

LA ECONOMÍA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN CHILE



NACIONES UNIDAS

CEPAL



Gobierno
de Chile

La economía del cambio climático en Chile



Alicia Bárcena
Secretaria Ejecutiva

Antonio Prado
Secretario Ejecutivo Adjunto

Joseluis Samaniego
Director
División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos

Ricardo Pérez
Director
División de Documentos y Publicaciones

Los montos que se indican en dólares corresponden a la denominación en dólares de los Estados Unidos. Las opiniones expresadas en este documento, son de exclusiva responsabilidad de los funcionarios y consultores que colaboraron en él y pueden no coincidir con las de la organización.

Los límites y los nombres que figuran en los mapas de este documento no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.

La elaboración de los cuadros, diagramas, gráficos, recuadros y mapas que aparecen en esta publicación estuvo a cargo de los autores, salvo que se indique otra cosa.

LA ECONOMÍA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN CHILE



NACIONES UNIDAS

CEPAL



Gobierno
de Chile

Coordinador en Chile:

Sebastián Vicuña, Centro de Cambio Global, Pontificia Universidad Católica de Chile

Equipo coordinador:

Francisco Meza, Luis Cifuentes, Juan Carlos Castilla, Juan Carlos Covarrubias

Colaboradores temáticos:

Proyecciones climáticas futuras y análisis de incertidumbre: Maisa Rojas
Impactos en los recursos hídricos: Ximena Vargas, James McPhee, Oscar Melo, Gustavo Lagos y Bonifacio Fernández
Impactos en el sector silvoagropecuario: Fernando Santibáñez, Oscar Melo, Rafael Larraín y Francisco Meza
Impactos en la biodiversidad: Pablo Marquet
Impactos en los recursos pesqueros: Juan Carlos Castilla
Impactos por el alza del nivel del mar: Patricio Winckler y Rodrigo Cienfuegos
Impactos en la salud: Luis Cifuentes
Integración de impactos económicos: Guillermo Donoso
Escenarios de mitigación: Luis Cifuentes y Enzo Sauma

Equipo CEPAL:

Joseluis Samaniego, Director, División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos
Carlos de Miguel, Oficial de Asuntos Ambientales, División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos
José Javier Gómez, Oficial de Asuntos Económicos, División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos
Luis Miguel Galindo, Jefe de Unidad, División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos
Karina Martínez, Investigadora, División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos
Oscar Cetrángolo, Experto en Políticas Públicas, Oficina de la CEPAL en Buenos Aires

Panel Asesor Internacional:

Daniel Bouille, Asesor en mitigación
Graciela Magrin, Asesora en adaptación
Gustavo Nagy, Asesor en adaptación
José Marengo, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
Lincoln Muniz, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Panel Asesor Nacional:

Ministerio del Medio Ambiente
Ministerio de Hacienda

Comité Consultivo:

Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO)
Comisión Nacional de Energía (CNE)
Corporación Nacional Forestal (CONAF)
Dirección de Obras Portuarias (DOP)
Dirección General de Aguas (DGA)
Fundación para la Innovación Agraria (FIA), Ministerio de Agricultura
Ministerio de Economía
Ministerio de Hacienda
Ministerio del Medio Ambiente
Ministerio de Obras Públicas
Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), Ministerio de Agricultura
Secretaría de Planificación de Transporte (SECTRA), Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones
Secretaría Ejecutiva de Medio Ambiente y Territorio (SEMAT), Ministerio de Obras Públicas
Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA)
Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS)

Este estudio se elaboró en el marco del Programa de la Cuenta del Desarrollo de las Naciones Unidas y fue posible gracias a la colaboración y financiamiento de las siguientes organizaciones:



Ministerio Federal de
Cooperación Económica
y Desarrollo



Índice

Prólogo	11
Resumen ejecutivo	13
Introducción	15
I. El cambio climático en Chile	17
A. Climatología actual y tendencias	17
B. Eventos extremos	21
C. Proyecciones climáticas futuras	22
D. Series climáticas futuras	31
II. Los escenarios socioeconómicos de Chile	33
III. La metodología del análisis económico del cambio climático	37
A. Impactos y adaptación	37
B. Mitigación	37
C. Efectos interrelacionados	38
D. Metodología del análisis económico del impacto del cambio climático en Chile	38
IV. Impactos económicos y sociales asociados al cambio climático en Chile	41
A. Recursos hídricos	41
1. Impactos en la disponibilidad de agua para riego	45
2. Impactos en la generación hidroeléctrica	47
3. Impactos en los sectores sanitario e industrial	52
4. Impactos en el sector minero	55
B. Sector silvoagropecuario	57
1. Impacto en la calidad de los suelos	59
2. Impacto en la productividad	60
3. Reasignación del uso del suelo silvoagropecuario: impactos económicos y en la mano de obra	64
4. Impacto en ocurrencia de plagas y enfermedades	71
C. La biodiversidad y los ecosistemas	71
D. Los recursos costeros y el aumento del nivel del mar	74
1. Los recursos pesqueros y acuícolas	74
2. El aumento del nivel del mar	74

E.	La salud.....	76
F.	La demanda de energía.....	77
G.	Las tendencias de los eventos extremos.....	77
H.	La infraestructura.....	79
I.	La agregación de los impactos.....	80
V.	Medidas de adaptación a los impactos del cambio climático en Chile.....	89
A.	Introducción al análisis de la adaptación a los impactos del cambio climático.....	89
B.	Los recursos hídricos.....	90
C.	El sector silvoagropecuario.....	91
D.	La biodiversidad y los ecosistemas.....	92
E.	La infraestructura.....	94
VI.	Emisión y mitigación de gases de efecto invernadero en Chile.....	95
A.	Emisiones históricas de gases de efecto invernadero.....	95
B.	Proyección de emisiones de gases de efecto invernadero en el período 2009-2030.....	97
1.	Sector energético.....	97
2.	Sector no energético.....	104
3.	Línea de base nacional.....	104
C.	Mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero en Chile.....	105
1.	Sector energético.....	105
2.	Discusión sobre costos de mitigación.....	115
3.	Cobeneficios ambientales de mitigación en el sector energético.....	118
4.	Mitigación de emisiones para sector no energético.....	121
VII.	Síntesis de la evaluación económica del cambio climático en el país.....	123
VIII.	Estrategias de cambio climático en el país.....	125
A.	Política nacional de cambio climático.....	125
B.	Iniciativas locales.....	126
IX.	Conclusiones y recomendaciones de política.....	127
	Bibliografía.....	131
	Apéndices.....	135
I.	Análisis de cambios en la variabilidad e incertidumbre asociadas a las proyecciones de cambios de temperatura y precipitación para Chile.....	136
Ia.	<i>Downscaling</i> climático del sector recursos hídricos.....	164
Ib.	<i>Downscaling</i> climático del sector agrícola.....	183
Ic.	<i>Downscaling</i> climático del sector biodiversidad.....	187
III.	Escenarios socioeconómicos de Chile.....	191
IVa.	Impactos en la disponibilidad de agua para riego.....	201
IVb.	Impactos en la productividad del sector silvoagropecuario.....	205
IVc.	Casos de estudio de impactos en la productividad del sector pecuario.....	224
IVd.	Impactos económicos y sociales en el sector silvoagropecuario.....	244
V.	Impactos en la generación hidroeléctrica.....	258
VI.	Impactos en la biodiversidad.....	288
VII.	Impactos en las zonas costeras.....	314
VIII.	Cobeneficios de las medidas de mitigación.....	321
Índice de cuadros, diagramas, gráficos, fotos, mapas y recuadros		
Cuadro I.1	Impactos de temporales, 1997-2003.....	22
Cuadro I.2	Resumen de proyecciones de precipitación según zona.....	30
Cuadro IV.1	Descripción de zonas hidrográficas.....	42

Cuadro IV.2	Estimación del uso de agua por región, 1993	44
Cuadro IV.3	Generación hidroeléctrica histórica y futura (escenario A2) en la hoya intermedia del sistema Laja.....	50
Cuadro IV.4	Proyecciones de variación del potencial de generación hidroeléctrica del SIC, escenarios A2 y B2	50
Cuadro IV.5	Impactos asociados al cambio climático (escenarios A2 y B2) en la generación hidroeléctrica	52
Cuadro IV.6	Impactos asociados al cambio climático (escenarios A2 y B2) en el sector sanitario de la Región Metropolitana	54
Cuadro IV.7	Cambios climáticos y de disponibilidad hidrológica en cuencas donde se desarrollan actividades mineras	56
Cuadro IV.8	Superficie agrícola regada por región	58
Cuadro IV.9	Superficie dedicada a cultivos según el escenario de cambio climático.....	65
Cuadro IV.10	Superficie dedicada a frutales según el escenario de cambio climático.....	66
Cuadro IV.11	Superficie dedicada a praderas naturales según el escenario de cambio climático.....	66
Cuadro IV.12	Superficie dedicada a plantaciones forestales según el escenario de cambio climático.....	67
Cuadro IV.13	Ingresos netos por región	68
Cuadro IV.14	Requerimiento de mano de obra	70
Cuadro IV.15	Resumen de los impactos sectoriales del cambio climático	81
Cuadro IV.16	Agregación de los costos económicos del cambio climático hasta 2030.....	83
Cuadro IV.17	Agregación de los costos económicos del cambio climático hasta 2050	84
Cuadro IV.18	Agregación de los costos económicos del cambio climático hasta 2070.....	85
Cuadro IV.19	Agregación de los costos económicos del cambio climático hasta 2100.....	86
Cuadro IV.20	Agregación de los costos económicos del cambio climático en 2030, 2050, 2070 y 2100	87
Cuadro V.1	Valores de habilitación de una red de áreas protegidas necesaria para conservar parte de la biodiversidad que se pierde, producto del cambio climático en la ecorregión valdiviana en los escenarios A2 y B2	93
Cuadro VI.1	Resumen de los indicadores y ajustes al modelo de proyección por sector	101
Cuadro VI.2	Evolución de las emisiones de GEI en el sector energético en el escenario base.....	103
Cuadro VI.3	Escenarios de mitigación considerados	108
Cuadro VI.4	Evolución de emisiones de GEI en el sector energético en los cinco escenarios de mitigación	112
Cuadro VI.5	Comparación de emisiones de gases de efecto invernadero en diferentes escenarios y métricas.....	115
Cuadro VI.6	Valor actual neto de los costos de mitigación en el sector energético asumiendo que los costos marginales corresponden al precio de transacciones de créditos de carbono.....	116
Cuadro VI.7	Medidas de mitigación de emisiones de GEI en el sector energético.....	117
Cuadro VI.8	Tipos de beneficios por la mejora de la calidad ambiental.....	119
Cuadro VI.9	Medidas de mitigación según escenarios.....	119
Cuadro VI.10	Escenarios de emisiones (GEI y HDP) por MWh generado con tecnología carbonífera en cada sistema eléctrico	120
Cuadro VI.11	Cobeneficios a nivel de escenario y zona geográfica, promedio 2010-2030, escenario de penetración máxima.....	121
Cuadro VI.12	Valor presente cobeneficios agregados según escenario-escenario de penetración máxima, 2010-2030	121
Cuadro VII.1	Síntesis de los costos económicos acumulados del cambio climático.....	124
Cuadro VII.2	Cobeneficios unitarios según escenario, promedio 2010-2030	124

Diagrama III.1	Esquema metodológico de análisis de la economía del cambio climático.....	39
Gráfico 1	Proyecciones climáticas a nivel global.....	16
Gráfico I.1	Series de tiempo de anomalías de temperatura en Chile central.....	19
Gráfico I.2	Tendencia lineal de precipitación anual en estaciones chilenas al sur de 30 °S, 1970-2000.....	20
Gráfico I.3	Serie de tiempo de precipitación mensual en la cuenca del río Limarí	31
Gráfico I.4	Serie de tiempo de precipitación anual en la cuenca del río Limarí	32
Gráfico I.5	Serie de tiempo de precipitación promedio mensual en la cuenca del río Limarí	32
Gráfico II.1	Aporte porcentual al PIB de los diferentes sectores de la economía, 2003-2007	34
Gráfico II.2	Proyección de crecimiento del PIB per cápita, 2000-2100.....	35
Gráfico IV.1	Disponibilidad y demanda de agua a nivel regional	43
Gráfico IV.2	Condiciones hidrológicas futuras en la subcuenca afluente a embalse Melado del sistema Maule Alto de acuerdo con el escenario A2, caudal histórico observado, 1976-2000	49
Gráfico IV.3	Comparación histórica entre generación hidroeléctrica y termoeléctrica en el SIC	51
Gráfico IV.4	Oferta de agua para la empresa Aguas Andinas en la Región Metropolitana, escenario A2	53
Gráfico IV.5	Comparación entre oferta y demanda de agua para el grupo aguas.....	53
Gráfico IV.6	Curvas de dosis respuestas para la temperatura promedio y el riesgo de mortalidad en Santiago	76
Gráfico IV.7	Porcentaje de modelos proyectando un número determinado de eventos asociados a sequía climatológica	78
Gráfico IV.8	Comparación en las condiciones de eventos de precipitación históricos y futuros.....	79
Gráfico VI.1	Emisiones de GEI totales por sector, 1984-2008	96
Gráfico VI.2	Emisiones netas (considerando sector forestal-CUS), 1994-2003	97
Gráfico VI.3	Cambios en la composición de la matriz de generación eléctrica de acuerdo con la situación base en 2009 y escenarios en 2030	99
Gráfico VI.4	Evolución de emisiones de GEI en el sector de la energía en el escenario base.....	102
Gráfico VI.5	Emisiones de GEI asociadas al sector transporte.....	104
Gráfico VI.6	Proyección de emisiones de gases de efecto invernadero por sector, 2009-2030.....	105
Gráfico VI.7	Proyección de demanda eléctrica SING de acuerdo con informes precio de nudo	106
Gráfico VI.8	Proyección de demanda eléctrica SIC de acuerdo con informes precio de nudo	107
Gráfico VI.9	Impacto de la ley 20.557 en las emisiones de GEI del subsector eléctrico, comparación de LB con y sin ley ERNC.....	108
Gráfico VI.10	Emisiones de GEI con y sin inclusión del aporte de acciones tempranas	108
Gráfico VI.11	Potencial de reducción en el sector energético en los distintos escenarios de mitigación	111
Gráfico VI.12	Potencial de reducción en el escenario de mitigación M1.....	113
Gráfico VI.13	Potencial de reducción en el escenario de mitigación M2	113
Gráfico VI.14	Potencial de reducción en el escenario de mitigación MT1	114
Gráfico VI.15	Potencial de reducción en el escenario de mitigación MT2	114
Gráfico VI.16	Potencial de reducción en el escenario de mitigación MAX	115
Mapa I.1	Distribución de climas según clasificación de Köppen	18
Mapa I.2	Proyecciones de temperatura en el escenario A2.....	23
Mapa I.3	Proyecciones de temperatura en el escenario B2.....	24

Mapa I.4	Proyecciones de precipitación en el escenario A2.....	25
Mapa I.5	Proyecciones de precipitación en el escenario B2.....	26
Mapa I.6	Comparación de proyecciones de precipitación HadCM3 en el escenario de GEI A2 y ensamble A2	28
Mapa I.7	Modelos que proyectan aumento de precipitación, 2010-2040.....	29
Mapa IV.1	Restricción de agua para riego para diferentes usuarios de la cuenca del río Limarí	47
Mapa IV.2	Esquema del Sistema Interconectado Central	48
Mapa IV.3	Ubicación de las minas seleccionadas.....	55
Mapa IV.4	Desertificación en Chile.....	59
Mapa IV.5	Cambios en la productividad en el período intermedio para trigo en secano, vides, praderas naturales y pino radiata para el escenario A2.....	61
Mapa IV.6	Cambios en los ingresos netos del sector silvoagropecuario en el escenario A2.....	68
Mapa IV.7	Cambios en la demanda de mano de obra en el sector silvoagropecuario en el escenario A2	70
Mapa IV.8	<i>Hotspots</i> de conservación a nivel mundial	72
Mapa IV.9	Detalle de <i>hotspots</i> de biodiversidad en Chile.....	72
Mapa IV.10	Distribución espacial de la red de áreas protegidas.....	73
Mapa IV.11	Representación esquemática de los impactos del cambio climático y su relación con las proyecciones climáticas futuras.....	82
Recuadro I.1	El Niño/Oscilación del Sur	21
Recuadro IV.1	Disponibilidad de agua para riego en la cuenca del río Limarí.....	46

Prólogo

El calentamiento global se ha transformado en uno de los principales desafíos que tiene que enfrentar el mundo actual, que se debate entre los deseos de desarrollo y la protección de los recursos naturales. La urgente atención que requiere este fenómeno se debe en gran medida a los fuertes impactos que el cambio climático ha tenido en distintos lugares del planeta.

El cambio climático obliga a reorientar el paradigma productivo y los patrones de consumo. Convoca a la solidaridad intergeneracional e, incluso, impone límites al cuestionar nuestra relación con el mundo. Dicho de otro modo, bajo la amenaza del cambio climático, el futuro de cada persona está indisolublemente ligado al futuro de todos. El aumento de la temperatura global, la conservación del medioambiente y el desarrollo energético necesario, tienen hoy una relación explícita.

Es por ello que el Gobierno de Chile, al ser parte de la sociedad internacional, debe contribuir, junto con todos los países del mundo, a la disminución del fenómeno del calentamiento global y a la protección de la naturaleza.

La presente publicación acerca de la economía del cambio climático en Chile es una muestra del compromiso que tanto el Gobierno de Chile como la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) tienen con este tema.

La CEPAL, a cargo de la coordinación técnica de esta iniciativa en la región, ha diseñado este estudio dentro de los mismos lineamientos técnicos y organizativos que el resto de los países que integran el proceso. El Gobierno de Chile, por medio de su panel asesor y del comité consultivo creado para tal efecto, apoyó con su conocimiento y experiencia al equipo coordinador del estudio.

El objetivo de esta investigación fue analizar el efecto económico que puede tener el cambio climático en Chile en los próximos 100 años. En este marco, se evalúan los impactos potenciales del cambio climático, se estudian las opciones de adaptación, se analizan las proyecciones de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y las opciones de mitigación para el país.

El diagnóstico que entrega este documento respecto de las vulnerabilidades y oportunidades de adaptación y mitigación al cambio climático, impone una serie de desafíos para Chile. Por una parte, se debe atender la prioridad de los temas relacionados con el riesgo y la vulnerabilidad, puesto que ya se están experimentando los impactos del fenómeno. Por otra parte, es necesario asumir el reto de limitar el aumento de las emisiones de GEI disminuyendo las causas de este fenómeno, ya que no hay contradicción entre la búsqueda del crecimiento y el desarrollo sostenible.

Para enfrentar estos retos, se requiere del aporte de toda la sociedad y de los organismos públicos mediante la creatividad, la innovación y el emprendimiento con el fin de utilizar las nuevas fuentes de energía, sobre todo aquellas que por su naturaleza son mucho menos contaminantes, como las energías no convencionales, limpias y renovables, en las que Chile tiene un potencial gigantesco.

Los resultados de este documento serán una herramienta de información adicional para el Gobierno de Chile, que le permitirá diseñar los lineamientos de políticas públicas y de institucionalidad apropiados para abordar los desafíos que impone adaptarse a los efectos del cambio climático, y transitar en la senda de un crecimiento económico bajo en emisiones de carbono. Prueba de ello ha sido el uso de este estudio como material de apoyo para el desarrollo de la Segunda Comunicación de Cambio Climático de Chile presentada ante la Conferencia Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC).

El Gobierno de Chile y la CEPAL reiteran su compromiso de seguir profundizando en esta investigación y desarrollar el conocimiento necesario para que todos los actores puedan tomar decisiones informadas y, de esta manera, contribuir a la prevención del cambio climático y reducir sus consecuencias adversas sobre los ciudadanos de Chile.

Alicia Bárcena
Secretaria Ejecutiva
Comisión Económica para América Latina
y el Caribe (CEPAL)

María Ignacia Benítez Pereira
Ministra del Medio Ambiente de Chile

Resumen ejecutivo

La evaluación de los impactos del cambio climático supone establecer escenarios climáticos futuros, que fueron tomados de un modelo de clima global que consideró dos escenarios de emisión de GEI hasta el año 2100, definidos como A2 y B2 por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). El escenario A2 se refiere a una economía internacional dinámica con un uso intensivo de combustibles fósiles, que produce un aumento de concentraciones de GEI en la atmósfera con valores muy superiores a los actuales, lo que incide en alzas en los niveles de temperatura, cambios en los patrones de precipitación, aumento en el nivel medio del mar y mayor frecuencia e intensidad de los fenómenos climáticos extremos. En el escenario B2 habría una menor concentración de GEI y, por ende, un menor nivel de impacto asociado al calentamiento global.

Los resultados que se presentan en este trabajo tienen que tomarse en su justa medida, es decir, como el producto de un análisis sobre la base de escenarios y, por lo tanto, no deben considerarse un pronóstico de la situación del país en los próximos 100 años.

Los escenarios climáticos usados en la evaluación nos indican de manera bastante consistente que el promedio de la temperatura en el país aumentaría aproximadamente 1 °C en los próximos 30 años, entre 1 °C y 2 °C en un período intermedio (2040-2070), llegando a un aumento de entre 3 °C y 4 °C a finales del siglo. Con respecto a la precipitación, los escenarios muestran, también de manera muy clara, una reducción de las precipitaciones anuales (en torno al 30% a finales de siglo) en Chile central (entre las regiones de Valparaíso y Los Lagos). En el extremo norte del país (regiones de Arica a Atacama) la situación es más ambigua, sin que la tendencia esperada sea muy evidente. Por otra parte, en el extremo austral (región de Magallanes) los modelos indicarían un aumento progresivo de los niveles de precipitación. Por último, en la región de Aysén, ubicada en una zona de transición, no se espera que haya grandes cambios con respecto a la situación actual.

Se ha llevado a cabo una evaluación económica de los efectos potenciales del cambio climático sobre los sectores silvoagropecuario, hidroeléctrico y de agua potable. De acuerdo con los resultados, se proyectan disminuciones importantes en la disponibilidad de recursos hídricos en los últimos dos sectores, lo que tiene costos económicos asociados. En el caso del sector hidroeléctrico, estos costos se vinculan a la necesidad de generar electricidad de manera más costosa. En el caso del sector de agua potable, mediante una evaluación de los impactos en la cuenca del Río Maipo donde se encuentra ubicada la ciudad de Santiago, los impactos económicos se han evaluado considerando el costo de

aumentar la dotación de agua para abastecer la demanda de la población. No se han incluido en esta oportunidad otros costos potenciales asociados a cambios estructurales.

Con respecto al sector silvoagropecuario la situación es más heterogénea. Para algunos tipos de cultivos y regiones, donde el factor limitante para el desarrollo es la baja temperatura, se proyectan importantes aumentos de la productividad (sur de Chile). Mientras que respecto de otros cultivos y regiones del país, donde el factor limitante está más asociado a la disponibilidad de agua (ya sea de lluvia o riego), se proyectan importantes disminuciones de la productividad (por ejemplo, frutales en el centro y norte del país). Estos cambios en la productividad deberían crear los incentivos para reordenar el patrón de uso de la tierra agrícola y, por ende, disminuir –por medio de la adaptación– los impactos esperados.

Los impactos económicos en todos estos sectores han sido agregados para obtener cifras netas para Chile. Cabe destacar que en este proceso de agregación no es posible identificar quiénes son los ganadores y quiénes son los perdedores en estas proyecciones. En términos absolutos, la agregación del valor presente de impactos indica que, para el escenario A2 de mayores emisiones, habría un costo que fluctúa entre 22.000 millones y 320.000 millones de dólares. Con respecto al escenario de menores emisiones, la situación es más ambigua, ya que los resultados indican un rango que fluctúa entre un beneficio neto de 25.000 millones de dólares a un costo de 40.000 millones de dólares. Las diferencias están dadas por el escenario de GEI usado (los impactos más negativos se dan con el escenario de mayor emisión de GEI), por la tasa de descuento utilizada en la valoración a valor presente y por el horizonte de la evaluación. Estos costos indican que Chile podría llegar a perder un 1,1% anual del PIB durante todo el período de análisis, es decir, hasta 2100, en el escenario A2. En el caso del escenario B2, se presentaría desde una pérdida anual del 0,5% en la proyección hasta 2050, hasta una ganancia anual del 0,09% en la proyección hasta 2100.

Las proyecciones para Chile indican un aumento sostenido en la emisión de GEI, que señalaría que en 2030 se contaría con un nivel de emisiones 2,5 veces superior al actual. Es posible, sin embargo, considerar la existencia de una serie de medidas tendientes a reducir las emisiones de GEI. Algunas de ellas se asocian a una reducción de la demanda de energía, así como a la eficiencia energética. También existen otras medidas cuyo objetivo es reducir el contenido de carbón en las fuentes de abastecimiento, como potenciar las fuentes de generación eléctrica de tipo renovable. Una evaluación de estos potenciales escenarios de mitigación indica que es factible reducir el incremento de las emisiones en torno a un 30% en los próximos 20 años con respecto a la línea de base, aunque no ha sido posible establecer en esta oportunidad los costos asociados a estas medidas.

La evaluación de los impactos del cambio climático es muy útil para entender las vulnerabilidades relativas, al proveer información vital para diseñar programas de adaptación de acuerdo con las necesidades de cada región y sector productivo. Nos ayuda a observar, además, que el desarrollo que ha tenido el país y sus proyecciones de desarrollo a futuro tiene costos significativos en materia de emisiones de GEI. Estas proyecciones indican un acoplamiento entre las emisiones y el nivel de desarrollo de la economía. Para lograr un desacople, y así contribuir a la disminución de las causas del cambio climático, es posible adoptar una serie de medidas que contribuyan a disminuir la demanda de energía y el contenido de carbón en los combustibles. Estas medidas tienen un costo asociado y, por lo tanto, suponen un esfuerzo político y fiscal importante que el país tiene que hacer para llevarlas a cabo.

Introducción

De acuerdo con las últimas conclusiones a que han llegado los científicos a nivel mundial, el calentamiento global es evidente y distinguible de la variabilidad natural que tiene el clima, y también es evidente el aporte del ser humano a este proceso. Todo esto ha quedado claramente postulado en el último informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), presentado en 2007 a la comunidad internacional. Las dos principales fuentes por medio de las que el ser humano contribuye al cambio climático son la quema de combustibles fósiles y los procesos de deforestación. Con la primera se aumenta la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, en particular de dióxido de carbono, el principal gas de efecto invernadero de origen humano; y con la segunda se emite el carbono capturado en la biomasa forestal.

En el informe del IPCC (2007) se presentan los resultados de las proyecciones climáticas para el futuro, que se realizan utilizando modelos computacionales que simulan el clima a nivel global y usando como base diferentes escenarios de emisión de GEI. Estos escenarios se construyen de acuerdo con diferentes visiones del nivel de desarrollo de la población y la economía y se clasifican en distintas familias según el nivel de intensidad de emisión de GEI a la que están asociados. En este sentido, se distinguen los escenarios tipo A, con un mayor nivel de emisiones que los escenarios tipo B. El gráfico 1, tomado del informe del IPCC, presenta, por una parte, los distintos escenarios de emisión de GEI y, por otra, las proyecciones de cambio en las temperaturas y precipitaciones del planeta. Se desprende de este gráfico que:

- i) en todos los escenarios y regiones se proyectan aumentos de temperatura. Sin embargo, estos son más evidentes en períodos más tardíos y en escenarios con mayor concentración de GEI en la atmósfera;
- ii) pese a lo anterior, se presentan diferencias regionales con respecto a la proyección de impactos, especialmente entre distintas latitudes y entre zonas continentales y oceánicas; y
- iii) con respecto a la precipitación, las proyecciones son más ambiguas, ya que existen zonas donde se proyectaría un aumento y otras donde se proyectaría una disminución de esta variable.

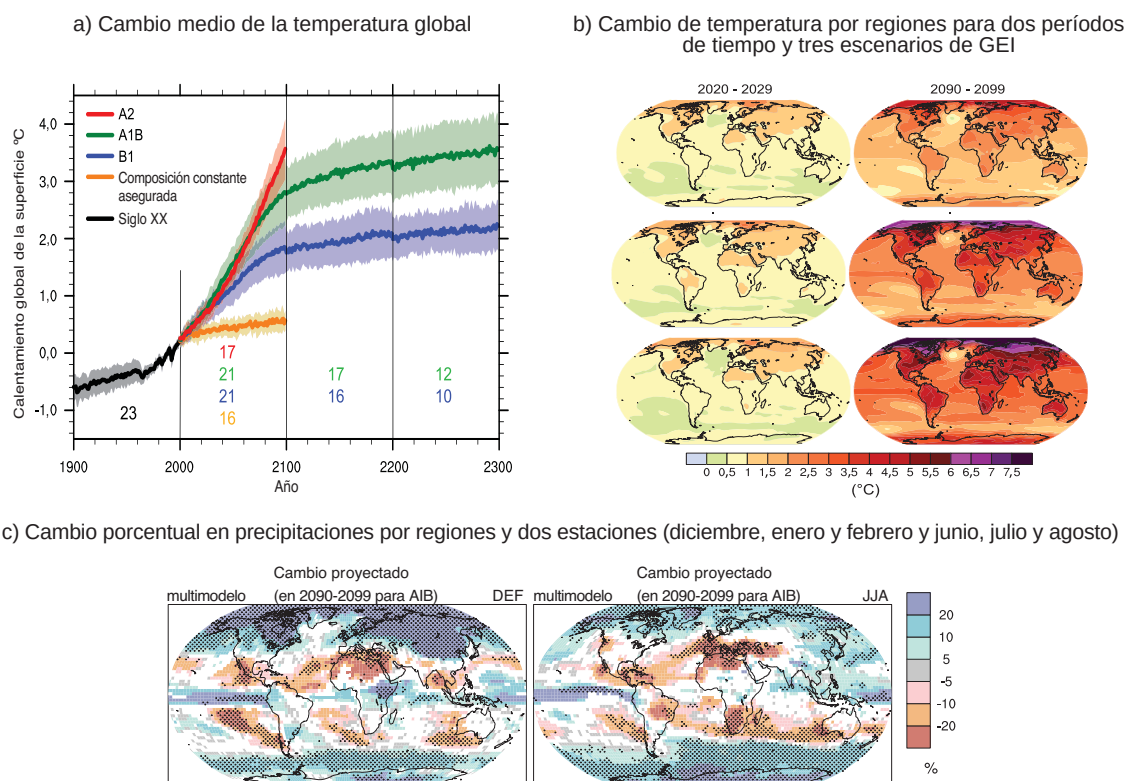
Informes como el IPCC (2007) o el informe Stern (2007) han sido una muy buena contribución para entender los impactos del cambio climático a nivel global. Incluso a nivel regional han brindado información relevante, sin embargo, la información disponible es escasa a nivel local o en cada país. El presente estudio se inserta en este marco, contribuyendo a la información que ya existe sobre impactos físicos y económicos del cambio climático en Chile, y se basa en el esfuerzo de un número importante

de investigadores y en la experiencia acumulada en el país, que se traduce en trabajos previos como el “Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI”, realizado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile para la CONAMA (DGF y CONAMA, 2007) y la “Primera comunicación nacional de Chile” para la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC).

En este trabajo se ha llevado a cabo una evaluación de los impactos físicos y económicos en una serie de sectores productivos del país. Estos impactos se han evaluado sobre la base de las proyecciones climáticas –temperatura y precipitación– tomadas de los resultados del modelo de clima global de la Oficina Meteorológica de Inglaterra –el modelo HadCM3–, considerando dos escenarios de emisión de GEI, el severo A2 y el más leve B2. La evaluación económica de estos impactos considera en algunos casos la introducción de una reacción que es intrínseca de los actores económicos que actúan de acuerdo con los cambios climáticos que perciben. Se reconoce, sin embargo, que en algunos casos, para lograr mitigar los impactos que se proyectan, es necesario contar con medidas de adaptación planificadas desde la perspectiva de las políticas públicas.

La evaluación económica de impactos se realiza tomando en cuenta la proyección de las futuras condiciones socioeconómicas en el país. Desde el punto de vista de las causas del cambio climático se reconoce a la vez que, asociados a estos escenarios de desarrollo económico, existen escenarios de emisión de GEI para el país. Estos escenarios son analizados en un capítulo especial del informe, en el que se describen las estimaciones sobre la contribución de Chile a las emisiones de GEI, incluyendo escenarios alternativos de mitigación.

GRÁFICO 1 PROYECCIONES CLIMÁTICAS A NIVEL GLOBAL



Fuente: Sobre la base de Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report (AR4) of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, 2007.

I. El cambio climático en Chile

A. Climatología actual y tendencias

Tal como se muestra en el mapa I.1 Chile se caracteriza por la existencia y manifestación de una extensa variedad de climas que se ven alterados por numerosos factores ambientales, imprimiéndole características muy peculiares a la climatología del país. No obstante, en términos generales se puede afirmar que el territorio nacional presenta rasgos de clima templado, con algunas variaciones esenciales. Las variedades climáticas más importantes se producen sobre todo por efecto de la latitud y la altura, dando origen a los sistemas climáticos desértico, tropical, subtropical, templado y polar, principalmente.

La influencia oceánica es un poderoso agente modulador de la amplitud térmica en la zona costera del país. Debido a ella, las temperaturas presentan una leve oscilación en relación con la variación en la latitud, presentando valores medios anuales que fluctúan entre 6 °C en el extremo austral, 15 °C en la costa central y 17 °C en el extremo norte. En cambio, en las zonas de menor influencia costera, la variabilidad y oscilación térmica tienden a ser mayores, observándose un ciclo anual de temperaturas que sigue el patrón estacional de la declinación solar y produciéndose meses invernales fríos y veranos cálidos. En estudios recientes se muestran algunas tendencias históricas de cambios en la temperatura del país que manifiestan una tendencia a la baja en el océano y en la costa, mientras que en el valle central, y especialmente en la cordillera, esta tendencia ha sido al alza (véase el gráfico I.1).

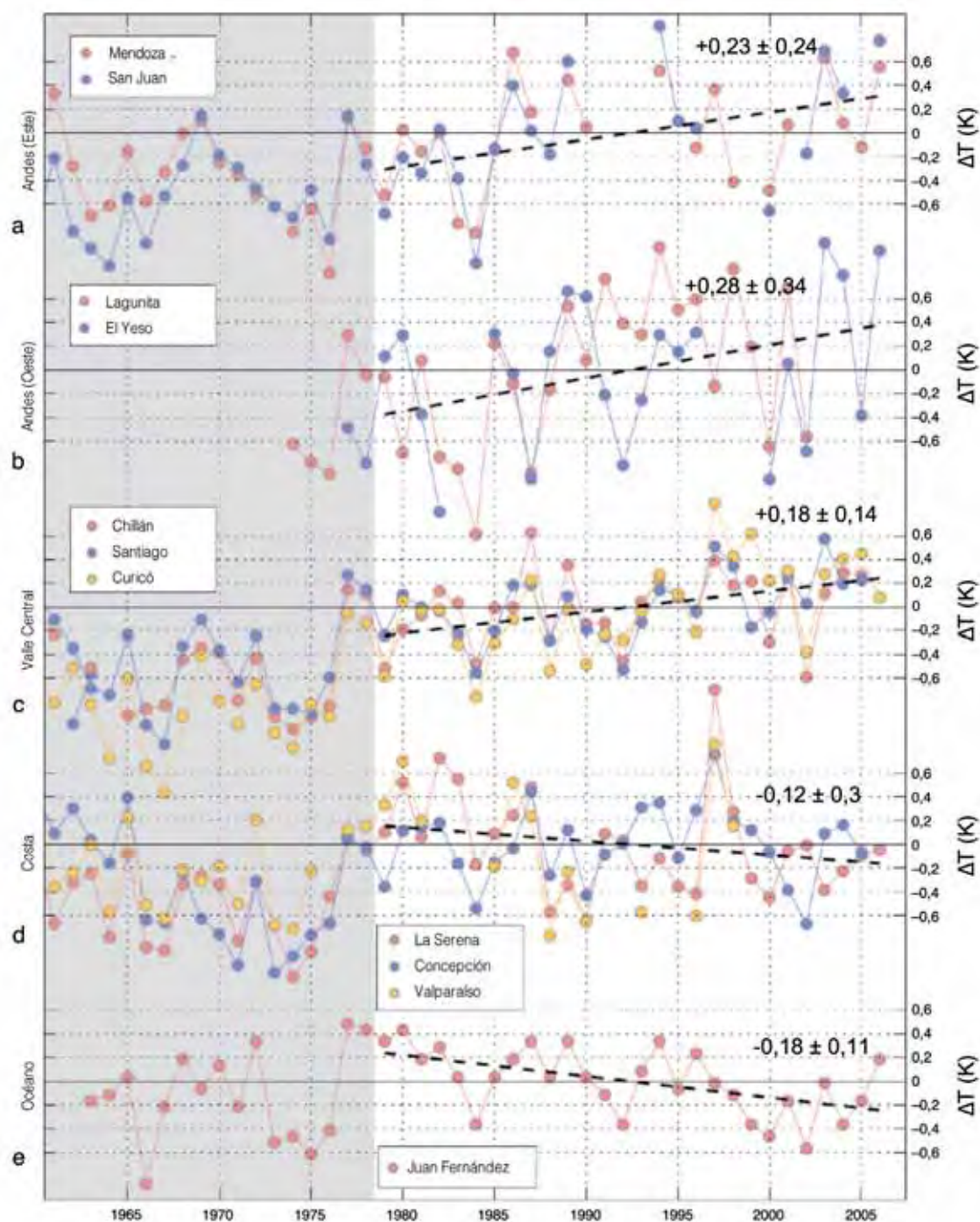
Con respecto a las precipitaciones, el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (DGF) y la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) (2007) observaron en Chile una disminución significativa de la precipitación en la región subtropical. La evolución del régimen pluviométrico en la región centro-sur y austral del país ha sido muy diferente, con una tendencia positiva dominante en esta región hasta mediados de los años setenta, para dar paso en las décadas más recientes a una tendencia decreciente que se ha mantenido hasta ahora. El gráfico I.2 presenta la magnitud de las tendencias en estaciones chilenas al sur de la latitud 30 °S durante el período 1970-2000, expresadas como cambio en valores normalizados por cada diez años (Quintana y Aceituno, 2006). A lo largo del país se distinguen tres tipos de distribución en el año. En la zona central y

MAPA I.1
DISTRIBUCIÓN DE CLIMAS SEGÚN CLASIFICACIÓN DE KÖPPEN



Fuente: Mapas de Chile (2011) [en línea] <http://www.mapasdechile.cl> [fecha de consulta: 9 de diciembre de 2011].

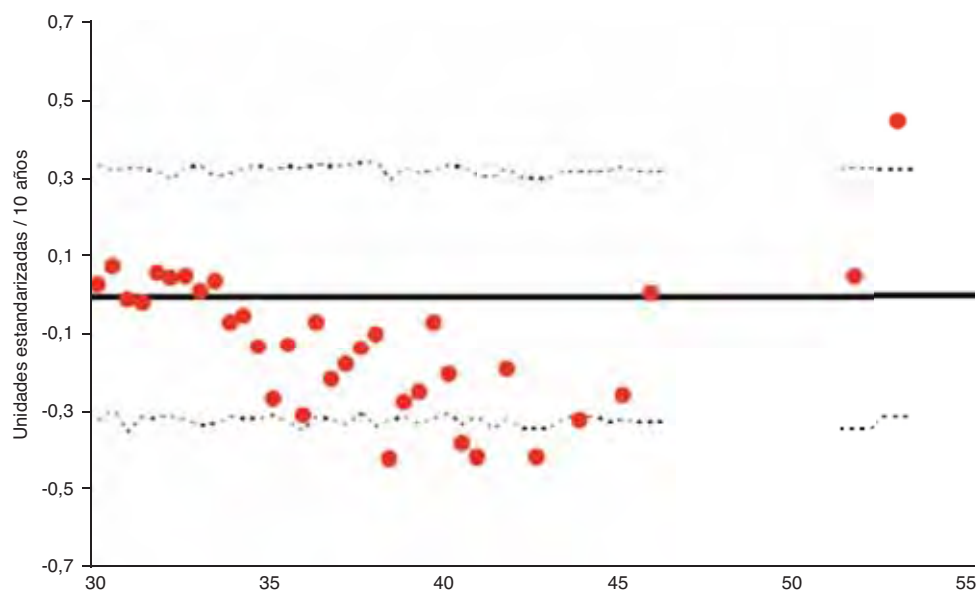
GRÁFICO I.1
SERIES DE TIEMPO DE ANOMALÍAS DE TEMPERATURA EN CHILE CENTRAL
 (27,5_– 37,5_S)



Fuente: M. Falvey y R. D. Garreaud, “Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006)”, *Journal of Geophysical Research*, vol. 114, N° D04102, 2009.

Nota: Las anomalías se calculan con respecto al período 1979–2006. Las líneas punteadas muestran la correlación lineal para los datos de cada grupo en el período 1979–2006. Se entrega también el valor de la tendencia para el período considerado.

GRÁFICO I.2
TENDENCIA LINEAL DE PRECIPITACIÓN ANUAL EN ESTACIONES
CHILENAS AL SUR DE 30 °S, 1970-2000



Fuente: J. Quintana y P. Aceituno, “Trends and interdecadal variability of rainfall in Chile”, *Proceedings of 8 ICSHMO*, Foz do Iguaçu, Brasil, 24-28 de abril, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2006.

Nota: Las tendencias están expresadas como cambio en valores normalizados por cada 10 años. La línea de puntos indica los límites de los valores positivos o negativos de tendencia que son estadísticamente significativos a un nivel de un 95%.

centro-sur existe un ciclo anual bien definido, característico de un régimen mediterráneo, que se manifiesta con un máximo invernal y un período estival con un monto significativamente menor que va aumentando hacia el sur. La zona austral, al oeste de la cordillera de los Andes, se caracteriza por una precipitación abundante en todos los meses del año, llegándose a acumular varios metros en el período, sin embargo, en la ladera oriental los montos disminuyen cerca de un orden de magnitud. Un tercer tipo de ciclo corresponde al que se presenta en la zona altiplánica, con precipitaciones modestas concentradas en verano, que en pocas ocasiones –cada 30 o más años– pueden hacerse más intensas.

En relación con cambios recientes en la precipitación, Quintana y Aceituno (2006) han observado una tendencia de disminución de las precipitaciones en la zona centro-sur a partir de la década de 1970, lo que, sin embargo, es difícil de validar debido a la fuerte variabilidad en la escala de tiempo decadal, que se vincula a cambios en esa misma escala en la Oscilación Austral –y de la frecuencia de eventos del Niño y La Niña–, así como en la Oscilación Decadal del Pacífico (véase el recuadro I.1).

RECUADRO I.1 EL NIÑO/OSCILACIÓN DEL SUR

Al igual que otras regiones del planeta, Chile presenta una señal importante en su régimen climático que está asociada a los fenómenos del Niño y la Oscilación del Sur.

El fenómeno del Niño corresponde a una anomalía térmica extensiva en la región central y oriental del Pacífico ecuatorial. Tres fases pueden ser definidas: una fase cálida o fase Niño, una fría o Niña y una Normal o de ausencia de anomalías. La Oscilación del Sur, por su parte, se refiere a una anomalía en las diferencias de presiones entre las estaciones de Tahiti y Darwin. Aun cuando se trata de procesos oceánicos y atmosféricos, la correlación entre ambos fenómenos es tan estrecha que se ha propuesto un solo nombre para designarlos: El Niño y la Oscilación del Sur (ENOS).

En Chile central los cambios en el régimen de precipitaciones han sido estudiados y asociados con el índice de la Oscilación del Sur, concluyéndose que hay una tendencia a observar condiciones anormalmente secas durante la fase positiva de la Oscilación del Sur –fase la Niña– (Rubin, 1955; Pittock, 1980). Por otra parte, las precipitaciones presentan una tendencia a ser más abundantes durante los años del Niño –fase negativa de la Oscilación del Sur (Quinn y Neal, 1983; Kane, 1999).

De esta forma es posible pensar que cambios en la frecuencia relativa del fenómeno ENOS, derivados del cambio climático, podrían tener una incidencia sobre los montos medios de precipitaciones y la frecuencia relativa de eventos extremos del futuro. Sin embargo, lo anterior todavía no logra ser dilucidado por completo. En la actualidad es posible encontrar publicaciones que avalan la tesis de un aumento de la frecuencia de ENOS, sobre todo en lo que respecta al Niño, como también a su disminución. Por ejemplo, Timmerman y otros (1998), señalan que el aumento de gases de efecto invernadero y el calentamiento de la superficie terrestre llevaría al sistema del océano Pacífico a presentar una mayor incidencia de eventos tipo Niño. Esta tesis es avalada parcialmente por estudios observacionales estadísticos de Trenberth y Hoar (1997) en el análisis del período 1892 a 1995. De un modo crítico podemos señalar que la reciente secuencia de eventos (2000 en adelante), en que no ha dominado el fenómeno del Niño, sino su fase opuesta, podrían llevar a cambiar estos resultados al menos en términos de la magnitud de la tendencia. Por otra parte, estudios paleoclimáticos como el de Moy y otros (2002) nos dicen que la tendencia es a la reducción de la actividad de ENOS si es que miramos escalas de tiempo milenarias. En el tercer reporte del IPCC (2001) se señala que los cambios de frecuencia de eventos ENOS podrían ocurrir, pero que su magnitud y consecuencia en el estado del clima dependen fuertemente del modelo de circulación global seleccionado, por lo que aún se debe considerar esto como una materia en la que persiste un importante grado de incertidumbre.

Fuente: Elaboración propia a partir de diversas fuentes.

B. Eventos extremos

Chile, a lo largo de su historia, ha sido afectado recurrentemente por distintos fenómenos naturales extremos. Debido a su localización geográfica, los más comunes han sido sismos, *tsunamis*, erupciones volcánicas, sequías e intensas lluvias que han desencadenado inundaciones y procesos aluvionales, entre otras consecuencias. A pesar de la relevancia de estos fenómenos y sus daños sobre la población, no existen registros históricos adecuados, por lo que es difícil obtener información integral de sus efectos (BID y CEPAL, 2007). Los eventos meteorológicos extremos, como sequías y temporales, si bien no causan impactos significativos en comparación con terremotos o erupciones volcánicas, son relevantes por su recurrencia. En el cuadro I.1 se muestra el impacto de temporales en Chile (1997-2003), como ejemplo de las consecuencias asociadas a este tipo de fenómenos.

CUADRO I.1
IMPACTOS DE TEMPORALES, 1997-2003

Año	Población afectada		Viviendas		
	Albergados	Damnificados	Daño menor	Daño mayor	Destruídas
1997	18 323	77 981	-	-	-
1998	6	68	-	-	-
1999	806	252	-	-	-
2000	6 711	101 491	39 563	5 582	1 114
2001	2 444	22 051	9 904	752	312
2002	15 212	163	48 735	8 305	4 134
2003	1 388	6 574	6 849	1 329	50

Fuente: BID y CEPAL (Banco Interamericano de Desarrollo y Comisión Económica para América Latina y el Caribe), *Información para la gestión de riesgo de desastres. Estudio de caso de cinco países: Chile* (LC/MEX/L.834), México, D.F., sede subregional de la CEPAL en México, 2007.

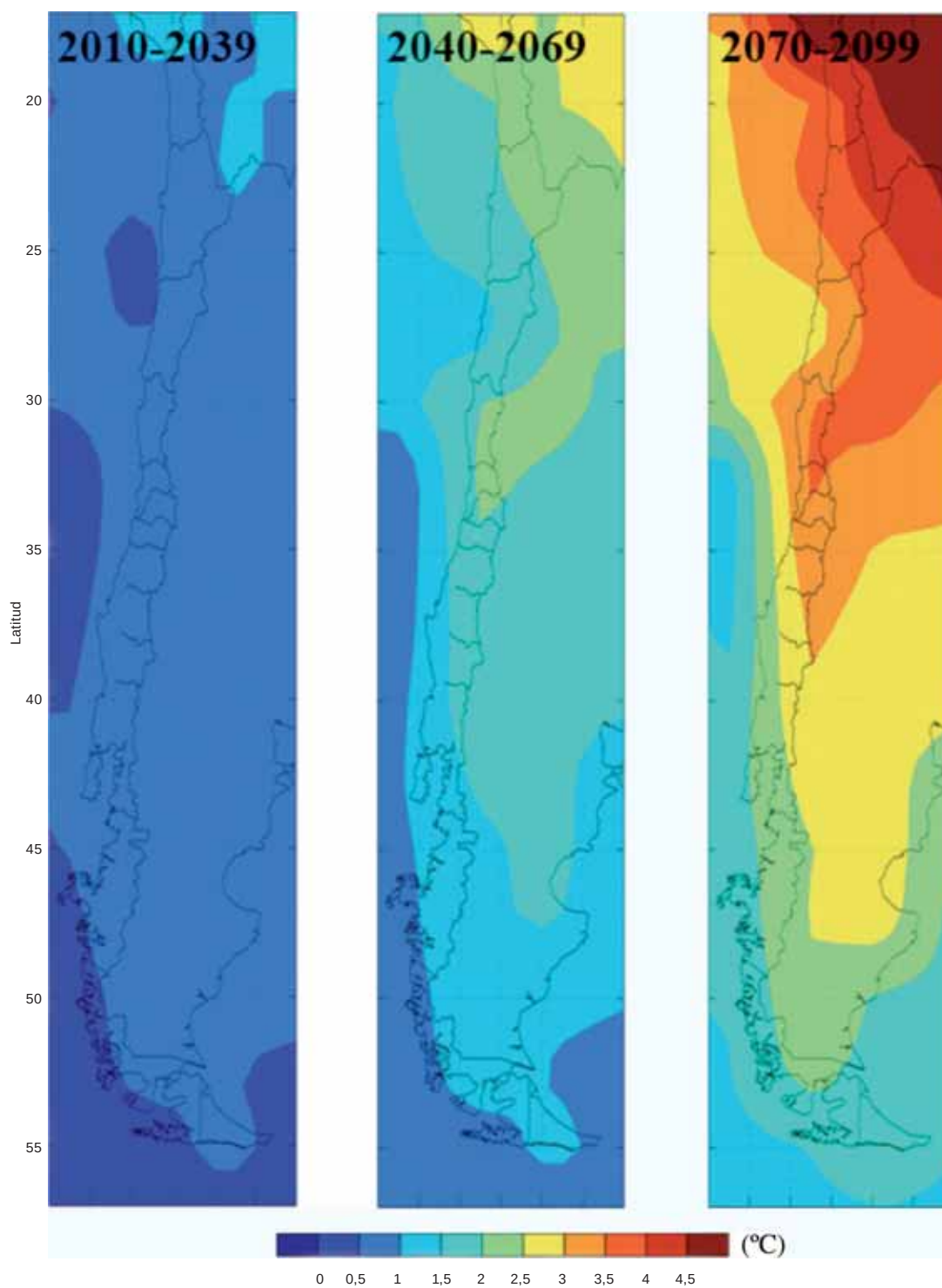
C. Proyecciones climáticas futuras

El análisis de impactos del cambio climático en el país se basa en las proyecciones del modelo de clima global HadCM3 de la Oficina Meteorológica de Inglaterra. Este modelo, a su vez, ha sido aplicado a los escenarios de emisión de gases de efecto invernadero A2 y B2. El escenario A2 implica un nivel alto de emisión de GEI, mientras que el escenario B2 considera un futuro más moderado en este sentido. Las proyecciones climáticas futuras se analizan considerando tres períodos distintos: uno temprano, que va de 2010 a 2040, uno intermedio, de 2040 a 2070 y uno tardío, de 2070 a 2100. En este trabajo se hace referencia de manera recurrente a estos períodos de análisis. En el mapa I.2 y I.3 se presentan de manera gráfica las proyecciones de temperatura para estos escenarios, y en los mapas I.4 y I.5 se ilustra su proyección de precipitación.

Al comparar las proyecciones de temperatura, se ve que para el período temprano, ambos escenarios muestran aumentos en todo el país, pero de manera más clara en la zona del altiplano y son mayores en el escenario B2. En el período intermedio, en cambio, el escenario A2 presenta aumentos mayores en la zona altiplánica y la zona centro-sur. En el período tardío, ambos escenarios pronostican aumentos de temperatura en todo el país, incluida la zona del extremo austral, pero en el escenario A2 son mayores, de 3 °C a 4 °C, en comparación al incremento de 2 °C a 3 °C en el escenario B2. En general, se observa que los aumentos de temperatura son más evidentes a medida que se aleja la influencia del océano (en altura o alejado de la costa).

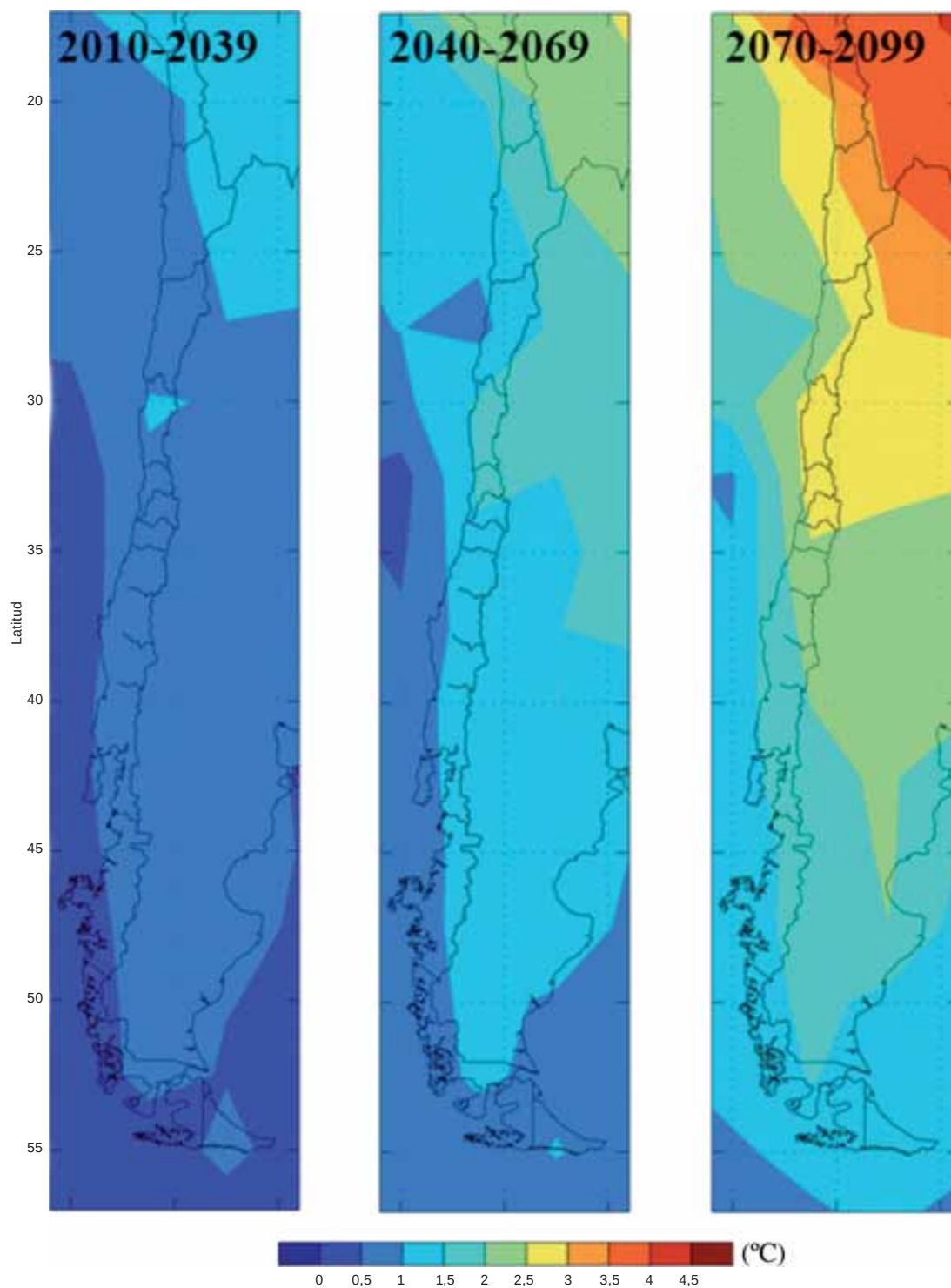
Con respecto a las proyecciones de precipitación, puede verse que en el período temprano se proyecta en el escenario B2 un mayor descenso de precipitación (entre un 10% y un 20%) en la zona del norte chico (regiones de Atacama y Coquimbo), en comparación con el escenario A2. En el período intermedio, ambos escenarios proyectan aumentos de precipitación en la región de Magallanes y disminución de precipitación entre las regiones de Antofagasta y Los Lagos; sin embargo, los cambios son más acentuados en el escenario A2. En el período tardío, en ambos escenarios se proyectan de manera similar aumentos de precipitación en el extremo austral y el altiplano, y un mismo rango de zonas con descenso de precipitación (entre Antofagasta y Los Lagos), pero el escenario A2 nuevamente muestra los descensos más pronunciados para esta última zona, de un 30% a un 40%.

MAPA I.2
PROYECCIONES DE TEMPERATURA EN EL ESCENARIO A2
(Cambios en grados Celsius sobre base histórica)



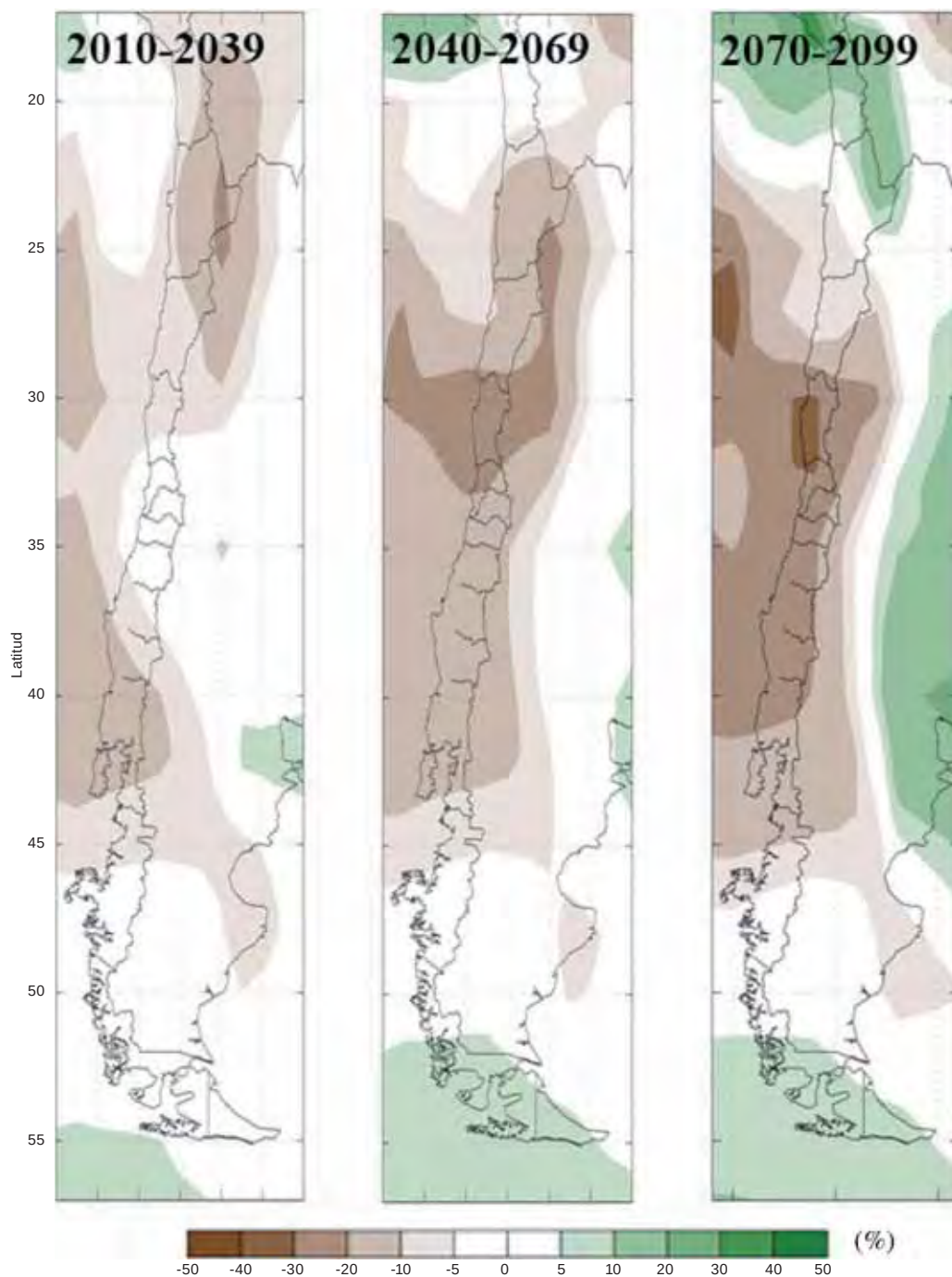
Fuente: Elaboración propia.

MAPA I.3
PROYECCIONES DE TEMPERATURA EN EL ESCENARIO B2
(Cambios en grados Celsius sobre base histórica)



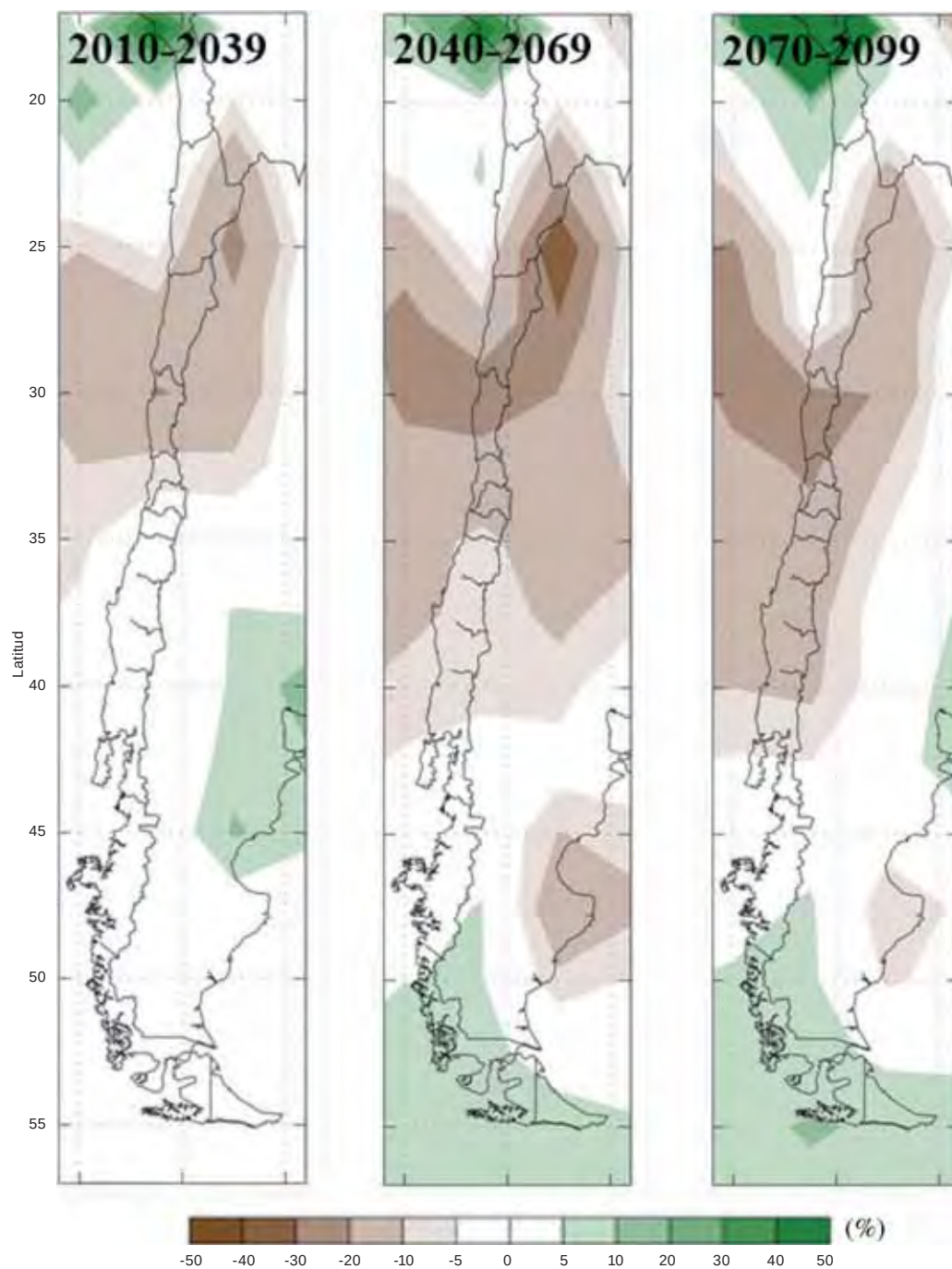
Fuente: Elaboración propia.

MAPA I.4
PROYECCIONES DE PRECIPITACIÓN EN EL ESCENARIO A2
(Cambios porcentuales sobre base histórica)



Fuente: Elaboración propia.

MAPA I.5
PROYECCIONES DE PRECIPITACIÓN EN EL ESCENARIO B2
(Cambios porcentuales sobre base histórica)



Fuente: Elaboración propia.

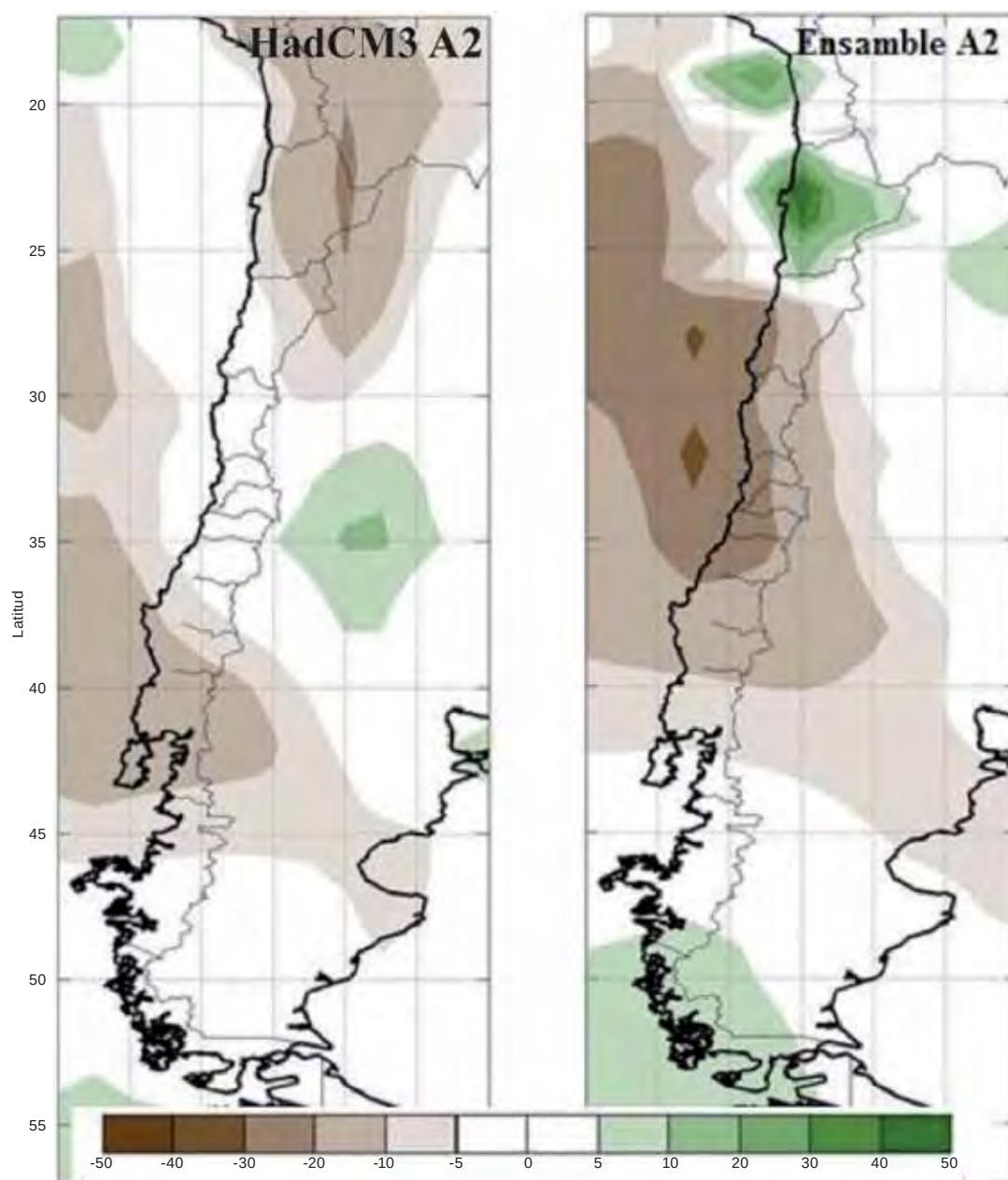
En este trabajo, además de la presentación de estos resultados, se ha llevado a cabo un análisis de incertidumbre de las proyecciones que ofrece el modelo utilizado en el estudio. La intención de este análisis es poder distinguir cuáles de las proyecciones que se ofrecen corresponden a señales robustas, que comparten un gran número de modelos en comparación con aquellas proyecciones que tienen un mayor grado de incertidumbre. Para hacer este análisis de incertidumbre, se analizaron las variables de precipitación y temperatura usando como base de datos el conjunto de modelos AO-GCMs CMIP3 que consiste en 14 modelos con simulaciones en el período 1960-2100 (20°C) y los escenarios SRES A1B, SRES A2, SRES B1. Luego, las variables de los modelos y escenarios disponibles se sometieron a un análisis de incertidumbre que consistió en un estudio de concordancia, una comparación de los resultados del modelo HadCM3 y un análisis de umbral (*threshold*) para cierto nivel de cambio.

A modo de ejemplo el mapa I.6 muestra una comparación entre las proyecciones de precipitación del modelo HadCM3 bajo el escenario de GEI A2 y el ensamble de modelos asociado a este escenario en el período 2010-2040. A su vez, el mapa I.7 muestra el porcentaje de modelos que indicarían un aumento de precipitaciones de acuerdo con las proyecciones para el mismo período. En el apéndice I se profundiza el estudio de incertidumbre para los diferentes períodos de análisis.

Puede concluirse que en el caso de Chile existe una alta probabilidad de ocurrencia de una disminución de precipitaciones entre los paralelos 30 °S y 42 °S (de la región de Coquimbo a la de Los Lagos, aproximadamente), para la cual se puede esperar que la señal de cambio climático sea mayor a la variabilidad, incluso en un futuro cercano. En la región de Magallanes (50 °S a 55 °S) existe también una gran concordancia entre los modelos en cuanto a la proyección de un pequeño cambio positivo de precipitación (entre un 5% y un 10% de la precipitación actual). Sin embargo, el cálculo indica que esta proyección nunca sobrepasa el nivel de variabilidad natural. En el resto de las regiones –en especial en el altiplano y norte grande al norte del paralelo 27 °S– existe una gran dispersión entre las proyecciones de los modelos, sin encontrarse resultados robustos con respecto a los cambios esperables a futuro.

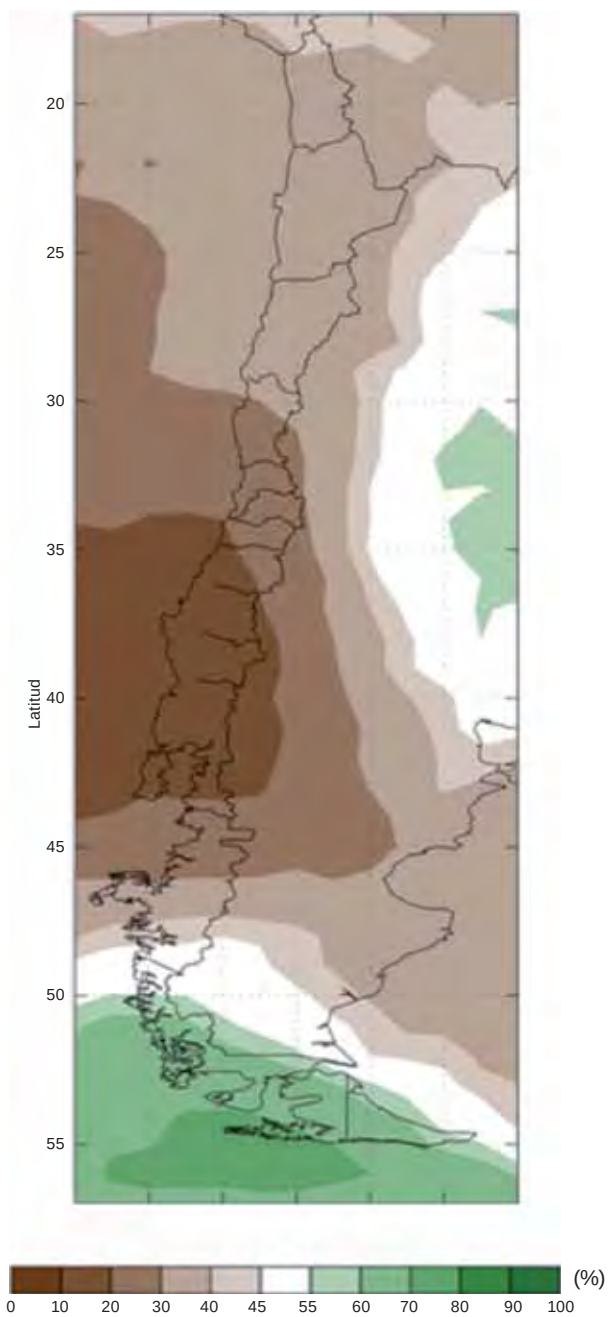
En el cuadro I.2 se muestra un resumen de las proyecciones de precipitación para las distintas regiones del país. Se presenta, por una parte, la robustez de la señal, considerando el análisis de incertidumbre asociado a todas las proyecciones de cambio climático disponibles y, por otra, la señal de cambio de acuerdo con el modelo HadCM3.

MAPA I.6
COMPARACIÓN DE PROYECCIONES DE PRECIPITACIÓN HadCM3 EN EL
ESCENARIO DE GEI A2 Y ENSAMBLE A2, 2010-2040
(Cambios porcentuales sobre base histórica)



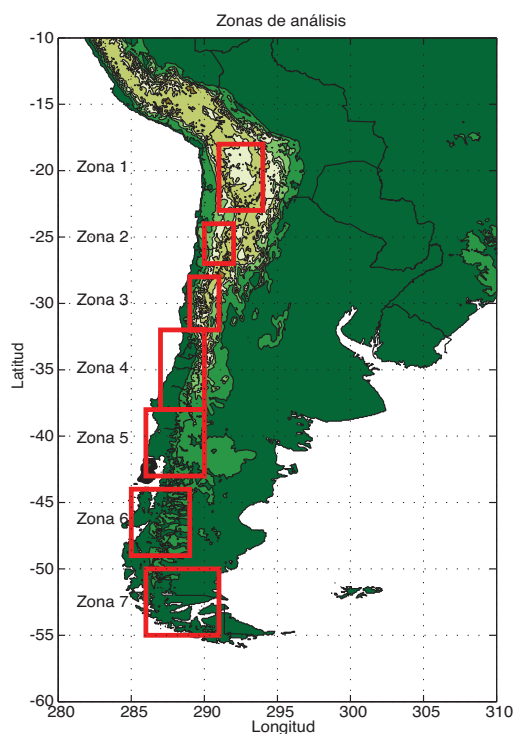
Fuente: Elaboración propia.

MAPA I.7
MODELOS QUE PROYECTAN AUMENTO DE PRECIPITACIÓN, 2010-2040
(En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia.

CUADRO I.2
RESUMEN DE PROYECCIONES DE PRECIPITACIÓN SEGÚN ZONA^a



Zona	Robustez de la señal		
	Temprano	Intermedio	Tardío
Zona 1: Altiplano (18-23S)	No existe una señal clara de cambio de precipitación		
	Disminución: 0/-10%		Aumento: +5/+10%
Zona 2: Norte grande (23-27S)	No existe una señal clara de cambio de precipitación		
	Disminución: -5/-10%		
Zona 3: Norte chico (28-32S)	Leve señal de disminución de precipitaciones		
	Disminución: -5%	Disminución: -10/-20%	
Zona 4: Chile central (32-38S)	Señal robusta de disminución de precipitaciones		
	Disminución: -5/-10%	Disminución: -10/-20%	Disminución: -20/-30%
Zona 5: Zona sur (38-42S)	Señal robusta de disminución de precipitaciones		
	Disminución: -5/-10%	Disminución: -10/-20%	Disminución: -20/-30%
Zona 6: Patagonia (44-49S)	No existe una señal clara de cambio de precipitación		
		Neutro: -5/5%	
Zona 7: Magallanes (50-55S)	Señal robusta de disminución de precipitaciones		
	Neutro: -5/5%	Aumento: +5/+10%	

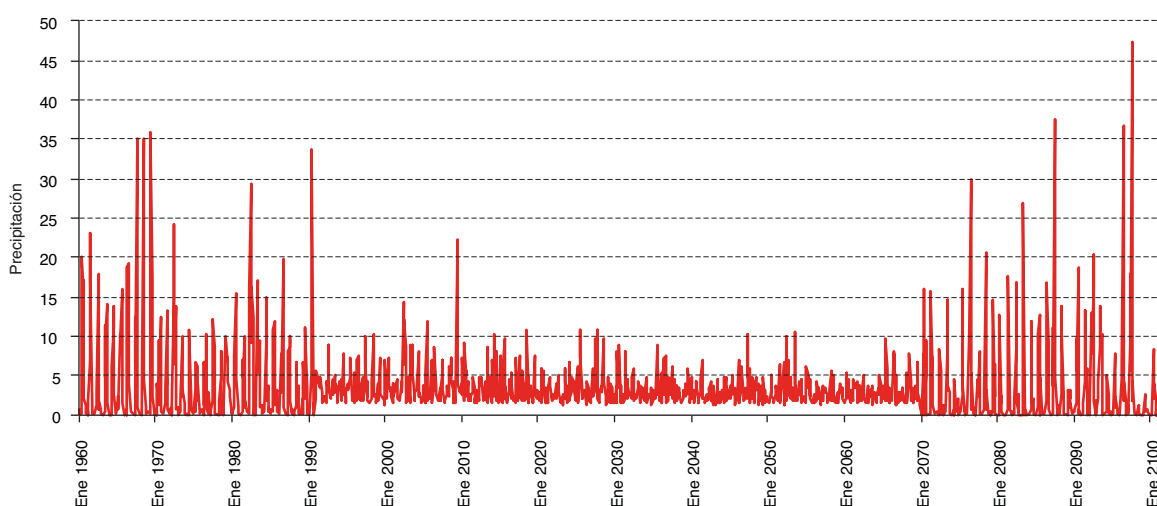
Fuente: Elaboración propia.

^a Se presenta el resultado del análisis de incertidumbre y proyección de acuerdo con el modelo HadCM3.

D. Series climáticas futuras

No existe en Sudamérica información espacialmente distribuida con respecto a proyecciones climatológicas que estén a la resolución espacial adecuada para ser utilizada en modelos de impacto. Para subsanar esta limitación, originalmente el proyecto tenía contemplado utilizar la información generada por el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais de Brasil (INPE). Este trabajo se basó en una correlación estadística entre la información proveniente de un modelo global (HadCM3) y la información a escala regional –generada usando una reducción de escala (*downscaling*) dinámica basada en el modelo PRECIS–. Sin embargo, tal como lo muestran los gráficos I.3, I.4 y I.5, las limitaciones de la metodología impidieron que se pudieran usar estos resultados para el análisis de impactos en Chile. Fue por esto que se hizo necesario llevar a cabo un *downscaling* adicional por tres grupos de investigadores asociados a los estudios de impacto en las condiciones de productividad agrícola, generación hidroeléctrica e impactos en biodiversidad. La metodología empleada por cada uno de estos grupos se describe en los apéndices IIa, IIb y IIc.

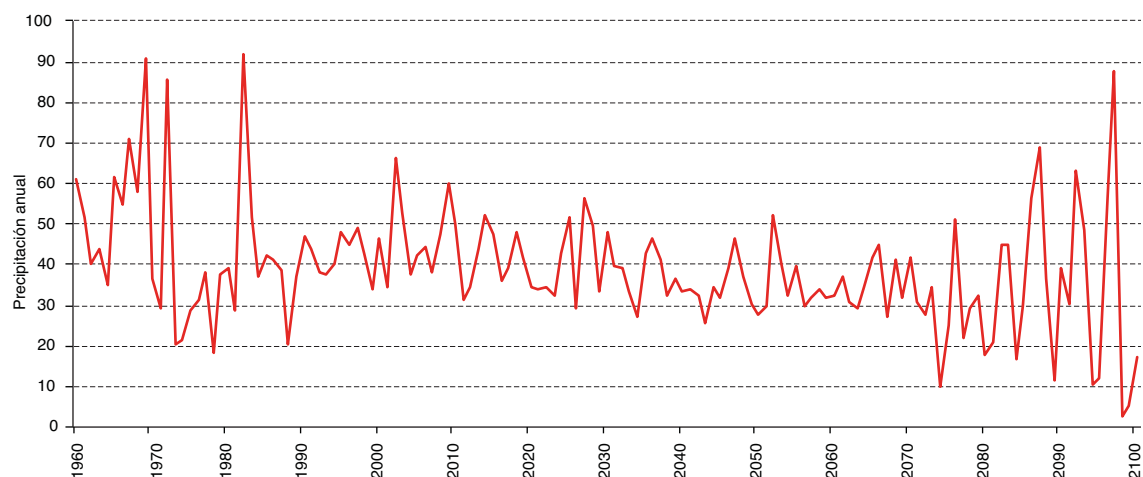
GRÁFICO I.3
SERIE DE TIEMPO DE PRECIPITACIÓN MENSUAL EN LA CUENCA DEL RÍO LIMARÍ
(En milímetros)



Fuente: Sobre la base de información proveniente del trabajo del INPE.

Nota: En el gráficos se puede apreciar claramente el cambio que ocurre del año 1990 al año 2070.

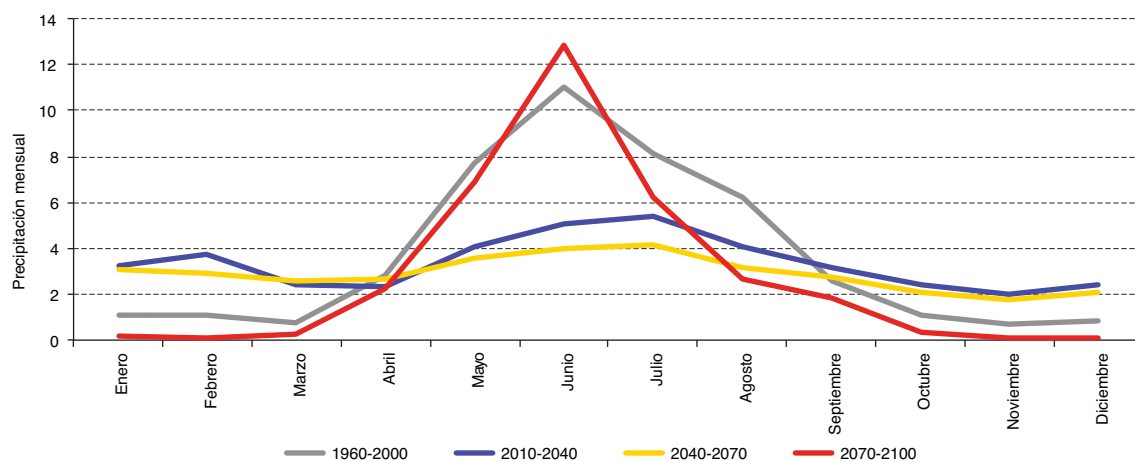
GRÁFICO I.4
SERIE DE TIEMPO DE PRECIPITACIÓN ANUAL EN LA CUENCA DEL RÍO LIMARÍ
 (En milímetros)



Fuente: Sobre la base de información proveniente del trabajo del INPE.

Nota: Se puede apreciar en el gráfico el cambio notorio que ocurre del año 1990 al año 2070.

GRÁFICO I.5
SERIE DE TIEMPO DE PRECIPITACIÓN PROMEDIO MENSUAL EN LA CUENCA DEL RÍO LIMARÍ
 (En milímetros)



Fuente: Sobre la base de información proveniente del trabajo del INPE.

Nota: Se puede apreciar la falta de representatividad de los patrones estacionales en esta cuenca en los periodos 2010-2040 y 2040-2070. Los otros dos periodos provienen del trabajo de *downscaling* dinámico usando PRECIS (DGF y CONAMA, 2007).

II. Los escenarios socioeconómicos de Chile

En forma paralela a la preparación de proyecciones climáticas, y dándole el contexto a la evaluación económica de impactos y, posteriormente, de medidas de mitigación, se han desarrollado diferentes escenarios socioeconómicos.

Desde 1990 a la fecha, Chile ha experimentado un crecimiento económico rápido, cada vez más diversificado y encabezado por las exportaciones (véanse más detalles en el apéndice III y en OCDE y CEPAL, 2005). De acuerdo con lo que se presenta en el gráfico II.1, si bien la economía del país se fundamenta en el aprovechamiento de recursos naturales –actividades minera y silvoagropecuaria–, el sector de servicios financieros y personales es el que aporta en mayor medida al producto interno bruto (PIB), seguido de la industria manufacturera. Esto se debe a los encadenamientos hacia adelante y hacia atrás que las actividades primarias desarrollan con el resto de las actividades de la economía –servicios, transporte y comunicaciones, entre otros–.

Recientemente, y después de varios años de marcada expansión –con una tasa de crecimiento promedio del 4% anual de 1997 a 2007–, la actividad económica presenta una desaceleración caracterizada por una inflación moderada. La desaceleración económica mundial, las condiciones financieras más estrictas y un menor nivel de actividad, consumo e inversión, implicarán un crecimiento proyectado de un -0,75% a un 0,25% para 2009. Sin embargo, para fines de 2009 y durante 2010 se espera que la actividad económica retome valores positivos y más cercanos a la tasa de crecimiento de largo plazo (Banco Central de Chile, 2009).

Con respecto a las condiciones demográficas, se estima que la población del país en el año 2007 era de 16.598.074 habitantes, de los cuales un 40% vivía en la Región Metropolitana. Por otra parte, considerando las proyecciones basadas en estudios del Instituto Nacional de Estadísticas (INE) y de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), se espera que la población del país alcance a poco más de 20 millones de personas hacia 2050 y que empiece a decaer hasta llegar a aproximadamente 17 millones a fines de siglo.

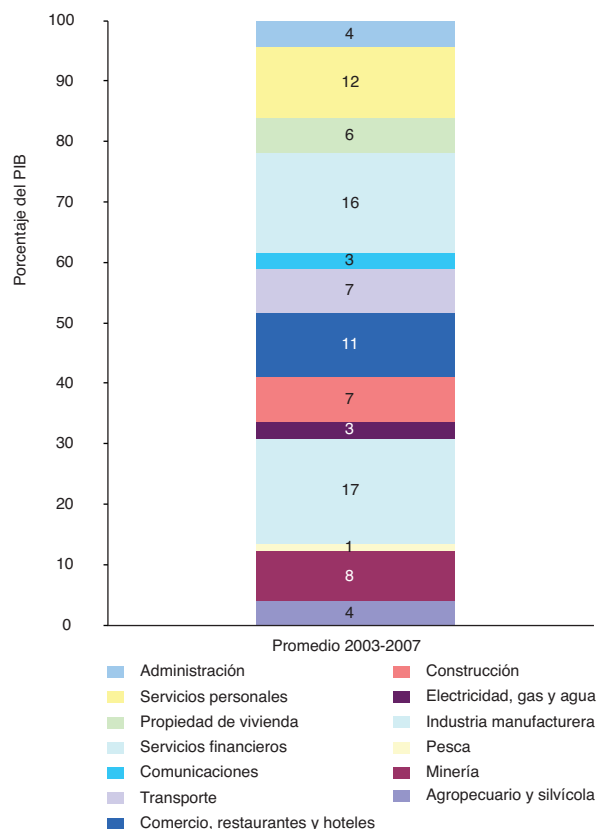
Hasta 2030 se realiza una proyección usando como base las tasas de crecimiento, tomadas del estudio realizado para la Comisión Nacional de Energía (CNE) y para la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), por POCH Ambiental (2009)¹:

¹ Las tasas de crecimiento para los años 2009 y 2010 son las consideradas en POCH Ambiental (2009), tomando como información la base disponible a la fecha del cierre del estudio (agosto de 2009).

- 2008: crecimiento de un 3,2%.
- 2009: crecimiento esperado del 0%.
- 2010: crecimiento esperado del 3%.
- 2011 a 2015: proyección de crecimiento del 5% anual.
- 2016 a 2030: proyección de crecimiento del 4% anual.

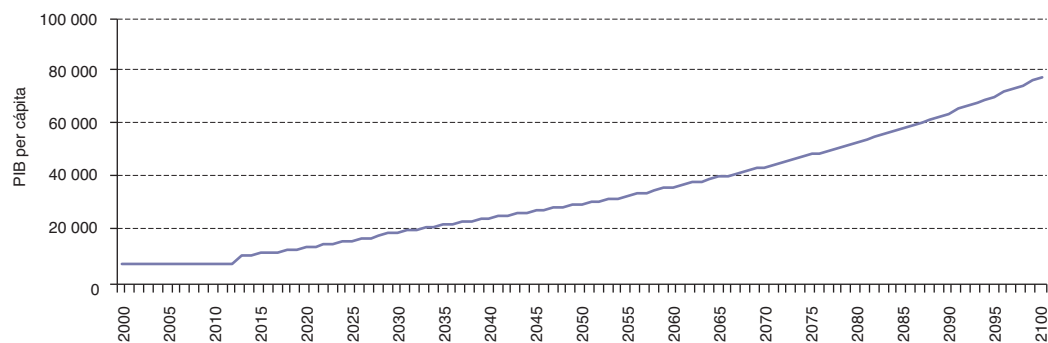
Para períodos posteriores a 2030, y dada la elevada incertidumbre, se ha llevado a cabo una proyección del PIB que se basa en las tasas de crecimiento de países que tengan un PIB per cápita similar al de Chile para los años respectivos. El resultado de este ejercicio es una proyección de crecimiento del PIB que se realiza sobre la base de datos observados en otros países con un mismo nivel de ingreso per cápita, y que cumple con el principio de convergencia. De acuerdo con este análisis se obtiene una disminución en la tasa de crecimiento, llegándose a valores del 2% en 2040, del 1,5% en 2050 y cerrando la proyección con un valor promedio del 1,2% en los últimos 50 años del siglo XXI. Combinando ambos escenarios, se elabora el gráfico II.2, que muestra la proyección del crecimiento del PIB per cápita del país hasta 2100. Es importante aclarar que esta proyección no corresponde a valores oficiales, ya que el Ministerio de Hacienda no publica proyecciones del PIB con estos horizontes de tiempo.

GRÁFICO II.1
APORTE PORCENTUAL AL PIB DE LOS DIFERENTES
SECTORES DE LA ECONOMÍA, 2003-2007
(En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia sobre la base de información del Banco Central.

GRÁFICO II.2
PROYECCIÓN DE CRECIMIENTO DEL PIB PER CÁPITA, 2000-2100
(En dólares de 2009)



Fuente: Elaboración propia con apoyo del Ministerio de Hacienda.

III. La metodología del análisis económico del cambio climático

A. Impactos y adaptación

Tal como se señaló en el cuarto informe de evaluación del IPCC (IPCC, 2007), no existen a la fecha muchos estudios enfocados al análisis de los impactos económicos del cambio climático desde el punto de vista de un país o una región en particular. A nivel global se han realizado una serie de esfuerzos en esta materia, entre los que destaca el informe Stern (2007). En estos estudios, sin embargo, se han simplificado en gran medida las relaciones existentes entre las proyecciones climáticas y sus impactos físicos y económicos, sobre todo en la escala espacial en que se hacen los análisis. En este estudio, al igual que en otros similares que se están llevando a cabo en la región, el objetivo es empezar a comprender, a una escala espacial con mayor detalle, cuáles son las implicancias futuras que las proyecciones climáticas tendrán sobre las actividades económicas del país. Estos cambios climáticos van a originar, en algunos casos, reacciones desde el punto de vista de los actores económicos que tienden a disminuir el efecto monetario esperado. Hemos llamado a este tipo de reacción adaptación intrínseca o endógena, porque ocurre independientemente de políticas e incentivos que se apliquen de manera planificada para paliar los impactos. Esto último, no implica que sean acciones sin costos de implementación. Cuando existen políticas e incentivos que se desarrollan de manera planificada, las hemos llamado medidas de adaptación planificadas o exógenas, cuya implementación también tiene un costo, pero que, según se esperaría, sería menor que la reducción de impactos asociados a la introducción de la medida.

B. Mitigación

Pese a que la contribución de cada país a las emisiones de GEI a nivel global es variable, se reconoce que la única solución a este problema supone que todos los países aporten al control y disminución tanto de las emisiones directas como de las indirectas de estos gases. El control de estas emisiones tiene un costo económico asociado que debe ser evaluado.

C. Efectos interrelacionados

En algunos casos particulares, se hace difícil distinguir con claridad entre un análisis de adaptación y uno de mitigación. Un buen ejemplo es la posibilidad de que una reducción en la generación de energía hidroeléctrica, producto de disminuciones de precipitación, traiga consigo un aumento de la generación mediante centrales termoeléctricas, lo que incide en un alza en las emisiones de GEI. Existe una serie de ejemplos equivalentes que han sido reconocidos en este trabajo.

D. Metodología del análisis económico del impacto del cambio climático en Chile

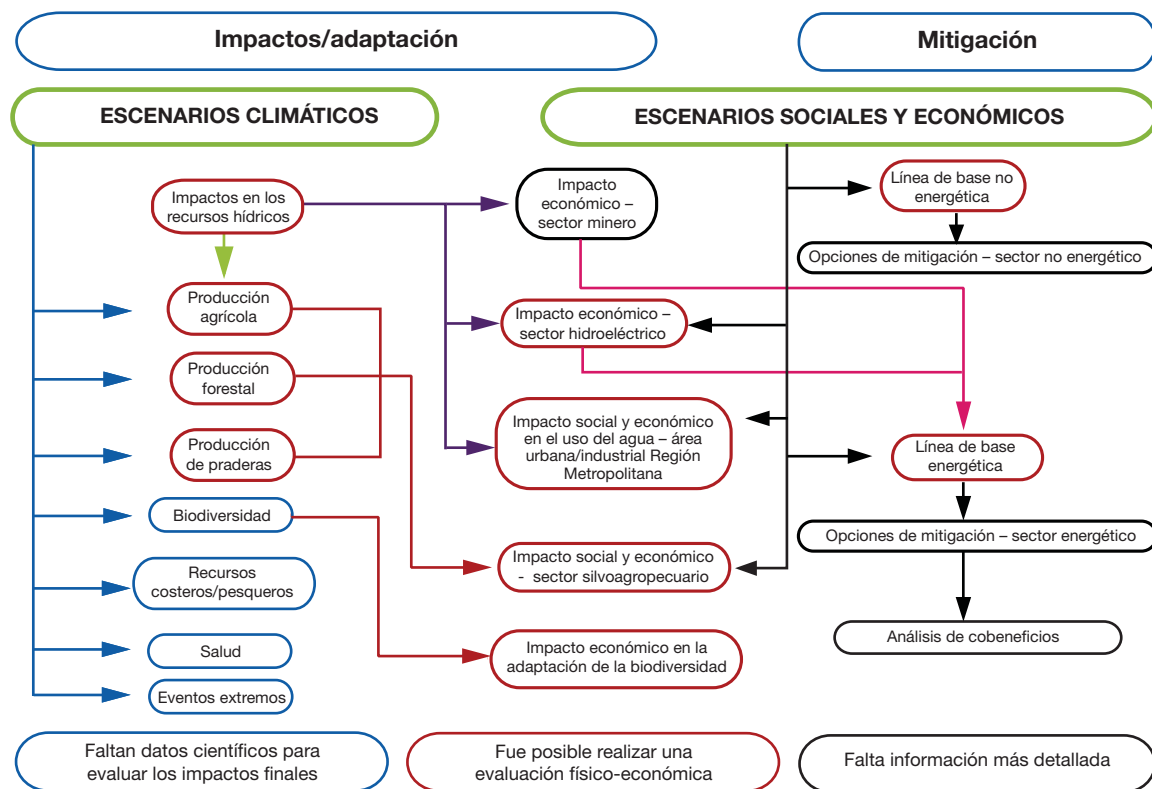
Prácticamente todas las actividades socioeconómicas están vinculadas de alguna manera –directa o indirecta– al clima. Es por ello que se esperaría que en todas ellas se manifieste –aunque de manera sutil– alguna huella asociada a los impactos del clima. Sin embargo, es posible asumir que en algunos sectores en relación más directa con este –como el agrícola–, las consecuencias sean más evidentes. Por otra parte, pese a que en algunos sectores –como el pesquero– la relación entre la actividad y el clima es clara, no existe un conocimiento muy desarrollado con respecto a esta relación, por lo que es difícil hacer estimaciones de los impactos económicos en el sector a futuro. Sobre la base de estos conceptos, la evaluación económica del cambio climático en el caso de Chile es dispar según los diferentes sectores de la economía.

En el diagrama III.1 se ilustra la metodología utilizada en este trabajo. En ella se han considerado aspectos relativos a los impactos y la adaptación, así como a la mitigación. Además se destacan aquellos sectores donde existen interrelaciones entre el impacto y la mitigación. Como se puede apreciar en algunos casos, como el de la agricultura, ha sido posible llevar a cabo un análisis más detallado de los impactos esperados del cambio climático. Este análisis comprende, en líneas generales, una evaluación de los impactos físicos asociados a los cambios climáticos –en el caso de la agricultura esto se traduce en cambios en la disponibilidad de agua para riego y en la productividad de los cultivos– y, también, una evaluación de los impactos económicos asociados, incluido, cuando sea pertinente, un grado de adaptación endógeno esperable. En otros casos, como el del sector de recursos pesqueros, aún falta información científica de base que permita evaluar desde un punto de vista físico la proyección de impactos. Por último, existen sectores como la minería, en los que no es posible establecer los efectos desde el punto de vista económico debido a información insuficiente. Es importante mencionar que en ninguno de los casos considerados, con la excepción de un análisis regional particular que se plantea en el tema de la biodiversidad, ha sido posible realizar una evaluación de los costos y beneficios asociados a la implementación de medidas de adaptación planificadas. Sin perjuicio de lo anterior, y a la luz de los resultados encontrados, se plantean una serie de alternativas a considerar en este sentido.

Cabe destacar que la evaluación de los impactos del cambio climático en un sector de la economía implica, por una parte, entender los impactos que se proyectan en las condiciones físicas en que se desarrolla dicho sector, pero también, tener en cuenta que estos se producen en horizontes lejanos de tiempo, por lo que es importante contar con un escenario de las condiciones económicas que se esperan en el futuro para él. Es por esto que en este trabajo se ha considerado la proyección de la condición económica a nivel macro del país, tal como se presentó en el capítulo II. Sin embargo, no se han elaborado supuestos acerca de los cambios estructurales que pueda tener la economía en el futuro en cuanto al aporte de ciertos sectores por sobre otros.

Los detalles asociados a este esquema metodológico quedan más claros cuando se describen los análisis sectoriales que se presentan en el próximo capítulo.

DIAGRAMA III.1
ESQUEMA METODOLÓGICO DE ANÁLISIS DE LA ECONOMÍA
DEL CAMBIO CLIMÁTICO



Fuente: Elaboración propia.

IV. Impactos económicos y sociales asociados al cambio climático en Chile

Prácticamente todas las actividades socioeconómicas están vinculadas al clima. Algunas de ellas, como la agricultura o el sector forestal, presentan una dependencia directa, ya que el clima determina la existencia de recursos energéticos y físicos primarios. En otros casos, los recursos hídricos juegan un papel de gran relevancia, de tal forma que los impactos que el cambio climático tenga sobre la oferta hidrológica dan lugar a consecuencias en cascada que repercuten en definitiva en las actividades económicas que se benefician de ellos. También existen sectores de la economía que, pese a no tener una relación directa con el clima, están relacionados con sectores que sí lo están y, por ende, también pueden verse afectados por el cambio climático.

En este capítulo se ofrece información sobre los efectos de los escenarios de cambio climático proyectados sobre distintos sectores de la economía, así como también una mirada analítica a sistemas biofísicos –suelos, recursos pesqueros, costas, infraestructura– y ecosistemas –biodiversidad– que pueden presentar un nivel de sensibilidad importante frente a cambios climáticos y que, por lo tanto, ven comprometidos la calidad y oferta de los servicios que pueden brindar. Finalmente, en esta sección se abordan algunos impactos sociales derivados, como los efectos en la salud y en la migración, debido a cambios significativos en los patrones de demanda de mano de obra.

A. Recursos hídricos

Los recursos hídricos son indispensables para el desarrollo del país, ya que prácticamente todas las actividades económicas –minería, agricultura y generación eléctrica, entre otras– utilizan el agua como un insumo fundamental. La disponibilidad de estos recursos en Chile es muy heterogénea en cuanto a tiempo y espacio, puesto que existen zonas con abundancia del recurso y otras con permanente déficit. Una descripción de las principales zonas hidrográficas del país se presenta en el cuadro IV.1.

Existe una gran heterogeneidad en la disponibilidad temporal y espacial del recurso en Chile, existiendo regiones con gran abundancia de recursos hídricos, y otras donde se presenta un permanente déficit (Donoso, Montero y Vicuña, 2001) (véase el gráfico IV.1).

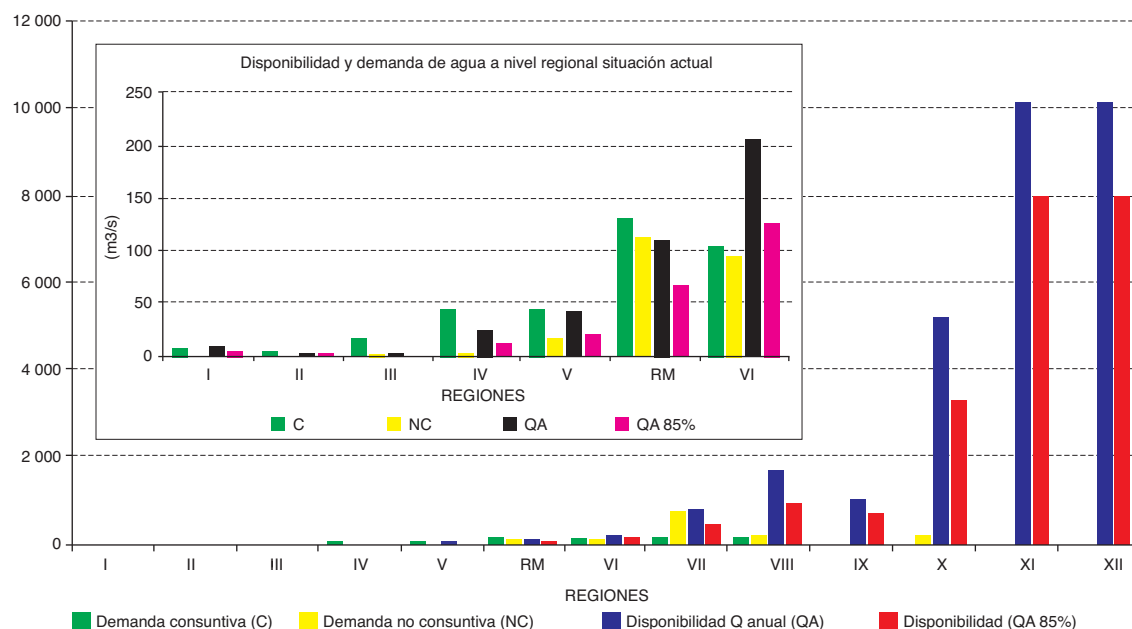
CUADRO IV.1

DESCRIPCIÓN DE ZONAS HIDROGRÁFICAS

Zona	Naturaleza de la cuenca
Régimen esporádico en la zona árida de Chile	Cuencas exorreicas Valles transversales del extremo norte Cuenca del río Loa Cuencas endorreicas Cuencas cerradas de La Puna Cuencas cerradas de elevaciones intermedias: Pampa del Tamarugal Salar de Atacama Salar de Punta Negra Cuencas arreicas de la Cordillera de la Costa
Régimen mixto en la zona semiárida de Chile	Cuencas andinas Ríos: Salado, Copiapó, Huasco, Elqui, Limarí, Choapa, Petorca, La Ligua, Aconcagua Cuencas preandinas Quebradas: Algarrobal, Chañaral, Las Breas, Lagunillas, estero Pupio, río Quilimarí Cuencas costeras Cuencas de la Cordillera de la Costa
Régimen mixto en la zona subhúmeda de Chile	Cuencas andinas Ríos: Maipo, Rapel, Mataquito, Maule, Itata, Biobío Cuencas costeras Interfluvio: Aconcagua-Maipo; Maipo-Rapel; Rapel-Mataquito; Mataquito-Maule; Maule-Itata; Itata-Biobío.
Régimen de ríos con regulación lacustre en la zona húmeda de Chile	Cuencas andinas, preandinas y trasandinas Ríos: Imperial, Toltén, Valdivia, Bueno, Maullín, Petrohué. Cuencas costeras Interfluvios: Biobío-Imperial; Imperial-Toltén; Toltén-Valdivia; Valdivia-Bueno-Maullín; Petrohué-Cochamó. Archipiélago de Chiloé
Ríos caudalosos trasandinos de Patagonia septentrional de Chile	Hoyas andinas y trasandinas Hoyas ríos: Cochamó, Puelo, Vodudahue, Reñihue-Yelcho; Corcovado; Palena; Cisnes; Aysén; Baker. Cuencas costeras Interfluvios: Puelo-Vodudahue; Vodudahue-Reñihue; Reñihue-Yelcho; Yelcho-Corcovado; Corcovado-Palena; Palena-Cisnes; Cisnes-Aysén; Aysén-Baker.
Zona de los campos de hielo de la Patagonia meridional	Ríos de alimentación glacial Hoyas ríos: Bravo, Pascua, Serrano, Gallegos. Cuencas costeras Hoyas ríos: Chico o Ciaiike. Campos de hielo Campo de hielo norte, campo de hielo sur, campo de hielo de Tierra del Fuego. Zonas hidrográficas al sur del Estrecho de Magallanes Cuencas ríos: Chico, Grande, Azupardo.

Fuente: Instituto Geográfico Militar (IGM), “Hidrografía”, *Geografía de Chile*, Tomo VIII, 1984.

GRÁFICO IV.1
DISPONIBILIDAD Y DEMANDA DE AGUA A NIVEL REGIONAL
(En metros cúbicos por segundo)



Fuente: Direccional General de Aguas (DGA), *Política nacional de recursos hídricos*, diciembre de 1999.

Desde el punto de vista de la demanda, la disponibilidad de recursos también es heterogénea, teniendo algunos sectores mayor relevancia que otros en diferentes regiones del país. En el cuadro IV.2 se pueden apreciar los principales usuarios de recursos hídricos por regiones, distinguiéndose el uso en el sector minero en el norte, de riego en el centro-sur, hidroeléctrico en el sur e industrial en el centro-sur.

De 1990 a 2002, la extracción de agua dulce en Chile aumentó en un 160%, lo que reflejó esencialmente un rápido crecimiento del uso no consuntivo por parte de las plantas hidroeléctricas. En las regiones del norte, la escasez del recurso se ha traducido en un aumento de la competencia entre sus principales usuarios: minería, agricultura de riego intensivo y suministro de agua potable. La contaminación de los cursos de agua agrava este conflicto, puesto que la contaminación por la escorrentía agrícola es un problema importante (OCDE y CEPAL, 2005). Por otra parte, en una proyección gubernamental de la sobredemanda de agua a 25 años –hasta 2017–, se especifica que el requerimiento de los hogares, de la minería y de la industria prácticamente se duplicará y que el uso para fines agrícolas aumentará en un 20%, producto de las presiones demográficas y económicas que existen sobre la demanda de los recursos hídricos. La demanda proyectada para la generación hidroeléctrica es incierta, ya que depende de decisiones futuras en relación con las fuentes de generación de electricidad; sin embargo, en las estimaciones se prevé que podría llegar a multiplicarse por diez. Cabe destacar que la mayor parte del consumo de agua corresponde al riego, con un 84,5% del total nacional. Este aumento de la demanda, tendería a hacer más severos los efectos esperados por cambios en la disponibilidad del recurso hídrico.

Por otra parte, y acorde con las proyecciones climatológicas futuras, se esperan consecuencias importantes en las condiciones hidrológicas de las diferentes cuencas hidrográficas del país que se resumen en los siguientes puntos generales:

CUADRO IV.2
ESTIMACIÓN DEL USO DE AGUA POR REGIÓN, 1993
(En miles de m³/año)

Región	Tipo de uso				
	Agricultura	Agua potable	Industria	Minería	Energía
I de Tarapacá	40 142	13 440	14 424	14 004	9 713
II de Antofagasta	6 386	9 900	10 272	56 580	0
III de Atacama	65 898	7 680	4 560	114 828	19 475
IV de Coquimbo	499 180	10 532	1 836	13 788	14 436
V de Valparaíso	461 909	39 504	40 380	9 576	211 376
VI del Libertador General Bernardo O'Higgins	1 598 950	16 836	8 196	86 532	3 270 700
VII del Maule	1 654 920	17 004	22 764	0 000	8 860 000
VIII del Biobío	855 620	28 764	392 460	13 200	2 462 100
IX de La Araucanía	74 191	9 636	1 992	0	0
X de Los Lagos	0 000	15 216	22 260	18 000	2 860 470
XI Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo	0	2 508	0 480	213 360	156 115
XII Magallanes y de la Antártica Chilena	0,816	4 848	32 676	2 172	0
Región Metropolitana de Santiago	1 292 690	178 644	86 700	3 948	1362 130
TOTAL	6 550 702	354 512	639 000	545 988	19 236 515

Fuente: Humberto Peña Torrealba; colaboradores Tatiana Cuevas Valencia, Carlos Salazar Méndez, *Recursos hídricos*, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Estudios y Planificación, 1993.

- i) en las cuencas ubicadas entre el paralelo 30 °S y 42 °S –entre las regiones de Coquimbo y de Los Lagos, aproximadamente– se espera una disminución de los caudales disponibles –efecto de la precipitación– y un cambio en la temporalidad de los caudales –efecto de la precipitación y de la temperatura–. Estos impactos dependen de la capacidad de regulación de los caudales en cada cuenca, lo que permite “mover” el agua desde los períodos en el año en que se encuentra disponible a los períodos en que se necesita. Impactos similares se han evaluado en cuencas con características hidroclimatológicas similares (Vicuña y otros, 2007), sin embargo, no se ha llevado a cabo un estudio detallado a la fecha en cuencas en Chile. También se espera una disminución importante en el hielo acumulado en los glaciares que se encuentran en estas cuencas, lo que implica seguir la tendencia histórica de retroceso de estos, tal como fuera registrado en diversas publicaciones (Escobar y otros, 1995). Este hecho afectará la disponibilidad de agua en aquellas cuencas donde el aporte de los glaciares es significativo, en general, las cuencas entre el Aconcagua y Cachapoal y algunas cuencas del norte de Chile (Bitrán y Rivera s/f). Este efecto se hace más notorio en los períodos de estiaje (verano-otoño) y en especial en los períodos de sequía, cuando el aporte de precipitaciones, e incluso del derretimiento de nieves, disminuye. Este tipo de efecto no ha sido considerado en los análisis que se presentan posteriormente;
- ii) para el extremo austral del país –entre los paralelos 50 °S y 55 °S– se espera un aumento de los caudales disponibles y un cambio en la extensión de las masas de hielo, cuyo sentido va a depender de los cambios relativos de radiación, temperatura, precipitación y de otras variables que influyen en su evolución; y

- iii) la situación en el extremo norte del país –cuencas endorreicas y altiplánicas– es más ambigua. El modelo utilizado en este trabajo pronostica una disminución de la precipitación a principios de siglo y un aumento a finales de este, lo que implica una clara disminución de la disponibilidad de recursos en el período cercano, aun cuando la situación no es tan clara en el período futuro, producto del efecto que podrían tener los cambios en la evaporación de agua asociados a los aumentos de temperatura.

Finalmente, siguiendo la cadena de efectos, se esperaría que estos cambios hidrológicos tengan importantes impactos en la utilización de los recursos hídricos en las cuencas ubicadas en la zona central del país. Estos estarían asociados a una baja en la disponibilidad de agua que se manifestaría de manera más clara en los períodos más críticos del año (finales de primavera y verano). Dichos efectos dependen de la capacidad de regulación de los caudales en cada cuenca, lo que permite mover el agua de los períodos en que se encuentra disponible a los períodos en que se necesita. Estos cambios hidrológicos afectarían la productividad de sectores que dependen de la disponibilidad y temporalidad de caudales, como la agricultura de riego, generación hidroeléctrica y consumo de agua en los sectores municipal, industrial y minero. En las secciones siguientes se presentan análisis asociados a cada uno de ellos.

Es importante mencionar que este análisis toma en cuenta cambios en las condiciones promedio en períodos largos de tiempo (30 años). La relación entre el clima y los efectos asociados es, por lo general, no lineal y compleja. La ocurrencia de eventos extremos –sequías o inundaciones– es lo que incide en mayor medida en los impactos económicos en el país. Pese a que este tipo de relación no ha sido evaluada desde un punto de vista económico, sí se presenta en una sección posterior la relación entre cambio climático y frecuencia de eventos climáticos extremos en el país.

1. Impactos en la disponibilidad de agua para riego

El uso de agua para riego constituye el mayor porcentaje de consumo de recursos hídricos en el país, especialmente en la zona central donde se concentra la agricultura. En algunas regiones existe una fuerte competencia en el uso de los recursos entre este y otros sectores, ya sea por la gran cantidad de agua demandada o por la falta de disponibilidad. Esto lleva a que exista un disímil nivel de estrés hídrico en las diferentes cuencas a nivel nacional.

Para evaluar los cambios que podrían ocurrir en el futuro en la disponibilidad de agua para riego, se ha aplicado como metodología una perturbación de los diferentes componentes que forman parte del balance hídrico de las cuencas en el país –es decir, lluvia, evaporación y caudal–. La información de base se deriva del *Balance hídrico de Chile* (DGA, 1987), y que fue modificada considerando los cambios proyectados en precipitación y temperatura para los escenarios de cambio climático. Sobre la base de esta metodología se obtienen escenarios de restricción de riego cuyos principales resultados se resumen en los siguientes puntos²:

- i) los agricultores ubicados al sur de la cuenca del río Maipo no deberían tener problemas de abastecimiento de agua para riego en términos generales (existen salvedades a nivel puntual);
- ii) de la cuenca del río Maipo (incluida) al norte se proyectan restricciones en la disponibilidad de agua para riego que dependen del escenario (A2 o B2) y del período de tiempo considerado;
- iii) para el período temprano, las restricciones varían de un 0% (escenario B2 en todas las cuencas excepto del Aconcagua) a un 15% (escenario A2 para la cuenca del río Aconcagua); y
- iv) para el período tardío, las restricciones varían de un 30% (escenario B2 en la cuenca del río Maipo) a un 65% (escenario A2 para la cuenca del río Aconcagua).

² Una descripción más detallada de la metodología y una presentación de resultados se presenta en el apéndice IVa.

Estos escenarios de restricción hídrica implican serios impedimentos en la productividad de cultivos, lo que será analizado en una sección posterior. Cabe mencionar que la metodología utilizada solamente permite hacer análisis regionales de gran extensión. Cuando se analizan estos temas en detalle, existen diferencias importantes entre usuarios dentro de una misma cuenca o entre tipos de agricultores, que inciden de manera diferente en el impacto real que perciban fruto de los cambios en la hidrología.

Un ejemplo de estas limitaciones se presenta en el recuadro IV.1, donde se señalan los resultados de un trabajo con mayor detalle que se llevó a cabo en la cuenca del río Limarí para determinar los impactos del cambio climático en la disponibilidad de agua para riego.

RECUADRO IV.1

DISPONIBILIDAD DE AGUA PARA RIEGO EN LA CUENCA DEL RÍO LIMARÍ

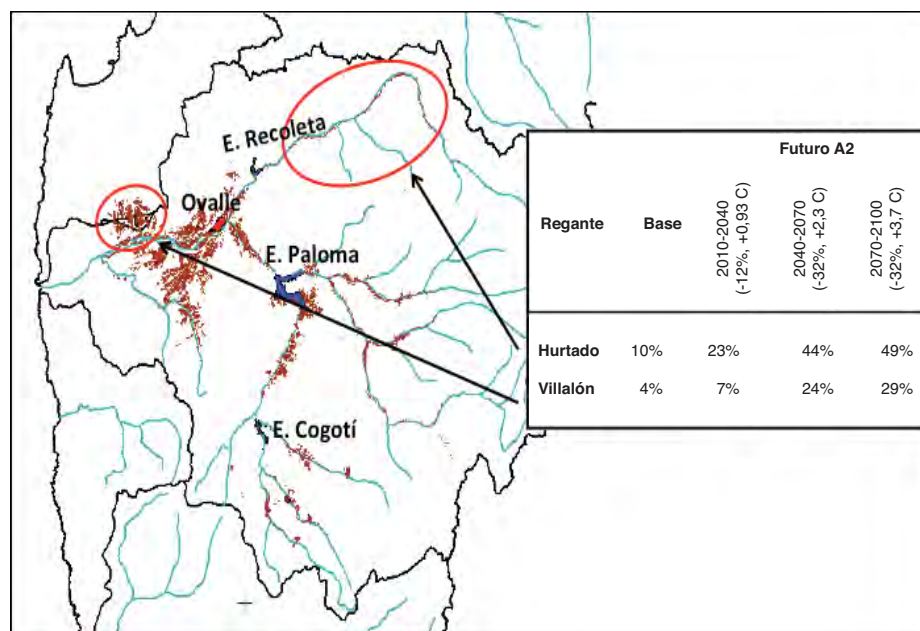
La representación agregada de la disponibilidad de agua para riego sobre la base de la metodología presentada en esta sección, limita el análisis espacial de los impactos y potenciales medidas de adaptación asociada al cambio climático. Sin embargo, hacer un análisis más detallado requiere de herramientas más sofisticadas que no han sido desarrolladas en el caso de la mayoría de las cuencas en Chile.

La cuenca del río Limarí ubicada aproximadamente a 400 km al norte de la ciudad de Santiago, en un clima semiárido, es una excepción de lo anterior. En los trabajos realizados por Vicuña y otros (2010) se desarrolló un modelo hidrológico y de recursos hídricos para esta cuenca utilizando la plataforma de modelación WEAP.

Revisando los resultados de dichos trabajos es posible apreciar los riesgos que se cometen al considerar cambios homogéneos en la disponibilidad de agua para riego en una cuenca. En el mapa IV.1 se entrega un análisis de la restricción de agua para riego futura de acuerdo con el escenario HadCm3-A2 en tres períodos temporales y para dos tipos de usuarios. Un grupo de usuarios corresponde a regantes en la parte alta del río Hurtado, que no poseen infraestructura de almacenamiento de agua y, por lo tanto, son muy vulnerables a los cambios en las condiciones climáticas. El segundo grupo de usuarios corresponde a regantes que se nutren de las aguas del Canal Villalón, que a su vez se nutre de las descargas de aguas de dos embalses de regulación en la cuenca –el embalse Recoleta y el embalse La Paloma– y, por lo tanto, poseen una menor vulnerabilidad respecto de los cambios en las condiciones climáticas. Se puede apreciar, para ambos casos, que frente a un mismo cambio climatológico el grado de impacto en la restricción de agua para riego es claramente superior en el caso de los regantes del río Hurtado. El análisis general presentado en este documento, no posee este grado de detalle en relación con las diferencias espaciales de la disponibilidad de agua para riego.

Fuente: S. Vicuña, R. D. Garreaud y J. McPhee, “Climate change impacts on the hydrology of a snowmelt driven basin in semiarid Chile”, *Climatic Change*, vol. 105, N^{os} 3-4, 2010.

MAPA IV.1
RESTRICCIÓN DE AGUA PARA RIEGO PARA DIFERENTES USUARIOS
DE LA CUENCA DEL RÍO LIMARÍ



Fuente: S. Vicuña, J. McPhee y R. D. Garreaud, “Agriculture vulnerability to climate change in a snowmelt driven basin in semiarid Chile”, *Journal of Water Resources planning and Management*, Doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000202, s/f.

2. Impactos en la generación hidroeléctrica

La energía hidroeléctrica representa aproximadamente el 60% de la generación de electricidad en el Sistema Interconectado Central (SIC)³ y es, por sus bajos costos de operación, la primera opción de generación. Sin embargo, la disponibilidad de esta fuente de energía es altamente variable y dependiente de las condiciones climatológicas. En períodos donde las condiciones climatológicas reducen la disponibilidad de generación hidroeléctrica existe un costo muy relevante para el país, tanto de tipo económico –al aumentar la generación por medio de fuentes más costosas (como el carbón o el diésel)– como climático, ya que significa un aumento de la emisión de GEI.

La metodología utilizada en este trabajo ha consistido primero en seleccionar dos sistemas de generación que poseen una gran relevancia por el nivel de aporte a la generación hidroeléctrica: los sistemas de los ríos Maule y Laja, que representan más del 40% de la potencia hidroeléctrica total instalada en el SIC. En el mapa IV.2 se presenta la ubicación de estas cuencas y cómo están acopladas al Sistema Interconectado Central (SIC). Para ambos sistemas se han desarrollado modelos hidrológicos capaces de representar en condiciones históricas y futuras el caudal de ingreso a las centrales de generación a nivel mensual. Por otra parte, para estos sistemas se han deducido relaciones estadísticas entre el caudal de ingreso a las centrales y la generación hidroeléctrica. En el caso del sistema Laja, por su alta capacidad de regulación de caudal, la relación buscada incluye condiciones históricas con desfase en cuanto a las condiciones hidrológicas.

³ El SIC representa el sistema interconectado de suministro de electricidad para la zona central de Chile entre Taltal y Puerto Montt. Abastece a aproximadamente el 90% de la población del país y cuenta con más del 70% de la capacidad instalada. Mayor información del SIC se puede encontrar en www.cdec-sic.cl. El sistema que abastece el norte del país se denomina Sistema Interconecto del Norte Grande (SING) y tiene una muy baja proporción de generación sobre la base de hidroelectricidad. Mayor información del SING se puede encontrar en www.cdec-sing.cl.

MAPA IV.2
ESQUEMA DEL SISTEMA INTERCONECTADO CENTRAL^a



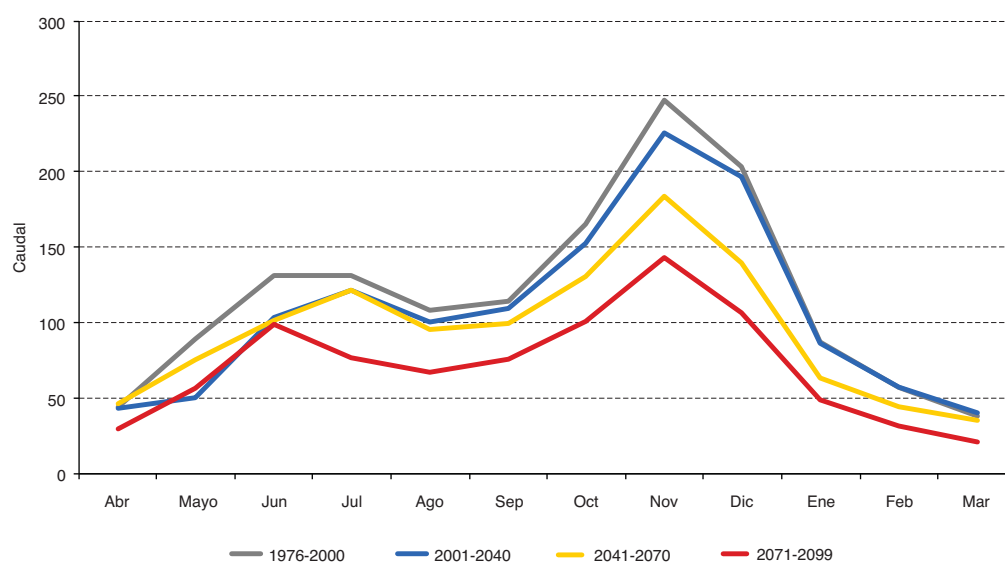
Fuente: Sobre la base del Centro de Despacho Económico de Carga-Sistema Interconectado Central (CDEC-SIC) (2011), “Estadísticas de operación 2001-2010” [en línea], Santiago de Chile, <http://www.cdec-sic/datos/anuario2011.pdf> [fecha de consulta: 9 de diciembre de 2011].

^a Se destaca la ubicación de los sistemas Maule Alto y Laja.

Utilizando tanto los modelos hidrológicos como estas relaciones estadísticas, es posible determinar cambios en la generación hidroeléctrica de acuerdo con los escenarios climatológicos futuros. Es importante destacar que, al basarse el análisis en relaciones estadísticas entre la hidrología y la generación, se ignoran aspectos clave relativos a la operación de estos sistemas como la estacionalidad de los caudales, la demanda de electricidad y la relación con otros usuarios en las cuencas (como agricultores). Finalmente, la información que se produce por medio de estos modelos en los sistemas Maule Alto y Laja se extrapola con posterioridad a otras cuencas del país donde existe generación hidroeléctrica en el SIC, para determinar de esa manera los impactos del cambio climático en el sector hidroeléctrico a nivel nacional.

De acuerdo con las proyecciones climáticas consideradas en el trabajo, se reflejan grandes cambios hidrológicos en estos sistemas hidroeléctricos. A modo de ejemplo (véanse detalles de la metodología usada y de los resultados obtenidos en el anexo V), en el gráfico IV.2 se presentan los cambios hidrológicos proyectados para la subcuenca de afluente al embalse Melado del sistema Maule Alto para el escenario A2, donde se puede apreciar, tal como fuera comentado con anterioridad, una disminución de los caudales a nivel anual, pero de manera más clara en los meses de primavera y verano (el caudal de los meses de invierno prácticamente no se ve afectado). Estos son los impactos esperados frente a las reducciones de precipitación y aumento de temperatura proyectados para esta región.

GRÁFICO IV.2
CONDICIONES HIDROLÓGICAS FUTURAS EN LA SUBCUENCA AFLUENTE A
EMBALSE MELADO DEL SISTEMA MAULE ALTO DE ACUERDO CON
EL ESCENARIO A2, CAUDAL HISTÓRICO OBSERVADO, 1976-2000
(En metros cúbicos por segundo)



Fuente: Elaboración propia.

Estos cambios en las condiciones hidrológicas tienen como consecuencia una reducción en la generación hidroeléctrica en condiciones medias. A modo de ejemplo (véanse detalles de la metodología usada y de los resultados obtenidos en el apéndice V), se presenta en el cuadro IV.3 el impacto esperado en las centrales ubicadas en la hoya intermedia del sistema Laja. Se puede apreciar que para ambos escenarios existe una disminución en la generación de hidroelectricidad.

CUADRO IV.3
GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA HISTÓRICA Y FUTURA (ESCENARIO A2)
EN LA HOYA INTERMEDIA DEL SISTEMA LAJA

Período	Generación promedio anual (GWh)	Variación (porcentajes)
1972-2000	3 000	...
2010-2040	2 727	-9
2041-2070	2 460	-18
2071-2099	2 379	-21

Fuente: Elaboración propia.

Al extrapolar estos impactos al resto de las cuencas hidroeléctricas del país (Maipo, Cachapoal-Teno y Biobío, entre otras) los resultados ofrecen proyecciones de generación que se muestran en el cuadro IV.4. Las variaciones en el potencial de generación hidroeléctrica para todo el SIC, en su configuración actual, van desde una disminución del 11% en el período cercano hasta una disminución del 22% en el período futuro lejano para el escenario A2. En el escenario B2 los impactos en el horizonte temprano son similares, sin embargo, la magnitud es menor para los escenarios más lejanos. Entre las cuencas individuales, la cuenca del río Biobío aparece como la más sensible, pero este resultado debe ser tomado con cautela debido a la escasa información histórica disponible y a posibles diferencias entre el régimen hidrológico del alto Biobío y el de la cuenca alta del río Maule.

CUADRO IV.4
PROYECCIONES DE VARIACIÓN DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN
HIDROELÉCTRICA DEL SIC, ESCENARIOS A2 Y B2
(En GWh)

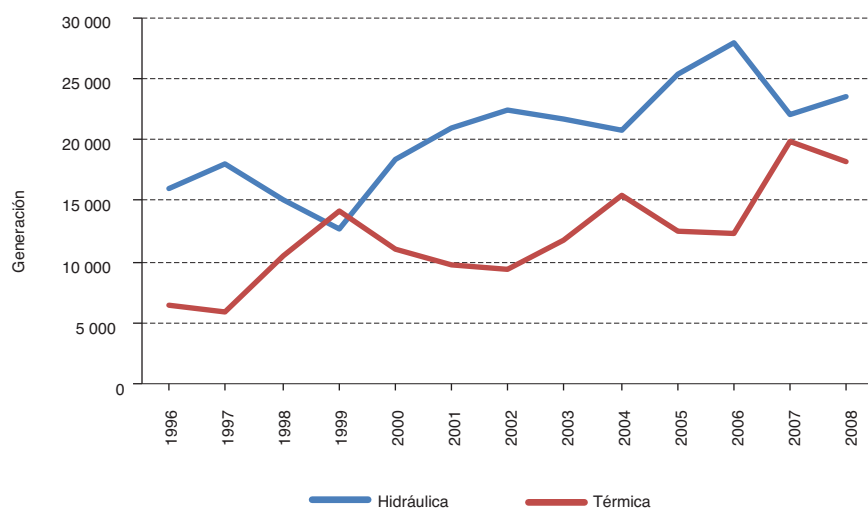
	Aconcagua	Maipo	Cachapoal	Biobío	Maule	Laja	Otras sur	Total
Período de referencia	1996-2008	1996-2008	1996-2008	2004-2008	1976-2008	1973-2000	1996-2008	NA
Energía anual base	756	1 584	1 555	4 798	7 282	4 508	455	20 938
Escenario A2, variaciones porcentuales								
	Aconcagua	Maipo	Cachapoal	Biobío	Maule	Laja	Otras Sur	Total
2011-2040	-4%	-1%	-10%	-33%	-3%	-7%	-3%	-11%
2041-2070	-17%	-8%	-26%	-38%	-6%	-14%	-5%	-17%
2071-2099	-18%	-9%	-27%	-47%	-11%	-17%	-8%	-22%
Escenario B2, variaciones porcentuales								
	Aconcagua	Maipo	Cachapoal	Biobío	Maule	Laja	Otras Sur	Total
2011-2040	-12%	-3%	-2%	-32%	-3%	-4%	-3%	-10%
2041-2070	-16%	-8%	-16%	-32%	-6%	-11%	-4%	-14%
2071-2099	-10%	-9%	-9%	-40%	-8%	-12%	-6%	-16%

Fuente: Elaboración propia.

Para evaluar los impactos económicos finales relacionados con esta reducción de la generación hidroeléctrica se ha asumido que, asociado a esta baja, existe un aumento en la generación termoeléctrica para compensar las pérdidas. Este supuesto se basa en la histórica correlación negativa existente entre la generación hidroeléctrica y termoeléctrica en el país tal como lo muestra el gráfico IV.3. Se supone además –para simplificar el análisis– que las centrales térmicas que reemplacen estas pérdidas operarían con carbón, que hoy día es el combustible más barato. Se reconoce que este es un supuesto simple, ya que el despacho de electricidad en el país es el resultado de un proceso de optimización económica donde se consideran precios de combustibles y costos de tecnologías de generación. Sin embargo, para obtener un cálculo más realista habría que considerar escenarios futuros (hasta 2100) de estas variables exógenas (precios y costos), así como también de diferentes políticas o medidas de mitigación de emisiones de GEI, tal como se analiza en el capítulo VI. Este tipo de análisis escapa al alcance de este trabajo. Un análisis más detallado también debiera incluir los impactos económicos asociados a la contaminación local, producto de este aumento de generación termoeléctrica.

Bajo los supuestos recién descritos se obtiene una proyección futura de, por una parte, un aumento de los costos de operación y, por otra, un aumento de las emisiones de GEI asociado a la operación de las centrales termoeléctricas. Un resumen de estos impactos se presenta en el cuadro IV.5 donde los impactos en el sector hidroeléctrico son significativos, incluso en el primer período de análisis, tanto en materia de emisión de GEI, alcanzando valores cercanos a los 3 millones de toneladas de CO₂ equivalente al año (MTCO₂e/año), como de costos económicos con valores cercanos a los 100 millones de dólares al año.

GRÁFICO IV.3
COMPARACIÓN HISTÓRICA ENTRE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA Y
TERMOELÉCTRICA EN EL SIC
(En GWh)



Fuente: Sobre la base del Centro de Despacho Económico de Carga-Sistema Interconectado Central (CDEC-SIC) (2011), “Estadísticas de operación 2001-2010” [en línea], Santiago de Chile, <http://www.cdec-sic/datos/anuario2011.pdf> [fecha de consulta: 9 de diciembre de 2011].

CUADRO IV.5
IMPACTOS ASOCIADOS AL CAMBIO CLIMÁTICO (ESCENARIOS A2 Y B2)
EN LA GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA

Período	Generación hidroeléctrica		Impactos asociados al aumento por generación termoeléctrica		
	GWh	Delta (porcentaje)	Reemplazo de generación (GWh) ^a	Emisión de GEI (tCO ₂ e/año)	Costo económico (millones de dólares/año)
1976-2000	20 938				
Escenario A2					
2011-2040	18 129	-13%	2 809	2 626 488	101
2041-2070	17 653	-16%	3 285	3 071 434	118
2071-2099	16 686	-20%	4 252	3 975 979	153
Escenario B2					
2011-2040	18 779	-10%	2 159	2 018 665	78
2041-2070	17 934	-14%	3 004	2 808 740	108
2071-2099	17 539	-16%	3 399	3 178 065	122

Fuente: Elaboración propia.

^a Equivale a la diferencia entre generación hidroeléctrica base y generación en escenario futuro.

3. Impactos en los sectores sanitario e industrial

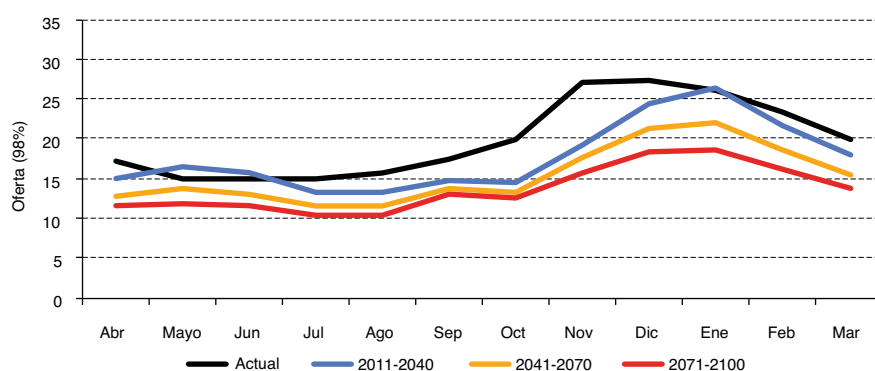
El correcto funcionamiento de los sectores sanitario e industrial depende inevitablemente de la disponibilidad de agua. Por una parte, el sector sanitario tiene la función principal de abastecer de agua potable a la población, mientras que el sector industrial, por su parte, necesita como insumo de operación agua cruda que en algunos casos es tomada directamente de la fuente de suministro de agua potable o de fuentes externas (como pozos de aguas subterráneas).

En ambos casos, los cambios en la disponibilidad de recursos hídricos van a afectar sus actividades. Pero el efecto se expresa de manera distinta. En el caso del sector sanitario, cambios hidrológicos en las fuentes de abastecimiento (ya sea en volúmenes en el tiempo y en la época del año), o en la calidad de las aguas de abastecimiento (aumento de los niveles de concentración de sedimentos) pueden afectar las operaciones en el corto y largo plazo. Si existe una disminución en la disponibilidad de recursos, una empresa sanitaria tendrá que incurrir en costos (por ejemplo, para cambios en la infraestructura o adquisición de derechos) para garantizar la satisfacción de la demanda, considerando proyecciones de mediano plazo de dicha demanda. Estos costos son finalmente traspasados a los usuarios en las tarifas de suministro. En el caso del sector industrial, los cambios en la disponibilidad de sus fuentes de abastecimiento implican aumentos en los costos de producción y, por ende, pérdidas de competitividad relativa. Para estimar los impactos del cambio climático en estos sectores es elemental, por lo tanto, evaluar los cambios en la disponibilidad de agua, relacionarlos con la demanda del recurso y, finalmente, establecer un modelo para medir los impactos económicos asociados.

En esta instancia se ha llevado a cabo este ejercicio para evaluar los impactos en el sector sanitario asociado a la cuenca del río Maipo. En instancias posteriores se puede replicar el modelo para estudiar la situación en otras cuencas del país. El hecho de que en la cuenca del río Maipo se concentre aproximadamente el 40% de la población y prácticamente el 50% del PIB del país la convierte en una cuenca estratégica. Por esta razón, es relevante analizar los impactos del cambio climático para el sector sanitario que opera en esta cuenca. Este sector se ve representado en la actualidad por la empresa Aguas Andinas, que abastece a prácticamente la totalidad de la población de la cuenca.

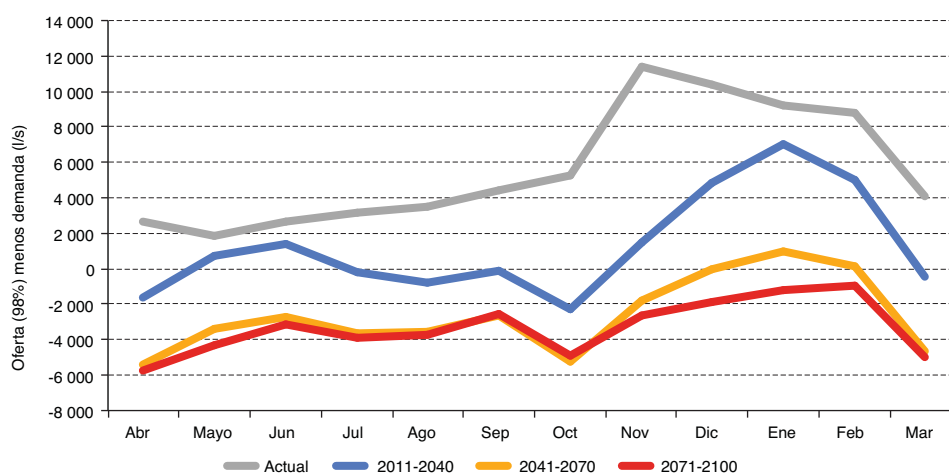
El análisis de impactos en el sector sanitario de esta cuenca se basa en una proyección (mediante un modelo hidrológico) de la disponibilidad de recursos en la principal fuente de abastecimiento de la empresa en el río Maipo. Esta proyección considera los cambios hidrológicos y también restricciones operacionales como la tenencia de derechos de agua y la capacidad de la infraestructura de distribución. El análisis se realiza para un período crítico (98% de probabilidad de excedencia) de acuerdo con los protocolos de diseño de la empresa. Este cambio en la disponibilidad se compara luego con las proyecciones de demanda de agua potable para la región. En el gráfico IV.4 se aprecia el cambio en la disponibilidad en los períodos futuros. La demanda de agua para la región, producto del aumento de la población, sube de 14 a 18 m³/s en valores medios anuales entre la situación actual y el período intermedio, y baja a 17 m³/s en el período tardío. Comparando la oferta y demanda de agua se evidencian meses con déficit (véase el gráfico IV.5). Por ejemplo para el mes de octubre, en el período 2071-

GRÁFICO IV.4
OFERTA DE AGUA PARA LA EMPRESA AGUAS ANDINAS
EN LA REGIÓN METROPOLITANA, ESCENARIO A2
(En metros cúbicos por segundo)



Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO IV.5
COMPARACIÓN ENTRE OFERTA Y DEMANDA DE AGUA PARA EL GRUPO AGUAS^a



Fuente: Elaboración propia.

^a No considera disponibilidad para localidades.

2100, existiría un déficit de 6 m³/s entre la disponibilidad natural y la demanda de agua. A modo de referencia, es importante destacar que el caudal disponible total en el río Maipo en el lugar de toma de Aguas Andinas para la misma probabilidad de excedencia es de 30 a 40 m³/s, siendo este caudal usado actualmente en su mayoría por el sector agrícola.

En caso de que la demanda de agua supere la oferta se asume que la empresa tiene que incurrir en costos para garantizar el correcto suministro en el futuro. El supuesto de este trabajo es que este costo se manifiesta en términos de compra de derechos de agua, la cual tiene que tomar en cuenta que los cambios en la disponibilidad promedio de agua en el río inciden en el precio al que se transan estos derechos. Todos estos efectos se han considerado para estimar los impactos económicos asociados al sector sanitario en la cuenca del Maipo que se resumen en el cuadro IV.6.

Se puede observar que, con ciertas diferencias menores, especialmente en el primer período de análisis, los costos para el sector bordearían los 2 millones de dólares al año, lo que significaría un aumento de aproximadamente dos dólares al año en la cuenta del agua de una familia promedio. Es esperable que este cambio en las tarifas no motive una reacción en los hábitos de consumo de los habitantes de la región. No obstante, es probable que este sea solo uno de los costos en los que la empresa tenga que incurrir para asegurar el correcto suministro de agua, ya que probablemente también existirán costos asociados a cambios en la infraestructura (por ejemplo, no queda claro con la metodología utilizada si el embalse El Yeso tiene las condiciones suficientes para seguir operando de manera adecuada frente a los cambios hidrológicos que se proyectan a futuro) o costos asociados a problemas en la calidad del agua (como el aumento de la concentración de sedimentos producto del aumento de la altura de la isoterma cero). Por todas estas razones se estima que la compra de derechos de agua representaría, en este caso, un límite inferior con respecto a los impactos económicos en la operación del sistema de distribución de agua potable en la Región Metropolitana. También es importante considerar que en el análisis no se ha tomado en cuenta la relación que tiene el sector con otros sectores usuarios del agua en la cuenca, como el sector agrícola, y los posibles problemas de gestión de los recursos y acceso al mercado de derechos de agua que podrían surgir en el futuro, producto de los cambios hidrológicos proyectados.

CUADRO IV. 6
IMPACTOS ASOCIADOS AL CAMBIO CLIMÁTICO (ESCENARIOS A2 Y B2)
EN EL SECTOR SANITARIO DE LA REGION METROPOLITANA

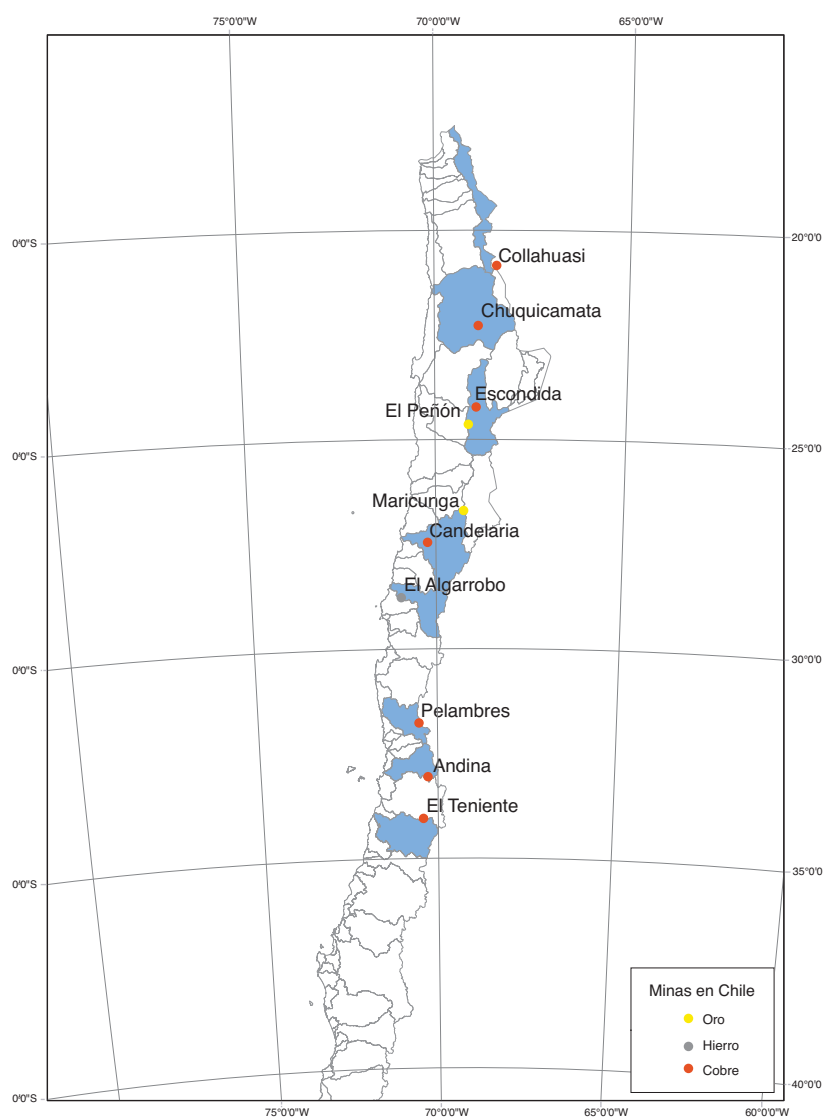
Período	Compra de acciones	Precio (dólares/acción)	Costo (millones de dólares)	Costo (millones de dólares/año)
Escenario A2				
2011-2040	634	52 233	33	1,1
2041-2070	951	62 313	59	2,0
2071-2099	441	67 353	30	1,0
Escenario B2				
2011-2040	1 121	52 233	59	2,0
2041-2070	904	62 313	56	1,9
2071-2099	6	67 353	0	0,0

Fuente: Elaboración propia.

4. Impactos en el sector minero

El sector minero en Chile representa un 8% del PIB nacional (véase el mapa IV.3) y un porcentaje mayor en términos de aporte a las exportaciones, lo que lo convierte claramente en un sector de relevancia estratégica desde el punto de vista económico para el país. Por otra parte, una de las variables más significativas de todo proyecto minero, tanto en términos de las operaciones actuales como de la materialización de los proyectos futuros, es la disponibilidad del recurso hídrico. Todo proceso de beneficio de minerales, ya sea flotación, lixiviación u otro, requiere de agua para su ejecución. Los cambios en la disponibilidad de recursos hídricos tienen, en este sentido, el potencial de aumentar las actividades de las faenas mineras y sus costos de operación asociados. Para estudiar la situación futura, en cuanto a la disponibilidad del recurso para la minería del país, se ha llevado a cabo un análisis basado en la perturbación –similar al esquema utilizado para el caso del riego– de las condiciones climáticas imperantes en las cuencas hidrológicas donde hoy existen faenas mineras. En el análisis se

MAPA IV.3
UBICACIÓN DE LAS MINAS SELECCIONADAS



Fuente: Elaboración propia.

han incluido las minas de cobre –el mineral que aporta en gran medida el valor económico del sector–, hierro y oro de mayor producción ubicadas entre las regiones de Arica y Parinacota y O’Higgins. En el mapa IV.3 se muestra la ubicación de las minas seleccionadas y las cuencas donde se ubican. Estas últimas fueron clasificadas de acuerdo con las condiciones hidrológicas imperantes en tres grupos: déficit (precipitaciones anuales menores a 100mm), transición (entre 100mm y 500mm) o superávit (mayores a 500mm). En la actualidad, se estima que el 78% de la producción de cobre del país proviene de minas ubicadas en cuencas con déficit.

En el cuadro IV.7 se muestran los resultados de la metodología aplicada para las minas seleccionadas en el estudio. Se presentan las condiciones climáticas históricas y los cambios proyectados en el período 2010-2040 como un delta de variación en el caso de la temperatura y como un porcentaje de variación para el caso de la precipitación. Como se puede observar, hay un aumento proyectado en la temperatura del orden de 0,5 °C a 1 °C. En el caso de las proyecciones de precipitación, todas las cuencas presentan una reducción, variando entre un -5% y un -15%. También se muestran los cambios en la disponibilidad hídrica para estas cuencas. Es importante tener en cuenta que la metodología utilizada es, en algunos casos, insensible a pequeños cambios e incapaz de arrojar un resultado en términos relativos cuando se tiene como base una disponibilidad hidrológica igual a 0 mm, como sucede en algunas de las cuencas consideradas.

CUADRO IV.7
CAMBIOS CLIMÁTICOS Y DE DISPONIBILIDAD HIDROLÓGICA EN CUENCAS
DONDE SE DESARROLLAN ACTIVIDADES MINERAS

Mina	Cuenca	Pp. (mm/año)	T media (°C)	Q 1960-1990 (mm/año)	Q 2011-2040 (mm/año)	Delta Pp. (porcentajes)	Delta T (°C)	Delta Q (porcentajes)
Escondida	Endorreicas Salar Atacama - Vertiente Pacífico	91,7	10,2	0,0	0,0	-13	0,7	-
Pelambres	Río Choapa	326	14,4	54,2	43,6	-7	0,4	-19,5
El Teniente	Río Rapel (Río Cachapoal)	1 595	14,0	1 115	1 068,5	-5,5	0,4	-4,2
Andina	Río Aconcagua (Río Colorado)	720	14,2	373	356,0	-4,9	1,0	-4,6
Chuquicamata	Río Loa (San Pedro de Chonchi)	141	8,5	8,5	4,8	-12,9	0,9	-44,0
Collahuasi	Altiplánicas (Salar de Coposa)	169	4,0	0,0	0,0	-11,2	0,9	-
Candelaria	Río Copiapó (Quebrada Paipote)	43	16,2	0,3	0,0	-12,1	0,5	-100,0
El Algarrobo	Río Huasco	175	14,5	5,5	0,7	-15,5	0,9	-88,2
Maricunga	Río Copiapó (Salar de Maricunga)	153	2,5	0,0	0,0	-7,8	0,5	-
El Peñón	Endorreicas Salar Atacama - Vertiente Pacífico	91,7	10,2	0,0	0,0	-13	0,7	-

Fuente: Elaboración propia.

Notas: Pp. = Precipitación anual promedio; T = Temperatura promedio; Q = Disponibilidad hidrológica en la cuenca donde la mina esté ubicada (no necesariamente la disponibilidad real de la mina); Delta Pp. = Cambios porcentuales en precipitación; Delta Q = Cambios porcentuales en caudal; Delta T = Cambio en grados de temperatura. Los cambios están asociados al escenario A2 en el período temprano.

Además, como puede apreciarse en el cuadro IV.7, ninguna de las cuencas mineras de Chile tiene mejoras hidrológicas, manteniéndose la gran mayoría en estado de déficit hídrico. Se prevé, en este sentido, que en el futuro se acentúen los conflictos existentes con respecto a la utilización de los recursos hídricos en estas cuencas. En las cuencas con déficit, el crecimiento que se espera en la producción minera (históricamente la producción de cobre ha aumentado a una tasa del 2,5% anual) posiblemente inducirá a las compañías dueñas de estas minas, y de otras que se ubican en las mismas cuencas, a tomar medidas para minimizar el costo del agua adicional que se utilice. La minimización del costo del déficit en la provisión de agua en el futuro considera diversas medidas, como aumentar las tasas de recirculación o desalinizar agua de mar. Esta última alternativa puede implicar un costo económico alto para las empresas y un aumento significativo en las emisiones de GEI de la industria, en especial en el norte grande, en que el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING) presenta una composición casi exclusiva de centrales térmicas, sobre todo a carbón. Para minas ubicadas en la cordillera, y considerando tecnologías actuales de reducción del uso del agua en las faenas, se estima que el costo asociado a desalinizar agua (y llevarla a la mina) bordearía los 6 y los 20 centavos por libra de cobre dependiendo de la altura y distancia de la costa, por lo que este factor puede llegar a representar hasta un 20% del costo de producción de algunas empresas⁴. En el caso de las mineras que se encuentran cerca de la costa y a baja altura sobre el nivel del mar, el costo para utilizar agua desalinizada baja considerablemente, 1 y hasta 3 centavos por libra de cobre, representando un valor más absorbible para la minería. Con respecto a las emisiones de GEI, se puede estimar que estas estarían en torno a 0,1 tCO₂e por cada tonelada de cobre producida, si la opción de abastecimiento de agua en caso de déficit se relaciona con la desalinización y se considera la actual matriz de generación en el SING.

B. Sector silvoagropecuario

Por su naturaleza, el sector silvoagropecuario es uno de los sistemas socioeconómicos humanos que mayores vínculos establece con las condiciones climáticas. El prolongado período en que cultivos y plantaciones permanecen expuestos a las fluctuaciones climáticas y las claras influencias que tienen los elementos meteorológicos, tanto sobre la productividad de los cultivos como sobre la calidad de los productos cosechados y en la productividad pecuaria, hacen de esta actividad una de las más vulnerables al cambio climático.

En Chile la producción agrícola se concentra en la zona central del país, asociada a un clima mediterráneo. La superficie cultivada se encuentra estabilizada en torno a las 8,5 millones de hectáreas, las que han cambiado su estructuración durante las dos últimas décadas, aumentando el porcentaje de tierras orientadas a la producción frutícola y vitivinícola. La superficie regada también se encuentra estabilizada, en torno a un 13% de la superficie agrícola total, tendiendo a aumentar los sistemas de riego tecnificado en reemplazo de sistemas convencionales (véase el cuadro IV.8).

El tipo de actividad agrícola –cultivos anuales, frutales, ganadería y horticultura, entre otros–, es definido por una combinación entre la oferta del ambiente biofísico –suelos, clima, hidrología–, las características de la población –rasgos culturales, sociales y económicos– y la adaptabilidad de las especies y variedades. Es por ello que los análisis de impacto deben ser abordados con cautela, y se debe tener el cuidado de no extrapolar magnitudes y cifras a todo el territorio. Aun así, existen referencias de estudios sectoriales que permiten rescatar elementos generales, que veremos a continuación, en términos de impactos sobre la productividad agrícola.

⁴ En este análisis se ha utilizado un precio de electricidad equivalente al precio de nudo de abril de 2009 para el sistema SING. Este valor equivale a 109 dólares/KWh. Se utilizan las tasas de emisión de GEI del SING de acuerdo con POCH Ambiental (2009).

CUADRO IV.8
SUPERFICIE AGRÍCOLA REGADA POR REGIÓN
(En hectáreas)

REGIÓN	Superficie agrícola total	Superficie regada
Total del país	8 528 858	1 093 812
I de Tarapacá	42 972	1 133
II de Antofagasta	4 911	2 296
III de Atacama	1 520 755	19 545
IV de Coquimbo	1 577 208	75 709
V de Valparaíso	633 335	86 156
VI de O'Higgins	665 118	210 691
VII del Maule	926 351	299 060
VIII del Biobío	706 841	166 455
IX de la Araucanía	504 938	49 771
X de Los Lagos	64 167	4 418
XI Aysén	137 324	2 767
XXII de Magallanes y Antártica	690 524	19 794
Región Metropolitana	810 137	136 732
XIV de Los Ríos	159 417	8 117
XV de Arica y Parinacota	84 859	11 168

Fuente: Instituto Nacional de Estadísticas (INE), “Resultados del VIII Censo Nacional Agropecuario” [en línea], Santiago de Chile, 2007, <http://www.censoagropecuario.cl/noticias/09/07042009.html> [fecha de consulta: 9 de diciembre de 2011].

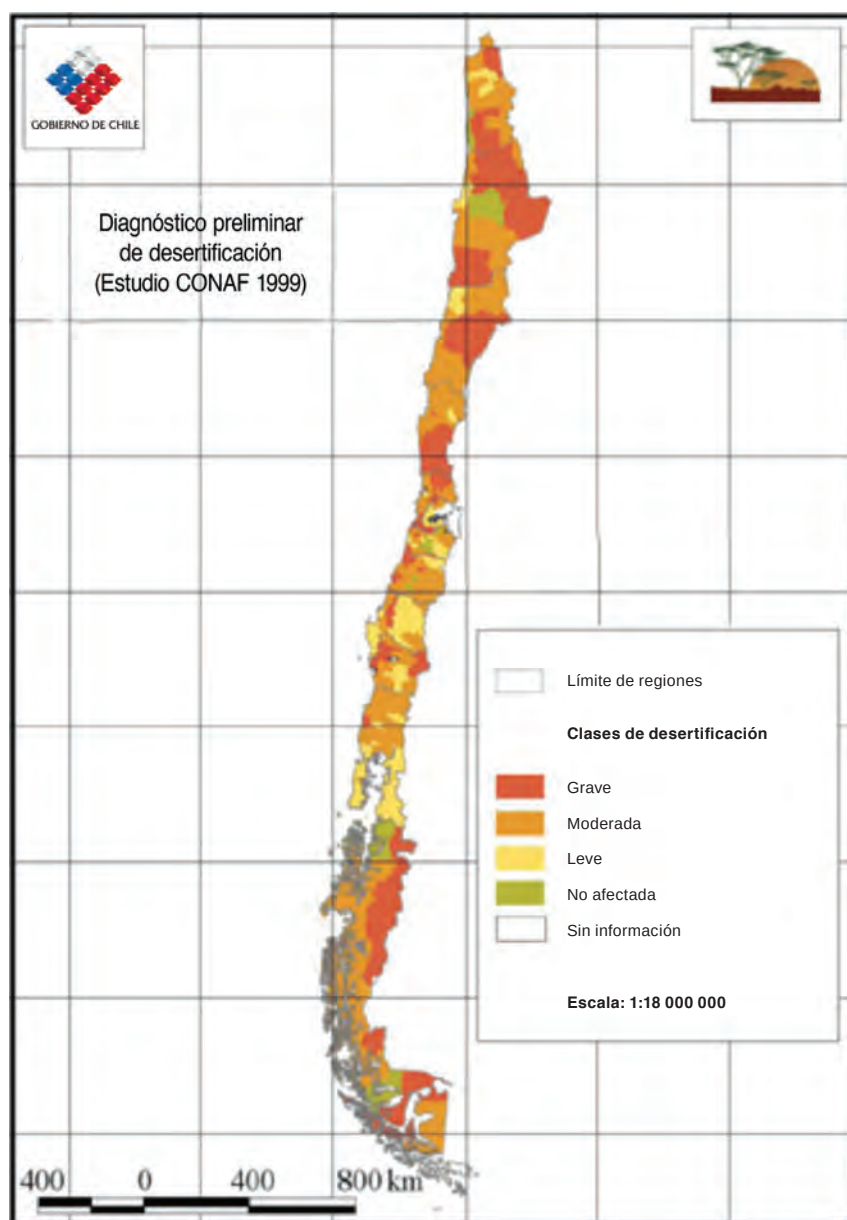
El sector pecuario chileno se encuentra bastante diversificado y presenta una relativamente alta segmentación por regiones geográficas. Así, la producción de aves y cerdo, y una buena parte de la actividad lechera, se encuentra en las zonas centro norte y centro. La actividad ganadera extensiva de carne y leche muestra un total de 3,5 millones de cabezas de ganado en todo el país. Sin embargo, se concentra fuertemente en las regiones centro sur y sur (solo la X región muestra un 39% de las existencias de la industria bovina del país), donde la combinación de recursos climáticos y edáficos permite la utilización de pasturas naturales y mejoradas. En zonas más australes se concentra la actividad ovina, que comparte algunas características con la anterior respecto de la dependencia del clima y de la productividad primaria de las praderas.

De acuerdo con la Corporación Chilena de la Madera (CORMA, 2009), el sector forestal chileno cuenta con una superficie de 15,7 millones de hectáreas de las cuales 13,56 millones corresponden a bosque nativo y 2,1 millones a bosques cultivados. Esta industria basa su actividad principalmente en plantaciones, sobre todo de las especies pino radiata y *eucaliptus globulus* y *nitens*, que se replantan tan pronto son cortados, por lo que constituyen una fuente renovable del recurso. En Chile se plantan anualmente un promedio de 45.000 hectáreas nuevas y se replantan aproximadamente 60.000 hectáreas, garantizando la sustentabilidad del sector.

1. Impacto en la calidad de los suelos

La degradación del suelo agrícola es un problema relevante a nivel nacional. La falta de un manejo eficaz del suelo y de objetivos de conservación, incluido el establecimiento de plantaciones forestales, ha significado una importante pérdida de la fertilidad del suelo, desertificación e inundaciones. Algunas estimaciones señalan que la erosión afectará casi a la mitad de la superficie total, y que 9 millones de hectáreas presentan degradación en mayor o menor grado. El mapa IV.4 ilustra la desertificación en Chile. El área afectada crece aproximadamente 40.000 hectáreas por año y la desertificación se está

MAPA IV.4
DESERTIFICACIÓN EN CHILE



Fuente: Corporación Nacional Forestal de Chile (CONAF), *Tercer informe nacional 2006*, Santiago de Chile [en línea] <http://www.unccd.int/cop/reports/lac/national/2006/chile-spa.pdf> [fecha de consulta: 25 de enero de 2012].

extendiendo a un ritmo de 6.000 hectáreas por año. La salinización del suelo en las áreas de regadío se explica por el uso de aguas salinas para riego, junto a técnicas de producción intensivas combinadas con un uso poco eficiente del agua (OCDE y CEPAL, 2005).

Con respecto a la situación en el futuro, estudios realizados por AGRIMED (2008a) muestran que las zonas con mayores riesgos de erosión por lluvias, tanto en la actualidad como en escenarios de cambio climático, corresponden a las zonas ubicadas en la cordillera de la costa y precordillera de los Andes. Se espera que esta situación se incremente en el futuro, ya que, aun cuando en gran parte de la zona de secano se han reducido las precipitaciones, se proyecta una disminución de biomasa de la cubierta vegetal, lo que aumentaría el nivel de vulnerabilidad de los suelos frente a la erosión. Esto podría contribuir a una pérdida en los factores productivos en el sector silvoagropecuario en el futuro.

2. Impacto en la productividad

Los impactos en la productividad de las nuevas condiciones climatológicas se derivan del uso de un modelo de simulación que, alimentado con datos climáticos –tanto históricos como futuros–, permite realizar una simulación del comportamiento productivo de cada cultivo y plantación forestal a nivel comunal (AGRIMED, 2008a). El modelo también contempla una simulación del balance hídrico, que considera un módulo que regula el riego suponiendo restricciones en las dotaciones de agua disponible durante toda la temporada. Los detalles metodológicos de la herramienta usada se presentan en el apéndice IVb.

A partir de este modelo se han evaluado cambios en la productividad de los principales grupos de cultivos anuales: frutales –incluidas vides–, praderas y plantaciones forestales. Estos resultados se han hecho para los dos escenarios de cambio climático (A2 y B2) y dos períodos temporales –intermedio y tardío, según las definiciones consideradas en este estudio–⁵. En el mapa IV.5 se presentan, a modo de ejemplo, los cambios en la productividad (en términos relativos) esperados para el período intermedio en cuatro casos: trigo en secano, vides, praderas naturales y plantaciones de pino radiata. Además, se ha incluido en los análisis el impacto en la productividad asociado a la reducción de disponibilidad de agua para riego, cuyo cálculo fuera descrito anteriormente. Se describen a continuación los impactos para los diferentes rubros silvoagropecuarios.

a) Cultivos anuales

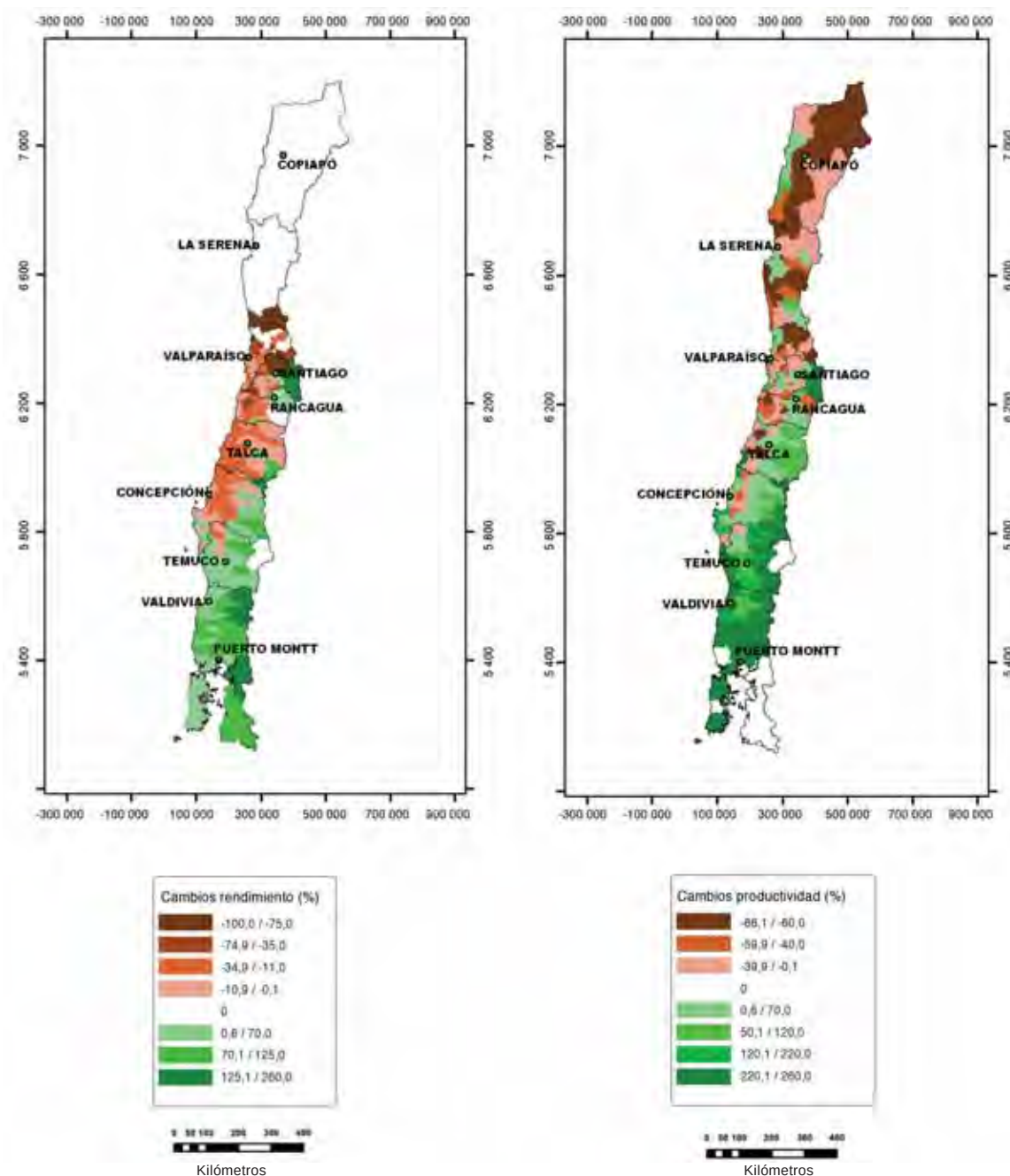
De acuerdo con los cambios climáticos proyectados, se espera que la agricultura de secano se vea afectada por los cambios en temperatura y precipitación, mientras que la agricultura de riego solo se verá afectada por el alza en la temperatura en aquellos lugares donde no se proyecten cambios en la disponibilidad de agua para riego. Respecto de los cultivos de invierno, especialmente cereales como trigo (véase el mapa IV.5), avena y cebada, se ven beneficiados por el alza en la temperatura en aquellas localidades donde las precipitaciones son suficientes para cubrir sus requerimientos hídricos. En general, las modificaciones en el régimen térmico permitirán cambiar sus fechas de siembra, lo que reduciría en parte los efectos negativos provocados por la disminución de las precipitaciones. Además, se espera que una menor frecuencia e intensidad de heladas permita adelantar en varios meses la fecha de siembra de los cultivos de verano, para aprovechar las precipitaciones invernales. Sin embargo, en zonas bajo riego, estos podrían sufrir reducciones en su productividad. También se estima que en zonas donde las temperaturas son limitantes, como es el caso de la costa y la precordillera, se pueda observar un aumento de los rendimientos. En términos generales, se aprecian mejoras en la productividad en el sur del país y en partes del valle central, y pérdidas de productividad en el resto del país, especialmente en aquellas regiones que presenten restricciones de riego.

⁵ Es importante mencionar un cambio de nomenclatura con respecto a los resultados previamente entregados de acuerdo con esta modelación (AGRIMED, 2008a): los escenarios A240 y B240 usados con anterioridad corresponden, en este caso, a los resultados en el período intermedio; y los escenarios A270 y B270 al período tardío.

MAPA IV.5
CAMBIOS EN LA PRODUCTIVIDAD EN EL PERÍODO INTERMEDIO
PARA TRIGO EN SECANO, VIDES, PRADERAS NATURALES Y PINO RADIATA
PARA EL ESCENARIO A2
(En porcentajes)

a) Trigo en seco

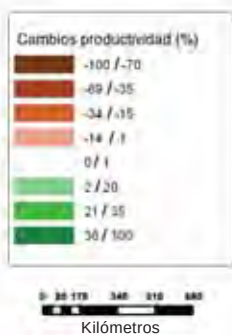
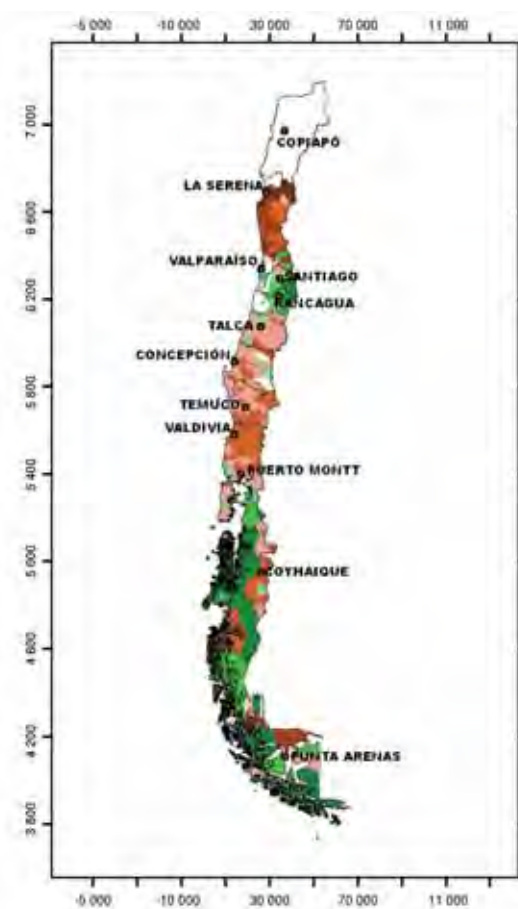
b) Vides



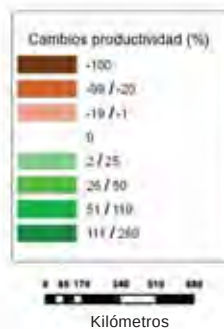
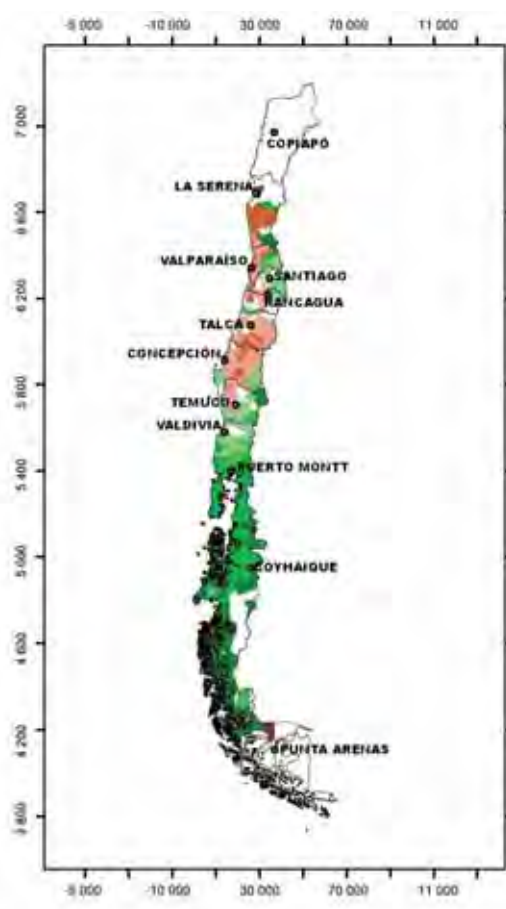
(continúa)

Mapa IV.5 (conclusión)

c) Praderas naturales



d) Pino radiata



Fuente: Elaboración propia.

b) Fruticultura y viticultura

En este caso se espera que, de acuerdo con las proyecciones climáticas, los frutales de hoja caduca puedan extender su área de cultivo hacia las regiones del Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos (sur del país). Las temperaturas benignas invernales favorecerían a las especies subtropicales, que podrían mejorar sensiblemente su potencial en casi todas las regiones del país. En las regiones productivas del centro-norte habría importantes reducciones en la productividad, en especial donde se proyectan disminuciones en la disponibilidad de agua para riego. En el caso de la viticultura, se espera que, en el norte del país y en algunas regiones de la zona central, se deterioren las condiciones productivas como consecuencia de la reducción del período de fructificación debido al alza en las temperaturas. Esta pérdida podría ser compensada en parte con variedades tardías. También se presentarían pérdidas de productividad asociadas a la menor disponibilidad de agua para riego. En la zona sur la vid se ve muy beneficiada por la atenuación del régimen de heladas hacia los sectores interiores del territorio. Además del beneficio productivo que esto significa, podría producirse un aumento de la precocidad en la maduración, perdiendo con ello las ventajas comparativas actuales que exhibe el norte del territorio.

c) Praderas y ganadería

Los escenarios climáticos proyectados para Chile durante este siglo parecen indicar que los cambios para el sector ganadero pueden ser negativos o positivos, dependiendo de la región de producción. En el caso de la ganadería ovina y bovina, los efectos del cambio climático se traducirán principalmente en cambios de la estacionalidad de la producción de las praderas, con diferencias más o menos marcadas de acuerdo con la zona geográfica correspondiente.

Asociado a estos cambios proyectados en la productividad de las praderas se ha llevado a cabo una evaluación de los impactos en la rentabilidad del sector ganadero, por medio de un análisis de tres casos de estudio dentro de las regiones ganaderas más importantes del país y que pretenden abarcar diferentes especies y sistemas productivos. Para el primer caso, crianza de bovinos en la región de la Araucanía, los resultados pronostican una baja de producción en el escenario A2 y un aumento del escenario B2; en el segundo caso, de producción de leche y carne en la región de Los Ríos, se pronostican aumentos de productividad en ambos escenarios, aunque los márgenes son pequeños y no consideran el valor alternativo del uso de la tierra. Para el tercer caso, productor ovino de carne y lana en la región de Aysén, la producción muestra pequeños aumentos en ambos productos y escenarios. Se desprende de estos análisis que la situación con respecto a los impactos del cambio climático en el sector ganadero es ambigua, por lo que no es posible llegar a conclusiones importantes con la información que se tiene hasta el momento. En el apéndice IVc se presenta con más detalle el trabajo realizado en los casos de estudio del sector pecuario.

d) Plantaciones forestales

En los estudios desarrollados por AGRIMED (2008b) se muestra que en las plantaciones de pino radiata, las condiciones de producción se deterioran considerablemente en el centro-norte –regiones entre Coquimbo y Metropolitana– como consecuencia del aumento del déficit hídrico. Igual situación se verifica en el caso de los eucaliptos. No obstante, a partir de la región de la Araucanía, se proyecta un aumento del potencial productivo de estas especies, como consecuencia del mejoramiento de las temperaturas invernales y de la disminución del número e intensidad de las heladas. Lo anterior debe ser mirado con cautela, ya que los cambios se producen en períodos más largos y sus efectos pueden verse enmascarados por la inercia de los bosques a la respuesta al cambio climático (ciclos de vida más largos).

Todos los cambios en la productividad que han sido descritos van a producir potencialmente cambios en los patrones del uso de la tierra en las superficies agrícolas. Estos cambios son evaluados en una sección posterior.

3. Reasignación del uso del suelo silvoagropecuario: impactos económicos y en la mano de obra⁶

Las nuevas productividades de las distintas especies del sector silvoagropecuario, asociadas a los cambios en las condiciones climáticas se traducen (manteniendo precios relativos de manera constante) en diferentes rentabilidades económicas. Cuando existen cambios relativos en estas rentabilidades existen, a su vez, reasignaciones potenciales en la composición del uso de la tierra (adaptación endógena)⁷. Los impactos económicos asociados al sector silvoagropecuario, por lo tanto, no pueden simplemente resultar de los cambios en la productividad, sino que tienen que reflejar el dinamismo del sector y su potencial para reaccionar frente a los cambios percibidos. Estos impactos, entonces, van a estar supeditados a la reasignación esperada en el uso del suelo. Estas reasignaciones también implican cambios en la demanda de mano de obra en el sector, que son analizados en una sección posterior.

Para estimar el cambio en el uso del suelo producto de las modificaciones en la rentabilidad, se desarrolló un modelo econométrico que permite determinar la composición actual del uso de la tierra en función de las productividades y utilidades netas actuales de cada cultivo. Para el desarrollo del modelo se utilizaron datos del VI y VII Censo Agropecuario (INE, 1997 y 2007). Para ambos años, se calculó la superficie total dedicada a la agricultura, la superficie de cada especie cultivada y su proporción en el total dedicada a la agricultura en cada comuna. Asimismo, se utilizaron fichas técnicas para calcular los rendimientos de las especies, sus costos fijos y variables, lo que finalmente permite estimar los ingresos netos por hectárea obtenidos para cada especie en cada comuna del país. No se considera el precio de la tierra. Este modelo es posteriormente utilizado considerando los cambios en la productividad proyectados a futuro, de acuerdo con lo presentado con anterioridad. La superficie máxima dedicada a actividades silvoagropecuarias se mantiene constante en los escenarios futuros. Es decir, no se permite en el modelo la extensión de la superficie agrícola total por comuna (esta incluye praderas y plantaciones forestales, entre otros usos). El cálculo de los ingresos netos para la línea de base y escenarios futuros se hace utilizando los precios medios de los últimos diez años, para evitar efectos puntuales por desviaciones ocurridas en un año particular y hacer comparables las estimaciones. Sin embargo, en los casos en que ocurren significativos aumentos o disminuciones en la producción se ajustan los precios de aquellos productos que tienen demandas elásticas.

En la evaluación de los impactos finales se ha considerado que existe un cierto rezago con respecto a la capacidad de adaptación endógena que tiene el sector. En este sentido, se sigue la siguiente lógica: los cambios climáticos inciden en cambios en la productividad que son percibidos por los agricultores de manera paulatina (producto de la incertidumbre introducida por la variabilidad climática). Esto motiva, por su parte, una reacción que también es paulatina, en la que existen precursores o adelantados en el proceso de adaptación y seguidores posteriores. Se ha considerado de manera arbitraria, pero conveniente de acuerdo con la metodología genérica seguida en el estudio, que el rezago para una completa adaptación es de 30 años. Así, los impactos económicos en el período intermedio, por ejemplo, incluyen la siguiente estructura: un uso del suelo que se determina de acuerdo con los cambios en la productividad del primer período, pero ingresos netos asociados a la productividad del período siguiente.

⁶ El análisis que se presenta en esta sección es fruto de la investigación del Departamento de Economía Agraria de la Pontificia Universidad Católica de Chile: “Evaluación socioeconómica del impacto del cambio climático en el sector silvoagropecuario”. Ha sido realizado a solicitud de la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA) y de la investigación hecha por ese mismo departamento para la CEPAL. En el anexo IV.d se presenta con mayor detalle el trabajo llevado a cabo.

⁷ Otros elementos que determinan el uso del territorio, por ejemplo áreas protegidas, bosques nativos o extensión de desiertos no son analizadas de manera explícita en esta sección. En otras partes del documento estos temas son mencionados brevemente.

Es importante considerar que los procesos de adaptación endógenos que se plantean en esta metodología tienen un costo de implementación asociado. El más obvio, y que ha sido incorporado en el análisis, es el potencial aumento de la superficie cultivada bajo riego, ya sea por expansión de la superficie de cultivos que tiene riego o cambio de cultivos de secano a riego. Este tipo de costo, en términos de instalación de infraestructura de riego intrapredial, ha sido incorporado en los balances de ingresos netos que se presentan a continuación.

Los resultados de la aplicación de esta metodología se presentan en términos de cambios en la superficie para los grandes grupos de especies y cambios en los ingresos netos. Además, se presentan los cambios en el requerimiento de mano de obra total y femenina. La poca disponibilidad de datos en las regiones extremas limita la confiabilidad de los resultados obtenidos, razón por la cual no se presentan los resultados asociados a estas regiones.

a) Cambio del uso del suelo

En los cuadros IV.9 a IV.12 se presenta la superficie dedicada a cada tipo de especie según el escenario de cambio climático. Se desprende de estos resultados que, en términos netos a nivel país, no existen grandes cambios proyectados con respecto a la utilización del suelo en términos de los pesos relativos de los tres grandes grupos considerados. A nivel regional, sí se ven cambios interesantes. Por ejemplo, en el caso de los cultivos y praderas naturales, se ven aumentos de las superficies en las regiones del Maule al norte (con excepción de la región de O'Higgins) y disminuciones al sur. En el caso de los frutales, se puede apreciar un cambio inverso al anterior. Es decir, disminución de la superficie con frutales del Maule al norte (con excepción de la región de O'Higgins) y aumento al sur. Finalmente, la tendencia con respecto a las plantaciones forestales es similar al caso de los frutales con la excepción de la región de Biobío, donde hoy se concentra la mayor superficie de plantaciones y donde los cambios proyectados son más ambiguos. Se debe notar que las superficies presentadas en los períodos 2040-2070 son iguales en ambos escenarios, ya que estas provienen del cambio en el clima que se observa en el período temprano y que es común a ambos escenarios, pero que solo se manifiesta en el siguiente período.

CUADRO IV.9
SUPERFICIE DEDICADA A CULTIVOS SEGÚN EL ESCENARIO
DE CAMBIO CLIMÁTICO
(En miles de hectáreas)

Región	Línea de base	Escenario A2		Escenario B2	
		2040-2070	2070-2100	2040-2070	2070-2100
Atacama	0	0	0	0	0
Coquimbo	6	2	0	2	1
Valparaíso	6	1	0	1	1
Metropolitana	20	5	0	5	2
O'Higgins	58	32	18	32	25
Maule	84	87	86	87	93
Biobío	126	132	154	132	153
Araucanía	156	134	142	134	156
Los Ríos	23	12	19	12	16
Los Lagos	29	63	84	63	82
Total	508	470	505	470	530

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO IV.10
SUPERFICIE DEDICADA A FRUTALES SEGÚN EL ESCENARIO
DE CAMBIO CLIMÁTICO
(En miles de hectáreas)

Región	Línea de base	Escenario A2		Escenario B2	
		2040-2070	2070-2100	2040-2070	2070-2100
Atacama	13	10	7	10	10
Coquimbo	35	27	21	27	32
Valparaíso	53	44	44	44	49
Metropolitana	51	58	51	58	73
O'Higgins	100	110	132	110	122
Maule	79	55	60	55	59
Biobío	20	22	28	22	24
Araucanía	3	3	5	3	4
Los Ríos	1	0	0	0	0
Los Lagos	1	1	2	1	2
Total	356	331	350	331	375

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO IV.11
SUPERFICIE DEDICADA A PRADERAS NATURALES
SEGÚN EL ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO
(En miles de hectáreas)

Región	Línea de base	Escenario A2		Escenario B2	
		2040-2070	2070-2100	2040-2070	2070-2100
Atacama	92	96	100	96	96
Coquimbo	3 193	3 212	3 231	3 212	3 212
Valparaíso	356	376	384	376	373
Metropolitana	192	207	234	207	200
O'Higgins	430	434	431	434	427
Maule	1 039	1 072	1 070	1 072	1 059
Biobío	761	726	700	726	711
Araucanía	949	946	898	946	900
Los Ríos	416	406	366	406	380
Los Lagos	752	706	653	706	668
Total	8 179	8 182	8 068	8 182	8 027

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO IV.12
SUPERFICIE DEDICADA A PLANTACIONES FORESTALES
SEGÚN EL ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO
(En miles de hectáreas)

Región	Línea de base	Escenario A2		Escenario B2	
		2040-2070	2070-2100	2040-2070	2070-2100
Atacama	0	0	0	0	0
Coquimbo	3	3	4	3	4
Valparaíso	54	51	52	51	52
Metropolitana	7	6	6	6	6
O'Higgins	132	142	145	142	147
Maule	486	478	470	478	476
Biobío	962	974	964	974	955
Araucanía	563	605	642	605	625
Los Ríos	232	251	285	251	274
Los Lagos	84	95	119	95	107
Total	2 523	2 606	2 686	2 606	2 646

Fuente: Elaboración propia.

b) Cambio en los ingresos netos

En el cuadro IV.13 se presentan los resultados de los ingresos netos por región y escenario de cambio climático. Esta información se muestra también de manera gráfica en el mapa IV.6, donde se ven los cambios relativos de los ingresos netos totales con respecto a la línea de base para las diferentes regiones del país en el escenario A2. Se puede apreciar, en ambos casos, que en términos generales existen aumentos de los ingresos netos en la región del Biobío al sur y disminución de los ingresos netos al norte de esta región. En términos netos a nivel de país, se observa que los ingresos netos disminuyen en todos los escenarios evaluados con excepción del escenario B2 en el período intermedio donde se registran beneficios. En términos relativos, se puede apreciar que el sector silvoagropecuario perdería cerca de un 15% de los ingresos netos en el peor escenario y ganaría un 1% en el mejor. Las pérdidas son claramente mayores para el escenario A2. En el análisis de impactos se han incorporado los costos asociados a la introducción de infraestructura de riego en aquellas comunas que indican un aumento de la superficie bajo riego, lo que sucede de manera especial en las regiones del sur del país. Esta evaluación se ha tomado en cuenta solo a nivel intrapredial, sin considerar los costos asociados al desarrollo de infraestructura que asegure la provisión de agua de riego a la entrada de los predios.

Es importante destacar que el método de estimación aplicado utiliza información obtenida de fichas técnicas, cuyos costos productivos no están directamente ligados a las comunas del país (la unidad básica de análisis del estudio). Esta limitación lleva, inevitablemente, a que los valores de referencia utilizados para generar los ingresos netos simulados difieran de la realidad particular de cada localidad productiva.

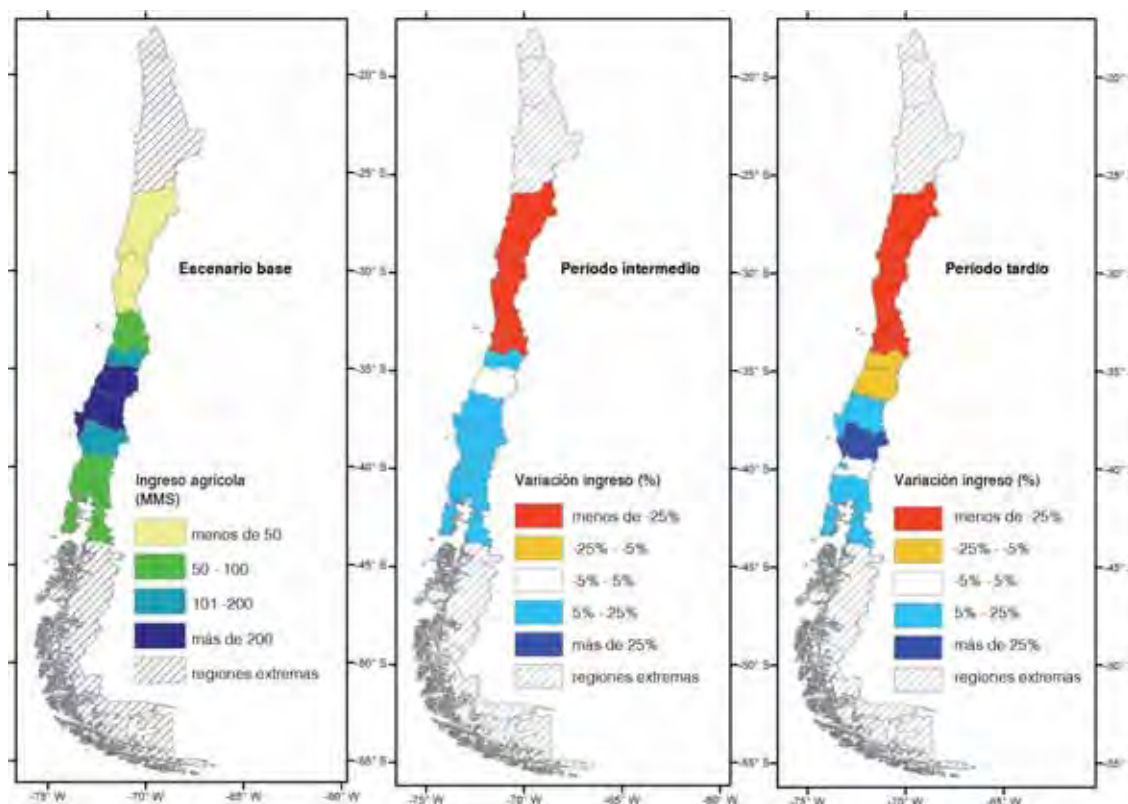
CUADRO IV.13
INGRESOS NETOS POR REGIÓN^a
(En millones de dólares de 2007)

Región	Línea de base	2010-2040	Escenario A2		Escenario B2	
			2040-2070	2070-2100	2040-2070	2070-2100
Atacama	22,4	4,8	-17,2	-6,7	-0,3	-16
Coquimbo	54,7	13,2	-38,5	-53,7	-7,9	-35,7
Valparaíso	122,7	66,3	54	13,6	97,7	73,2
Metropolitana	151,6	119,6	72,5	3,3	160,4	95,9
O'Higgins	335,3	323,3	350,4	253,9	345,3	379,1
Maule	494,6	478,4	474,3	435,4	484,4	480,4
Biobío	478,3	476,6	502,1	520,6	501,4	524,6
Araucanía	389,1	404,2	458,7	473,2	458,2	494,6
Los Ríos	209,1	212,5	214,1	220,4	212,2	215,7
Los Lagos	169,7	177,9	209,1	209,2	186,2	205,3
Total	2 427,5	2 276,7	2 279,5	2 069,0	2 437,4	2 417,0

Fuente: Elaboración propia.

^a Ingresos netos anuales. Los ingresos netos negativos indican que los agricultores están teniendo pérdidas. Las fichas técnicas representan aproximaciones de lo que ocurre en cada explotación y, como tales, capturan mejor el sentido de las variaciones más que su valor exacto. Se usan promedios de precios de diez años. Es un modelo en desequilibrio, dado que no impone una restricción de ingresos netos positivos. Esta característica permite capturar la inercia en el cambio del uso del suelo, que en el contexto del cambio climático interpretamos como el proceso de aprendizaje y adaptación a las nuevas condiciones climáticas e hídricas. El modelo no considera precios de la tierra, la productividad de los cultivos se altera por los cambios climáticos y de disponibilidad hídrica. La disponibilidad total de tierras se mantiene constante a nivel comunal. Se asume que los bienes producidos no cambian de precio, excepto en el caso en que el modelo arroja aumentos drásticamente mayores (o menores) y se considera que los precios son elásticos ante cambios en la producción nacional.

MAPA IV.6
CAMBIOS EN LOS INGRESOS NETOS DEL SECTOR
SILVOAGROPECUARIO EN EL ESCENARIO A2
(En miles de millones de dólares y porcentajes)



Fuente: Elaboración propia.

c) Cambio en la demanda de mano de obra y potenciales efectos en los procesos migratorios

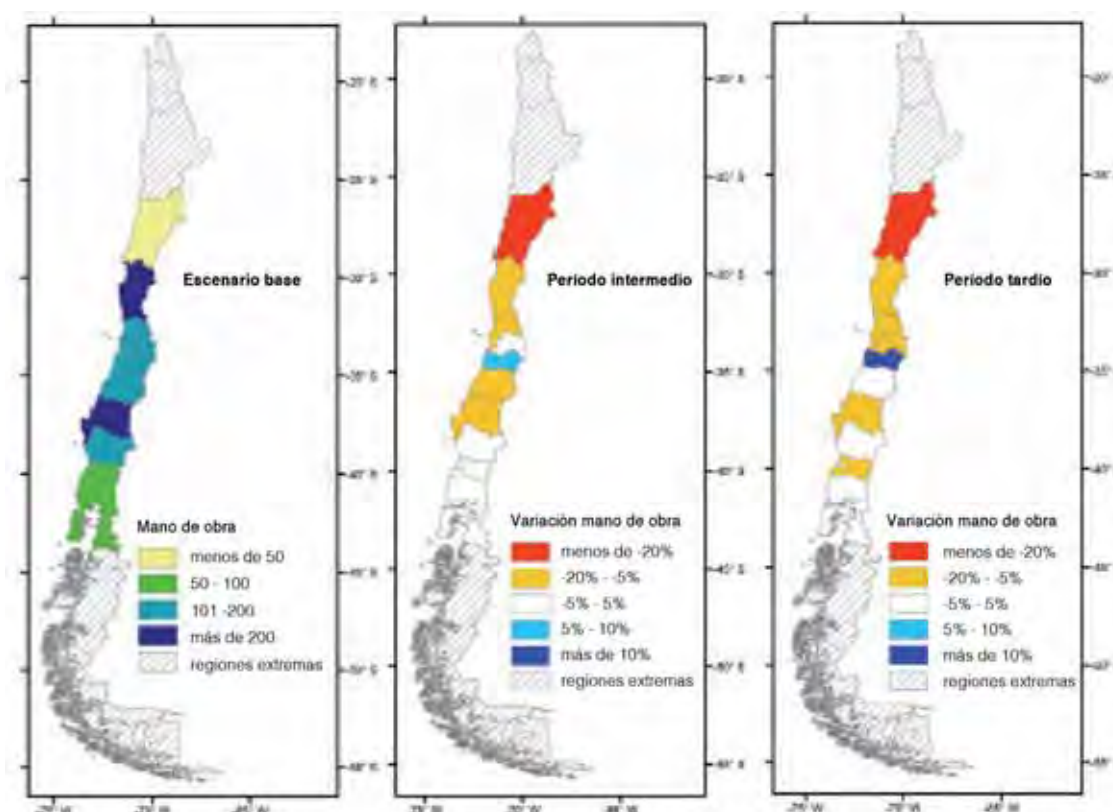
Los impactos del cambio climático finalmente afectarán de una u otra manera a la sociedad. Los cambios proyectados en la productividad agrícola, en especial en la zona centro-sur y sur del país se traducirían en cambios en la demanda de mano de obra en el sector rural. Esto implicaría, por una parte, una acentuación en la zona centro-sur de una tendencia existente en el país, que indica un constante poblamiento de las urbes en desmedro de las zonas rurales, pero en la zona sur podría ocurrir el fenómeno inverso, es decir, una inmigración atribuida a un aumento de la demanda de mano de obra. En el cuadro IV.14 se presenta el requerimiento de mano de obra en número de trabajadores equivalente al año para los diferentes escenarios futuros. La información se presenta de manera gráfica también en el mapa IV.7. Los resultados indican una reducción de la demanda de mano de obra en las regiones al norte de la Región Metropolitana. La región de O'Higgins muestra un aumento de la demanda de mano de obra y, por último, las regiones del sur del país no muestran cambios importantes. A nivel nacional se proyecta una caída en la demanda de mano de obra del sector de alrededor del 5%.

CUADRO IV.14
REQUERIMIENTO DE MANO DE OBRA
(En miles de trabajadores totales equivalentes al año)

Región	Línea de base	2010-2040	Escenario A2		Escenario B2	
			2040-2070	2070-2100	2040-2070	2070-2100
Atacama	7,00	6,21	3,72	2,43	4,43	3,53
Coquimbo	54,65	51,65	43,98	39,44	44,81	44,22
Valparaíso	27,36	24,81	19,08	17,50	20,60	20,62
Metropolitana	26,93	25,87	23,47	18,35	26,48	25,24
O'Higgins	39,20	39,37	42,28	40,87	41,78	44,23
Maule	30,94	30,16	28,06	28,72	28,28	29,20
Biobío	49,26	48,69	44,68	43,58	45,17	44,51
Araucanía	30,11	29,07	27,33	25,49	27,92	27,34
Los Ríos	12,43	11,79	10,29	9,07	10,62	9,71
Los Lagos	17,72	17,45	18,07	16,92	17,64	17,22
Total	295,60	285,07	260,96	242,38	267,73	265,83

Fuente: Elaboración propia.

MAPA IV.7
CAMBIOS EN LA DEMANDA DE MANO DE OBRA EN EL SECTOR
SILVOAGROPECUARIO EN EL ESCENARIO A2
(En miles de trabajadores y porcentajes)



Fuente: Elaboración propia.

4. Impacto en ocurrencia de plagas y enfermedades

Este es uno de los puntos en que el nivel de conocimiento nacional es más bajo con respecto a los impactos en el sector silvoagropecuario. Solo es posible plantear algunas hipótesis que requieren confirmación empírica. Entre ellas, se espera que se reduzca la incidencia de enfermedades que surgen en ambientes de alta humedad o superficies mojadas. Por ejemplo, la *Botrytis* de la vid, causada por el hongo *Botrytis cinerea*, vería reducida su incidencia, debido a que este patógeno necesita de factores ambientales como la temperatura, la humedad relativa y el agua libre para su desarrollo (Broome y otros, 1995; Bulit y Dubos, 1988; Meza, 2004).

Respecto del problema de plagas, existe la hipótesis de que un aumento de la temperatura tiende a favorecer el número de generaciones de insectos y a ampliar sus nichos ecológicos en aquellos lugares donde las condiciones invernales inducían su receso o directamente afectaban su tasa de mortalidad.

C. La biodiversidad y los ecosistemas

La amplia extensión latitudinal del territorio, sumada a su relieve, determinado principalmente por la cordillera de los Andes y la cordillera de la Costa, y a una marcada influencia oceánica son fundamentales para comprender la variedad y diversidad de los ecosistemas de Chile. Estos ecosistemas proveen una serie de servicios a la población –los llamados servicios ecosistémicos–, muchos de los cuales tienen un valor de mercado (por ejemplo, la captura de carbono en los bosques), aunque la gran mayoría no lo tiene o no se han desarrollado aún las herramientas que permitan llevar a cabo esta evaluación (como el valor del suministro de recursos hídricos en períodos críticos). Uno de los componentes asociados al valor de un ecosistema es la biodiversidad. Por ello, en este trabajo se evalúan los impactos del cambio climático relacionados con la pérdida de la biodiversidad en Chile. En este sentido, pese a aportar a un tema esencial, los resultados de este estudio deben considerarse solo como una fracción de las consecuencias económicas que se pueden proyectar en relación con el impacto del cambio climático en los ecosistemas.

En materia de conservación de la biodiversidad, Chile se caracteriza por poseer un alto nivel de endemismo, que se explica por las características del relieve. Gran parte del territorio ha sido reconocido como zona crítica (*hotspot*) en materia de biodiversidad (véase el mapa IV.8 y el mapa IV. 9). Sin embargo, no se cuenta con un sistema nacional formal de planificación territorial que permita garantizar la identificación de áreas de gran diversidad biológica ubicadas fuera de las áreas formalmente protegidas, situación que dificulta los avances en relación con el problema de la representatividad de especies en el sistema nacional de áreas protegidas, que ha llegado a cubrir alrededor de un 20% de la superficie continental, pero no provee una adecuada cobertura de la biodiversidad total del país. El mapa IV. 10 muestra la distribución espacial de la Red de Áreas Protegidas (RAP) presentes en Chile.

En este trabajo se analiza la respuesta al cambio climático de cerca de 200 especies de plantas y animales vertebrados de Chile, empleando modelos de su distribución geográfica, con el fin de evaluar las alteraciones de la biodiversidad. Esta modelación se realiza en un contexto espacialmente explícito y considerando los escenarios del cambio climático. Mayor detalle de la metodología usada y los resultados obtenidos se pueden encontrar en el apéndice VI de este documento.

Para el caso de estudio a nivel nacional, se llevó a cabo la modelación de la distribución actual y futura de 160 especies, de las que se obtuvieron datos suficientes y modelos significativos (16 especies de anfibios, 16 especies de reptiles, 36 especies de mamíferos y 92 especies de árboles y arbustos). Las consecuencias esperadas del cambio climático en Chile dependerán fundamentalmente

MAPA IV.8
HOTSPOTS DE CONSERVACIÓN A NIVEL MUNDIAL



Fuente: Conservation International (2007) [en línea] <http://www.biodiversityhotspots.org/Pages/default.aspx> [fecha de consulta: 13 de diciembre de 2011].

MAPA IV.9
DETALLE DE HOTSPOTS DE BIODIVERSIDAD EN CHILE

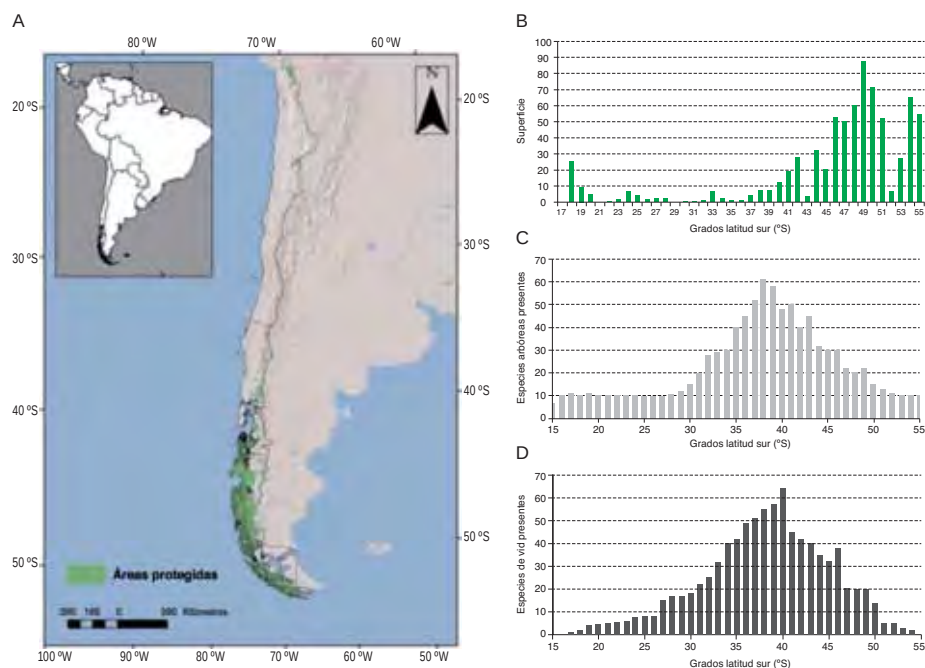


Fuente: Conservation International (2007) [en línea] <http://www.biodiversityhotspots.org/Pages/default.aspx> [fecha de consulta: 13 de diciembre de 2011].

de las capacidades de dispersión o migración a gran escala de las especies estudiadas. Con el objeto de estimar el efecto de la dispersión, se consideraron dos escenarios extremos de respuesta: uno que presupone limitaciones de dispersión, con un rango de distribución futuro que corresponde básicamente al hábitat estable (es decir, aquel que mantiene una alta probabilidad de ser ocupado), y un segundo escenario de dispersión en el que las especies son capaces de colonizar de manera exitosa todo el hábitat idóneo nuevo disponible, producto del cambio climático, donde sea que ocurra. Los resultados obtenidos predicen que al considerar limitaciones a la dispersión, las especies retienen en promedio entre un 85% y un 77% del rango actual (dependiendo del escenario climático considerado), pudiendo llegar a perder como máximo entre un 48% y un 70% de su hábitat estable en los escenarios B2 y A2, respectivamente, lo que correspondería a una igual reducción de su rango de distribución en Chile en un escenario en el que se limite la dispersión. Por el contrario, si se asume que las especies son capaces de desplazarse y colonizar exitosamente los nuevos hábitats, las pérdidas esperadas oscilan entre el 25% y el 38% en promedio en los escenarios B2 y A2, respectivamente. En general, este patrón se mantiene en los diferentes grupos taxonómicos estudiados, con una tendencia a mayor pérdida de hábitat en el escenario A2.

Cuando se examinan los cambios esperados en las especies analizadas que están clasificadas actualmente en alguna categoría especial de conservación, se observa que para los árboles y arbustos, en el escenario más severo (A2, sin dispersión), el 59% de estas especies enfrenta reducciones de más del 20% de su rango geográfico. En el caso del escenario B2, frente a limitaciones en la dispersión, solo el 35% reduce su rango en más del 20%. En las especies animales, en particular los mamíferos,

MAPA IV.10
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA RED DE ÁREAS PROTEGIDAS



Fuente: Elaboración propia excepto C y D, tomado de J. J. Armesto y otros, "From the holocene to the anthropocene: A historical framework for land cover change in Southwestern South America in the past 15000 years", *Land Use Policy*, 27, 148-160, 2009.

Nota: A: proporción de cada banda latitudinal cubierta por la RAP; B: proporción del total de especies de árboles; C: proporción del total de especies de enredaderas y plantas epifitas; D: presencia en cada banda latitudinal.

las pérdidas más severas se reflejan en los escenarios que consideran la limitación por dispersión, observándose que entre el 44% y el 67% de las especies reduce su rango en más de un 20%. Cabe destacar que hay dos especies en peligro, el pitao (*pitavia punctata*) y el huemul (*hippocamelus bisulcus*), con respecto a las que se esperan reducciones importantes en su distribución, incluso al considerar un escenario con dispersión ilimitada.

D. Los recursos costeros y el aumento del nivel del mar

En esta sección se realizan dos tipos de análisis: los impactos en los recursos pesqueros y acuícolas y los impactos causados por el aumento del nivel del mar.

1. Los recursos pesqueros y acuícolas

Pese a la relevancia de estos sectores para la economía del país y su relación con el clima, actualmente Chile no cuenta con un nivel de investigación aceptable acerca de los efectos del cambio climático sobre las actividades pesquera y acuícola. Sin embargo, se puede conjeturar que muchos de los potenciales impactos mencionados afecten a estas actividades.

Un impacto potencial del cambio climático, todavía en debate, está relacionado con los cambios en la frecuencia de ocurrencia e intensidad de fenómenos como El Niño y La Niña y su repercusión en el sistema de la corriente de Humboldt. Este es uno de los ecosistemas más productivos del planeta y se caracteriza por un flujo hacia el norte de aguas superficiales subantárticas y por zonas de surgencia de aguas frías subsuperficiales, ricas en nitratos, fosfatos y otros nutrientes. Las interacciones entre el océano y la atmósfera y el forzamiento de los vientos sobre la superficie del océano están íntimamente ligados a los cambios de escenario de los modelos del cambio climático, y afectarán el funcionamiento de los sistemas oceanográficos del Pacífico suroriental. En Chile y el Perú, estos cambios podrían afectar negativamente la elevada productividad primaria que caracteriza al sistema de Humboldt. Además, y vinculado a lo anterior, está la posibilidad de que aumente la ocurrencia de eventos con mínima concentración de oxígeno que tienen consecuencias negativas en la fauna marina y costera.

Por otra parte, los cambios en la temperatura o en la salinidad de las aguas, donde se concentran los cultivos marinos, como en el mar interior de Chiloé, podrían causar la diseminación de enfermedades. Un ejemplo sería el cambio en la distribución del llamado piojo del salmón (*caligus rogercresseyi*) por el aumento de la temperatura del mar. Este parásito afecta la capacidad de crecimiento de los salmones, pudiendo incluso causar la muerte de individuos por heridas y, en consecuencia, provoca pérdidas en la industria salmonera. En algunos estudios, realizados principalmente en el hemisferio norte, se sugiere que una elevación en la temperatura del mar aumentaría la distribución de este parásito. Sin embargo, no existen conclusiones acabadas en este tema, especialmente para el caso chileno.

2. El aumento del nivel del mar

El nivel medio del mar cambia debido a las variaciones del volumen total de los océanos, causadas principalmente por alteraciones en la temperatura a escala global. La causa más importante del aumento reciente del nivel del mar a escala global es la expansión o dilatación térmica del agua, responsable del 80% de la variación observada en el último siglo. Otra consecuencia significativa es el cambio en el balance de la masa de los glaciares continentales, alrededor del 15%. Existen evidencias históricas y proyecciones futuras que indican aumentos sostenidos en el nivel del mar. En el caso de Chile, estas proyecciones tienen que ser contrastadas con los efectos del solevantamiento

costero o subsidencia provocados por los procesos tectónicos que, a pesar de actuar a nivel local, pueden producir efectos comparables a los causados por el nivel del mar, en especial en un país con fuerte actividad sísmica. Se ha llevado a cabo un análisis prospectivo de las tendencias del nivel del mar en las inmediaciones de la costa chilena y los resultados son ambiguos, con disminuciones del nivel en el norte del país y alzas en el sur. El análisis del nivel medio del mar realizado en el marco de este estudio se orienta a definir variaciones en el medio y largo plazo, sobre la base del análisis de series horarias de nivel del mar disponible en los principales puertos chilenos. Esta escala temporal de análisis se ha adoptado en razón de que el nivel de la superficie del mar es resultado de la superposición de fenómenos ondulatorios asociados a diferentes mecanismos de generación, que abarcan escalas espaciales y temporales en esencia diferentes, y que pueden ser analizadas desagregadas con el objeto de obtener la señal del nivel del mar en forma independiente. Es probable que estas diferencias se deban, en parte, al efecto recién mencionado de los cambios en el nivel relativo de la tierra a causa de actividades sísmicas (mayor detalle de la metodología usada y los resultados obtenidos se pueden encontrar en el apéndice VII de este documento). Queda mucho por hacer en este sentido para poder determinar cuál será la superficie afectada de acuerdo con las proyecciones del aumento medio del nivel del mar.

Por otra parte, este aumento no es el único tema de relevancia al momento de analizar los impactos en las costas chilenas. También deben considerarse los cambios en los eventos extremos, la altura de olas, la intensidad de los oleajes y los cambios en la intensidad y dirección de los vientos. Estos fenómenos pueden afectar la infraestructura costera (en cuanto a su integridad y operación) y los sistemas naturales en mayor grado que el alza del nivel del mar.

La combinación de estos agentes puede producir los siguientes efectos físicos en el borde costero:

- Inundación de las zonas costeras.
- Aumento de las planicies de inundación.
- Pérdida de territorios deltaicos.
- Desaparición de humedales.
- Erosión costera en playas y acantilados.
- Efectos en la cota de inundación en playas.
- Efectos en la forma en planta y perfil de las playas por basculamiento.
- Modificación del balance sedimentario costero.
- Efectos en la dinámica de las dunas.
- Efectos en la hidrodinámica y morfodinámica de estuarios.
- Efectos sobre el comportamiento operacional y estructural de las obras marítimas.
- Aumento del daño durante inundaciones y tormentas.
- Intrusión salina en acuíferos.
- Subida del nivel de la capa freática.

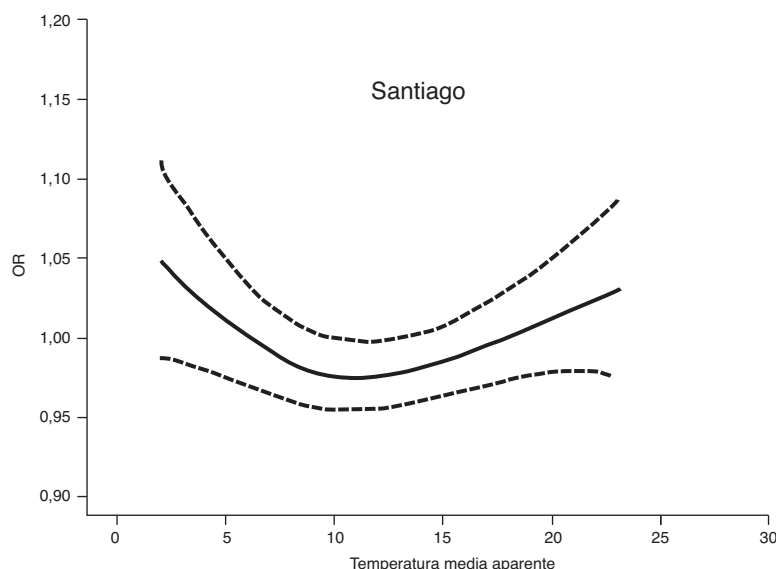
Sin embargo, no existen aún en Chile las herramientas ni la información requerida para hacer este tipo de análisis –como se realizó en España–, algo que debería llevarse a cabo en el futuro.

E. La salud

En general, el cambio climático no producirá nuevas enfermedades, pero puede aumentar la ocurrencia de algunas y exacerbar el efecto de ciertas variables ambientales en la salud. También es posible que aumente la ocurrencia de algunas enfermedades tropicales que requieren de un vector para su transmisión, como la malaria y el dengue. Estas dos enfermedades no están presentes en Chile, aunque en el extremo norte, las condiciones podrían ser eventualmente favorables para su desarrollo, por lo que no se puede descartar su ocurrencia. Es importante destacar que no existen metodologías en la actualidad para hacer una evaluación económica de estos potenciales impactos. Por otra parte, con respecto a los efectos directos del cambio climático, las mayores temperaturas impactan en la salud al menos por dos vías: aumento de la mortalidad y otras patologías, y aumento del ozono troposférico, con sus consiguientes efectos negativos. Todos estos efectos han sido estudiados tomando en cuenta los registros históricos (Bell y otros, 2008). Sin embargo, no se ha establecido aún la relación entre el cambio climático y la frecuencia de ocurrencia para poder llevar a cabo la evaluación económica respectiva. En trabajos como el de Bell y otros (2008) también se ha podido identificar que las temperaturas extremas tienen una clara incidencia en los índices de mortalidad en ciudades en Latinoamérica. El gráfico IV.6 muestra la relación encontrada por estos investigadores para el caso de la ciudad de Santiago. Del gráfico se desprende que tanto las temperaturas extremas bajas como las altas, inciden en un aumento del riesgo de mortandad. Es complejo por lo tanto indicar cuál sería a priori el efecto de un aumento de las temperaturas producto del cambio climático.

Es importante agregar que el país presenta algunos desequilibrios ambientales que juegan un rol negativo en la salud de la población. Tal vez el más claro ejemplo es la mala calidad del aire en la Región Metropolitana. Los 6 millones de habitantes del Gran Santiago están expuestos a altos niveles

GRÁFICO IV.6
CURVAS DE DOSIS RESPUESTA PARA LA TEMPERATURA PROMEDIO Y
EL RIESGO DE MORTALIDAD EN SANTIAGO^a



Fuente: M. L. Bell y otros, “Vulnerability to heat-related mortality in Latin America: a case-crossover study in Sao Paulo, Brazil, Santiago, Chile and Mexico City, Mexico”, *International Journal of Epidemiology*, vol. 37, N° 4, 2008.

^a La línea sólida refleja la tendencia central y las líneas punteadas un intervalo de confianza del 95%. El modelo se ajusta a concentraciones de ozono y PM10.

de contaminación del aire, que se traducen en enfermedades respiratorias y muertes prematuras. La Organización Mundial de la Salud (OMS) clasifica a Santiago entre las ciudades más contaminadas del mundo. Este problema se debe en su mayoría a las emisiones de la industria y el transporte, y se agravan debido a su ubicación: un valle rodeado por cadenas montañosas de la cordillera de los Andes y la cordillera de la costa, con poco viento y lluvia que dispersen las emisiones. La contaminación se intensifica aún más en los meses fríos, entre abril y septiembre, debido al fenómeno natural de inversión térmica (OCDE y CEPAL, 2005).

F. La demanda de energía

Como se indicó con anterioridad, el cambio climático provoca una potencial reducción en la generación hidroeléctrica del país. Con respecto a las repercusiones en la demanda de energía, no es claro cuál es la relación existente entre esta y los cambios en la temperatura. En regiones del planeta con condiciones climatológicas similares a las de Chile, pero con un mayor nivel de ingreso (véase el caso de California en Miller y otros, 2008), el aumento de la temperatura podría implicar un aumento de la demanda de la electricidad que se utiliza en los sistemas de aire acondicionado. Por otra parte, una elevación de las temperaturas mínimas podría disminuir la demanda de electricidad asociada a la calefacción. Este tipo de efectos no han sido analizados aún para el caso de Chile y sería recomendable realizar estudios con mayor profundidad al respecto.

Es importante destacar que en el caso del sector de la energía existe un claro enlace entre lo que son los impactos del cambio climático y las medidas de mitigación de sus causas. Este enlace se produce, por ejemplo, al considerar cuál es el efecto que tendrían diferentes escenarios de cambio climático en la producción de hidroelectricidad y la factibilidad de usar esta estrategia como una medida de mitigación de sus causas. La oportunidad ofrecida por este estudio de considerar ambos aspectos (impactos-adaptación y mitigación) permite lograr un análisis explícito de estas relaciones que no se ha llevado a cabo en el pasado.

G. Las tendencias de los eventos extremos

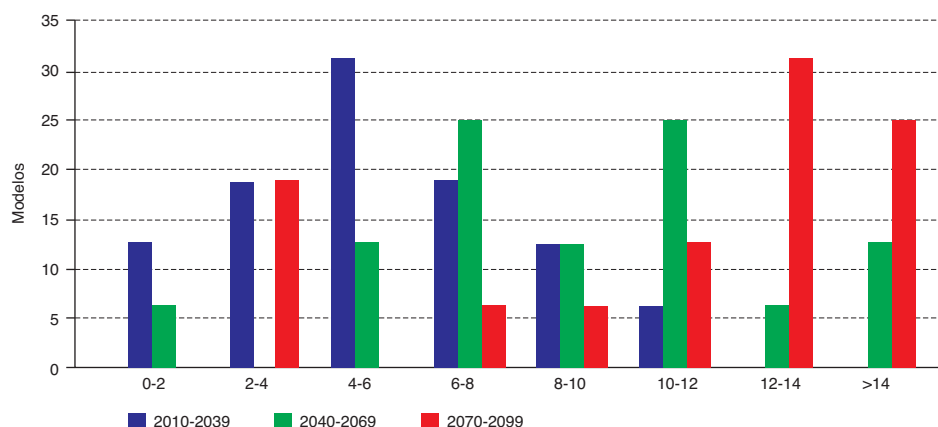
Los impactos que se han presentado en este estudio están asociados a cambios en las condiciones medias (sobre una base de 30 años) de la producción de ciertos sectores económicos del país. Sin embargo, los mayores impactos asociados al clima suceden por eventos extremos, como sequías o inundaciones. Utilizando los modelos considerados en el análisis de incertidumbre descrito en el primer capítulo de este informe, se realizó un estudio de la variabilidad climatológica proyectada a futuro para tener una aproximación de los potenciales impactos relacionados con estos eventos (véase el apéndice I). La metodología utilizada para el análisis de variabilidad considera la realización de las siguientes tareas:

- i) generación de funciones de densidad de probabilidad (*probability density functions*, PDFs) para el promedio anual y por estación (verano, otoño, invierno, primavera), a partir de datos mensuales y diarios cuando están disponibles. Con esto se estudiarán los cambios en las distribuciones de frecuencia de las variables meteorológicas e índices de eventos extremos de interés, por ejemplo, temperatura media, extremas, precipitación diaria para las distintas zonas del país; y
- ii) eventos extremos a considerar: cambio en duración de sequías, tormentas cálidas asociadas a peligro de inundaciones, olas de calor.

Con respecto a lo último, se presenta el gráfico IV.7 que muestra el cambio esperado en frecuencia de eventos de sequías en la región de análisis climatológico, esto corresponde a la zona central del país (véanse los mapas I.5 y I.6 en la sección C. Proyecciones climáticas futuras, del capítulo

I). El gráfico presenta para los tres periodos de análisis –temprano, intermedio y tardío– cuál es el porcentaje de modelos que indicarían la ocurrencia de un cierto número de eventos, referidos a la situación de dos años seguidos con precipitación anual bajo el percentil 20 del escenario base histórico. En el apéndice I se presentan otros análisis de cambios en variabilidad y eventos extremos que se proyectan para Chile.

GRÁFICO IV.7
PORCENTAJE DE MODELOS PROYECTANDO UN NÚMERO DETERMINADO DE
EVENTOS ASOCIADOS A SEQUÍA CLIMATOLÓGICA^a
(En porcentajes)



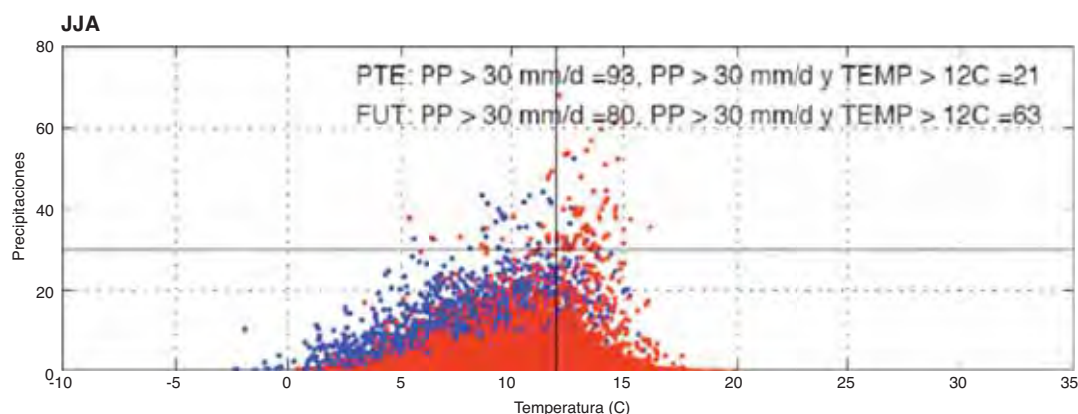
Fuente: Elaboración propia.

^a Una sequía climatológica se define como dos años consecutivos con precipitaciones anuales bajo el percentil 20 histórico. Análisis realizado para la región de análisis 4 (centro sur del país).

Los resultados muestran un marcado aumento de la probabilidad de ocurrencia de eventos de sequía, especialmente en los periodos intermedio y tardío, comparados con la línea de base. Por ejemplo, tomando como métrica que una sequía corresponde a una situación en la que se registran dos años consecutivos con precipitación anual menor al percentil 20 de la línea de base, un 30% de los modelos proyectaron que para fines del siglo XXI este tipo de eventos ocurriría unas 14 veces en un periodo de 30 años, es decir, prácticamente una sequía permanente.

Por otra parte, los resultados muestran que, pese a que el número de eventos de precipitación extrema tiende a decrecer en gran parte del país (de acuerdo con la noción de que la precipitación disminuye), la ocurrencia de eventos de alta precipitación en días con temperaturas elevadas aumenta con respecto a la situación base. Esto tiene implicancias significativas, ya que el incremento de la línea de la isoterma cero en las llamadas tormentas cálidas tiene el efecto de aumentar considerablemente el caudal de los ríos, originando importantes catástrofes por inundaciones, además de otros impactos como los ya mencionados para el caso de la provisión de agua potable en el sector sanitario. A modo de ejemplo de esta situación, en el gráfico IV.8 se presentan en color azul los eventos históricos y en rojo los eventos futuros de precipitación diaria en una localidad ubicada genéricamente en Chile central. Para cada uno de estos eventos se ha identificado la intensidad de precipitación y la temperatura ambiental del día en que ocurre la precipitación. Se han incluido en el gráfico dos líneas que distinguen para ambas variables los eventos con altos niveles de precipitación (>30 mm/día) y con altos niveles de temperatura (>12 °C). Se puede apreciar que el número de eventos con altos niveles de precipitación disminuye en el futuro (baja de 93 a 80 eventos en un periodo de 20 años), pero que el número de eventos con altos niveles de precipitación y altos niveles de temperatura se triplica en el futuro (sube de 21 a 63 eventos).

GRÁFICO IV.8
COMPARACIÓN EN LAS CONDICIONES DE EVENTOS DE PRECIPITACIÓN
HISTÓRICOS Y FUTUROS^a
(En milímetros por día)



Fuente: Elaboración propia.

^a Se aprecia una disminución de eventos con alta intensidad de precipitación, pero un aumento de eventos con alta intensidad y alta temperatura. El análisis está centrado en una región enmarcada entre los paralelos 32 °S y 35 °S.

Nota: Se considera temperatura ambiental en el día del evento e intensidad de precipitación.

En el futuro será necesario evaluar los impactos económicos relacionados con los cambios en estos eventos extremos. En general, la relación entre el clima y la economía no es lineal, por lo que el análisis de las condiciones medias no es suficiente para estimar todos los costos económicos asociados al cambio climático.

H. La infraestructura

De acuerdo con la información brindada, es posible prever que un aumento de la frecuencia de las inundaciones, ya sea asociado a cambios en la variabilidad climática o a un aumento del número de tormentas cálidas, tendrá un impacto en las condiciones de operación y la integridad de la infraestructura vinculada a las comunicaciones (caminos) y a la infraestructura en el sector de la salud o la educación. También se puede prever que un aumento de los niveles de precipitación en el altiplano pueda causar aluviones. Cabe recordar el aluvión acaecido en la región de Antofagasta en 1991, con pérdidas económicas estimadas en aproximadamente 349 millones de pesos chilenos en el sector de la salud, 698 millones de pesos chilenos en educación y 382 millones de pesos chilenos en infraestructura vial (BID y CEPAL, 2007)⁸. Por último, los cambios en las condiciones meteorológicas y oceanográficas costeras pueden tener impactos importantes en la operación e integridad de las obras de infraestructura de la zona. Estos potenciales efectos justifican que estos temas sean abordados en estudios futuros del impacto del cambio climático en Chile.

Existe una serie de complejidades asociadas a la evaluación física y económica del impacto futuro del cambio climático en infraestructura. Por una parte, las funciones de daño (físico y económico) no están claramente establecidas, es decir, no es posible predecir con exactitud cuál es el porcentaje de infraestructura que sufriría daños en virtud de un cierto evento hidrometeorológico. Las series

⁸ Esto equivale a 1 millón, 2 millones y 1,1 millones de dólares de 1991, respectivamente. El tipo de cambio promedio de 1991 fue 349 pesos por dólar (véase www.bcentral.cl).

históricas son cortas y no existe una sistematización en la recopilación de datos asociada a impactos. Para mejorar estas deficiencias la CEPAL desarrolló en el año 2003 para Latinoamérica el *Manual para la evaluación del impacto socioeconómico y ambiental de los desastres* (CEPAL, 2003). Por otra parte, la resolución temporal y la base de desarrollo detrás de los modelos de cambio global –base de los modelos de cambio regional– todavía no son lo suficientemente refinadas –por ejemplo por la falta de escalas temporales de corta duración– como para predecir con precisión cambios en la ocurrencia de eventos extremos.

Sin perjuicio de lo anterior, se están haciendo mejoras en estos modelos y metodologías que permitirán llevar a cabo proyecciones futuras del cambio en la variabilidad climatológica y ocurrencia de eventos extremos (Tebaldi y otros, 2006). El trabajo que se ha presentado por medio de este proyecto también colabora en la creación de las bases necesarias para realizar este tipo de análisis. Parte de estas bases están, por ejemplo, asociadas al estudio de impactos en infraestructura portuaria producto del alza del nivel del mar. Otro ejemplo estaría asociado a la metodología propuesta para analizar cambios en la variabilidad climatológica, en especial eventos extremos asociados a eventos de precipitación.

I. La agregación de los impactos

Como se describió en el capítulo III, el cambio climático podría afectar a todos los sectores socioeconómicos de manera directa o indirecta. Sin embargo, ya sea por la falta de herramientas que permitan evaluar los impactos de manera física o por la carencia de información detallada para realizar una evaluación económica, el análisis en esta oportunidad se llevó a cabo para un subconjunto de sectores. En el cuadro IV.15 se presenta un resumen de los impactos esperados para todos los sectores analizados en el estudio. En el mapa IV.11 se presentan dichos impactos de manera esquemática, asociados a las proyecciones climáticas. Como puede apreciarse en el cuadro IV.15a, algunos sectores han sido analizados en detalle, lo que ha permitido obtener resultados en términos del impacto económico para diferentes períodos y escenarios climáticos. A continuación se detallan los sectores analizados:

- i) sector silvoagropecuario: por medio del análisis se han obtenido cambios en la producción y los ingresos netos a nivel comunal para todo el país;
- ii) sector hidroeléctrico: se obtienen impactos económicos a nivel nacional vinculados al aumento de la generación a partir de carbón, debido a la pérdida de generación hidroeléctrica de las centrales instaladas en la actualidad; y
- iii) sector sanitario: se obtiene el impacto económico producto del alza de las tarifas de provisión de agua potable en la Región Metropolitana.

Los resultados económicos para estos sectores han sido agregados de acuerdo con una metodología que se presentará a continuación. Sin embargo, es importante destacar que los cálculos realizados representan una visión conservadora de la evaluación completa de los impactos económicos probables para el país. Las dos razones principales son:

- i) la falta de algunos sectores relevantes en la evaluación económica como, por ejemplo, la minería y la salud (véase el cuadro IV.15b); y
- ii) la evaluación de los impactos contempla condiciones climáticas medias. Sin embargo, es posible prever que los costos del cambio climático no sean lineales con respecto a los cambios del clima y, por lo tanto, una evaluación basada en promedios puede subvalorar los impactos reales.

En la metodología de agregación de los impactos económicos se reconoce que los efectos en cada uno de los sectores repercuten en otros sectores de la economía. Por ejemplo, un impacto en el

CUADRO IV.15
RESUMEN DE LOS IMPACTOS SECTORIALES DEL CAMBIO CLIMÁTICO

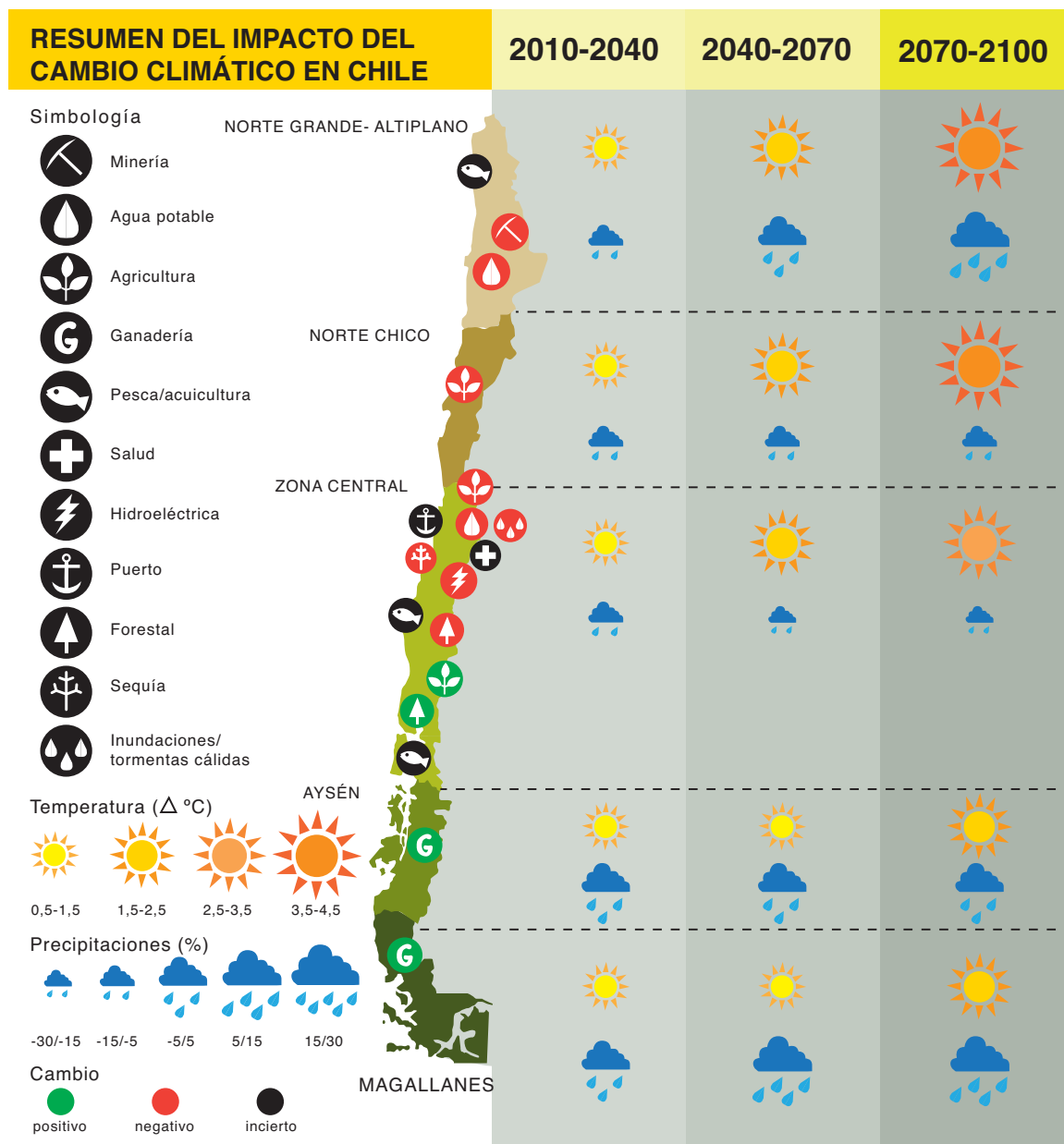
a) Sectores incluidos en el análisis económico		
Sector	Impactos esperados	Supuestos de valoración económica
Recursos hídricos e hidroeléctricos	Menor disponibilidad de agua en cuencas y, por ende, menor generación de electricidad.	Cambio en la generación de electricidad desarrollado por medio de una simulación hidrológica y el uso de relaciones estadísticas entre hidrología y generación. Este trabajo se realiza en dos sistemas hidroeléctricos y se extrapola después al resto del país. Las pérdidas se compensan con generación a partir de carbón.
Recursos hídricos y agua potable	Menor disponibilidad de agua en períodos de déficit para la cuenca del río Maipo.	El cambio en la oferta en períodos extremos se compara con los cambios en la demanda. El déficit se suple con la compra de derechos.
Silvoagropecuario	Cambios en la productividad con diferencias regionales y por especies.	Cambios en la productividad que implican alteraciones en la rentabilidad y las reasignaciones mediante un proceso de adaptación. Se consideran impactos por déficit de riego y costos de implementación de infraestructura de riego intrapredial.
b) Sectores no incluidos en el análisis económico		
Sector	Impactos esperados	Nivel de conocimiento
Recursos hídricos y minería	Menor disponibilidad de agua en cuencas donde existen faenas mineras.	Se considera un impacto con alta probabilidad de ocurrencia, cuya evaluación económica requiere de la elaboración de mejores herramientas.
Biodiversidad y ecosistemas	Pérdida de la biodiversidad vegetal y animal en el país. Impactos ambientales y económicos asociados a servicios ecosistémicos.	Se considera un impacto con alta probabilidad de ocurrencia, cuya evaluación económica requiere de la elaboración de mejores herramientas.
Zonas costeras	Impactos asociados al alza del nivel del mar y cambios en patrones climatológicos y oceanográficos.	No existe información suficiente para determinar la probabilidad de ocurrencia de este tipo de impacto.
Recursos pesqueros	Cambios en la productividad primaria debido a alteraciones en los patrones climatológicos y oceanográficos.	No existe información suficiente para determinar la probabilidad de ocurrencia de este tipo de impacto.
Recursos acuícolas	Cambios en la distribución de enfermedades que afectan al sector acuícola.	No existe información suficiente para determinar la probabilidad de ocurrencia de este tipo de impacto.
Energía	Aumento de la demanda debido al uso de equipos de aire acondicionado.	Se considera un impacto con probabilidad media de ocurrencia, cuya evaluación económica requiere de la elaboración de mejores herramientas.
Eventos extremos: sequías	Aumento de la frecuencia de eventos de sequía.	Se considera un impacto con alta probabilidad de ocurrencia, cuya evaluación económica requiere de la elaboración de mejores herramientas.
Eventos extremos: inundaciones	Aumento de la frecuencia de tormentas cálidas e inundaciones asociadas.	Se considera un impacto con probabilidad media de ocurrencia, cuya evaluación económica requiere de la elaboración de mejores herramientas.
Infraestructura	Costos elevados por destrozos causados por eventos extremos (inundaciones e impactos en zonas costeras).	Se considera un impacto con probabilidad media de ocurrencia, cuya evaluación económica requiere de la elaboración de mejores herramientas.

Fuente: Elaboración propia.

sector silvoagropecuario repercute en el sector industrial (agroindustria) y, a su vez, los impactos en ambos sectores tienen repercusiones en la recaudación de impuestos. Para llevar a cabo el análisis de estas interrelaciones, se ha utilizado la metodología de la matriz de insumo-producto, que reconoce las interrelaciones entre los distintos sectores de la economía. La llamada matriz de coeficientes técnicos, que se desarrolla a partir de la matriz de demanda intermedia, se utiliza para evaluar los

MAPA IV.11

REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LOS IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y SU RELACIÓN CON LAS PROYECCIONES CLIMÁTICAS FUTURAS^a



Fuente: Elaboración propia.

^a Se indican impactos sectoriales y proyecciones climáticas (para el escenario A2). Con respecto a los impactos sectoriales se consideran dos alternativas: los colores rojo o verde implican un impacto negativo o positivo respectivamente; el color negro corresponde a sectores donde se requiere más conocimiento para poder desarrollar una evaluación de impactos.

efectos indirectos vinculados a los impactos en cada uno de los sectores productivos considerados en la evaluación económica. Para obtener dicha información, así como para generar los impactos esperados, se usará como referencia la matriz de producción y el vector de utilización intermedia del Instituto Nacional de Estadísticas para el año 1996, así como las matrices de utilización intermedia elaboradas a partir de esta información por el Ministerio de Planificación (MIDEPLAN) el año 2005. No se han incluido en el análisis las potenciales consecuencias en materia fiscal.

Estos análisis se llevan a cabo en períodos temporales futuros, lo que implica proyectar el impacto de acuerdo con una condición económica futura. Esta proyección se realiza utilizando la misma tasa de crecimiento del PIB que se presentó en el capítulo II. Las series anuales de impactos obtenidos se calculan en su valor presente utilizando cuatro tasas de descuento diferentes: 6%, 4%, 2% y 0,5%, sumadas según cuatro horizontes de tiempo: 2030, 2050, 2070 y 2100. Del cuadro IV.16 a IV.19 se presentan los impactos directos, indirectos y totales para estos horizontes de tiempo y cuatro tasas de descuento en millones de dólares.

CUADRO IV.16
AGREGACIÓN DE LOS COSTOS ECONÓMICOS DEL
CAMBIO CLIMÁTICO HASTA 2030
(En millones de dólares y en términos absolutos)

Sector	IMPACTOS DIRECTOS							
	Tasa de descuento 6%		Tasa de descuento 4%		Tasa de descuento 2%		Tasa de descuento 0,5%	
	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
Agrícola	-665	-513	-860	-661	-1 126	-864	-1 391	-1 064
Frutícola	6 927	5 807	8 697	7 336	11 062	9 382	13 364	11 375
Silvícola	-389	-315	-499	-405	-650	-528	-799	-649
Ganadero	793	774	982	955	1 230	1 193	1 469	1 421
Hidroelectricidad	1 417	1 098	1 794	1 390	2 298	1 783	2 790	2 166
Agua potable	18	27	23	34	29	44	35	53
Total impactos	8 101	6 878	10 136	8 650	12 843	11 010	15 469	13 302
Sector	IMPACTOS INDIRECTOS							
	Tasa de descuento 6%		Tasa de descuento 4%		Tasa de descuento 2%		Tasa de descuento 0,5%	
	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
Agrícola	-463	-357	-598	-460	-784	-601	-968	-741
Frutícola	3 372	2 827	4 234	3 571	5 385	4 567	6 506	5 537
Silvícola	-384	-311	-492	-399	-640	-520	-787	-640
Ganadero	878	857	1 087	1 058	1 362	1 321	1 627	1 573
Hidroelectricidad	1 332	1 032	1 686	1 307	2 160	1 676	2 623	2 036
Agua potable	8	11	10	14	12	18	15	22
Total impactos	4 743	4 060	5 926	5 091	7 496	6 461	9 015	7 789
Sector	IMPACTOS TOTALES							
	Tasa de descuento 6%		Tasa de descuento 4%		Tasa de descuento 2%		Tasa de descuento 0,5%	
	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
Agrícola	-1 128	-870	-1 458	-1 121	-1 909	-1 465	-2 359	-1 805
Frutícola	10 299	8 634	12 931	10 908	16 446	13 949	19 870	16 912
Silvícola	-773	-626	-992	-804	-1 290	-1 048	-1 586	-1 288
Ganadero	1 671	1 631	2 069	2 013	2 593	2 514	3 096	2 994
Hidroelectricidad	2 749	2 129	3 480	2 697	4 458	3 459	5 413	4 203
Agua potable	26	39	32	49	41	62	50	76
Total impactos	12 845	10 938	16 062	13 741	20 339	17 472	24 484	21 091

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO IV.17
AGREGACIÓN DE LOS COSTOS ECONÓMICOS DEL
CAMBIO CLIMÁTICO HASTA 2050
(En millones de dólares y en términos absolutos)

Sector	IMPACTOS DIRECTOS							
	Tasa de descuento 6%		Tasa de descuento 4%		Tasa de descuento 2%		Tasa de descuento 0,5%	
	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
Agrícola	-2 889	-2 115	-4 790	-3 513	-8 233	-6 058	-12 645	-9 334
Frutícola	15 038	10 528	22 811	15 413	36 194	23 514	52 719	33 212
Silvícola	-1 486	-1 201	-2 435	-1 980	-4 145	-3 392	-6 327	-5 205
Ganadero	903	702	1 139	789	1 448	824	1 739	757
Hidroeléctrico	2 855	2 311	4 280	3 496	6 698	5 522	9 648	8 010
Agua potable	40	52	60	78	95	121	139	172
Total impactos	14 460	10 277	21 065	14 282	32 058	20 530	45 272	27 612
Sector	IMPACTOS INDIRECTOS							
	Tasa de descuento 6%		Tasa de descuento 4%		Tasa de descuento 2%		Tasa de descuento 0,5%	
	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
Agrícola	-2 011	-1 472	-3 334	-2 445	-5 730	-4 217	-8 802	-6 497
Frutícola	7 320	5 125	11 104	7 503	17 619	11 446	25 663	16 167
Silvícola	-1 465	-1 184	-2 400	-1 952	-4 085	-3 344	-6 237	-5 131
Ganadero	1 000	778	1 261	874	1 604	912	1 926	838
Hidroeléctrico	2 684	2 172	4 024	3 286	6 297	5 191	9 070	7 530
Agua potable	17	22	25	33	40	51	58	72
Total impactos	7 545	5 440	10 680	7 298	15 744	10 040	21 679	12 980
Sector	IMPACTOS TOTALES							
	Tasa de descuento 6%		Tasa de descuento 4%		Tasa de descuento 2%		Tasa de descuento 0,5%	
	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
Agrícola	-4 900	-3 587	-8 124	-5 959	-13 963	-10 275	-21 447	-15 831
Frutícola	22 358	15 652	33 916	22 916	53 813	34 960	78 382	49 379
Silvícola	-2 951	-2 385	-4 836	-3 933	-8 230	-6 736	-12 564	-10 336
Ganadero	1 903	1 480	2 400	1 663	3 052	1 736	3 664	1 595
Hidroeléctrico	5 539	4 483	8 304	6 782	12 995	10 714	18 719	15 541
Agua potable	56	74	85	110	135	171	197	245
Total de impactos	22 005	15 717	31 745	21 580	47 802	30 569	66 950	40 592

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran que los impactos económicos del cambio climático hasta ahora evaluados en Chile son significativos. En términos absolutos, la agregación del valor presente de impactos indica que en el escenario A2 habría un costo que fluctúa entre 22.000 millones y 320.000 millones de dólares, dependiendo de la tasa de descuento empleada y del horizonte considerado. Con respecto al escenario B2, la situación es más ambigua, ya que los resultados indican un rango que fluctúa entre un beneficio neto de 25.000 millones de dólares a un costo de 40.000 millones de dólares, dependiendo de la tasa de descuento utilizada y del horizonte considerado. A modo de referencia, cabe mencionar que el PIB del país para 2008 fue de aproximadamente 120.000 millones de dólares. Los resultados no son equivalentes en todos los sectores, identificándose con este ejercicio ciertos sectores económicos (el sector agrícola distinguido del sector frutícola) que se podrían ver beneficiados con el cambio climático en el futuro. Los impactos asociados al escenario A2 son mayores que los del escenario B2, que presenta beneficios importantes para el sector agrícola

CUADRO IV.18
AGREGACIÓN DE LOS COSTOS ECONÓMICOS DEL
CAMBIO CLIMÁTICO HASTA 2070
(En millones de dólares y en términos absolutos)

Sector	IMPACTOS DIRECTOS							
	Tasa de descuento 6%		Tasa de descuento 4%		Tasa de descuento 2%		Tasa de descuento 0,5%	
	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
Agrícola	-4 711	-3 822	-9 463	-7 934	-20 592	-17 862	-38 815	-34 509
Frutícola	20 168	12 501	35 932	20 442	70 795	36 734	125 832	61 084
Silvícola	-2 235	-1 905	-4 327	-3 760	-9 073	-8 029	-16 645	-14 910
Ganadero	859	494	1 045	274	1 254	-488	1 412	-1 941
Hidroeléctrico	3 562	2 940	6 066	5 080	11 344	9 634	19 366	16 594
Agua potable	50	61	85	100	160	177	272	288
Total impactos	17 693	10 269	29 338	14 202	53 888	20 166	91 421	26 607
Sector	IMPACTOS INDIRECTOS							
	Tasa de descuento 6%		Tasa de descuento 4%		Tasa de descuento 2%		Tasa de descuento 0,5%	
	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
Agrícola	-3 279	-2 660	-6 587	-5 522	-14 333	-12 433	-27 017	-24 020
Frutícola	9 817	6 085	17 491	9 951	34 463	17 882	61 254	29 735
Silvícola	-2 203	-1 878	-4 265	-3 706	-8 944	-7 914	-16 407	-14 697
Ganadero	951	547	1 158	304	1 389	-540	1 563	-2 149
Hidroeléctrico	3 349	2 764	5 702	4 776	10 664	9 057	18 206	15 601
Agua potable	21	26	36	42	67	74	114	121
Total impactos	8 657	4 883	13 535	5 844	23 306	6 126	37 713	4 591
Sector	IMPACTOS TOTALES							
	Tasa de descuento 6%		Tasa de descuento 4%		Tasa de descuento 2%		Tasa de descuento 0,5%	
	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
Agrícola	-7 989	-6 482	-16 050	-13 456	-34 924	-30 295	-65 832	-58 529
Frutícola	29 985	18 586	53 424	30 393	105 258	54 615	187 087	90 819
Silvícola	-4 437	-3 784	-8 593	-7 467	-18 017	-15 942	-33 053	-29 607
Ganadero	1 810	1 041	2 203	578	2 643	-1 028	2 975	-4 090
Hidroeléctrico	6 911	5 703	11 768	9 855	22 008	18 691	37 571	32 195
Agua potable	71	87	121	142	227	251	386	409
Total impactos	26 350	15 152	42 873	20 046	77 194	26 292	129 135	31 198

Fuente: Elaboración propia.

especialmente a fines de siglo. Para dar un mayor contexto a los cuadros IV.16, IV.17, IV.18 y IV.19, se muestra en el cuadro IV.20 la suma de los valores actuales de los impactos, dividida por la suma de los valores actuales del PIB base proyectado para el mismo horizonte. De acuerdo con este análisis, encontramos que la agregación de los impactos económicos del cambio climático indica que Chile (en los sectores incluidos en el análisis de acuerdo con lo presentado en el cuadro IV.20) podría llegar a perder un 1,1% anual durante todo el período de análisis, es decir, hasta 2100, en el escenario A2. En el caso del escenario B2, la situación es más ambigua, presentándose desde una pérdida anual del 0,5% para la proyección hasta 2050, hasta una ganancia anual del 0,09% para la proyección hasta 2100 y una tasa de descuento del 0,5%.

CUADRO IV.19
AGREGACIÓN DE LOS COSTOS ECONÓMICOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO HASTA 2100
(En millones de dólares y en términos absolutos)

Sector	IMPACTOS DIRECTOS							
	Tasa de descuento 6%		Tasa de descuento 4%		Tasa de descuento 2%		Tasa de descuento 0,5%	
	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
Agrícola	-6 249	-5 739	-15 627	-15 707	-46 677	-51 137	-118 725	-137 305
Frutícola	24 283	14 149	52 396	27 070	140 359	64 877	338 694	147 506
Silvícola	-2 671	-2 322	-6 053	-5 408	-16 270	-14 911	-38 449	-35 790
Ganadero	966	457	1 493	141	3 230	-973	7 649	-3 252
Hidroeléctrico	3 986	3 282	7 745	6 430	18 371	15 253	40 707	33 592
Agua potable	53	62	96	101	204	178	401	282
Total impactos	20 367	9 889	40 051	12 628	99 217	13 287	230 278	5 033
Sector	IMPACTOS INDIRECTOS							
	Tasa de descuento 6%		Tasa de descuento 4%		Tasa de descuento 2%		Tasa de descuento 0,5%	
	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
Agrícola	-4 350	-3 995	-10 877	-10 933	-32 489	-35 593	-82 637	-95 570
Frutícola	11 821	6 888	25 506	13 177	68 326	31 582	164 874	71 805
Silvícola	-2 633	-2 288	-5 966	-5 330	-16 038	-14 698	-37 900	-35 278
Ganadero	1 070	506	1 654	157	3 577	-1 078	8 470	-3 601
Hidroeléctrico	3 747	3 085	7 281	6 045	17 270	14 339	38 269	31 580
Agua potable	22	26	40	43	86	75	169	118
Total impactos	9 677	4 221	17 638	3 159	40 733	-5 373	91 245	-30 946
Sector	IMPACTOS TOTALES							
	Tasa de descuento 6%		Tasa de descuento 4%		Tasa de descuento 2%		Tasa de descuento 0,5%	
	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
Agrícola	-10 599	-9 734	-26 505	-26 639	-79 165	-86 730	-201 361	-232 875
Frutícola	36 104	21 037	77 902	40 248	208 685	96 459	503 568	219 311
Silvícola	-5 305	-4 610	-12 019	-10 738	-32 308	-29 609	-76 349	-71 068
Ganadero	2 036	962	3 147	298	6 807	-2 051	16 119	-6 853
Hidroeléctrico	7 733	6 367	15 026	12 475	35 641	29 593	78 976	65 172
Agua potable	75	88	137	144	290	253	570	400
Total impactos	30 044	14 110	57 689	15 787	139 950	7 913	321 522	-25 914

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO IV.20
AGREGACIÓN DE LOS COSTOS ECONÓMICOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO
EN 2030, 2050, 2070 Y 2100

(Dividido por agregación del valor presente del PIB base para los mismos horizontes en porcentajes)

	Año 2030							
	Tasa de descuento 6%		Tasa de descuento 4%		Tasa de descuento 2%		Tasa de descuento 0,5%	
	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
Total impactos directos	0,39	0,33	0,40	0,34	0,42	0,36	0,43	0,37
Total impactos indirectos	0,23	0,19	0,24	0,20	0,24	0,21	0,25	0,22
Total impactos	0,62	0,53	0,64	0,55	0,66	0,57	0,68	0,59
	Año 2050							
	Tasa de descuento 6%		Tasa de descuento 4%		Tasa de descuento 2%		Tasa de descuento 0,5%	
	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
Total impactos directos	0,44	0,31	0,45	0,31	0,47	0,30	0,48	0,29
Total impactos indirectos	0,23	0,16	0,23	0,16	0,23	0,15	0,23	0,14
Total impactos	0,66	0,48	0,69	0,47	0,70	0,45	0,71	0,43
	Año 2070							
	Tasa de descuento 6%		Tasa de descuento 4%		Tasa de descuento 2%		Tasa de descuento 0,5%	
	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
Total impactos directos	0,46	0,27	0,49	0,24	0,52	0,20	0,55	0,16
Total impactos indirectos	0,22	0,13	0,23	0,10	0,23	0,06	0,23	0,03
Total impactos	0,68	0,39	0,72	0,34	0,75	0,26	0,78	0,19
	Año 2100							
	Tasa de descuento 6%		Tasa de descuento 4%		Tasa de descuento 2%		Tasa de descuento 0,5%	
	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
Total impactos directos	0,49	0,24	0,57	0,18	0,68	0,09	0,78	0,02
Total impactos indirectos	0,23	0,10	0,25	0,05	0,28	-0,04	0,31	-0,10
Total impactos	0,73	0,34	0,82	0,23	0,96	0,06	1,09	-0,09

Fuente: Elaboración propia.

V. Medidas de adaptación a los impactos del cambio climático en Chile

A. Introducción al análisis de la adaptación a los impactos del cambio climático

El ser humano tiene por naturaleza la capacidad de adaptarse a las adversidades que se le presentan. Los efectos del cambio climático probablemente no escapen a esta condición y, por lo tanto, van a existir en el futuro opciones, medidas y políticas que permitan reducir las consecuencias económicas, sociales y ambientales que se proyectan. Como se mencionó con anterioridad, esta adaptación puede adoptar diferentes formas. Por una parte, existen medidas de adaptación endógena que corresponden a la capacidad de reacción intrínseca de los actores económicos y que, por ende, no requieren un proceso de planificación externo, aunque esto no implica la ausencia de un costo económico. Este tipo de medidas de adaptación ya han sido incorporadas en la evaluación de impactos presentada en el capítulo anterior. El cambio en el uso del suelo propiciado por las modificaciones en la productividad del sector silvoagropecuario representa un buen ejemplo. Sin embargo, las medidas de adaptación pueden complementarse con otras que requerirían de un proceso de planificación o gestión adicional. Este es el tipo de medidas que se consideran en este capítulo.

En la actualidad no se han implementado medidas de adaptación que estén asociadas solo al cambio climático, aunque sí existen otras que históricamente se han aplicado en el país para paliar los efectos negativos de la variabilidad climática, como las obras de protección contra las inundaciones en el río Mapocho o los embalses de regadío con capacidad de almacenaje de agua interanual. Sin embargo, no podrían considerarse medidas de adaptación al cambio climático.

Es importante tener en cuenta que, en el estudio de las medidas de adaptación, resulta fundamental reconocer la incertidumbre que existe con respecto a los escenarios futuros de las condiciones climáticas. Si no se incluye este análisis de incertidumbre, es muy probable que se realice una mala adaptación, que tal vez tenga beneficios en un escenario particular pero no en otros. Por lo tanto, es importante considerar en primera instancia aquellas medidas doblemente beneficiosas (*win-win*) o útiles en todo caso (*no regret*), que otorgan grandes beneficios, incorporando de manera explícita esta

incertidumbre de escenarios. Muchas de estas medidas son blandas, en contraposición con las medidas estructurales asociadas, por ejemplo, a la construcción de infraestructura. Ejemplos de las medidas blandas serían la recopilación de información y las mejoras en la institucionalidad en lo que respecta al uso de recursos. Sin perjuicio de lo anterior, es posible reconocer que en ciertas regiones del país los niveles de incertidumbre son relativamente bajos, lo que permitiría adoptar medidas estructurales.

A continuación, se describen algunas medidas de adaptación que pueden tomarse para paliar los impactos de algunos de los sectores considerados en el capítulo anterior.

B. Los recursos hídricos

Pese a no existir hasta el momento evaluaciones explícitas sobre las medidas de adaptación orientadas a reducir los impactos del cambio climático en los recursos hídricos en Chile, es posible aprender de los trabajos realizados en otras regiones con condiciones climatológicas similares, como California, donde se han evaluado medidas de adaptación con respecto a los impactos en cuencas hidrológicas con uso de agua mixto –riego, agua potable e hidroelectricidad (Vicuña y otros, 2010). Estas medidas buscan flexibilizar la operación de embalses y mejorar la gestión del agua a nivel de la cuenca, tratando de reducir los impactos asociados a una reducción en los niveles de disponibilidad y a cambios en la temporalidad de los caudales. Es importante destacar que, debido al alto nivel de incertidumbre de la región con respecto a los escenarios futuros, no fue posible encontrar medidas estructurales u operacionales capaces de lograr beneficios para todos los escenarios evaluados. En cambio, estos beneficios sí se lograban con las reestructuraciones institucionales orientadas a mejorar la gestión de los recursos en la cuenca.

Como ejemplo de este tipo de medidas se pueden citar los resultados del proyecto “Políticas Públicas para la Adaptación a los Impactos del Cambio Climático en la Agricultura de Riego en Chile Central”, que forma parte del Concurso de Políticas Públicas 2009 que la Pontificia Universidad Católica de Chile organiza en conjunto con la Cámara de Diputados, el Ministerio Secretaría General de la Presidencia y la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativa. En este trabajo se evaluaron medidas específicas de adaptación a los impactos del cambio climático en el sector agrícola, en especial en lo relacionado con el uso de agua para riego (Donoso y otros, 2009).

Con respecto a medidas estructurales en términos genéricos, se han propuesto una serie de acciones de adaptación –no evaluadas bajo una región o escenario específico– que apuntan a reducir los impactos proyectados en los recursos hídricos de Chile (Bitrán y Rivera, s/f). Muchas de ellas están orientadas a reponer la pérdida de almacenamiento que supone una reducción de la cantidad de agua acumulada en la cordillera en forma de nieve.

También es de esperar que en el caso de Chile, donde se observan claramente pérdidas en la disponibilidad de los recursos hídricos para diferentes sectores, se incorporen en el futuro medidas que tengan como objetivo ampliar la oferta de suministro y mejorar el uso actual del recurso. En este sentido, existen acciones destinadas, por ejemplo, a aumentar la eficiencia del riego o, en el caso de la minería, a mejorar las tasas de circulación de agua o eventualmente recurrir a la desalinización del agua de mar. En este último aspecto, se debe destacar que en la actualidad y debido a la escasez del recurso hídrico, el uso directo de agua de mar ya es una opción utilizada por algunas mineras (Michilla y el futuro proyecto Esperanza), como también por una planta desalinizadora en el puerto de Coloso, que abastece las operaciones de la Minera Escondida. Por otra parte, en el proyecto El Morro (III región) se considera la construcción de una planta desalinizadora que abastecería la totalidad del agua requerida para su operación. A nivel gubernamental, se está analizando el tema de la desalinización en el contexto del Comité Interministerial de Políticas Hídricas, donde se ha conformado un grupo de trabajo para el estudio de iniciativas de plantas desalinizadoras dentro del sistema de concesiones.

En relación con los eventos extremos y los recursos hídricos, existen algunas iniciativas que permiten fortalecer las capacidades generales para enfrentar y adaptarse al cambio climático. El Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y El Caribe (CAZALAC) ha llevado a cabo cursos de capacitación y proyectos de investigación para enfrentar el tema del uso eficiente de recursos hídricos y su relación con las sequías. Algunos ejemplos de estos proyectos son: i) Elaboración de Atlas de Sequía en Áreas Piloto; ii) Estudio de caso del Uso Eficiente del Agua en la Región de Coquimbo; y iii) Manejo del Riesgo Climático en los Recursos hídricos de la Región de Coquimbo.

En el caso de inundaciones, no se tienen antecedentes de modelos, estrategias ni proyectos que incorporen explícitamente los escenarios de cambio climático. La Oficina Nacional de Emergencia (ONEMI) tiene planes de trabajo y un Centro de Alerta que incluye análisis de riesgos hidrometeorológicos. No obstante, todos ellos se encuentran desarrollados bajo una perspectiva meteorológica de corto plazo, entregándose alertas regionales en virtud del resultado de los pronósticos del tiempo.

La introducción de medidas de adaptación a los recursos hídricos implica la constitución de mecanismos de gestión de aguas en una cuenca, considerando de manera complementaria tanto los recursos de agua superficial como subterránea. Probablemente esto último implique además una revisión de la regulación existente de los derechos de agua del país (Bitrán y Rivera, s/f).

C. El sector silvoagropecuario

En cuanto a la adaptación de los sistemas agrícolas, existen medidas para minimizar los cambios en la productividad a consecuencia del cambio climático (Cifuentes y Meza, 2008). En estas medidas se exploran combinaciones de gestión productiva y el uso de insumos y variedades adaptadas para hacer frente al cambio climático. Además, tal como se ha discutido anteriormente, el cambio climático provocará un aumento de los requerimientos de riego en todo el país para las especies frutales y en el sur del país para los cultivos anuales. Esto sugiere la necesidad de crear y mejorar la infraestructura de riego de dichas regiones como una medida de adaptación. Estas políticas relacionadas con el fomento del riego deberían considerar de manera explícita los impactos del cambio climático, incluyendo el análisis de incertidumbre. Para ello, es necesario incorporar herramientas efectivas en los protocolos de evaluación de obras de infraestructura y en los programas de fomento del riego en el país. De este modo, podrían evaluarse estos proyectos asumiendo que la historia climatológica e hidrológica no es suficiente para asegurar su correcto funcionamiento (los beneficios esperados) en el futuro. También es necesaria una adecuada representación de las condiciones actuales hidrológicas y de recursos hídricos en una cuenca en particular.

La adaptación a eventos relacionados con el clima no es algo nuevo. Existen numerosos ejemplos de estrategias y planes de adaptación en respuesta a fluctuaciones meteorológicas y a una búsqueda permanente de sistemas, que reduzcan al máximo la vulnerabilidad climática o que saquen el máximo provecho a la oferta de recursos ambientales que brinda el clima. El uso de variedades tolerantes a factores meteorológicos (sequías y tolerancia a frío, entre otras), la introducción del riego, el manejo del recurso hídrico y la conservación de suelos, planes de acción para enfrentar catástrofes naturales, sistemas de alerta y pronóstico, son algunos ejemplos de fortalecimiento de resiliencia y de reducción de vulnerabilidad (IPCC, 2007).

La adaptación de sistemas agrícolas, por su parte, es un poco más compleja ya que tiene distintos niveles. Primero, hay un conjunto de medidas que busca minimizar los cambios en productividad a consecuencia del cambio climático (Cifuentes y Meza, 2008), las que exploran combinaciones de manejo productivo, uso de insumos y variedades adaptadas para hacer frente al cambio climático. Se ha visto que las reducciones del uso de fertilizantes, siembras más tempranas y la sustitución de variedades actuales por algunas de mayor longevidad son medidas que permiten minimizar los efectos negativos del cambio

global (véanse algunos ejemplos en Meza, Silva y Vigil, 2008). Estas medidas son de carácter local y son autónomas, en el sentido de que los agentes involucrados son agricultores que no debieran tener impedimentos mayores para incorporarlas. El uso de información climática como herramienta de toma de decisiones y medida de gestión de riesgo climático es reconocido como un mecanismo de adaptación del sector agrícola, puesto que contribuye directamente a la creación de capacidades. En Chile, Meza y otros (2003) determinan las condiciones de uso y el valor económico del uso de dicha información en el contexto de la predicción climática estacional asociada al fenómeno del Niño.

Se ha discutido anteriormente que uno de los impactos del cambio climático será un aumento de los requerimientos de riego en todo el país para las especies frutales y en el sur para los cultivos anuales. Esto sugiere la necesidad de crear y mejorar la infraestructura de riego de dichas regiones como una medida de adaptación. Las inversiones en sistemas de riego (equipos y profundización de pozos, entre otras) para garantizar la productividad son también medidas locales y de carácter individual, aunque el acceso a capital puede ser un factor que limite la autonomía de los agricultores.

Un segundo tipo de medidas de adaptación en el sector agrícola tiene relación con aprovechar las oportunidades que se desprenden del cambio climático. En ellas los agentes tomadores de decisiones introducen cambios importantes en sus sistemas productivos, tales como un cambio de rubro o la reubicación de sus instalaciones en pos de mejores condiciones ambientales. Muchos expertos señalan que la consecuencia de ellas será una reorganización del mapa agrícola, con especies subtropicales avanzando hacia el sur y una redefinición de los valles con aptitud vitivinícola.

Por último, hay un conjunto de medidas que buscan fortalecer las capacidades de las comunidades a nivel regional para enfrentar los problemas del cambio climático. Entre ellas se cuentan las inversiones en infraestructura como embalses y canales, la masificación de instrumentos financieros que permitan manejar el riesgo como el seguro agrícola y los subsidios que permiten reducir la vulnerabilidad de los sistemas de producción y de los recursos naturales (por ejemplo, recuperación de suelos, créditos y asistencia técnica, entre otros).

Recientemente se ha completado un estudio sobre estrategias de adaptación al cambio climático (Aldunce y otros, 2008). El objetivo general de este estudio fue sistematizar y evaluar las políticas y estrategias de adaptación al cambio climático del sector silvoagropecuario y de los recursos edáficos e hídricos, tanto a nivel nacional como internacional.

Asimismo, es importante mencionar que de manera paralela a este trabajo se está llevando a cabo un estudio de políticas públicas asociadas a la adaptación en el riego en Chile que fuera presentado en la sección anterior y cuyas conclusiones también aplican aquí (Donoso y otros, 2009).

D. La biodiversidad y los ecosistemas

No existen estudios publicados respecto de las medidas que podrían disminuir los impactos o permitir una adaptación de la biodiversidad y sistemas naturales a los cambios climáticos esperados para Chile. Sin embargo, tal como menciona Tognelli, Ramírez de Arellano y Marquet (2008), es imperativo para el país establecer una red de áreas protegidas que proporcione una adecuada cobertura de la actual biodiversidad y que sea robusta a cambios climáticos futuros.

En el capítulo IV, sobre los impactos del cambio climático, se determinó que a nivel nacional existen para Chile serios riesgos de pérdida de la biodiversidad. También se indicó que este peligro está ligado a las posibilidades de dispersión que tienen las especies en el territorio.

Continuando con este trabajo, se presenta un complemento de esa evaluación para una zona en particular, la ecorregión valdiviana, donde se ha llevado a cabo una modelación dinámica que permite

el seguimiento del movimiento de las especies de acuerdo con los escenarios climáticos en una serie de situaciones diferentes. Por una parte, se ha impedido el movimiento de especies más allá de las zonas en las que actualmente hay intervención del ser humano; y, por otra, se contempla un escenario en el que no existe esta restricción, caracterizado en la práctica por un potencial aumento de las áreas protegidas.

Los resultados de este trabajo sobre los escenarios climáticos futuros se resumen más adelante. Para el escenario B2 se observa que, del total de especies consideradas en la modelación, una especie de los vegetales y tres de los vertebrados sufrirían un decrecimiento en su distribución mayor al 80% cuando se considera el impacto del uso humano del territorio, lo que las colocaría en peligro crítico⁹. En este escenario, al aumentar las áreas protegidas se incrementa la ocupación de estas especies, pero solo en dos casos este incremento permite que la reducción en la distribución sea menor o igual al 80%. Además de estas especies, otras nueve presentan decrecimientos iguales o mayores al 80% en ambos escenarios (con y sin considerar el uso humano del territorio). En el escenario A2 se observa que 11 especies de plantas y 6 de vertebrados tendrían un decrecimiento en su distribución mayor al 80% cuando se considera el impacto del uso humano del territorio, lo que las colocaría en peligro crítico. En este caso, el aumento de las áreas protegidas logra incrementar la ocupación de estas especies, pero en solo 11 de los casos este incremento permite que la reducción en la distribución sea menor o igual al 80%. Otras nueve presentan un decrecimiento igual o mayor al 80% en ambos escenarios (con y sin considerar el uso humano del territorio).

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, una medida de adaptación potencial para este sector sería la adquisición de terrenos aledaños a las áreas protegidas de manera de aumentar las posibilidades de dispersión de las especies. Esta medida ha sido evaluada como ejemplo de aplicación en el caso de la ecorregión valdiviana. En el cuadro V.1 se muestran los resultados de la valoración económica en ambos escenarios, correspondientes al costo de las áreas que deberían incluirse al diseñar un sistema de áreas protegidas que sea sólido ante los cambios del clima en esta región. Es importante destacar que no se incorporan en el análisis los beneficios asociados a tal medida, es decir, el impacto que deja de percibirse al no perderse estas especies, tema que sería pertinente evaluar al decidir la mejor estrategia de adaptación en esta materia.

CUADRO V.1
VALORES DE HABILITACIÓN DE UNA RED DE ÁREAS PROTEGIDAS
NECESARIA PARA CONSERVAR PARTE DE LA BIODIVERSIDAD QUE SE
PIERDE, PRODUCTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA ECORREGIÓN
VALDIVIANA EN LOS ESCENARIOS A2 Y B2

Usos	A2		B2	
	Superficie (En hectáreas)	Monto (En millones de dólares)	Superficie (En hectáreas)	Monto (En millones de dólares)
Agrícola	167 488	1 209	54 867	396
Bosque nativo	398 579	480	207 041	249
Forestal	122 815	681	91 769	509
Matorral	27 816	186	13 916	93
Total	716 698	2 557	367 593	1 248

Fuente: Elaboración propia.

⁹ Se modelan 69 especies de árboles y 25 especies de vertebrados.

E. La infraestructura

En cuanto a los impactos en la infraestructura asociados a las inundaciones, es importante considerar que en el futuro, si cambia la frecuencia o la intensidad de estos eventos, probablemente deba estudiarse la adopción de medidas que reevalúen los protocolos de diseño de obras de infraestructura para mejorar su resistencia. Independiente de lo anterior, es relevante indicar que las medidas que se tomen para disminuir los impactos en las vidas humanas y los costos materiales asociados a las inundaciones en la actualidad también tendrán que ser aplicadas en el futuro. En este sentido, las acciones necesarias serían mejorar las condiciones de monitoreo de caudales en las crecidas y continuar los planes de mejora de las redes de descarga de agua de lluvia de las principales urbes, iniciados por el Ministerio de Obras Públicas a fines de los años noventa (Bitrán y Rivera, s/f).

Con respecto a los potenciales impactos en las zonas costeras y la infraestructura asociada, cuando existan las herramientas e información requeridas sobre la evaluación de impactos futuros, estas deberían incluirse en el diseño de obras o en los protocolos de operación que anticipen eventuales cambios oceánico-meteorológicos.

VI. Emisión y mitigación de gases de efecto invernadero en Chile

En los capítulos anteriores se puso énfasis en describir los efectos esperados del cambio climático en Chile. Este capítulo se enfoca en evaluar cuál ha sido y cuál se espera que sea el impacto del país en la ocurrencia del cambio climático. El desarrollo económico de Chile ha sido continuo en las últimas décadas y eso ha traído una serie de beneficios económicos y sociales, pero también una consecuencia no deseada: el aumento sostenido de las emisiones de gases de efecto invernadero, en especial de dióxido de carbono (CO₂), asociado principalmente al consumo de energía. Pese a no ser un país con una incidencia relevante en el contexto mundial, está claro que su aporte ha ido creciendo de manera paulatina y, de acuerdo con las tendencias que se esperan, seguirá aumentando en el futuro. En este capítulo se ofrece una perspectiva histórica y futura de los escenarios de emisión de GEI en Chile¹⁰.

A. Emisiones históricas de gases de efecto invernadero

Si bien se han realizado diferentes estudios (POCH Ambiental, 2008; PROGEA-Universidad de Chile, 2008; INIA, 2004) con el fin de cuantificar las emisiones de GEI en Chile en los últimos años, no existe un inventario que integre los diferentes sectores emisores y, por lo tanto, es necesario recurrir a distintas fuentes de información para evaluar la totalidad de las emisiones nacionales.

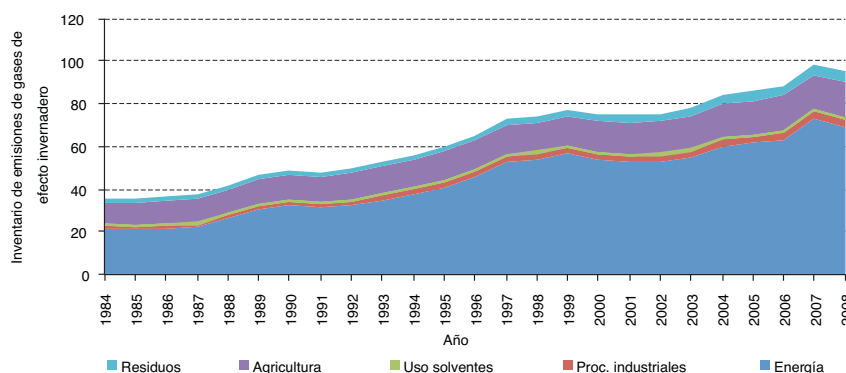
Las emisiones totales de Chile en el período 1984-2008, sin incluir al sector forestal, cambio del uso del suelo (F-CUS), se muestran en el gráfico VI.1. Por una parte, se puede apreciar que el país ha aumentado su nivel de emisiones en un 166% durante las últimas décadas, de un total de 36 millones de toneladas de CO₂ equivalente (MtCO₂e) en 1984 a 95 millones en 2008. En términos de emisiones per cápita se pasó de 3 toneladas por persona en 1984 a 5,7 toneladas en 2008. Por otra parte, se destaca que el sector de la energía domina las emisiones, con un aporte del 73% de las emisiones totales en 2008.

¹⁰ Es importante destacar que los períodos de análisis para los trabajos de impacto, adaptación y mitigación no han podido ser los mismos, ya que se consideró el tipo de información disponible a la fecha. No existe a la fecha ningún tipo de proyección de emisiones ni de demanda y generación de energía que abarque períodos que superen el año 2030.

Con respecto al sector F-CUS, la información oficial disponible en la actualidad está asociada al estudio del inventario de emisiones de los sectores no energéticos realizado por el INIA (2004). Esta información cubre solo el período que va hasta 2003, por lo que no fue incluida en el análisis anterior. Sin embargo, es importante señalar que el INIA (2004) constató que el sector F-CUS ha sido históricamente un sumidero neto de emisiones, producto sobre todo de la conversión de suelos abandonados y agrícolas a plantaciones forestales. En 2003, este efecto sumidero ascendió a unas 18,2 MtCO₂e, valor que corresponde a casi un 25% de las emisiones totales presentadas para ese año en el gráfico VI.1. Se puede apreciar en el gráfico VI.2 el efecto que tiene el sector F-CUS en disminuir las emisiones netas del país. Complementando lo anterior, es importante mencionar que se han realizado estudios (Gilabert y otros, 2007) que acreditan que una parte significativa de este aporte como sumidero del sector se asocia al fomento de las plantaciones forestales producido por medio del decreto ley 701.

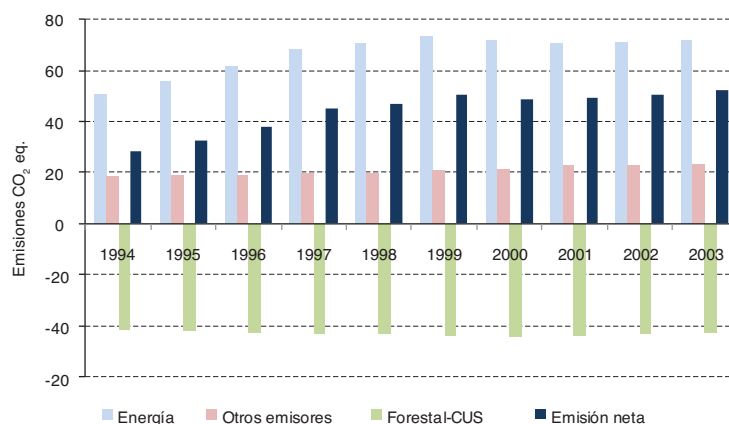
A continuación se presentan las proyecciones futuras de emisión de GEI en el país.

GRÁFICO VI.1
EMISIONES DE GEI TOTALES POR SECTOR, 1984-2008
(En MtCO₂e)



Fuente: Elaboración propia sobre la base de POCH Ambiental, “Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero para Chile desde el año 1984 al 2006”, Proyecto segunda Comunicación nacional, 2008; y Programa de Gestión y Economía Ambiental (PROGEA-Universidad de Chile), *Consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero en Chile 2007-2030 y opciones de mitigación*, Universidad de Chile, Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), “Actualización del inventario de gases efecto invernadero (GEI), para el caso de Chile, en los sectores agrícolas, uso y cambio de uso de la tierra, forestal y de residuos”, Santiago de Chile, 2004.

GRÁFICO VI.2
EMISIONES NETAS (CONSIDERANDO SECTOR FORESTAL-CUS), 1994-2003
 (En MtCO₂e)



Fuente: Elaboración propia sobre la base de POCH Ambiental, “Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero para Chile desde el año 1984 al 2006”, Proyecto segunda Comunicación nacional, 2008; y Programa de Gestión y Economía Ambiental (PROGEA-Universidad de Chile), *Consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero en Chile 2007-2030 y opciones de mitigación*, Universidad de Chile, Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), “Actualización del inventario de gases efecto invernadero (GEI), para el caso de Chile, en los sectores agrícolas, uso y cambio de uso de la tierra, forestal y de residuos”, Santiago de Chile, 2004.

B. Proyección de emisiones de gases de efecto invernadero en el período 2009-2030

Se presentan a continuación las proyecciones de emisiones de GEI de diferentes sectores en el período 2009-2030.

1. Sector energético

Como se deduce de los inventarios de emisiones pasadas de GEI, el sector energético es el principal emisor en Chile. Este sector se compone de varios subsectores, entre los que se destacan el de generación eléctrica y otras fuentes de transformación de energía y el de transporte. A estos los siguen otros subsectores con aportes relevantes, pero menores.

A continuación se procederá a detallar los supuestos realizados para la construcción del escenario base de emisiones del sector energético. Se analizan por separado los supuestos realizados en el subsector generación de electricidad y en los otros subsectores.

Las proyecciones para el subsector de generación de electricidad para los dos principales sistemas eléctricos del país (el SIC y el SING), han sido preparadas por la Comisión Nacional de Energía (CNE), que llevó a cabo una proyección del suministro eléctrico de largo plazo (2009-2035) mediante un modelo de optimización de suministro energético que minimiza el costo total de abastecimiento futuro considerando tanto la inversión como la operación. Para esta proyección se utilizaron como base los datos de costos existentes de tecnologías, así como de sus características técnicas y las proyecciones de la Agencia Internacional de Energía (AIE) respecto de su posible evolución. Asimismo, se utilizaron estudios de la CNE y antecedentes de la AIE con respecto a la evolución esperada de los precios de los hidrocarburos. Esto implica costos constantes de las tecnologías convencionales en el tiempo, costos

decrecientes de las tecnologías de generación de Energías Renovables No Convencionales (ERNC) y precios crecientes de los hidrocarburos.

Para cada tecnología se analizó la disponibilidad total del recurso y se establecieron límites a la capacidad que se puede utilizar del total de cada recurso durante el período, con el fin de reflejar el hecho de que no todo el recurso puede ser técnica ni económicamente aprovechable. Además, se restringió la capacidad media anual que puede incorporarse de cada tecnología para reflejar las restricciones de ejecución de proyectos. De ese modo, se incorporaron características específicas de los potenciales nacionales y se tomó en cuenta la evolución histórica de la matriz eléctrica.

En las proyecciones realizadas para el subsector de generación eléctrica, se considera el plan de obras de la CNE, incluyendo tanto las centrales que se encuentran en construcción en la actualidad como aquellos proyectos que se encuentran en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. Las proyecciones consideradas asumen que la línea de base incorpora el total cumplimiento de la ley N° 20.257 de fomento de ERNC –no se considera la posibilidad de que las empresas eléctricas paguen la multa correspondiente al incumplimiento de la ley¹¹. Los detalles de esta ley serán explicados en una sección a continuación. Por otra parte, se asume como supuesto de estas proyecciones el hecho de que no existe una conexión entre los cuatro sistemas de transmisión existentes. En particular, no se considera la posibilidad de empalmar el Sistema Interconectado Central (SIC) y el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING).

Como datos exógenos se consideraron los costos de las tecnologías (inversión y operación) y de los combustibles, así como sus características técnicas. Se tomó como base la política vigente expresada en la ley de ERNC y las acciones vinculadas al logro de la eficiencia energética.

Con estos criterios se realizó un conjunto de proyecciones suponiendo que la política energética permanece estable en todo el período¹². El objetivo de las proyecciones fue identificar la gama de posibles resultados en términos de emisiones que pueden darse dentro del marco de la política vigente. Las variaciones pueden ocurrir en tres ámbitos:

- i) nivel efectivo de eficiencia: depende del conjunto de decisiones individuales que afectan la demanda final;
- ii) aprovechamiento efectivo de la capacidad hidráulica: depende de las limitaciones que se definan para los proyectos específicos; y
- iii) aprovechamiento de la capacidad de ERNC: depende de las restricciones que se definan para los proyectos específicos.

En función de las variables recién descritas se estableció un conjunto de escenarios, manteniendo invariadas las proyecciones de precios de hidrocarburos, costos de inversión y operación y características técnicas. En todos los escenarios se respetó el plan de obras y la demanda del informe de precio de nudo de abril de 2009, que realiza una proyección de 2009 a 2019. Por lo tanto, las variantes que presentan los distintos escenarios se producen a partir de 2020.

Dentro de los escenarios se definió como escenario de referencia el que presenta menor número de restricciones. Posteriormente, se procedió a agregar en forma sucesiva mayores restricciones dentro de las posibilidades mencionadas¹³.

¹¹ La ley N° 20.257 establece que, en caso de incumplimiento de los porcentajes de producción con ERNC, la empresa eléctrica deberá pagar un cargo de monto proporcional a la magnitud de la energía renovable que no se acreditó. Lo recaudado con estos cargos se destinará a los clientes de aquellas empresas eléctricas cuyos suministros hubieren cumplido la obligación, distribuyéndose a prorrata de la energía consumida por los clientes.

¹² Por ese motivo, no se introduce la posibilidad de otras opciones tecnológicas como la energía nuclear de potencia.

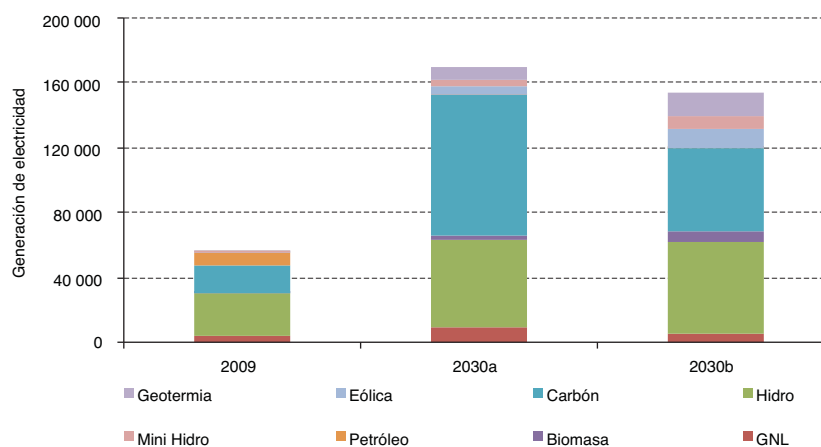
¹³ Pueden existir escenarios más extremos en términos de emisión que los planteados, pero se han mantenido acotados los escenarios en virtud del argumento de que no debería existir una divergencia radical con ciertas tendencias históricas del sistema chileno.

El escenario identificado de mayor riesgo de emisión¹⁴ es el de mayor crecimiento de demanda y mayores restricciones a la instalación de proyectos hídricos y de ERNC¹⁵. Este se considera el escenario base de emisiones, pues no incorpora medidas para reducir la probabilidad de su ocurrencia. Es decir, dentro de los escenarios que se evalúan en el marco de la política vigente, es el que no toma en cuenta las acciones específicas de mitigación.

En el gráfico VI.3 se presentan los cambios en la composición de la matriz de los sistemas SIC y SING (en términos de generación de electricidad) de acuerdo con estas dos situaciones descritas. Primero se presenta la situación actual a 2009 y después se plantean dos posibles escenarios a 2030. El primer escenario (2030a) corresponde al escenario base en materia de emisiones ya mencionado. El segundo escenario (2030b) corresponde al llamado escenario de referencia, donde se imponen restricciones mínimas al desarrollo de la energía hídrica y de las ERNC y se han logrado tasas mayores de eficiencia energética. Este se considerará con posterioridad como un escenario de mitigación de emisiones. Se puede apreciar que la diferencia entre ambos escenarios está dada por la cantidad de electricidad producida y por los aportes relativos de las distintas fuentes de generación, en especial carbón, hidráulica y ERNC.

Es importante tener en cuenta que en ambos casos se han considerado para la generación histórica hidráulica factores de planta, que corresponden a años hidrológicos medios. Esto podría verse alterado en el futuro de acuerdo con lo presentado en el capítulo IV respecto de los efectos en el sector hidroeléctrico. En dicho capítulo se menciona que el impacto del cambio climático podría aumentar la necesidad de generar electricidad con carbón de 2.000GWh a 3.000GWh al año. Se destaca que los escenarios para 2030 indican una generación a carbón entre 50.000GWh y 85.000GWh aproximadamente, cifra bastante superior a la anterior.

GRÁFICO VI.3
CAMBIOS EN LA COMPOSICIÓN DE LA MATRIZ DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE
ACUERDO CON LA SITUACIÓN BASE EN 2009 Y ESCENARIOS EN 2030
(En GWh)



Fuente: Elaboración propia.

¹⁴ En caso de que se alteraran las variables exógenas, se podría aumentar la variabilidad de los resultados. Por ejemplo, si la tasa de crecimiento de los precios de los hidrocarburos fuera significativamente menor que la reconocida internacionalmente en la actualidad, se tendería a una matriz con mayor presencia de hidrocarburos.

¹⁵ Con respecto al nivel efectivo de eficiencia energética, se mantiene el aumento de la demanda eléctrica a la misma tasa media que hasta 2019. Las restricciones en la generación hidráulica y de ERNC suponen que la instalación de estas tecnologías a futuro no es sustancialmente diferente a la observada hasta ahora.

Para el resto de los subsectores del sector energético –incluida la generación eléctrica de autoprodutores y los sistemas Aysén y Magallanes– se usó la proyección de línea de base de emisiones del sector energético encargada por la CNE a la empresa POCH Ambiental (POCH, 2009). El trabajo de POCH presenta resultados solo hasta 2025, pero en esta oportunidad se extendieron hasta 2030 manteniéndose las mismas tendencias de consumo de energía. Para estimar la demanda de energía no eléctrica de estos sectores se utilizaron como variables explicativas los índices históricos de actividad económica sectorial o el PIB. Las variables utilizadas en la proyección del consumo de energía en cada sector se presentan en el cuadro VI.1 obtenidas del informe (POCH, 2009). Para estimar las emisiones de GEI en el sector de la energía se emplearon las metodologías sugeridas por el IPCC. Esta estimación es más rudimentaria que la realizada para el SIC y el SING, pues no considera el proceso de optimización que debería tender a manifestarse en un sistema de generación eléctrica. No obstante, dado que el aporte en términos de emisiones de estos subsectores es proporcionalmente menor, las diferencias metodológicas son poco relevantes.

En el gráfico VI.4 se observan las emisiones totales del sector de la energía en el período 1985-2030, desglosadas por subsectores. Para el subsector de electricidad se ha considerado como base la situación asociada al escenario 2030a del gráfico VI.3, es decir, el escenario que sigue la tendencia actual, en cuanto a restricciones a la entrada de centrales hidráulicas y ERNC y de eficiencia energética.

Las emisiones del sector energía muestran un aumento del 281% (casi tres veces) de 2009 a 2030, pasando de 70 a 197 MtCO₂e (no se incluyen en este balance las emisiones del subsector leña y biogás). Los principales aumentos los han experimentado los subsectores de transporte e industria de energía.

La evolución de las emisiones totales de GEI en el sector energía en el período 1985-2030, desglosadas por subsectores, se detalla en el cuadro VI.2.

Respecto del subsector transporte, segundo en cuanto a aporte en el sector energía, se puede apreciar en el gráfico VI.5 que la mayor contribución en cuanto a las emisiones de GEI está asociada al transporte terrestre. Es importante considerar que las emisiones de transporte incluyen para los subsectores de transporte aéreo y marítimo, aquellas emisiones por los combustibles *bunker*, que corresponderían en promedio a un 44% y un 73% de las emisiones totales de cada subsector respectivamente (Sistemas Sustentables, 2009)¹⁶.

¹⁶ No se consideraron las emisiones de maquinaria fuera de ruta, pero tampoco se cargaron a transporte, en especial porque no había información disponible en los estudios utilizados. Esto probablemente está considerado en el consumo industrial.

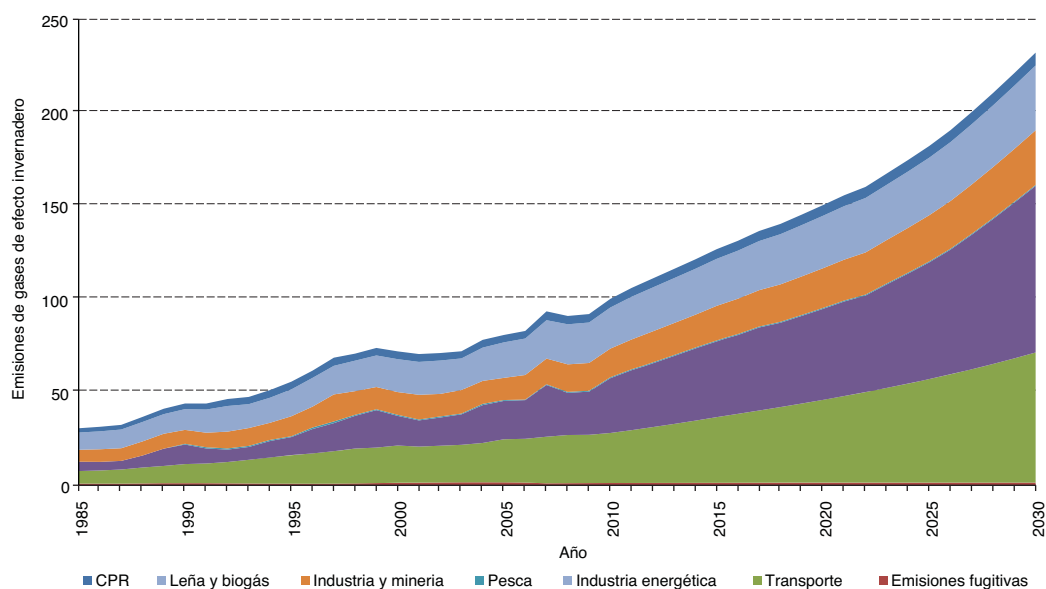
CUADRO VI.1
RESUMEN DE LOS INDICADORES Y AJUSTES AL MODELO DE PROYECCIÓN
POR SECTOR

Sector	Porcentaje respecto del total nacional de CO ₂ eq	Indicador para correlacionar el consumo de energía	Variable para proyectar el indicador	Correlación indicador versus consumo de energía	Ajustes al modelo
Energía-gas y coque	1,2%	Producción acero	PIB	0,63	Producción acotada a la capacidad instalada 1,45 MMton y al año 2015 al doble de la capacidad. Alquitrán, gas corriente y petróleo combustible ajustado a la mediana 2004-2007, del 12,2%, 19,8% y 6,4% respectivamente.
Energía-petróleo y gas	4,5%	Procesamiento crudo	PIB	0,73	Producción acotada a la capacidad de refinación actual de 120 mil Tcal y a un aumento en 2016 de 160 mil Tcal. Nafta acotado a la mediana 2000-2007 del 10%
Energía-carbón y leña	0,0%	Producción carbón	CNE	0,87	Isla Riesco el año 2012 comienza operaciones productivas de 4 a 6 MMton. Carbón, petróleo combustible y diésel ajustados a la mediana 2004-2007 del 11%, 6,4% y 15% respectivamente.
Energía-gas y metanol	0,6%	Producción metanol	PIB	0,98	Datos desde 1988.
Cobre	5,4%	Producción cobre	COCHILCO	0,98	-
Salitre	0,5%	PIB	n/a	0,90	Petróleo combustible ajustado a la mediana del consumo histórico del 59%.
Hierro	0,5%	PIB	n/a	0,67	-
Celulosa	1,2%	Producción celulosa	PIB	n/a	Modelo PROGEA
Siderurgia	3,1%	Producción acero	PIB	0,78	Producción acotada a la capacidad instalada 1,45 MMton y al año 2015 al doble de la capacidad.
Petroquímica	0,1%	PIB	n/a	0,83	Crecimiento del sector es un 50% del PIB debido a que los valores son relativamente estables desde 1992.
Cemento	1,4%	Producción cemento	PIB	0,95	Coque acotado a mediana histórica representativo del 10%.
Azúcar	0,7%	Producción azúcar	PIB	0,77	-
Industrias varias	9,6%	PIB	n/a	0,95	-
Transporte aéreo	3,4%	PIB	n/a	0,97	-
Transporte marítimo	7,2%	PIB	n/a	0,96	-
Transporte terrestre	27,0%	Parque vehicular	PIB	n/a	Modelo PROGEA
Transporte ferroviario	0,1%	PIB	n/a	-0,81	-
Comercial y público	1,4%	PIB	n/a	0,94	-
Residencial	5,9%	Población	INE	0,97	-
Pesca	0,9%	PIB	n/a	0,66	Datos desde 1990. Petróleo combustible acotado a mediana histórica del 53%.

Fuente: POCH Ambiental, “Proyección de la evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector energía”, Santiago de Chile, Comisión Nacional de Energía (CNE), 2009.

Nota: n/a = no aplica.

GRÁFICO VI.4
EVOLUCIÓN DE EMISIONES DE GEI EN EL SECTOR DE LA ENERGÍA
EN EL ESCENARIO BASE^a
(En MtCO₂)



Fuente: Elaboración propia.

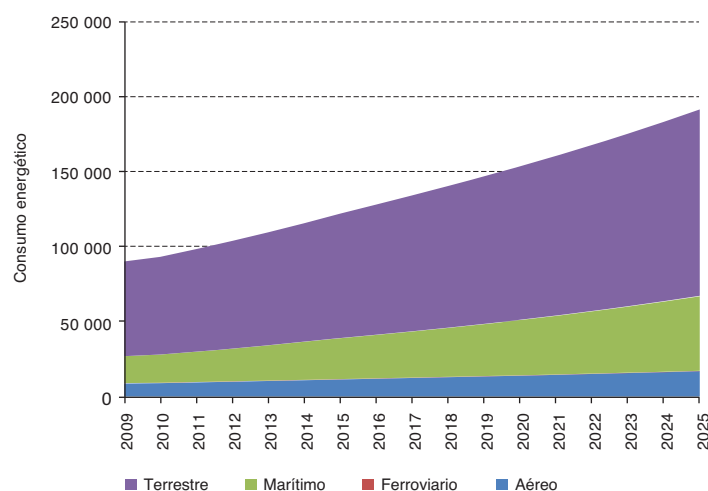
^a Las emisiones por combustión de leña y biogás se presentan en este gráfico, pero posteriormente no se suman al neto total del país, ya que no implican emisiones netas (el CO₂ que se emite fue capturado previamente). CPR se refiere a comercial, público y residencial; industria energética considera principalmente al subsector de generación eléctrica, pero también a otros subsectores asociados a la conversión de energía, como la producción de petróleo refinado.

CUADRO VI.2
EVOLUCIÓN DE LAS EMISIONES DE GEI EN EL SECTOR ENERGÉTICO
EN EL ESCENARIO BASE
(En MtCO₂e)

Año	Transporte	Industria de la energía	Industria y minería	CPR	Pesca	Emisiones fugitivas	Leña y biogás	Escenario base
1985	6,72	5,03	6,39	2,30	0	0,88	9,25	21,3
1986	7,07	4,62	6,75	2,44	0	0,85	9,62	21,7
1987	7,60	4,62	6,78	2,49	0	0,84	10,05	22,3
1988	8,54	6,44	7,57	2,71	0	0,96	10,43	26,2
1989	9,27	9,28	8,00	2,90	0	1,08	10,52	30,5
1990	10,19	10,47	7,45	3,02	0,42	1,16	11,14	32,7
1991	10,62	8,07	7,80	3,22	0,65	1,04	12,43	31,4
1992	11,46	6,65	9,01	3,74	0,64	1,00	13,75	32,5
1993	12,70	6,89	9,57	3,87	0,59	0,94	12,82	34,6
1994	13,97	8,86	9,19	4,09	0,60	0,90	13,45	37,6
1995	15,37	9,64	10,73	4,14	0,45	0,83	14,41	41,1
1996	16,26	13,10	11,23	3,88	0,82	0,81	15,42	46,1
1997	17,42	15,04	14,50	4,36	0,92	0,84	15,36	53,1
1998	18,76	17,55	12,69	3,77	0,56	0,93	16,36	54,3
1999	19,10	20,09	11,92	4,03	0,50	1,10	16,94	56,7
2000	19,96	15,90	12,19	4,18	0,59	1,35	17,67	54,2
2001	19,25	14,05	13,25	4,22	0,50	1,48	17,65	52,8
2002	19,73	15,12	12,08	4,02	0,59	1,47	17,91	53,0
2003	20,19	16,35	12,63	3,83	0,43	1,50	16,95	54,9
2004	21,10	20,31	12,32	4,16	0,68	1,58	17,87	60,1
2005	23,09	20,59	11,90	3,97	0,46	1,58	19,05	61,6
2006	23,48	20,75	13,17	4,06	0,32	1,44	19,57	63,2
2007	25,01	27,74	13,77	4,75	0,41	1,03	20,59	72,7
2008	25,85	22,61	14,78	4,46	0,52	1,10	21,50	69,3
2009	25,89	23,15	14,88	4,53	0,52	1,17	21,71	70,1
2010	26,78	29,38	15,37	4,63	0,51	1,26	22,05	77,9
2011	28,29	32,17	15,97	4,73	0,52	1,26	22,92	82,9
2012	29,88	34,33	16,53	4,84	0,52	1,33	23,54	87,4
2013	31,55	36,39	17,24	4,95	0,52	1,34	24,09	92,0
2014	33,32	38,58	17,73	5,07	0,52	1,34	24,65	96,6
2015	35,19	40,80	18,39	5,19	0,52	1,35	25,22	101,4
2016	36,95	42,29	18,96	5,29	0,52	1,36	25,78	105,4
2017	38,74	44,54	19,51	5,40	0,52	1,36	26,36	110,1
2018	40,57	45,24	20,08	5,50	0,52	1,37	26,94	113,3
2019	42,46	47,02	20,67	5,62	0,52	1,37	27,53	117,7
2020	44,42	48,82	21,29	5,73	0,52	1,38	28,14	122,2
2021	46,46	50,75	21,94	5,83	0,52	1,39	28,72	126,9
2022	48,58	51,79	22,61	5,94	0,53	1,39	29,23	130,8
2023	50,80	55,57	23,30	6,05	0,53	1,40	29,63	137,6
2024	53,13	59,02	24,03	6,16	0,53	1,40	30,24	144,3
2025	55,56	62,63	24,78	6,28	0,53	1,40	30,87	151,2
2026	58,13	66,89	25,59	6,40	0,53	1,40	31,60	158,9
2027	60,83	72,22	26,44	6,52	0,53	1,41	32,35	167,9
2028	63,67	77,76	27,35	6,65	0,53	1,41	33,13	177,4
2029	66,67	83,53	28,31	6,77	0,53	1,41	33,93	187,2
2030	69,82	89,37	29,33	6,91	0,53	1,41	34,76	197,4

Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO VI.5
EMISIONES DE GEI ASOCIADAS AL SECTOR TRANSPORTE
(En Tcal)



Fuente: POCH Ambiental, “Proyección de la evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector energía”, Santiago de Chile, Comisión Nacional de Energía (CNE), 2009.

2. Sector no energético

Los otros sectores que contribuyen a la emisión de GEI corresponden al sector forestal, cambio del uso del suelo (F-CUS), al de procesos industriales, al de uso de solventes y, finalmente, al de agricultura y residuos. Para todos estos sectores, con excepción del F-CUS, se han evaluado las emisiones futuras utilizando datos directos de estudios o una proyección de acuerdo con tendencias históricas. El sector F-CUS no fue incluido en el análisis debido a que, a diferencia de los otros, resulta más complejo llevar a cabo proyecciones de su posible aporte de acuerdo con las condiciones históricas. El aporte puntual que logró el decreto ley 701 de fomento forestal impide extrapolar el patrón de emisiones netas históricas hacia el futuro.

Respecto de los GEI originados directamente en los procesos industriales, en el estudio PROGEA (2008) se establece que las industrias de producción de cemento, hierro y acero son las más relevantes en términos relativos. La proyección de emisiones se realizó mediante la proyección de los volúmenes de producción de esos materiales. Para el sector uso de solventes se proyectaron los datos del informe de POCH (2008). Finalmente, para el sector agricultura y residuos se proyectaron los datos del trabajo del INIA (2004).

3. Línea de base nacional

Sobre la base de los aportes del sector energético y no energético es posible hacer una proyección de las emisiones de GEI totales en el país, como se muestra en el gráfico VI.6 (aunque, como se mencionó anteriormente, no se incluyen las proyecciones del sector F-CUS).

Se observa que las emisiones totales aumentan un 243% en el período 2009-2030 (de 96 MtCO₂e a 233 MtCO₂e).

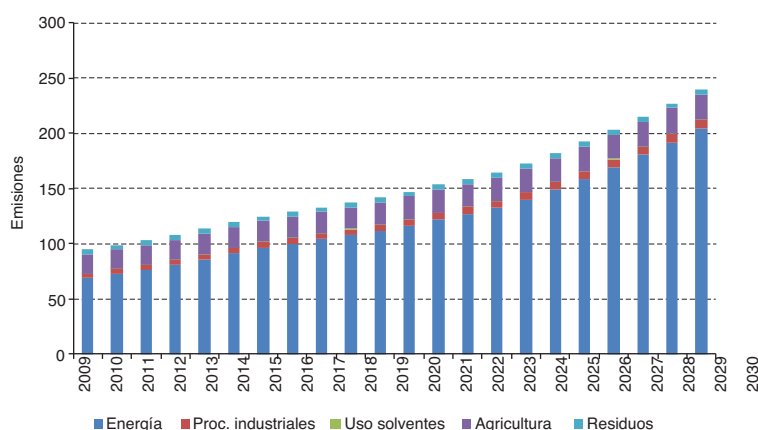
C. Mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero en Chile

1. Sector energético

En el gráfico VI.6 se ve claramente que el principal sector emisor de GEI en Chile es el de la energía, con aproximadamente un 85% de aporte de emisiones para 2030. En este sentido, resulta crítico incorporar medidas de mitigación de las emisiones de este sector a fin de lograr reducciones importantes para el país. En estudios recientes (Blümel, Espinoza y Domper, 2010) se muestra que, a pesar de todos los logros obtenidos en eficiencia energética, aún no existe un real desacople entre el consumo de energía y el PIB en Chile. La línea de base estudiada en las secciones anteriores de este capítulo tampoco da cuenta de dicho desacople. Existen diversas barreras para desarrollar medidas de mitigación que permitan avanzar hacia un real desacople entre el consumo energético y el PIB. Dichas barreras pueden ser clasificadas en: i) barreras relacionadas con el consumidor; ii) barreras relacionadas con los fabricantes de equipos; iii) barreras relacionadas con las empresas de servicios; iv) barreras relacionadas con las instituciones financieras; v) barreras relacionadas con aspectos legales y gubernamentales; y vi) barreras culturales.

Es fundamental reconocer que en Chile ya se han incorporado medidas que resultaron en una reducción significativa de las proyecciones de emisión. Estas son las llamadas acciones tempranas (*early actions*), que corresponden a acciones de mitigación que han sido adoptadas adelantándose a cualquier acuerdo formal de reducción de emisiones. En el caso particular de Chile, es posible destacar dos acciones tempranas que ya han sido implementadas en relación con emisiones provenientes del sector de generación de electricidad. Estas forman parte del impacto en la eficiencia energética (EE) asociado al Programa País de Eficiencia Energética (PPEE) y la ley de fomento a las energías renovables no convencionales (ley 20.257), que entró en vigencia el año 2010. Es importante destacar que el efecto de estas medidas, en cuanto a reducción de emisiones, ya ha sido incorporado en la línea de base de emisiones presentada con anterioridad.

GRÁFICO VI.6
PROYECCIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO
POR SECTOR, 2009-2030
(En MtCo₂)

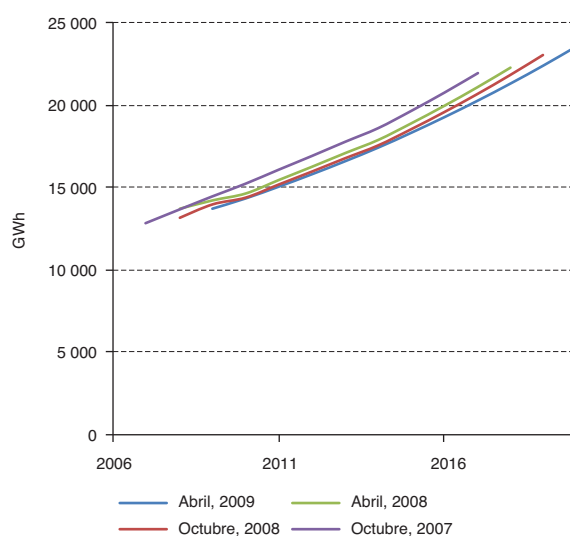


Fuente: Elaboración propia.

El PPEE tiene el objetivo de consolidar la eficiencia energética como una fuente de energía y para lograrlo se ha trabajado en diversas políticas que buscan incentivar un uso más eficiente de la energía en todos los sectores. Principalmente, es posible mencionar el primer programa de recambio de bombillas eficientes en hogares, el etiquetado de eficiencia energética para refrigeradores y los programas de educación en eficiencia energética. También se están diseñando otros programas, sobre todo para el sector industrial, como los de recambio de camiones antiguos y motores eléctricos por otros más eficientes. En el último tiempo, se ha constatado la incorporación permanente de criterios de eficiencia en los hábitos de los consumidores, lo que ha contribuido a una contracción de la demanda de electricidad en el país. Considerando las reducciones de dicha demanda asociada a medidas implementadas por medio del PPEE, la CNE ha ido modificando progresivamente las proyecciones para la tasa de crecimiento de la demanda de electricidad que utiliza en los estudios de estimación del precio de nudo para los sistemas SING y SIC¹⁷. Esto se puede apreciar con claridad en los gráficos VI.7 y VI.8. Es importante recalcar que la información que emana del informe de precio de nudo, en cuanto a demanda y oferta de electricidad, es la que se usa en la proyección de emisiones del sector eléctrico.

Por otra parte, la ley de fomento de las ERNC establece, desde 2010, la obligación de las empresas eléctricas, que comercializan energía en los sistemas eléctricos con capacidad instalada superior a 200 MW (SIC y SING), de acreditar anualmente que un porcentaje del total de la energía comercializada haya sido inyectado a los sistemas eléctricos por medios de generación renovables no convencionales, sean estos propios o contratados. En particular, la ley establece que de 2010 a 2014 la obligación es del 5%. A partir de 2015, esta obligación se incrementa gradualmente en un 0,5% anual hasta llegar al 10% en 2024. Esta ley tiene vigencia solo para los contratos celebrados con posterioridad al 10 de enero de 2007.

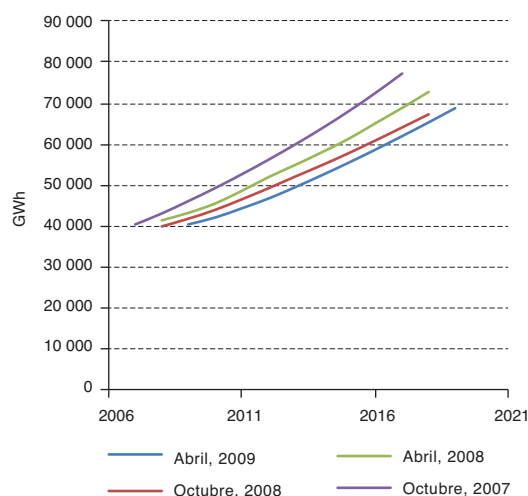
GRÁFICO VI.7
PROYECCIÓN DE DEMANDA ELÉCTRICA SING DE ACUERDO CON
INFORMES PRECIO DE NUDO
(En GWh)



Fuente: Sobre la base de la Comisión Nacional de Energía (CNE), Informes Precio de nudo [en línea] <http://www.cne.cl> [fecha de consulta: 9 de diciembre de 2011].

¹⁷ En <http://www.cne.cl/>.

GRÁFICO VI.8
PROYECCIÓN DE DEMANDA ELÉCTRICA SIC DE ACUERDO CON
INFORMES PRECIO DE NUDO
(En GWh)



Fuente: Sobre la base de la Comisión Nacional de Energía (CNE), Informes Precio de nudo [en línea] <http://www.cne.cl> [fecha de consulta: 9 de diciembre de 2011].

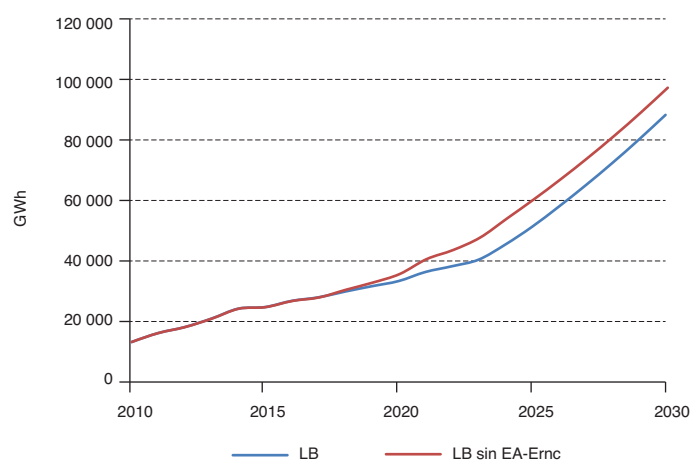
La ley 20.257 involucra reducciones en las emisiones de GEI que, al igual que en el caso de las medidas de eficiencia energética, ya han sido incorporadas en la línea de base de emisiones de GEI. Para calcular cuál es el aporte que tiene esta ley en reducir las emisiones se ha adaptado una metodología que considera, de manera intacta, la generación estipulada en el plan de obras asociado al informe de precio de nudo de abril de 2009. Luego, desde el año 2019 (último año de la proyección del plan de obras), se reemplazan todas aquellas centrales de fuentes de ERNC incorporadas a los sistemas SIC y SING en la proyección de línea de base. Se supuso que la generación de ERNC sería reemplazada por generación a carbón. El gráfico VI.9 muestra la comparación de la generación a carbón para todo el país para la línea de base y la línea de base sin considerar las acciones tempranas de ERNC.

Bajo el supuesto de que estas medidas no existieran, se produciría un aumento en la proyección de emisiones de GEI a raíz de un incremento en la generación a carbón, asociado tanto a una reducción del aporte de energías renovables –de acuerdo con las repercusiones de la ley de ERNC– como a un aumento de la demanda de electricidad –de conformidad con el impacto esperado de las medidas asociadas al PPEE–. En el gráfico VI.10 se presentan las emisiones de GEI cuando no se incluyen los programas de eficiencia energética tempranos ni la ley de fomento de las ERNC. Es interesante notar que, sin la introducción de estas medidas, la emisión de GEI al año 2030 sería casi un 18% mayor que la línea de base considerada en estas proyecciones.

Además de los efectos de las acciones tempranas se proponen en esta oportunidad cinco escenarios de mitigación destinados a reducir las emisiones del escenario base. La definición de estos escenarios se muestra en el cuadro VI.3. Los dos primeros consideran medidas que apuntan a obtener reducciones en los sectores de generación de electricidad, industrial y residencial. Los dos escenarios siguientes están asociados a medidas en el sector del transporte. Finalmente, se considera un escenario con el máximo potencial de abatimiento.

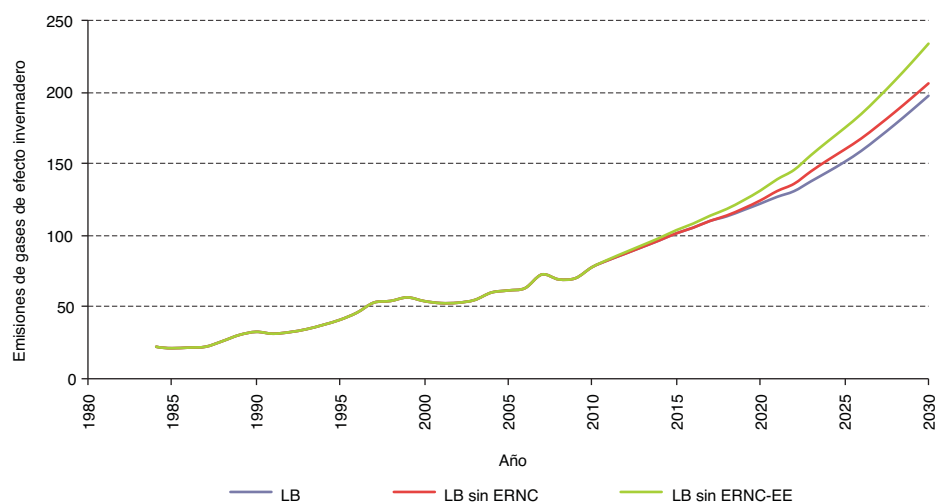
A continuación se describe cada uno de estos escenarios con mayor detalle:

GRÁFICO VI.9
IMPACTO DE LA LEY 20.557 EN LAS EMISIONES DE GEI DEL SUBSECTOR ELÉCTRICO, COMPARACIÓN DE LB CON Y SIN LEY ERNC
(En GWh)



Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO VI.10
EMISIONES DE GEI CON Y SIN INCLUSIÓN DEL APOORTE DE ACCIONES TEMPRANAS
(En MtCo₂e)



Fuente: Elaboración propia.

CUADRO VI.3
ESCENARIOS DE MITIGACION CONSIDERADOS

Escenario	Electricidad	Industria	CPR	Transporte
M1	EEMax + ERNCMax + HidroMax	EE	EE	
M2				
MT1				EE
MT2				Biocombustibles
MAX	EEMax + ERNCMax + HidroMax	EE	EE	EE + Biocombustibles

Fuente: Elaboración propia.

a) **Escenario M1: Escenario de eficiencia energética**

Este escenario considera la implementación, mediante el PPEE, de una serie de medidas que permitan lograr una reducción de un 20% en el consumo incremental en el período 2008-2030 en los subsectores industrial y comercial-público-residencial (CPR). La cifra se basa en la información proyectada en el período 2008-2020 en el documento “Política energética: Nuevos lineamientos. Transformando la crisis energética en una oportunidad” (CNE, 2008) y en el supuesto de que esta tendencia lineal continúa en el período 2020-2030. Cabe destacar que no resulta evidente que la tendencia lineal de reducción asociada a la eficiencia energética (EE) continúe en el período 2020-2030, debido a que existen no linealidades en la aplicación de este tipo de medidas (las medidas más efectivas, desde el punto de vista de los costos, se aplican primero). Esta medida se aplica a los subsectores industria y CPR. Las medidas de EE para el subsector de electricidad se consideran en el próximo escenario.

Dado que no se dispone de una desagregación sectorial de los niveles de reducción en el consumo debidos a medidas de eficiencia energética, se asume que la reducción es proporcional al consumo de cada industria y sector y por tipo de combustible proyectado en la línea de base, de modo de obtener las proyecciones agregadas consideradas (CNE, 2008).

Es necesario subrayar que, al analizar la oferta de eficiencia energética, es muy importante tener claro a qué se refiere el potencial de eficiencia energética. Al respecto, se debe distinguir entre: i) el potencial económico, alcanzable cuando son removidas las imperfecciones de mercado; ii) el potencial tecnológico, alcanzable cuando, además, son removidas las barreras que no son de mercado (por ejemplo, cuando la nueva tecnología pasa a ser obsoleta con mucha rapidez); y iii) el potencial hipotético, alcanzable por medio de la eliminación adicional de las imperfecciones de mercado en los sectores de los combustibles y de la electricidad.

El potencial de mercado es la mejora en eficiencia que se puede esperar en un año futuro bajo ciertas condiciones determinadas (es decir, asumiendo ciertos precios de la energía, ciertas preferencias de los consumidores y ciertas políticas energéticas). El potencial de mercado refleja barreras e imperfecciones de mercado que previenen el potencial de eficiencia de realizarse completamente.

El potencial económico es el ahorro de energía que resultaría si durante cada año del período en cuestión todos los reemplazos, retroalimentaciones y nuevas inversiones se realizaran escogiendo la tecnología más eficiente en energía dentro de las tecnologías que son costo-efectivas a los precios de la energía existentes (o proyectados). El potencial económico asume implícitamente un mercado en buen funcionamiento, con competitividad entre las inversiones en la demanda y la oferta de energía. Presupone, además, que las barreras a dicha competitividad han sido corregidas mediante políticas energéticas adecuadas. Se asume que, como resultado de dichas políticas, todos los usuarios tienen fácil acceso a información confiable acerca del costo-efectividad y del desempeño técnico de las distintas opciones de eficiencia energética existentes y emergentes.

El potencial técnico representa los ahorros de energía alcanzables bajo consideraciones teóricas de termodinámica, donde el consumo final de energía se mantiene constante y donde las pérdidas de energía pueden ser minimizadas por medio de la sustitución de procesos, reciclaje de materiales o de calor y mejora de la aislación (evitar la pérdida de calor).

El potencial hipotético es alcanzable por medio de la eliminación adicional de las imperfecciones de mercado en el negocio de los combustibles y de la electricidad. El potencial hipotético representa los ahorros de energía que resultan de implementar la tecnología más eficiente en energía disponible en un determinado momento, independiente de la estimación de costos y del ciclo de reinversión.

Las medidas de eficiencia energética aquí consideradas corresponden a la estimación del potencial económico, según las definiciones anteriores.

b) Escenario M2: Escenario óptimo de generación eléctrica

Como se adelantó, este escenario de mitigación (escenario 2030b en el gráfico VI.3) corresponde al escenario desarrollado por la CNE, en el que se levantan las restricciones al ingreso de ERNC y energía hidráulica y que también incluye los resultados asociados a medidas y programas de eficiencia energética más agresivos respecto de mayores emisiones. Este escenario considera la ejecución de medidas y programas que tienen como objetivo reducir la probabilidad de ocurrencia del escenario de mayor emisión que fuera descrito con anterioridad. No implica en todo caso cambios en la normativa vigente en materia energética.

c) Escenario MT1: Escenario de eficiencia energética en el sector del transporte terrestre

Aquí se toma en cuenta el máximo potencial de eficiencia energética en el sector del transporte. Tal como se hizo en el escenario M1, a sugerencia de la CNE y de la CONAMA, se incluye el potencial de EE proyectado en CNE (2008), que considera como potencial una reducción de un 20% en el consumo incremental de combustible hasta el año 2020. Este potencial ha sido proyectado de manera lineal para cubrir el período 2020-2030. Al igual que en el escenario M1, no resulta evidente que la tendencia lineal de reducción asociada a la EE continúe en el período 2020-2030, debido a que existen no linealidades en la aplicación de este tipo de medidas.

Dado que no se dispone de una desagregación por combustibles o tipo de flota de los niveles de reducción en el consumo, producto de medidas de eficiencia energética, se asume que la reducción es proporcional al consumo de cada tipo de flota y por tipo de combustible proyectado en la línea de base, de modo de obtener las proyecciones agregadas consideradas (CNE, 2008). Es importante mencionar que la información *bottom-up* de la CCG-UC y POCH Ambiental (2010) se cruzó con la información *top-down* de los estudios sectoriales que conforman el presente documento, pero no se aplicó la medida a nivel de tecnología como para saber cómo cambia la configuración del parque vehicular.

d) Escenario MT2: Escenario de uso de biocombustibles en el sector del transporte terrestre

Existen muy pocos estudios que estimen el máximo potencial de uso y producción de biocombustibles en Chile. A sugerencia de la CNE y de la CONAMA, se considerará el potencial de penetración de los biocombustibles proyectado en CNE (2008). De acuerdo con dicho documento, se considera que el biocombustible será utilizado solo en el sector del transporte terrestre y alcanzará en el año 2020 una penetración del 10% del consumo total de los vehículos motorizados terrestres. Sobre la base de esta información, en este escenario se estima que los biocombustibles cubrirán un porcentaje del consumo de los vehículos motorizados terrestres que aumenta linealmente de un 0% en 2009 a un 20% en 2030 (pasando por un 10% de penetración en 2020). Cabe destacar que no se describe en el documento de base cuál sería el tipo de biocombustible que logrará este tipo de penetración. Esto es sumamente importante en el cálculo de las reducciones efectivas de emisión de GEI. En este caso se ha asumido que el biocombustible utilizado es producido íntegramente en el país, lo que corresponde a un escenario de mitigación posible, pero que tiene que ser estudiado con mayor detalle para determinar la posibilidad real de producción nacional de biocombustibles.

e) Escenario MAX: Este escenario considera el máximo potencial de reducción

Este escenario corresponde a: eficiencia energética en el sector energético + escenario óptimo de generación eléctrica + eficiencia energética en el sector del transporte terrestre + uso de biocombustibles en el transporte terrestre. En este escenario se incluyen los máximos potenciales de reducción encontrados en los escenarios anteriores con respecto al escenario base (línea de base del gráfico VI.10).

A continuación se presentan los resultados obtenidos al estimar las emisiones de GEI en cada uno de los escenarios descritos anteriormente. En el gráfico VI.11 se muestra la evolución de las emisiones totales de GEI en los distintos escenarios, que se contrastan con la línea de base de emisiones de GEI (línea de base del gráfico VI.10).

Se puede observar que el escenario M2 asociado al subsector de electricidad es el que implica un menor nivel de emisiones con respecto a la línea de base. Si se aplicaran las medidas orientadas a la realización de todos estos escenarios, se lograría una reducción significativa de emisiones (un 30% sobre la línea de base) en los próximos 20 años. Esta situación implica reducir en un 45% el aumento (al año 2030) proyectado de emisiones con respecto a la situación actual.

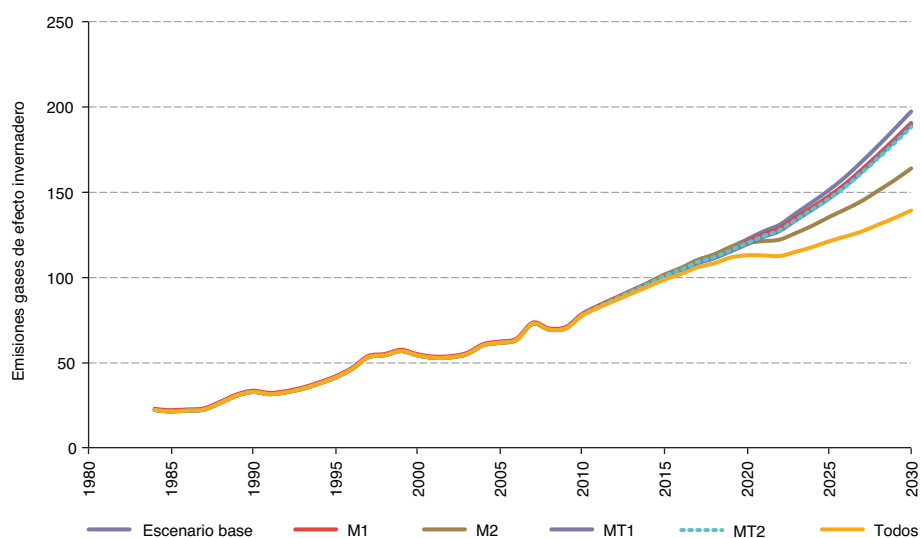
Sin embargo, es muy importante tener en cuenta que las medidas consideradas solo corresponden a un potencial de reducciones. Aún resta evaluar estas medidas desde la perspectiva de los costos asociados para verificar su real capacidad de implementación. Esto podría implicar que si los costos de implementación de estas medidas son demasiado elevados, el país estará en condiciones de aplicar solo una fracción de este potencial.

La evolución de las emisiones totales de GEI en el sector de la energía en el período 1985-2030, en cada uno de los cinco escenarios de mitigación considerados, se detalla en el cuadro VI.4.

En los gráficos VI.12 a VI.16 se presenta el desglose de emisiones por subsector para la situación actual (2009) y para la proyección de mediano plazo (2030) en los distintos escenarios considerados.

Los resultados que se han presentado hasta el momento están expresados en términos absolutos (emisiones de GEI en MtCO₂e). Resulta interesante revisar estos valores en términos relativos, ya sea como emisión por habitante o como emisión por producto de la economía (medido por el PTB). En el cuadro VI.5 se presenta una comparación de estos tipos de métricas en diferentes escenarios y se muestran resultados, tanto para las emisiones asociadas al sector de la energía como para las emisiones totales (sin incluir al sector F-CUS). Se puede apreciar que en el escenario de

GRÁFICO VI.11
POTENCIAL DE REDUCCIÓN EN EL SECTOR ENERGÉTICO EN LOS DISTINTOS
ESCENARIOS DE MITIGACIÓN
(En MtCO₂e)



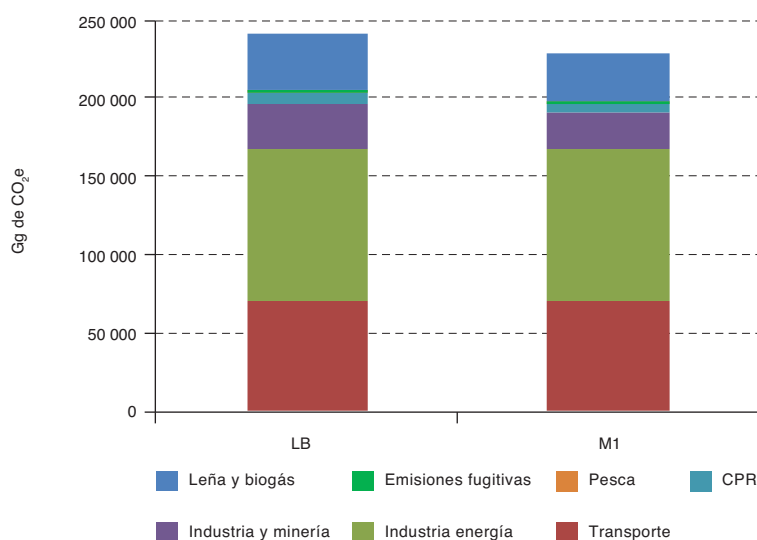
Fuente: Elaboración propia.

CUADRO VI.4
EVOLUCIÓN DE EMISIONES DE GEI EN EL SECTOR ENERGÉTICO
EN LOS CINCO ESCENARIOS DE MITIGACIÓN
(En MtCO₂e)

Año	Esc. base	Esc. M1	Esc. M2	Esc. MT1	Esc. MT2	Esc. MAX
1985	21,32	21,32	21,32	21,32	21,32	21,32
1986	21,74	21,74	21,74	21,74	21,74	21,74
1987	22,33	22,33	22,33	22,33	22,33	22,33
1988	26,22	26,22	26,22	26,22	26,22	26,22
1989	30,52	30,52	30,52	30,52	30,52	30,52
1990	32,71	32,71	32,71	32,71	32,71	32,71
1991	31,41	31,41	31,41	31,41	31,41	31,41
1992	32,51	32,51	32,51	32,51	32,51	32,51
1993	34,56	34,56	34,56	34,56	34,56	34,56
1994	37,61	37,61	37,61	37,61	37,61	37,61
1995	41,15	41,15	41,15	41,15	41,15	41,15
1996	46,09	46,09	46,09	46,09	46,09	46,09
1997	53,09	53,09	53,09	53,09	53,09	53,09
1998	54,25	54,25	54,25	54,25	54,25	54,25
1999	56,74	56,74	56,74	56,74	56,74	56,74
2000	54,16	54,16	54,16	54,16	54,16	54,16
2001	52,75	52,75	52,75	52,75	52,75	52,75
2002	53,02	53,02	53,02	53,02	53,02	53,02
2003	54,93	54,93	54,93	54,93	54,93	54,93
2004	60,14	60,14	60,14	60,14	60,14	60,14
2005	61,60	61,60	61,60	61,60	61,60	61,60
2006	63,21	63,21	63,21	63,21	63,21	63,21
2007	72,71	72,71	72,71	72,71	72,71	72,71
2008	69,32	69,32	69,32	69,32	69,32	69,32
2009	70,14	70,12	70,14	69,99	70,14	69,97
2010	77,94	77,84	77,94	77,63	77,92	77,51
2011	82,94	82,80	82,94	82,46	82,87	82,24
2012	87,43	87,19	87,43	86,75	87,26	86,35
2013	91,99	91,61	91,99	91,10	91,69	90,43
2014	96,56	96,06	96,56	95,44	96,10	94,47
2015	101,44	100,75	101,44	100,06	100,77	98,71
2016	105,37	104,47	105,37	103,73	104,47	101,92
2017	110,07	108,94	110,07	108,14	108,88	105,82
2018	113,28	111,90	113,28	111,04	111,77	108,15
2019	117,66	115,99	117,66	115,09	115,80	111,56
2020	122,16	120,17	120,14	119,25	119,90	112,97
2021	126,89	124,54	121,20	123,60	124,18	112,86
2022	130,84	128,09	122,13	127,16	127,65	112,50
2023	137,64	134,46	126,06	133,54	133,90	115,04
2024	144,26	140,60	130,32	139,71	139,92	117,78
2025	151,19	147,03	135,34	146,16	146,19	121,16
2026	158,94	154,23	139,91	153,40	153,23	123,95
2027	167,94	162,63	144,80	161,86	161,44	126,92
2028	177,36	171,40	150,92	170,71	170,00	130,94
2029	187,23	180,55	157,09	179,95	178,93	134,86
2030	197,37	189,92	163,93	189,45	188,07	139,25

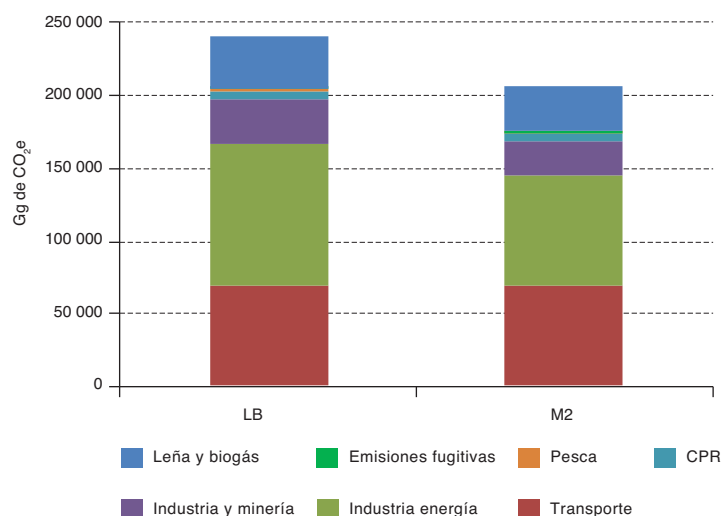
Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO VI.12
POTENCIAL DE REDUCCIÓN EN EL ESCENARIO DE MITIGACIÓN M1



Fuente: Elaboración propia.

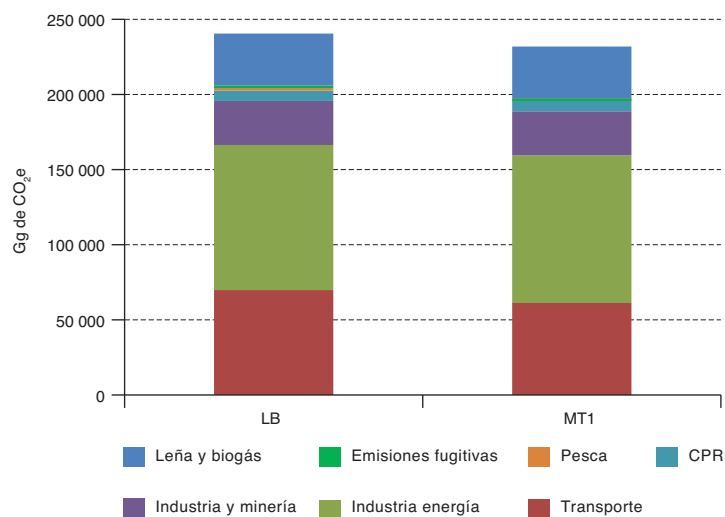
GRÁFICO VI.13
POTENCIAL DE REDUCCIÓN EN EL ESCENARIO DE MITIGACIÓN M2



Fuente: Elaboración propia.

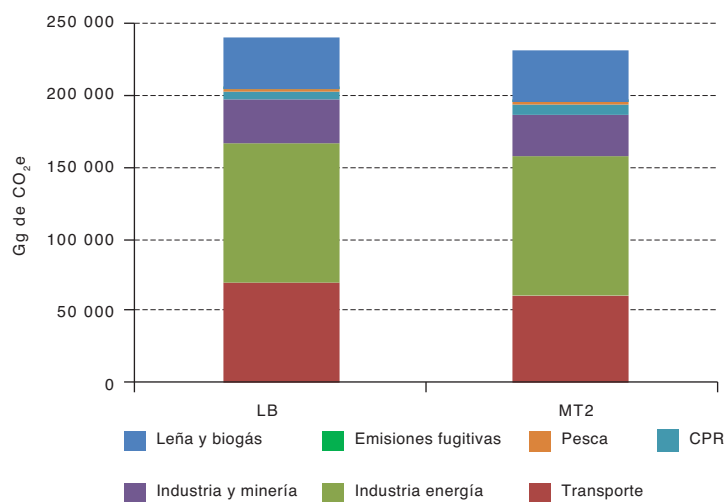
emisiones base existe un claro aumento de las emisiones per cápita que se duplican al pasar de aproximadamente 6 tCO₂e/hab a valores en torno a los 12 tCO₂e/hab (el aumento es de 4 tCO₂e/hab a 10 tCO₂e/hab si se consideran solamente las emisiones asociadas al sector energético). Si se lograra introducir los escenarios de mitigación descritos, el aumento sería la mitad y en este caso llegaría solo a 9 tCO₂e/hab (7 tCO₂e/hab para el sector de la energía). Con respecto a la intensidad de la economía (medida en términos de las emisiones de GEI por producto), el resultado es diferente y en

GRÁFICO VI.14
POTENCIAL DE REDUCCIÓN EN EL ESCENARIO DE MITIGACIÓN MT1



Fuente: Elaboración propia.

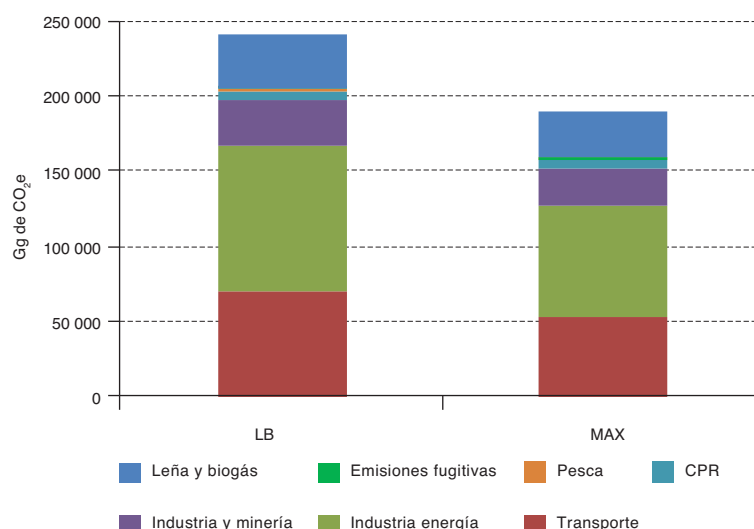
GRÁFICO VI.15
POTENCIAL DE REDUCCIÓN EN EL ESCENARIO DE MITIGACIÓN MT2



Fuente: Elaboración propia.

el caso de la línea de base no se observan cambios importantes. Esto implica de manera indirecta que no existe un desacople entre el crecimiento del país y el crecimiento de las emisiones. Sin embargo, en el escenario de máxima mitigación existe una mejora en la eficiencia de emisiones de la economía lográndose este desacople.

GRÁFICO VI.16
POTENCIAL DE REDUCCIÓN EN EL ESCENARIO DE MITIGACIÓN MAX



Fuente: Elaboración propia.

CUADRO VI. 5
COMPARACIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO
EN DIFERENTES ESCENARIOS Y MÉTRICAS

Escenarios	Emisiones relativas					
	Emisiones absolutas (MtCO ₂ e)		Por habitante (Tonelada/cápita)		Por producto (Toneladas/millones de dólares)	
	Energía	Totales	Energía	Totales	Energía	Totales
2009	70	96	4,1	5,7	415	568
2030 Base	197	233	10,1	11,9	493	582
2030 Mitigación	139	175	7,1	8,9	348	437

Fuente: Elaboración propia.

2. Discusión sobre costos de mitigación

La evaluación económica de los costos de mitigación es una tarea muy compleja y cuya incertidumbre es elevada. En el único estudio que se ha propuesto, al menos en forma preliminar, una curva de abatimiento de emisiones de GEI para Chile es en el de PROGEA (2008). Sin embargo, el vínculo entre la curva de abatimiento y las medidas de mitigación contempladas en los escenarios de mitigación utilizados no es evidente. Por ello, se ha decidido no considerar dicha curva de abatimiento en esta oportunidad.

Es imperativo que se realice un análisis de los costos asociados a diferentes escenarios de mitigación de emisiones en Chile. Tomando en cuenta trabajos realizados en otros contextos se observa, en general, que los costos de mitigación pueden ser elevados. Como ejemplo en el informe Stern (2007) se estima que los costos asociados al escenario de mitigación global equivalen a una pérdida aproximada de alrededor del 1% del PGB a nivel mundial. Por otra parte, y como ejemplo de un país en particular, en Australia se estimó una pérdida de entre un 0,7% y un 0,8% de su PGB como costo asociado a la implementación de medidas tendientes a lograr un escenario de concentraciones de GEI en torno a 450 ppm (Garnaut y otros, 2008).

En esta oportunidad, pese a que no se ha realizado un análisis sobre los costos marginales de abatimiento de emisiones para Chile, se ha querido presentar a modo de ilustración un ejercicio similar

al usado en México (Galindo, 2009). En este ejercicio se asume que el costo marginal de mitigación en Chile será similar al precio de la reducción certificada de emisiones (RCE) en los mercados de carbono observados hoy. Este ejercicio está sujeto a muchas limitaciones, entre las que se puede mencionar, en primer lugar, que el precio de estas en los mercados de carbono representa la intersección de una curva de costos mundiales marginales de mitigación con la demanda de reducciones certificadas de emisiones, realidad que puede ser muy diferente a la de la curva de costos de mitigación que se puede desprender de la realidad nacional. Además, no se sabe cómo evolucionarán sus precios en el futuro, un tema especialmente sensible al grado de compromiso global que exista con respecto al control de emisiones. Sin embargo, este ejercicio puede servir para estimar por lo menos un orden de magnitud en relación con los costos de mitigación. Asumiendo que el valor del carbono representa el costo marginal actual de mitigación de los países sujetos a restricciones de emisiones, y asumiendo, en forma conservadora, que el costo marginal es lineal, se puede estimar el costo de mitigación para cada uno de los escenarios considerados.

Se han asumido dos escenarios de precios del carbono: uno de 10 y otro de 30 dólares por tonelada de reducción de emisiones de CO₂e. A modo de referencia se puede tomar en cuenta que el precio promedio de las transacciones de bonos de carbono realizadas en la plataforma *Evolution Markets LLC* ha sido de 20 dólares por tonelada de CO₂e reducida. Con este valor, se calcula el valor presente neto de los costos de mitigación aplicando cuatro tasas de descuento del 6%, 4%, 2% y 0,5%, equivalentes a las usadas en la evaluación de impactos económicos del cambio climático en el capítulo IV. Los resultados se muestran en el cuadro VI.6.

Es importante recalcar que lo presentado en el cuadro VI.6 es un ejercicio para destacar el orden de magnitud que estaría asociado a los costos de las medidas de mitigación en el caso de Chile. El costo real de mitigación puede superar o ser inferior al precio de las transacciones de créditos de carbono, como fuera asumido en el ejercicio.

El Gobierno de Chile está realizando algunos estudios para analizar los costos marginales de abatimiento de emisiones en el país. Sin embargo, los plazos definidos para dichos estudios exceden ampliamente los plazos del presente proyecto. Uno de estos trabajos, encargado por CONAMA y CNE, está analizando distintas opciones de mitigación de GEI en Chile y estudiando los costos asociados. Aun cuando el término del estudio está planificado para marzo de 2010, ya tiene algunos resultados preliminares en términos de identificar las principales medidas de mitigación económicamente factibles de implementar en el caso chileno. Dichas medidas de mitigación se presentan en el cuadro VI.7.

CUADRO VI.6
VALOR ACTUAL NETO DE LOS COSTOS DE MITIGACIÓN EN EL SECTOR
ENERGÉTICO ASUMIENDO QUE LOS COSTOS MARGINALES CORRESPONDEN
AL PRECIO DE TRANSACCIONES DE CRÉDITOS DE CARBONO^a
(En millones de dólares)

Escenario	Costo marginal/precio carbono							
	10 dólares/tCO ₂ e				30 dólares/tCO ₂ e			
	Tasa de descuento				Tasa de descuento			
	6%	4%	2%	0,5%	6%	4%	2%	0,5%
M1	113	150	202	255	338	450	607	766
M2	342	476	669	869	1 025	1 427	2 007	2 608
MT1	152	198	262	326	457	594	785	978
MT2	131	175	238	302	393	526	715	907
MAX	737	999	1 371	1 753	2 212	2 998	4 114	5 259

Fuente: Elaboración propia.

^aSe considera una curva de costos lineales, por lo que en cualquier punto en el tiempo, el costo total es igual al valor del costo marginal dividido por dos y multiplicado por la cantidad de emisiones abatidas.

CUADRO VI.7
MEDIDAS DE MITIGACIÓN DE EMISIONES DE GEI EN EL SECTOR ENERGÉTICO

Sector	Subsector	Categoría	Tecnología/medida	Proceso
Energía	Generación eléctrica	Energías renovables no convencionales (ERNC)	Generación eléctrica eólica	-
Energía	Generación eléctrica	ERNC	Generación eléctrica solar térmica	-
Energía	Generación eléctrica	ERNC	Generación eléctrica solar fotovoltaica	-
Energía	Generación eléctrica	ERNC	Generación eléctrica usando biomasa	-
Energía	Generación eléctrica	ERNC	Generación eléctrica geotérmica	-
Energía	Generación eléctrica	ERNC	Generación eléctrica de minihidráulicas (hasta 5 MW)	-
Energía	Generación eléctrica	ERNC	Generación eléctrica de minihidráulicas (entre 5 y 10 MW)	-
Energía	Generación eléctrica	Secuestro de carbono	Captura y almacenamiento de Carbono	-
Energía - transporte	Transporte terrestre-vehículos livianos	Cambio modal	Cambio modal producto de la construcción de nuevos kilómetros de metros	-
Energía - transporte	Transporte terrestre-vehículos livianos	Cambio tecnológico o de combustible	Vehículos híbridos para renovación del parque.	-
Energía - transporte	Transporte terrestre-vehículos livianos	Cambio tecnológico o de combustible	Uso de biocombustibles	-
Energía - transporte	Transporte terrestre-vehículos livianos	Eficiencia energética	Conducción eficiente (ecodriving)	-
Energía - transporte	Transporte terrestre	Eficiencia energética	Renovación parque de vehículos livianos	-
Energía - transporte	Transporte terrestre-camiones	Cambio modal	Cambio de transporte de carga a camión por ferrocarril	-
Energía - transporte	Transporte terrestre - camiones	Cambio tecnológico o de combustible	Uso de biocombustibles	-
Energía - transporte	Transporte terrestre-camiones	Eficiencia energética	Gestión de flotas	-
Energía - transporte	Transporte terrestre - camiones	Eficiencia energética	Mejoras aerodinámicas	-
Energía - transporte	Transporte terrestre-camiones	Eficiencia energética	Renovación parque de camiones de carga	-
Industria	Cobre	Eficiencia energética	Optimización de la combinación de variables de operación en los molinos SAG	Molienda y concentración. Proceso pirometalúrgico.
Industria	Cobre	Eficiencia energética	Chancadores de rodillos de alta presión	Molienda y concentración. Proceso pirometalúrgico
Industria	Cobre	Cambio tecnológico o sustitución de combustible	Coletores solares parabólicos y bombas de calor para ajuste de temperatura de electrolito y otros aportes de calor a fluidos en el proceso LX/SX/EV	Proceso hidrometalúrgico (LX/SX/EW)
Industria	Cobre	Eficiencia energética	Gestión de flotas en minas	Minas
Industria	Cobre	Cambio tecnológico o sustitución de combustible	Utilización de biocombustibles en minas	Minas
Industria	Cemento	Sustitución de combustible	Utilización de desechos forestales y agrícolas como combustible alternativo en hornos cementeros	Producción de Clinker
Industria	Cemento	Sustitución de combustible	Uso de lodos de PTAS secos como combustible alternativos en hornos cementeros	Producción de Clinker

(continúa)

Cuadro VI.7 (conclusión)

Sector	Subsector	Categoría	Tecnología/medida	Proceso
Industria	Cemento	Eficiencia energética	Separadores de alta eficiencia	Molienda de materias primas
Industria	Siderurgia	Cambio tecnológico o sustitución de combustible	Super horno de coque para mejora de producción y emisiones al siglo XXI (SCOPE21)	Fabricación de coque
Industria	Siderurgia	Cambio tecnológico o sustitución de combustible	Turbina de recuperación de alta presión (TRTP)	Fabricación de hierro (arrabio)
Industria	Siderurgia	Cambio tecnológico o sustitución de combustible	Sistema de inyección de carbón pulverizado (PCI)	Fabricación de hierro (arrabio)
Industria	Industrias varias	Eficiencia energética	Reemplazo de motores tradicionales por eficientes	Varios
Industria	Industrias varias	Eficiencia energética	Cogeneración (CHP)	Varios
Industria	Industrias varias	Eficiencia energética	Gestión de la demanda eléctrica	Varios
Industria	Industrias varias	Eficiencia energética	Uso eficiente del vapor	Varios
Industria	Industrias varias	Eficiencia energética	Recuperación de calor residual	Varios
Comercial, público y residencial (CPR)	Residencial	Cambio de tecnología o combustible	Calderas de condensación	Calefacción y agua caliente sanitaria (ACS)
CPR	Residencial	Cambio de tecnología o combustible	Colectores solares	Calefacción y agua caliente sanitaria (ACS)
CPR	Residencial	Eficiencia energética	Reducción de pérdidas en stand-by	Consumo eléctrico de equipos.
CPR	Residencial	Eficiencia energética	Mejoras de aislación térmica	Demanda energética de viviendas
CPR	Residencial	Eficiencia energética	Recambio de ampolletas incandescentes por CFL	Iluminación
CPR	Residencial	Eficiencia energética	Recambio de refrigeradores convencionales por eficientes	Consumo eléctrico de equipos
CPR	Residencial	Eficiencia energética	Electrodomésticos (lavadora, secadora, etc.) eficientes	Consumo eléctrico de equipos
CPR	Residencial	Eficiencia energética	Duchas eficientes	Consumo eléctrico

Fuente: Elaboración propia sobre la base de información preliminar proporcionada por el Centro de Cambio Global UC y POCH, referente al estudio “Análisis de opciones futuras de mitigación de gases de efecto invernadero para Chile en el sector energía”.

3. Cobeneficios ambientales de mitigación en el sector energético

Chile es un país que presenta problemas de contaminación ambiental en casi todas sus grandes urbes y también en las zonas rurales del valle longitudinal. Como las fuentes de gases de efecto invernadero y de contaminantes locales y regionales son muchas veces las mismas, la mitigación de emisiones provee la oportunidad de reducir simultáneamente las emisiones de contaminantes, produciendo una mejora en la calidad ambiental local y regional. Estos cobeneficios han sido reconocidos ampliamente en la literatura y en los dos últimos reportes del Grupo de Trabajo III del IPCC.

La reducción de la concentración de contaminantes atmosféricos resultará en una mejora ambiental para la zona o localidad donde esta se realice. El siguiente cuadro resume algunos de los impactos del cambio en el nivel de concentración de contaminantes atmosféricos, que además se traducen en beneficios económicos para el país.

Para valorizar la mejora de calidad ambiental, el análisis está centrado en el impacto más importante, la reducción de impactos en salud pública, que resultan de la reducción de exposición de la población a material particulado.

En este estudio se analizan los cobeneficios asociados a cada escenario de mitigación (véase el cuadro VI.9). Como la relación del cambio de emisiones de GEI y contaminantes locales dañinos para la salud (HDP, por sus siglas en inglés) depende de medidas específicas, el análisis se realiza a nivel de medida y luego es agregado a nivel de escenarios. Es importante destacar que la presente evaluación, respecto de las acciones de mitigación de GEI, se hace utilizando dos escenarios de penetración de medidas (normal y máximo) y para la valorización de beneficios en salud se hace utilizando dos escenarios, bajo y alto. El cuadro VI.9 muestra el tipo de medidas que se agregan para cada escenario.

Por ejemplo, las medidas de mitigación consideradas en el subsector de generación eléctrica del sector energético (escenario M2) pueden producir cobeneficios al reducir la demanda eléctrica y sustituir centrales de generación térmica por otras de menores emisiones, tanto globales como locales. Esta reducción podría afectar las fechas de entrada de centrales térmicas potenciales o el parque generador, en cuyo caso, las centrales menos eficientes son las que dejarían de generar.

La sustitución de centrales de generación térmica por otras sin emisiones de CO₂ tiene efecto en las emisiones de contaminantes locales (MP, SO₂, NOX y HC) que producen los efectos presentados en el cuadro VI.10. En este se muestran las emisiones de contaminantes locales y globales por MWh generados por distintas centrales a carbón en Chile. Se muestran tanto centrales nuevas como existentes en los sistemas interconectados del norte grande y central según lo evaluado por Cifuentes y +MG (2010). La magnitud de las emisiones tiene directa relación con la tecnología utilizada y su antigüedad. La reducción en la generación de una de estas centrales (por ejemplo, por la instalación de una central eólica o reducción de la demanda eléctrica) producirá una disminución de las emisiones globales y locales.

El nivel de beneficio en salud se produce dependiendo de la población que sea afectada por la medida de mitigación. Para el caso de las medidas que tienen una emisión directa, la población

CUADRO VI.8
TIPOS DE BENEFICIOS POR LA MEJORA DE LA CALIDAD AMBIENTAL

Impacto	Descripción
Salud humana	Se consideran los efectos de mortalidad prematura y de morbilidad en la población expuesta, debido a los cambios en las concentraciones ambientales extramuros.
Visibilidad	Los cambios de concentraciones tienen un impacto en la visibilidad.
Materiales	Debido a la contaminación se producen daños en superficies de materiales fundamentalmente.
Agricultura	Mejora en la productividad por reducción de concentración de SO ₂

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO VI.9
MEDIDAS DE MITIGACIÓN SEGÚN ESCENARIOS

Escenario de mitigación	Medidas
M1	Eficiencia energética en industria Eficiencia energética en CPR
M2	Eficiencia energética en industria Eficiencia energética en CPR Introducción de mayor capacidad instalada de ERNC e hidroeléctricas
MT1	Cambio en partición modal Renovación del parque de vehículos Mejoras tecnológicas en vehículos
MT2	Introducción de biocombustibles

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO VI.10
ESCENARIOS DE EMISIONES (GEI Y HDP) POR MWh GENERADO
CON TECNOLOGÍA CARBONÍFERA EN CADA SISTEMA ELÉCTRICO

Tipo de central	Sistema eléctrico	Chimenea	Comuna	CO ₂ (Ton)	PM (Gramo)	SO ₂ (Gramo)	NO _x (Gramo)
Existente	SIC	Laguna Verde U1	Valparaíso	55	5	76	48
		Laguna Verde U2	Valparaíso	78	7	109	68
		Ventanas U1	Puchuncaví	151	55	471	296
		Bocamina U1	Coronel	144	23	502	316
		Ventanas U2	Puchuncaví	266	98	872	548
		Guacolda U3	Huasco	368	61	1 184	640
	SING	CELTA U2	Iquique	1 600	886	3 214	2 019
Nueva	SIC	Laguna Verde U1	Valparaíso	153	36	195	352
		Laguna Verde U2	Valparaíso	67	15	217	15
		Ventanas U1	Puchuncaví	138	24	202	230
		Bocamina U1	Coronel	113	18	171	195
		Ventanas U2	Puchuncaví	117	20	198	275
		Guacolda U3	Huasco	117	20	197	274
		Laguna Verde U1	Valparaíso	111	5	43	60
		Laguna Verde U2	Valparaíso	39	7	36	12
		Ventanas U1	Puchuncaví	37	6	35	60
		Bocamina U1	Coronel	12	1	5	7
		Ventanas U2	Puchuncaví	12	1	5	7
		Guacolda U3	Huasco	13	3	12	30
	SING	Angamos U1	Mejillones	549	94	203	486
		Angamos U2	Mejillones	531	91	197	470

Fuente: Elaboración propia sobre la base de L. A. Cifuentes y +MG, *Análisis técnico-económico de la aplicación de una norma de emisión para termoeléctricas*, 2010.

afectada es aquella que produce el menor consumo de combustible o utiliza uno menos contaminante. Para aquellas medidas que producen una reducción en la demanda eléctrica y aquellas que cambian el parque generador (ERNC o hidro), la población afectada será aquella en que se ubican las centrales generadoras que se desplazan o reducen su generación base.

La evaluación de los potenciales cobeneficios por la aplicación de medidas de mitigación de GEI entrega resultados alentadores. El cuadro VI.11 muestra los cobeneficios unitarios de acuerdo con las zonas geográficas del país y escenarios de mitigación por la aplicación de las medidas de mitigación de GEI. Se puede apreciar que existen cobeneficios negativos en algunas zonas, debido principalmente al aumento de las emisiones producto del incremento en el consumo de electricidad de algunas medidas (por ejemplo, expansión de líneas de metro o vehículos híbridos eléctricos enchufables). Los resultados se muestran para un escenario de penetración de medidas máximo (los detalles de los cálculos realizados se pueden revisar en el apéndice VIII).

Además, es posible determinar los cobeneficios a nivel agregado, multiplicando por los cobeneficios unitarios por la reducción de GEI estimada para cada escenario de mitigación. En el cuadro VI.12 se muestra el valor presente de los cobeneficios al año 2010, aplicando cuatro tasas de descuento del 6%, 4%, 2% y 0,5%, equivalentes a las usadas en la evaluación de impactos económicos del cambio climático en el capítulo IV.

CUADRO VI.11
COBENEFICIOS A NIVEL DE ESCENARIO Y ZONA GEOGRÁFICA,
PROMEDIO 2010-2030, ESCENARIO DE PENETRACIÓN MÁXIMA
(En dólares/tCO₂e)

Zona	M1	M2	MT1	MT2	MAX	Promedio por zonas
Norte grande costa	[6,1 - 37,3]	[5,4 - 32,9]	[-14 - -85,3]	[10,5 - 63,8]	[6,3 - 38,3]	[4,6 - 28,2]
Norte grande interior	[0,4 - 2,3]	[0,4 - 2,3]	[0,4 - 2,3]	[0,4 - 2,1]	[0,4 - 2,3]	[0,4 - 2,3]
Norte chico costa	[1,5 - 7,9]	[1,5 - 7,9]	[1,6 - 8,6]	[1,4 - 7,7]	[1,6 - 8,5]	[1,5 - 8,3]
Centro costa	[2,3 - 11,4]	[1,6 - 8,1]	[-5,5 - -27,3]	[15,8 - 78,3]	[3,6 - 17,8]	[1,4 - 6,8]
Centro interior	[20,4 - 112]	[20,4 - 112]	[22 - 121,1]	[22,5 - 123,7]	[21,5 - 118,4]	[21,2 - 116,5]
Sur costa	[11,3 - 62,7]	[11,3 - 62,8]	[7 - 38,7]	[9,3 - 51,3]	[10,6 - 58,6]	[11,4 - 63,1]
Sur interior	[2,3 - 13,1]	[2,3 - 13,1]	[2,5 - 13,9]	[2,7 - 15,3]	[2,4 - 13,7]	[2,4 - 13,5]
Austral	[0,3 - 1,6]	[0,3 - 1,6]	[0,3 - 1,7]	[0,3 - 1,5]	[0,3 - 1,7]	[0,3 - 1,6]
Promedio por escenario	[7,3 - 41,1]	[7 - 39]	[19,7 - 107,9]	[16,6 - 91,4]	[11,8 - 65,4]	

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Se presentan los resultados para dos escenarios de valoración de beneficios [bajo-alto].

CUADRO VI.12
VALOR PRESENTE COBENEFICIOS AGREGADOS SEGÚN ESCENARIO-ESCENARIO
DE PENETRACIÓN MÁXIMO, 2010-2030
(En millones de dólares)

Escenario reducción GEI	Tasa de descuento			
	6%	4%	2%	0,5%
M1	[290 – 1 610]	[380 – 2 130]	[510 – 2 830]	[630 – 3 550]
M2	[530 – 2 930]	[710 – 3 950]	[970 – 5 400]	[1 240 – 6 870]
MT1	[610 – 3 370]	[820 – 4 480]	[1 100 – 6 030]	[1 380 – 7 590]
MT2	[500 – 2 740]	[660 – 3 600]	[870 – 4 790]	[1 090 – 5 970]
MAX	[1 640 – 9 040]	[2 180 – 12 030]	[2 940 – 16 210]	[3 710 – 20 440]

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Se presentan los resultados para dos escenarios de valoración de beneficios [bajo-alto], VP al año 2010.

4. Mitigación de emisiones para sector no energético

De acuerdo con información del IPCC (2007), las mejoras en la gestión agrícola pueden reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero. La eficacia de estas prácticas depende de factores como el clima, el tipo de suelo y el sistema de cultivo. Aproximadamente el 90% de la mitigación total deriva de la intensificación de los sumideros (secuestro de carbono del suelo) y el resto de la reducción de emisiones. Las opciones de mitigación más prominentes en la agricultura son:

- renovación de suelos orgánicos cultivados;
- mejora de la gestión de tierras de cultivo (incluida la agronomía, la gestión de nutrientes y la gestión de cultivos y desechos) y la gestión hídrica (incluido el drenaje y el regadío);
- mejora de la gestión de tierras de pastoreo (incluida la intensidad de pastoreo, el aumento de la productividad, la gestión de nutrientes, la gestión de incendios y la introducción de especies); y

- iv) renovación de tierras degradadas (mediante el uso del control de la erosión, enmiendas orgánicas y enmiendas de nutrientes).

Las opciones disponibles para reducir las emisiones de fuentes y aumentar las eliminaciones mediante sumideros en el sector forestal, o ambas, se agrupan en tres categorías generales:

- i) mantener o aumentar el área de bosques;
- ii) mantener o aumentar la densidad de carbono en el terreno; y
- iii) aumentar las reservas de carbono en los productos de la madera fuera del sitio e incrementar la sustitución de productos y combustibles.

Algunos estudios (Gilbert y otros, 2007; INIA, 2004) han demostrado la importancia que tiene el sector forestal como sumidero neto de CO₂. En 2003, este sumidero representaba aproximadamente el 25% de las emisiones totales. Por lo tanto, es interesante considerar a futuro, como medida de mitigación, la posibilidad de potenciar este sector a semejanza de lo logrado por el decreto ley 701 y por medio del manejo del bosque nativo, siguiendo los lineamientos de la ley de fomento y recuperación del bosque nativo.

VII. Síntesis de la evaluación económica del cambio climático en el país

Si se recopila la información presentada en este trabajo, se puede hacer una síntesis general de los resultados obtenidos. En lo que respecta a la evaluación económica de impactos, hemos encontrado que, en aquellos sectores en los que fue posible llevar a cabo la evaluación completa, el impacto económico neto podría alcanzar un costo de más de 300.000 millones de dólares, dependiendo del horizonte considerado, de la tasa de descuento utilizada y del escenario de cambio climático evaluado. Esto equivaldría a una pérdida anual de aproximadamente un 1,1% del PIB hasta 2100. Sin embargo, no todos los escenarios evaluados indican costos netos. Por ejemplo, la agregación de impactos del escenario B2 hasta 2100, usando una tasa de descuento del 0,5%, indica beneficios netos en torno a los 25.000 millones de dólares. Todo lo anterior se puede apreciar en el resumen de costos que se presenta en el cuadro VII.1. En términos generales, se puede observar que los impactos asociados al escenario A2 (el de mayor emisión de GEI) son mayores que los que se asocian al B2. Como se mencionó, este último incluso proyecta beneficios netos para el horizonte que considera los últimos 50 años del siglo XXI. En el caso del escenario A2, donde los impactos negativos se concentran a finales de siglo a menor tasa de descuento, el valor presente del impacto es mayor, al igual que es mayor al estimar un horizonte más lejano. Lo contrario ocurre con el escenario B2, donde se puede ver que los mayores efectos negativos se dan en el período intermedio y en el caso del horizonte lejano los mayores efectos negativos se presentan con una tasa de descuento más alta.

Es importante destacar que el impacto económico deber ser visto como el rango inferior de impactos, por las razones antes expuestas: falta de sectores analizados y evaluación realizada para condiciones medias, no extremas.

Por otra parte, con respecto a las emisiones de GEI, se puede prever que para romper la relación existente entre el desarrollo del país y estas emisiones, es necesario incurrir en medidas o programas de mitigación. En esta oportunidad no ha sido posible establecer los costos asociados a ellas. Sin embargo, los escenarios de mitigación considerados lograrían una reducción potencial de aproximadamente el 30% para los próximos 20 años con respecto a la línea de base.

Sí se ha incluido un análisis de los posibles cobeneficios de la aplicación de medidas que busquen reducir las emisiones de GEI en Chile, señalando la importancia que tiene realizar un análisis integrado de políticas. En concordancia con lo mencionado en *Air Pollution and Climate change: Two*

Sides of the same Coin? (Swedish EPA, 2009), es evidente la necesidad de una estrategia conjunta que permita atacar los desafíos relacionados con el cambio climático y la contaminación atmosférica y, de esta manera, será posible reducir significativamente los costos de abatimiento.

De acuerdo con el análisis presentado, al implementar medidas que permitan cumplir con los escenarios de reducción de GEI (M1, M2, MT1 y MT2), sería posible obtener beneficios monetarios según lo ilustrado en el cuadro VII.2, donde se muestra el valor de cobeneficio promedio en el período 2010-2030 en los distintos escenarios de reducción de GEI. Estos valores además se presentan para los rangos de escenarios de penetración (normal y máximo) y los escenarios de valoración de beneficios (bajo y alto). El mayor impacto se concentraría en las grandes urbes chilenas como lo son el Gran Valparaíso, Gran Santiago, Gran Temuco y Gran Concepción, localidades donde se verá mejorada la calidad de vida de la población.

CUADRO VII.1
SÍNTESIS DE LOS COSTOS ECONÓMICOS ACUMULADOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO^a

Escenario horizonte	<i>(Valores absolutos en millones de dólares)</i>							
	Tasa de descuento		Tasa de descuento		Tasa de descuento		Tasa de descuento	
	6%		4%		2%		0,5%	
	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
Año 2050	22 005	15 717	31 745	21 580	47 802	30 569	66 950	40 592
Año 2100	30 044	14 110	57 689	15 787	139 950	7 913	321 522	-25 914
Escenario horizonte	<i>(En porcentajes del valor presente del PIB)</i>							
	Tasa de descuento		Tasa de descuento		Tasa de descuento		Tasa de descuento	
	6%		4%		2%		0,5%	
	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
Año 2050	0,66	0,48	0,69	0,47	0,70	0,45	0,71	0,43
Año 2100	0,73	0,34	0,82	0,23	0,96	0,06	1,09	-0,09

Fuente: Elaboración propia.

^aNo incluye todos los sectores productivos.

CUADRO VII.2
COBENEFICIOS UNITARIOS SEGÚN ESCENARIO,
PROMEDIO 2010-2030
(En dólares/tCO₂e)

Escenario reducción GEI	Escenario penetración medidas	
	Normal	Máximo
M1	[6,9 - 38,8]	[7,3 - 41,1]
M2	[6,6 - 37,3]	[7 - 39]
MT1	[16,4 - 90,3]	[19,7 - 107,9]
MT2	[14,5 - 79,4]	[16,6 - 91,4]
MAX	[10,6 - 58,5]	[11,8 - 65,4]

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Se presentan los resultados para dos escenarios de valoración de beneficios [bajo-alto].

VIII. Estrategias de cambio climático en el país

A. Política nacional de cambio climático

Si bien Chile es parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y del Protocolo de Kyoto, en su calidad de país en desarrollo, no posee compromisos de reducción de emisiones de GEI frente a estos acuerdos internacionales. No obstante, en 1996 estableció, en el contexto de la CMNUCC, el Comité Nacional Asesor sobre Cambio Global, encargado de preparar la Primera Comunicación Nacional sobre el Cambio Climático. Entre otras cosas, en esta comunicación se incluía un inventario nacional de las emisiones de gases de efecto invernadero y se identificaban las opciones de mitigación, así como la vulnerabilidad y las medidas de adaptación (OCDE y CEPAL, 2005).

El Gobierno de Chile definió en 2006 su estrategia nacional de cambio climático, que plantea tratar la temática sobre la base de los siguientes ejes: i) adaptación a los efectos del cambio climático; ii) mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero; y iii) creación y fomento de capacidades en cambio climático.

En 2008 se aprobó el Plan de Acción Nacional de Cambio Climático (PACC), concebido como un instrumento articulador de un conjunto de lineamientos de orden político que llevarán a cabo los organismos públicos competentes en materia de cambio climático y de sus efectos adversos. Este plan también pretende ser una herramienta orientadora para el sector productivo y académico, así como para los organismos no gubernamentales, puesto que indica las materias que el Estado considera que deben ser asumidas por el conjunto de la sociedad para enfrentar los efectos del cambio climático.

El PACC fue diseñado para responder a los ejes y objetivos de la Estrategia Nacional de Cambio Climático, mediante un proceso en el que participaron, tanto las instituciones vinculadas al Consejo Directivo de la Comisión Nacional del Medio Ambiente como otras pertenecientes al mundo académico y de investigación nacional.

En el marco del PACC, se constituyó en 2008 el Consejo de Cambio Climático y Agricultura, en el que participan diversos actores y expertos relacionados con el sector silvoagropecuario. Este Consejo es la primera instancia de este tipo a nivel sectorial en el país y responde a la necesidad de velar por la adaptación del sector silvoagropecuario a los efectos del cambio climático.

Finalmente, en junio de 2009 se creó el Comité Interministerial de Cambio Climático, conformado por los Ministros de Medio Ambiente, Relaciones Exteriores, Hacienda, Energía y Agricultura y la Secretaria General de la Presidencia. Este Comité tiene como objetivo principal resolver los asuntos vinculados al proceso de negociación internacional sobre cambio climático. La Secretaria Ejecutiva le corresponde al Director Ejecutivo de la CONAMA.

B. Iniciativas locales

Además de los estudios relativos a los efectos del cambio climático y de las medidas de mitigación, es importante mencionar una serie de iniciativas locales que se están llevando a cabo para ayudar a la mitigación de las emisiones de GEI y plantear medidas de adaptación a los efectos del cambio climático.

Desde el punto de vista de la mitigación, resultan especialmente relevantes las acciones y los programas que llevan adelante el Programa País de Eficiencia Energética y la reciente Ley de Energías Renovables No Convencionales. Las repercusiones de estas medidas en la reducción de las emisiones de GEI ya han sido evaluadas en capítulos anteriores.

IX. Conclusiones y recomendaciones de política

Chile posee un número importante de características que lo convierten en un país vulnerable a los efectos del cambio climático. Gran parte del territorio presenta niveles muy bajos de precipitación asociados a climas desérticos y semiáridos. Muchas de las cuencas hidrológicas, y de los usuarios que allí viven, necesitan de un régimen hidrológico basado en el derretimiento de nieves acumuladas en los meses de invierno. Las principales actividades económicas del país dependen directa o indirectamente de las condiciones climáticas y si bien existe una larga costa que provee recursos, en ella se ha construido una infraestructura que también sufre los impactos e inclemencias del clima. Por último, existen varias regiones con un alto nivel de endemismo que están incluidas dentro de las zonas críticas (*hotspots*) de biodiversidad del planeta.

No debería ser una sorpresa, entonces, que los resultados entregados en este informe presenten una amplia evidencia de los potenciales efectos del cambio climático en Chile. De acuerdo con las proyecciones de modelos de clima global, el futuro en escenarios de cambio climático significa para Chile, en términos generales, un aumento de temperatura en todo el país que se hace más progresivo a medida que avanza el siglo XXI (en torno a 4 °C a finales de siglo) y nos alejamos del mar. Por otra parte, los mismos modelos proyectan importantes reducciones en los niveles de precipitación (en torno al 30% a finales de siglo) para la zona central, entre las regiones de Valparaíso y Los Lagos. En el extremo norte del país (regiones de Arica a Atacama) la situación es más ambigua y no hay mucha claridad en cuanto a la tendencia esperada. En el extremo austral (región de Magallanes), los modelos indican un aumento progresivo de los niveles de precipitación. Finalmente, la región de Aysén corresponde a una zona de transición, donde no se esperan grandes variaciones con respecto a la situación actual.

Estos cambios en las condiciones climáticas pueden traer aparejada una serie de problemas económicos, sociales y ambientales. Muchos de estos problemas estarían asociados a cambios en la disponibilidad de recursos hídricos y en los efectos que estos tendrían en la generación de hidroelectricidad, la provisión de agua potable y la disponibilidad de agua para riego y para otros sectores productivos, como la industria y la minería.

En el caso de los efectos en la generación eléctrica, los escenarios evaluados indican pérdidas en torno al 10% y al 20% con respecto a la situación base. Esto tendría un costo económico significativo, cercano a los 100 millones de dólares al año, e incidiría en el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, alrededor de 3 millones de toneladas de CO₂ equivalente. Todo esto es producto de un incremento de la generación eléctrica de tipo térmica.

Con respecto a la provisión de agua potable, los resultados indican que, en el caso de la Región Metropolitana, existirían cambios hidrológicos en la principal fuente de abastecimiento de la ciudad –el río Maipo–, por lo que, de acuerdo con las proyecciones de demanda del recurso para la población, en el futuro se produciría un déficit en la provisión de este. Un componente del impacto que enfrentarían las empresas sanitarias estaría asociado a la compra de derechos para asegurar la oferta de agua. Producto de esta situación, se puede prever que tales empresas tengan que incurrir en costos que se traspasarían a los usuarios en la ciudad mediante el aumento de las tarifas. Una evaluación de este costo implicaría un incremento en la tarifa de agua para la población en torno a los dos dólares al año. Es importante destacar que este sería solo uno de los componentes de los efectos esperados y que existen otros costos asociados a los cambios, los que será necesario incluir en la infraestructura para garantizar un servicio adecuado.

De la evaluación realizada en el sector minero se puede concluir que, para un horizonte de tiempo que abarque los próximos 30 años, las condiciones climatológicas indican que todas las cuencas donde se ubican las minas en la actualidad verán reducida su disponibilidad hidrológica producto de un aumento de temperatura y, por ende, de evaporación, y de un descenso de la precipitación. No está claro cuáles serían las acciones que tendrían que llevar a cabo las diferentes minas a raíz de estos cambios, si se considera que la gran mayoría se encuentra en este momento en una situación sumamente compleja en cuanto a la disponibilidad de agua. La medida de última instancia a la que podrían recurrir sería la desalinización de agua de mar. En caso de que esta fuera la medida considerada, su adopción implicaría aumentos significativos en los costos de producción, de entre 6 c/lb y 20 c/lb, y un incremento en la emisión de GEI producto del consumo de electricidad asociado al proceso.

Siguiendo con el análisis de cambios en recursos hídricos, de acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio se proyecta que existirá una baja en la disponibilidad de agua para riego en las comunas ubicadas al norte del río Maipo. Esto, sumado a cambios proyectados en la productividad de diferentes tipos de especies, tiene importantes efectos potenciales en el sector silvoagropecuario. Estos cambios en la productividad inciden en cambios potenciales del uso del suelo que apuntan, en términos generales, a un aumento de la superficie plantada con frutales y plantaciones forestales en las regiones del sur del país. De manera complementaria, se desprenden aumentos en la superficie de otros tipos de cultivos en las comunas de la zona norte. Todos estos cambios han sido incluidos en una evaluación económica de impactos para el sector, que consideran un grado de adaptación inherente a la reacción esperable del sector en virtud de los cambios en la productividad proyectados. La evaluación económica pone de manifiesto que ciertos tipos de especies y ciertas regiones se verían potencialmente beneficiadas por el cambio climático. En términos agregados, sin embargo, los efectos serían negativos y las pérdidas en las utilidades netas se situarían entre los 100 y los 300 millones de dólares al año.

En todos los sectores descritos, con excepción del sector minero, ha sido posible llevar a cabo una evaluación económica de impactos, que han sido proyectados de acuerdo con la situación económica que se espera para el futuro (mediante el empleo de proyecciones del PIB) y agregados en su valor presente neto. En términos absolutos, la agregación del valor presente de los impactos indica que asociado al escenario A2 existiría un costo que fluctúa entre los 22.000 millones de dólares y los 320.000 millones de dólares, dependiendo de la tasa de descuento usada y del horizonte considerado. Con respecto al escenario B2, la situación es más ambigua, ya que los resultados indican un rango que fluctúa entre un beneficio neto de 25.000 millones de dólares a un costo de 40.000 millones de dólares, dependiendo de la tasa de descuento usada y del horizonte considerado. A modo de referencia, es importante considerar que el PIB del país para 2008 fue de aproximadamente 120.000 millones de dólares. Estos costos indican que Chile podría llegar a perder anualmente un 1,1% durante todo el período de análisis, es decir, hasta 2100 para el escenario A2. En el caso del escenario B2, la situación es más ambigua y se observa desde una pérdida anual del 0,5% para la proyección hasta 2050 hasta una ganancia anual del 0,09% para la proyección hasta 2100 y una tasa de descuento del 0,5%.

Existen una serie de sectores, que posiblemente sufrirán las consecuencias del cambio climático, en los que no se ha podido llevar a cabo una evaluación económica de impactos. Las dos razones que impiden concretar esta evaluación son:

- i) la existencia de sectores donde el conocimiento científico permite relacionar el cambio climático con variables físicas, pero no se cuenta con las herramientas para completar el paso y hacer la evaluación económica (como el sector minero); y
- ii) la inexistencia de la información científica básica que permita relacionar el cambio climático con las variables biofísicas de relevancia (como el sector pesquero).

Los sectores que no han sido incluidos en la evaluación económica, pero que se espera que deban soportar los efectos asociados al cambio climático, son: i) biodiversidad y servicios ecosistémicos; ii) salud; iii) recursos pesqueros y acuícolas; iv) alza del nivel del mar e impactos costeros; v) eventos extremos; vi) impactos en infraestructura; y vii) cambios en demanda de energía.

Por consiguiente, los valores entregados con respecto a los impactos económicos tienen que ser considerados como valores mínimos de referencia, dado que no se incluyen los impactos económicos asociados a los sectores no evaluados recién mencionados.

La evidencia de estos impactos potenciales del cambio climático en Chile debería traducirse en el diseño de políticas públicas orientadas a la adaptación, o sea a la disminución de los impactos esperados. Estas políticas públicas deberían definirse sobre la base de los siguientes criterios:

- i) las políticas de adaptación deberían estar orientadas en una primera etapa a los sectores de los que se dispone de un mayor nivel de información con respecto a los efectos del cambio climático (en este caso, los sectores silvoagropecuario y de recursos hídricos);
- ii) se debe instrumentar un marco de adaptación que permita priorizar medidas en virtud de la incertidumbre asociada a escenarios de cambio climático. En este sentido, las primeras políticas de adaptación tienen que incorporar medidas doblemente beneficiosas (*win-win*) o medidas útiles en todo caso;
- iii) el proceso de adaptación debe reconocer que los efectos tienen diferencias espaciales y sectoriales significativas. En este sentido, es importante detectar, como parte de este proceso, quién o qué es más vulnerable a los efectos esperados, ya que eso es lo que hoy tiene una menor capacidad de adaptación; y
- iv) el marco de adaptación debería apoyarse en una continua mejora de los niveles de información que se puedan tener de los impactos en los sectores ya analizados y otros que todavía falta analizar. En este sentido, no hay mejor manera de prepararse para los efectos del futuro que tener un buen entendimiento de los efectos del presente.

Otra manera de ayudar a la adaptación de los efectos del cambio climático es apostar como país a reducir las emisiones de GEI. Los resultados presentados en este trabajo muestran que los efectos del cambio climático son superiores en los escenarios con un mayor nivel de emisión de GEI (escenario A2 frente a escenario B2). Chile, al ser un país pequeño en el contexto global, no tiene un aporte importante en las emisiones de GEI. Sin embargo, su continuo crecimiento histórico y futuro augura un aporte relativo cada vez mayor en términos de emisiones por habitante. De acuerdo con las proyecciones de emisiones tomadas de distintos estudios y sobre la base de proyecciones realizadas por la Comisión Nacional de Energía, se presentan en este documento distintos escenarios de emisión de GEI para el futuro. En todos ellos se aprecia que el principal sector emisor del país corresponde al sector de la energía, con aproximadamente un 85% de las emisiones totales. Lo siguen los sectores agrícola, industrial y de uso de solventes. Por su parte, el sector forestal y de cambio del uso del suelo ha contribuido históricamente como sumidero neto de CO₂.

Se plantean en este documento una serie de medidas genéricas que apuntan a lograr reducciones (mitigación) en la emisión de GEI. Estas medidas están enfocadas exclusivamente al sector eléctrico y apuntan a reducir la demanda de energía (o electricidad) o a descarbonizar la manera en que se genera la energía (o electricidad). Algunas de estas medidas, las llamadas acciones tempranas, ya han sido incorporadas como parte de la línea de base de la situación futura, lográndose una reducción en torno al 20% del crecimiento de las emisiones futuras. Un ejemplo de estas medidas corresponde a la ley de energías renovables no convencionales, que implica la obligación de que las empresas generadoras de electricidad incorporen a sus matrices la generación mediante energías renovables no convencionales. Otro ejemplo corresponde a la serie de medidas y programas que ha propiciado el Programa País de Eficiencia Energética y que ha tenido como resultado una reducción importante de la demanda de electricidad a nivel nacional.

Sin embargo, es necesario que se diseñen políticas públicas que aseguren que este tipo de impactos de reducción de emisiones siga creciendo en el futuro, para así lograr un desacople entre el nivel de desarrollo del país y sus emisiones de GEI. Los escenarios de mitigación considerados en este trabajo lograrían una reducción potencial de aproximadamente el 30% para los próximos 20 años con respecto a la línea de base.

En Chile no se ha hecho una evaluación de los costos económicos asociados a estos escenarios de mitigación. Si se recurre al análisis de la información proveniente de estudios realizados en otros países, o a nivel mundial, es posible prever que estos costos sean importantes, pero probablemente menores que los asociados a los efectos del cambio climático. Es imperativo llevar a cabo esta evaluación considerando las limitaciones y oportunidades que Chile enfrenta en esta materia.

Asimismo, es interesante reconocer que las medidas de mitigación de las emisiones de GEI tienen cobeneficios ambientales asociados, producto de la reducción de contaminantes locales. De acuerdo con el análisis presentado, al implementar medidas que permitan cumplir con los escenarios de reducción de GEI, sería posible obtener beneficios monetarios que pueden llegar incluso a valores en torno a los 100 dólares/tCO₂. El mayor impacto se concentraría en las grandes urbes chilenas como lo son el Gran Valparaíso, Gran Santiago, Gran Temuco y Gran Concepción, localidades donde se verá mejorada la calidad de vida de la población.

Chile tiene por delante un gran desafío en materia de cambio climático. Por una parte, el desarrollo del país contribuye a las causas del problema mediante la emisión de gases de efecto invernadero que se prevé que seguirá creciendo en el futuro, por lo que se deben crear las políticas públicas tendientes a reducir estas emisiones. Por otra parte, el cambio climático tiene efectos económicos, sociales y ambientales que ponen en riesgo el desarrollo del país, en especial el de las personas más vulnerables, por lo que se deben crear programas de adaptación para paliar los efectos negativos. El desafío es lograr romper este círculo vicioso que repercute en el desarrollo sostenible de las futuras generaciones.

Bibliografía

- AGRIMED (Centro de Agricultura y Medio Ambiente) (2008a), “Impactos en los recursos edáficos de Chile frente a cambios climáticos”, *Análisis de vulnerabilidad del sector silvoagropecuario, recursos hídricos y edáficos de Chile frente a escenarios de cambio climático. Segunda comunicación nacional de Chile*, Santiago de Chile.
- (2008b), “Impactos productivos en el sector silvoagropecuario de Chile frente a escenarios de cambio climático”, *Análisis de vulnerabilidad del sector silvoagropecuario, recursos hídricos y edáficos de Chile frente a escenarios de cambio climático. Segunda comunicación nacional de Chile*, Santiago de Chile.
- Aldunce, P. y otros (2008), “Sistematización de las Políticas y Estrategias de Adaptación Nacional e Internacional al Cambio Climático del Sector Silvoagropecuario y de los Recursos Hídricos y Edáficos”, Departamento de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales Renovables, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile [en línea] <http://www.fia.cl/Portals/0/UDE/Documentos/Cambio%20Cilmatico/Sistematizaci%C3%B3n%20de%20las%20Pol%C3%ACTicas%20y%20Estrategias%20de%20Adaptaci%C3%B3n%20Nacional.pdf> [fecha de consulta: 9 de diciembre de 2011].
- Armesto, J. J. y otros (2009), “From the holocene to the anthropocene: A historical framework for land cover change in Southwestern South America in the past 15.000 years”, *Land Use Policy*, 27, 148-160.
- Banco Central de Chile (2009), “Informe de política monetaria de mayo de 2009”, Santiago de Chile.
- Bell, M. L. y otros (2008), “Vulnerability to heat-related mortality in Latin America: a case-crossover study in Sao Paulo, Brazil, Santiago, Chile and Mexico City, Mexico”, *International Journal of Epidemiology*, vol. 37, N° 4.
- BID y CEPAL (Banco Interamericano de Desarrollo y Comisión Económica para América Latina y el Caribe) (2007), *Información para la gestión de riesgo de desastres. Estudio de caso de cinco países: Chile (LC/MEX/L.834)*, México, D. F., sede subregional de la CEPAL en México.
- Bitrán, E. y P. Rivera (s/f), “Planned adaptation to climate change: results from the Chilean case”, Washington, D. C., Banco Mundial, inédito.
- Blümel, G. F., R. A. Espinoza y M. de la L. Domper (2010), “Crecimiento económico, precios de la energía e innovación tecnológica”, *Libertad y desarrollo*, Serie Informe Económico, N° 206.
- Broome, J. C. y otros (1995), “Development of an infection model for botrytis bunch rot of grapes based on wetness duration and temperature”, *Phytopathology*, N° 85.

- Bulit, J. y B. Dubos (1988), “Botrytis bunch rot and blight”, *Compendium of Grape Diseases*, R. C. Pearson y A. C. Goheen (eds.), St. Paul, MN, The American Phytopathological Society.
- CDEC-SIC (Centro de Despacho Económico de Carga Sistema Interconectado Central) (2011), “Estadísticas de operación 2001-2010” [en línea] <http://www.cdec-sic.cl/datos/anuario2011.pdf> [fecha de consulta: diciembre de 2011].
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y El Caribe) (2003), “Manual para la evaluación del impacto socioeconómico y ambiental de los desastres” (LC/L. 1874) [en línea], México, D.F., <<http://www.eclac.org/cgi-bin/getProd.asp?xml=/publicaciones/xml/7/12707/P12707.xml&xsl=/mexico/tpl/p9f.xsl&base=/mexico/tpl/top-bottom.xsl>> [fecha de consulta: 9 de diciembre de 2011].
- CNE (Comisión Nacional de Energía) (2011), Informe precio de nudo [en línea] http://www.cne.cl/cnewww/opencms/07_Tarificacion/01_Electricidad/Otros/Precios_nudo/otros_precios_de_nudo/abril2011.html [fecha de consulta: 9 de diciembre de 2011].
- ____ (2008), “Política energética: nuevos lineamientos. Transformando la crisis energética en una oportunidad”, Santiago de Chile.
- CCG-UC y POCH Ambiental (2010), “Análisis de opciones futuras de mitigación de gases de efecto invernadero para Chile en el sector energía”, Informe final para la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA).
- Cifuentes, L. A. y F. J. Meza (2008), “Cambio climático: consecuencias y desafíos para Chile”, *Temas de la agenda pública*, año 3, N° 19.
- ____ (2008), “Cambio climático: consecuencias y desafíos para Chile” [en línea] <http://politicaspUBLICAS.uc.cl/media/publicaciones/pdf/20100921154224.pdf>.
- Cifuentes, L. A. y +MG (2010), *Análisis técnico-económico de la aplicación de una norma de emisión para termoeléctricas*.
- CONAF (Corporación Nacional Forestal de Chile) (1999), *Tercer informe nacional 2006*, Santiago de Chile [en línea] <http://www.unccd.int/cop/reports/lac/national/2006/chile-spa.pdf> [fecha de consulta: 25 de enero de 2012].
- CORMA (Corporación Chilena de la Madera) (2009) [en línea] <http://www.corma.cl/corma.asp?id=3&ids=130> [fecha de consulta: 9 de diciembre de 2008].
- 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 de Chile.
- DGA (Dirección General de Aguas) (2002), “Los mercados del agua: La experiencia chilena”, documento presentado en la Conferencia Internacional de Organismos de Cuenca, Madrid, noviembre de 2002 [en línea] <http://documentos.dga.cl/ADM2972.pdf> [fecha de consulta: 15 de diciembre de 2011].
- ____ (1999), “Política nacional de recursos hídricos”, documento oficial de la Dirección General de Aguas, diciembre de 1999 [en línea] <http://www.bvsde.paho.org/bvsarg/e/fulltext/chile2/chile2.pdf> [fecha de consulta: 9 de diciembre de 2011].
- ____ (1987), *Balance hídrico de Chile*, Santiago de Chile, Ministerio de Obras Públicas.
- DGF (Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile) y CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente) (2007), *Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI*, Santiago de Chile [en línea] http://www.sinia.cl/1292/articles-50188_recurso_8.pdf [fecha de consulta: 9 de diciembre de 2011].
- Donoso, G., J. P. Montero y F. Meza (2001), “Adaptación a los impactos del cambio climático en la agricultura de riego en Chile central” [en línea] <http://www.cambioglobal.uc.cl> [fecha de consulta: 9 de diciembre de 2011].
- Donoso, G., J. P. Montero y S. Vicuña (2001), “Análisis de los Mercados de Derechos de Aprovechamiento de Agua en las Cuencas del Maipo y el Sistema Paloma en Chile: Efectos de la Variabilidad en la Oferta Hídrica y de los Costos de Transacción”, XI Jornadas de Derechos de Aguas, Universidad de Zaragoza y Confederación Hidrográfica del Ebro, Zaragoza.

- Donoso, G. y otros (2009), “Adaptación a los impactos del cambio climático en la agricultura de riego en Chile central”, *Camino al Bicentenario. Propuestas para Chile*, Concurso Políticas Públicas 2009, Vicerrectoría de Comunicaciones y Asuntos Públicos, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile.
- Escobar, F. y otros (1995), “Balance de masa en el glaciar Echaurren Norte, 1975 a 1992”, Santiago de Chile, Dirección General de Aguas (DGA), inédito.
- Falvey, M. y R. D. Garreaud (2009), “Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979-2006)”, *Journal of Geophysical Research*, vol. 114, N° D04102.
- Galindo, L. M. (2009), *La economía del cambio climático en México. Síntesis*, México, D. F., Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
- GAMMA (2007), *Apoyo a la implementación de norma de emisión para centrales termoeléctricas*, Santiago de Chile.
- Garnaut, R. (2008), “Garnaut Climate Change Review Interim Report to the Commonwealth, State and Territory Governments of Australia”, *Garnaut Climate Change Review*, febrero.
- Garnaut y otros (2008), “Emissions in the Platinum Age: the implications of rapid development for climate-change mitigation”, *Oxford Review of Economic Policy*, vol. 24, N° 2.
- Gilbert, H. P. y otros (2007), “Estimación del carbono capturado en las plantaciones de pino radiata y eucaliptos relacionadas con el DL-701 de 1974”, Santiago de Chile, Departamento de Ciencias Forestales, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- INE (Instituto Nacional de Estadísticas) (2007), “Resultados del VIII Censo Nacional Agropecuario”, [en línea] <http://www.censoagropecuario.cl/noticias/09/07042009.html> [fecha de consulta: 15 de diciembre de 2010].
- ____ (1997), “VI Censo Nacional Agropecuario, resultados preliminares”, Santiago de Chile.
- INIA (Instituto de Investigaciones Agropecuarias) (2004), “Actualización del inventario de gases efecto invernadero (GEI), para el caso de Chile, en los sectores agrícolas, uso y cambio de uso de la tierra, forestal y de residuos”, Santiago de Chile.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) (2007), *Cambio climático 2007. Cuarto informe de evaluación*, Ginebra.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007) “Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change”, M. L. Parry y otros (ed.), Cambridge University Press, Reino Unido.
- ____ (2006), “Guidelines for national greenhouse gas inventories” [en línea] <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>.
- ____ (2001) “The Scientific Basis. Contributions of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change”, Cambridge University Press, 2001.
- Kane, R. P. (1999), “Rainfall extremes in some selected parts of Central and South America: ENSO and other relationships reexamined”, *International Journal of Climatology*, vol. 19, N° 4.
- Meza, F. (2004), “La viticultura en función del clima y su cambio”, *Tópicos de actualización en viticultura y enología*, Colección de Extensión, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Meza, F., D. Silva y H. Vigil (2008), “Climate change impacts on irrigated maize in Mediterranean climates: Evaluation of double cropping as an emerging adaptation alternative”, *Agricultural Systems*, vol 98, N° 1.
- Meza, F. J. y otros (2003), “Value of perfect forecasts of sea surface temperature anomalies for selected rain-fed agricultural locations of Chile”, *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 116, N° 3-4.
- Miller, N. L. y otros (2008), “Climate, extreme heat, and electricity demand in California”, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 47, N° 6.

- Moss, R. H. y otros (2010), “The next generation of scenarios for climate change research and assessment”, *Nature*, vol. 463, N° 7.282.
- Moy, C.M. y otros (2002), “Variability of El Niño/Southern Oscillation activity at millennial timescales during the Holocene epoch”, *Nature*, vol. 420, N° 6.912.
- OCDE y CEPAL (Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos y Comisión Económica para América Latina y el Caribe) (2005), *Evaluaciones del desempeño ambiental: Chile (LC/L.2305)*, Santiago de Chile.
- Peña Torrealba, H. (1993), *Recursos hídricos*, colaboradores T. Cuevas Valencia, C. Salazar Méndez, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Estudios y Planificación.
- Pittock, A. B. (1980), “Patterns of climatic variation in Argentina and Chile. Part I: Precipitation, 1931-1960”, *Monthly Weather Review*, 108, N° 9.
- POCH Ambiental (2009), “Proyección de la evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector energía”, Santiago de Chile, Comisión Nacional de Energía (CNE).
- ____ (2008), “Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero para Chile desde el año 1984 al 2006”, Proyecto segunda Comunicación nacional.
- PROGEA (Programa de Gestión y Economía Ambiental) (2008), *Consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero en Chile 2007-2030 y opciones de mitigación*, Santiago de Chile, Universidad de Chile.
- Quinn, W. y V. Neal (1983), “Long-term variations in the Southern Oscillation, El Niño and the Chilean subtropical rainfall”, *Fishery Bulletin*, 81, N° 2.
- Quintana, J. y P. Aceituno (2006), “Trends and interdecadal variability of rainfall in Chile”, *Proceedings of 8 ICSHMO*, Foz do Iguaçu, Brasil, 24-28 de abril, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).
- Rubin, M. J. (1955), “An analysis of pressure anomalies in the Southern Hemisphere”, *Notos*, 4.
- Sistemas Sustentables (2009), “Desarrollo y aplicación de una metodología local de cálculo de emisiones bunker para gases de efecto invernadero”, estudio realizado para la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA).
- Stern, N. (2007), *El informe Stern: La verdad del cambio climático*, Barcelona, Ediciones Paidós.
- Swedish EPA (Environmental Protection Agency) (2009), *Air Pollution and Climate Change: Two sides of the same coin?*
- Tebaldi, C. y otros (2006), “Going to the Extremes: An intercomparison of model-simulated historical and future changes in extreme events”, *Climatic Change*, vol. 79.
- Timmerman, A. y otros (1998), “ENSO response to global warming”, *Max-Planck-Institut für Meteorologie Rep.* 251, 13.
- Tognelli, M. F., P. I. Ramírez de Arellano y P. Marquet (2008), “How well do the existing and proposed reserve networks represent vertebrate species in Chile?”, *Diversity and Distributions*, vol. 14, N° 1.
- Trenberth, K. E. y T. J. Hoar (1997), “El Niño and climate change”, *Geophysical Research Letters*, vol. 24, N° 23.
- Vicuña, S., R. Garreaud y J. McPhee, (2010), “Climate change impacts on the hydrology of a snowmelt driven basin in semiarid Chile”, *Climatic Change*, vol. 105, N° 3-4.
- Vicuña, S., J. McPhee y R. Garreaud (s/f), “Agriculture vulnerability to climate change in a snowmelt driven basin in semiarid Chile”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, doi:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000202.
- Vicuña, S. y otros (2010), “Basin-scale water systems operations with uncertain future climate conditions: Methodology and case studies”, *Water Resources Research*, vol. 46, N° W04505.
- Vicuña S. y otros (2007), “The sensitivity of California water resources to climate change scenarios”, *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 43, N° 2.
- Villagran, C. y L. F. Hinojosa (1997), “Historia de los bosques del sur de Sudamérica, II: Análisis fitogeográfico”, *Revista Chilena de Historia Natural*, vol. 70, N° 2.

Apéndices

Apéndice I

Análisis de cambios en la variabilidad e incertidumbre asociadas a las proyecciones de cambios de temperatura y precipitación para Chile

A. Introducción

En el contexto del plan de acción nacional sobre cambio climático, recientemente se han estado llevando a cabo una serie de estudios sobre los impactos proyectados en varios sectores en el país. La mayoría de estos estudios se basan en una proyección de cambio climático que fue realizada por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile con un modelo numérico climático regional (PRECIS). Esta simulación fue encargada por la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) y pretendía justamente ser la base para evaluar el impacto de cambio climático en el país, en preparación para la segunda comunicación nacional que debió hacer Chile como parte de su compromiso como nación miembro de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC).

Por otra parte, un aspecto integral del cambio climático global es la incertidumbre. Existen muchos tipos de incertidumbre asociados al cambio climático, pero es fundamental tener claro que el sistema climático es un sistema natural caótico, no determinístico y que, por tanto, cualquier proyección futura debiera hacerse en términos probabilísticos. Esto se logra realizando un conjunto de proyecciones o ensambles que cubran los probables futuros.

Considerando la realidad nacional de la existencia de solo una proyección de cambio climático y la incertidumbre inherente a la temática, el presente análisis pretende evaluar las incertidumbres en los cambios en precipitación y temperatura esperados para Chile durante el presente siglo y, de esa manera, contextualizar la proyección regional con que contamos para el país.

B. Incertidumbre en proyecciones de cambio climático

Existen muchos tipos de clasificaciones de incertidumbre. El Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en su cuarto informe (AR4) utiliza la tipología ilustrada en el cuadro A1.1.

La incertidumbre estructural e incerteza también pueden ser clasificadas como “incertidumbre de conocimiento” y han recibido la mayor atención y estudio en el contexto del cambio climático.

1. Cascada de incertidumbre en proyecciones de cambio climático

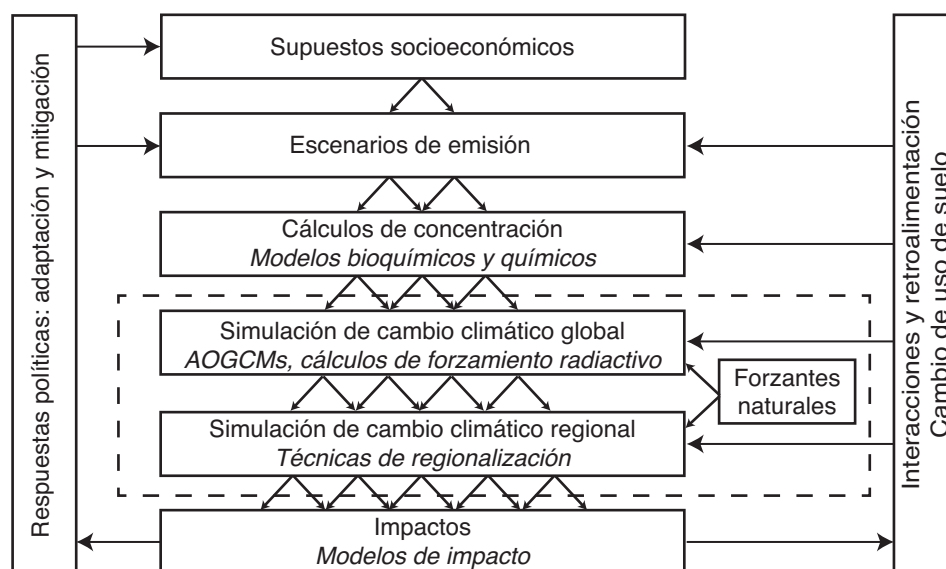
Dado el carácter no lineal y estocástico del sistema climático, como del forzamiento antropogénico y natural, el cambio climático contiene un nivel intrínseco de incertidumbre. Como resultado, las proyecciones deben ser abordadas de forma probabilística (Giorgi, 2005). Por otra parte, el proceso de hacer estas proyecciones va introduciendo un número de incertidumbres, denominada cascada de incertidumbre, la que debe ser caracterizada y cuantificada para un cabal entendimiento de este proceso y sus resultados (véase el diagrama A1.1).

CUADRO A1.1 CLASIFICACIONES DE INCERTIDUMBRE

Tipo	Ejemplos de causas	Acercamientos o consideraciones típicas
No predictibilidad	Proyecciones de comportamiento humano (por ejemplo, evolución de sistemas políticos). Componentes caóticos de sistemas complejos.	Uso de escenarios que abarcan rangos plausibles, indicando claramente asunciones, los límites considerados y los juicios subjetivos. Rango de un conjunto de corridas de modelos.
Incetidumbre estructural	Modelos inadecuados, marcos conceptuales incompletos o competidores, desacuerdo en la estructura del modelo, límites o definiciones ambiguas de sistema, procesos significativos o relaciones no considerados o incorrectos.	Especificar supuestos y definiciones claramente, comparar modelos con una observación para un rango de condiciones, determinar el grado de entendimiento de la ciencia subyacente.
Incetezas	Datos inexactos, faltantes o no representativos, resolución especial o temporal inadecuados, parámetros cambiantes o mal delimitados.	Análisis de características estadísticas (de observaciones y resultados del conjunto modelo, entre otras); pruebas estadísticas jerárquicas. Comparación entre modelos con observaciones.

Fuente: Intergovernmental Panel on climate change (IPCC) Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report (AR4) of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, Estados Unidos, 2007.

DIAGRAMA A1.1 CASCADA DE INCERTIDUMBRE EN PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO^a



Fuente: F. Giorgi, "Climate change prediction", *Climatic Change*, vol. 73, DOI: 10.1007/s10584-005-6857-4, 2005.

^a Las líneas segmentadas abarcan el segmento de la cascada debido a simulaciones climáticas.

2. Emisiones de gases de efecto invernadero

Este tipo de incertidumbre es de carácter impredecible, ya que envuelve proyecciones del comportamiento humano: el desarrollo socioeconómico del planeta. La manera en que se ha abordado esta incertidumbre es asumir un rango de historias de desarrollo plausibles. El IPCC ha elaborado una serie de estas líneas de desarrollo que se encuentran publicadas en el informe especial sobre escenarios de emisiones (Tsuneyuki, Nakicenovic y Robinson, 2000). Estos escenarios constituyen la base para el modelamiento numérico de cambio climático realizado a la fecha. En preparación para el Quinto Informe de Evaluación del IPCC de 2013, se han proyectado nuevos escenarios de emisiones (Moss y otros, 2008).

3. Concentraciones de gases de efecto invernadero

Para obtener las concentraciones atmosféricas de GEI y calcular su efecto radiactivo, se requieren de modelos biogeoquímicos. Estos modelos calculan las reacciones químicas y el tiempo de residencia de los distintos gases y su interacción con la biósfera, por medio del ciclo del carbono. Para el AR4 estos procesos fueron calculados por modelos específicos no acoplados a modelos climáticos. Por lo tanto, las retroalimentaciones entre el ciclo de carbón y el clima no están incluidas en estas proyecciones.

4. Simulaciones globales de cambio climático

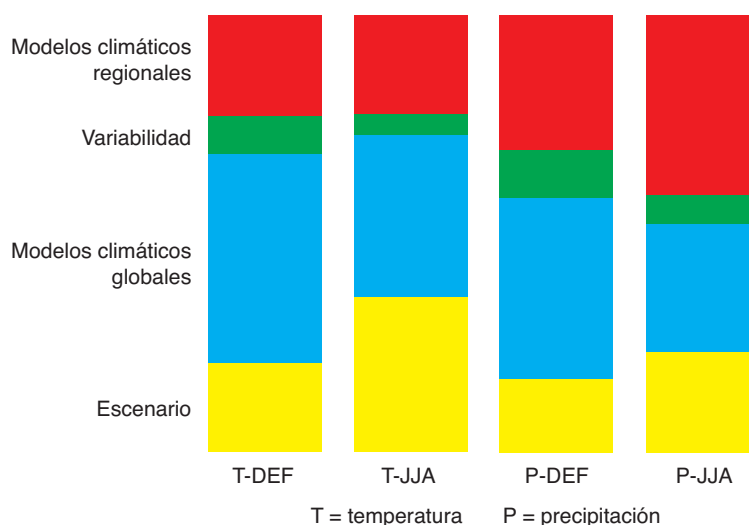
La mayor parte del trabajo de cuantificar la incertidumbre se ha realizado al nivel de las simulaciones globales de cambio climático. Especialmente analizando factores clave tales como la sensibilidad climática, absorción de calor por parte del océano o el rol radiactivo de aerosoles. La sensibilidad climática se define como el cambio en temperatura global producido por una duplicación de la concentración de CO₂ en la atmósfera respecto del período preindustrial. Este parámetro se ha estudiado extensamente y constituye una base para evaluar la respuesta climática al forzamiento antropogénico. Varios métodos se han utilizado para constreñir este factor: observaciones pasadas históricas y paleoclimáticas y ensambles de modelos atmósfera-océano acoplados.

5. Cambio climático regional

Dada la baja resolución espacial de los modelos globales (General Circulation Models, GCMs), por una parte, y la necesidad de contar con información climática a escalas más finas para estudios de impacto por otra, se han desarrollado métodos de escalamiento o *downscaling*. Las dos metodologías principales son el *downscaling* estadístico y el dinámico. Este último consiste en utilizar un modelo numérico regional a alta resolución (normalmente entre 50-25 km), forzado o alimentado en sus bordes con variables de un modelo global. Entre las ventajas de este método se cuenta que, dado que se utiliza un modelo dinámico, todas las variables simuladas son dinámicamente consistentes y, por lo tanto, pueden resolver procesos de menor escala de manera adecuada en muchos lugares del planeta. La mayor desventaja es su costo computacional y la dependencia de sus resultados de la condiciones de borde que son proporcionadas por el modelo global imperfecto –*garbage in, garbage out*–.

Tal como el caso de los modelos globales, la manera correcta de abordar el tema de la incertidumbre con modelos regionales es la construcción de un ensamble de simulaciones, con varios modelos regionales alimentados o forzados por varios modelos globales. La envergadura de tal tarea requiere esfuerzos coordinados de distintas instituciones o países. Ejemplos de estos son el proyecto PRUDENCE (EU FW6), ENSEMBLES (EU-FW7), NARCCAP (Estados Unidos) y CLARIS-LPB (Sudamérica, EUFW7). El primer proyecto de intercomparación de modelos climáticos regionales (Regional Climate Models, RCMs) fue PRUDENCE y permitió evaluar la contribución relativa de las distintas fuentes de incertidumbre (emisiones, GCM, RCM). Déqué y otros (2007), determinan la contribución parcial de estas fuentes en la diferencia de proyecciones de temperatura y precipitación

CUADRO A1.2
FUENTES DE INCERTIDUMBRE EN LA SIMULACIÓN DE CAMBIOS EN
TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN, 2071-2100 (MENOS 1961-1990), POR EL ENSAMBLE
DE SIMULACIONES PRUDENCE (TODA EUROPA)



Fuente: M. Déqué y otros, “An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections”, *Climatic Change*, vol. 81, DOI 10.1007/s10584-006-9228-x, 2007.

para Europa. Los resultados se resumen en el cuadro A1.2. La influencia relativa de la fuente de incertidumbre depende de la variable y la estación del año, pero la mayor contribución viene del modelo global.

6. Estudios de impacto

Finalmente, los resultados de las proyecciones regionales de cambio climático serán utilizados para estudios de impacto en distintos sectores socioeconómicos, tales como agricultura, recursos hídricos o energía. Pocos estudios han intentado abordar la temática de la incertidumbre, desde las emisiones a los modelos climáticos regionales. Por ejemplo, Dessai y Hulme (2007) evaluaron la robustez de un plan de manejo hídrico en Inglaterra en un marco probabilístico y encontraron que las decisiones de adaptación en recursos hídricos eran sensibles a la incertidumbre a la respuesta climática regional (de GCMs y RCMs). Parece haber una cierta evidencia (Dessai, 2005; Wilby y Harris, 2006; Dessai y Hulme, 2007) que indica que las mayores incertidumbres del cambio climático desde una perspectiva del impacto/adaptación vienen de los modelos acoplados atmósfera-océano (AOGCMs), seguido por el método *downscaling*.

Dados estos resultados, existe una tendencia natural por escoger el mejor modelo global para realizar el *downscaling* con un modelo regional. Sin embargo, Pierce y otros (2009) llevaron a cabo un estudio para determinar cómo escoger modelos globales para estudios de cambio climático regional. Utilizaron 21 métricas para evaluar la calidad del modelo global sobre el oeste de América del Norte y detectar y atribuir el cambio climático en la región. Su conclusión es que no existe correlación entre la calidad del modelo global respecto de las métricas probadas y la detección y atribución de cambio climático regional. Más bien, enfatizan la importancia de usar ensambles, ya que el promedio del ensamble es mejor que cualquier modelo individual. Esto se debe principalmente a la cancelación de errores de los modelos globales al tomar el promedio. De esta manera se confirman resultados de trabajos anteriores a escala global (Räisänen, 2007) en una escala regional como es el oeste de América del Norte.

C. Datos y métodos

Para los distintos análisis llevados a cabo se utilizó la base de datos completa del “Coupled Modeling Intercomparison Project 3” (CMIP3), descrita por Meehl y otros (2007). Esta base de datos consiste en un grupo de simulaciones de más de 20 modelos acoplados atmósfera-océano (AOGCM) para el siglo XX y siglo XXI. Para el siglo XXI, se utilizaron las simulaciones de tres escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero:

- SRES B1: escenario de emisiones bajas, estabilizando concentraciones en 550 ppm a fines de siglo;
- SRES A1B: escenario de emisiones medias, estabilizando concentraciones en 650 ppm a fines de siglo; y
- SRES A2: escenario de emisiones altas, que llega a concentraciones de 850 ppm de CO₂ equivalente a fines de siglo.

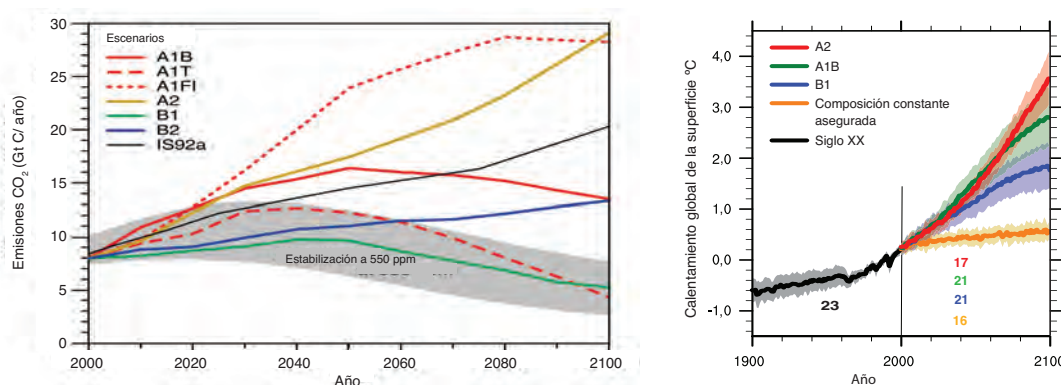
El gráfico A1.1 muestra la trayectoria de las emisiones para los distintos escenarios y la respuesta global del conjunto de modelos CMIP3, tal como aparece en el Cuarto informe del IPCC (IPCC, 2007).

En el presente estudio, para hacer el análisis con los tres escenarios, se utilizó un subconjunto de modelos para los cuales existen todas las simulaciones. Estos se encuentran en el cuadro A1.3. En el caso del análisis del escenario A2, se utilizó el total de modelos existentes, los adicionales se encuentran en el cuadro A1.4. En ambos cuadros el número bajo cada escenario corresponde al total de realizaciones para ese escenario y modelo.

Las variables analizadas fueron precipitación y temperaturas, a nivel mensual y diario. Los análisis se llevaron a cabo para tres horizontes de tiempo, cada uno de 30 años, y para 7 zonas del país, que se encuentran delimitados en el mapa A1.1.

GRÁFICO A1.1

ESCENARIOS DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO, SRES 1990 Y CAMBIO DE TEMPERATURA GLOBAL PARA LOS DISTINTOS ESCENARIOS



Fuente: Adaptado de Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report (AR4) of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, Estados Unidos, 2007.

CUADRO A1.3
MODELOS EXISTENTES PARA LOS ESCENARIOS SRES B1, SRES A1B, SRES A2

AOGCM	20C	B1	A1B	A2
CCCMA	5	4	4	2
CNRM	1	1	1	1
CSIRO	2	1	1	1
GFDL	3	1	1	1
GISS_E_R	1	1	2	1
INMCM3	1	1	1	1
IPSL	1	1	1	1
MIROC3_2M	3	3	3	3
MIUB_ECHO	5	3	3	3
MPI	3	3	2	3
MRI	5	5	5	5
NCAR_CCSM3	8	6	6	4
NCAR_PCM1	4	2	3	4
UKMO_HADCM3	1	1	1	1

Fuente: Elaboración propia.

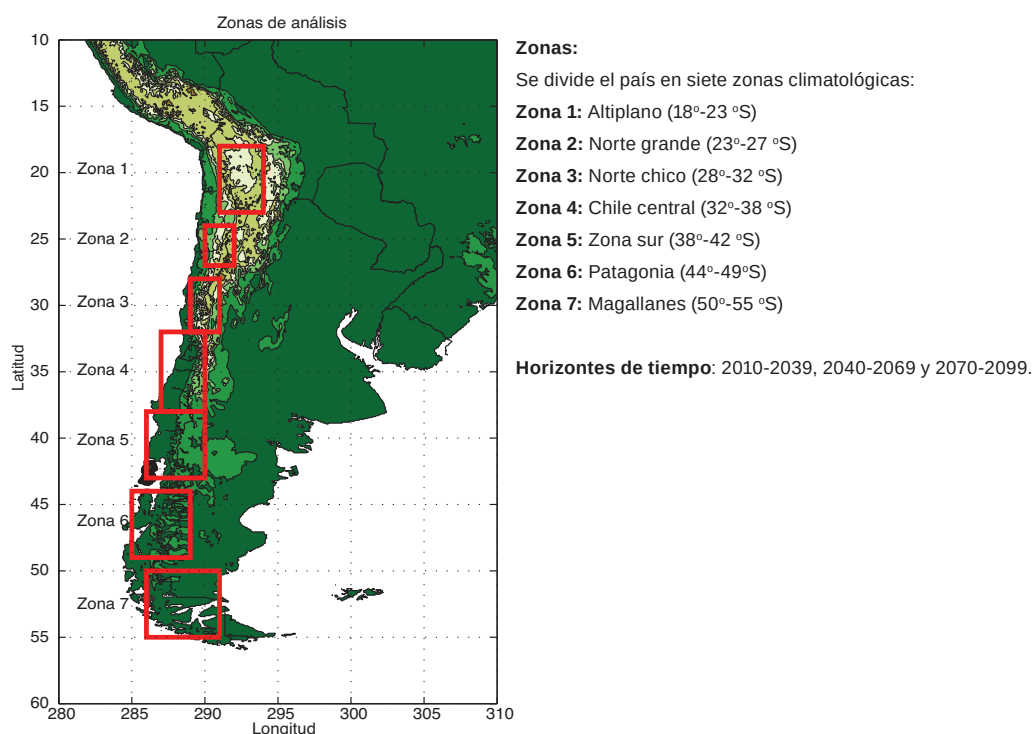
CUADRO A1.4
MODELOS ADICIONALES EXISTENTES PARA EL ESCENARIO SRES A2

AOGCM	20C	A2
INGV_ECHAM	1	1
UKMO_HADGEM1	2	1

Fuente: Elaboración propia.

MAPA A1.1

ZONA DE ESTUDIO DE SIETE ZONAS DE ANÁLISIS



Fuente: Elaboración propia.

D. Resultados

Dado que el objetivo de este estudio es entregar una evaluación probabilística de los cambios proyectados para el territorio nacional, y de esa manera dar un contexto a la proyección que fue realizada con el modelo regional PRECIS, no se ha hecho una validación de modelos.

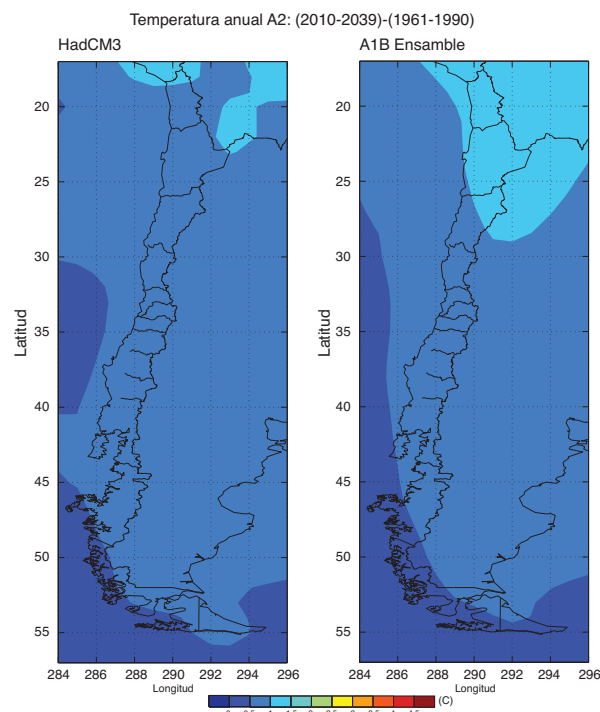
Primero se presentarán los resultados obtenidos del análisis de los campos mensuales de temperatura y precipitación.

1. Temperaturas

El análisis de la base de datos completa CMIP3 para el escenario SRES A2 indica un calentamiento del territorio nacional para todas las zonas, en los tres períodos de análisis. El gráfico A1.1 muestra el cambio anual de temperaturas para los tres períodos con respecto al período base. Nótese la diferencia en la escala de colores utilizada para el mapa A1.2 y para los mapas A1.3 y A1.4.

Los paneles a la izquierda de los mapas A1.2 y A1.3 corresponden al promedio del modelo HadCM3 y los de la derecha corresponden al promedio del ensamble de modelos SRES A2. Tanto en HadCM3 como en el ensamble, la zona que más calentamiento sufre es la del altiplano y la cordillera en Chile centro-sur. La zona que menos se calienta es el océano en latitudes altas y la punta austral del continente (región de Magallanes). Al analizar los promedios estacionales de cambio de temperatura, se ha visto que los mayores cambios en el altiplano ocurren en invierno, mientras que en la zona centro-sur del país, y en general sobre la cordillera, los mayores cambios se producen en verano. Estos resultados son válidos para los tres períodos analizados.

MAPA A1.2
PROYECCIONES DE TEMPERATURA EN EL ESCENARIO A2, 2010-2039
(Cambios en grados Celsius por sobre base histórica)



Fuente: Elaboración propia.

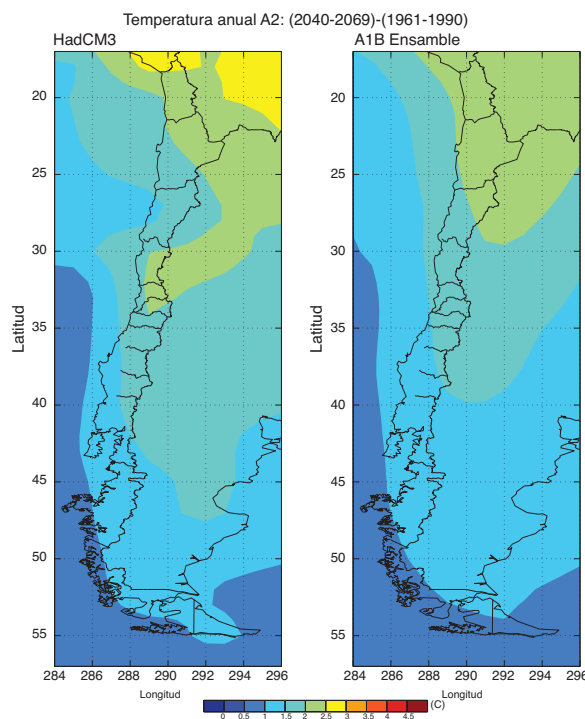
Con respecto a HadCM3 se observa, en los promedios anuales, que el modelo tiende a proyectar un calentamiento mayor al promedio sobre el continente y en particular sobre la cordillera en Chile centro-sur. Sobre el océano adyacente, HadCM3 se comporta cercano o por debajo del promedio. En la zona altiplánica, HadCM3 se calienta por debajo del promedio para el primer período, pero hacia fines de siglo, el calentamiento es de 0,5 a 1 °C mayor que el promedio. Sobre la cordillera de la zona central el calentamiento en HadCM3 también es de 0,5 a 1 °C mayor al promedio.

En los promedios estacionales se destaca que HadCM3 muestra un calentamiento muy fuerte en los meses de verano (diciembre-enero-febrero), muy por sobre el promedio del ensamble, entre los 35°-38 °S. En resumen, el modelo presenta una alta sensibilidad climática y probablemente sobreestima el calentamiento en Chile, si se compara con el conjunto de las proyecciones para el escenario SRES A2.

En el mapa A1.4, correspondiente al período 2070-2100, se agrega el cambio de temperatura simulado por PRECIS. Claramente, el modelo regional reproduce de cerca el patrón de cambio del modelo forzante (HadCM3), con un mayor detalle debido a su mayor resolución espacial. El resultado principal es una acentuación del calentamiento en las cumbres de la cordillera.

Existen casos en que se hace más relevante realizar la evaluación de impacto del cambio climático respecto de un cambio en la temperatura, en vez de hacerlo respecto de cierto período en el futuro. Esto es sobre todo el caso para ecosistemas. Cambios en la temperatura sobre cierto umbral pueden significar un punto de inflexión para algunos ecosistemas naturales que sería importante cuantificar. Por esta razón se ha utilizado una métrica de temperatura, en vez de la métrica tradicional de cambio para un horizonte de tiempo futuro. Es decir, se ha calculado el año en que ocurrirá un

MAPA A1.3
PROYECCIONES DE TEMPERATURA EN EL ESCENARIO A2, 2040-2069
(Cambios en grados Celsius por sobre base histórica)



Fuente: Elaboración propia.

cambio de 1 °C, 2 °C y 3 °C. Para todas las zonas se ha promediado solamente la franja latitudinal. Como las series de tiempo de las simulaciones terminan en el año 2100, si para ese año no se ha alcanzado el umbral específico, el cambio ocurrirá durante el siglo XXII.

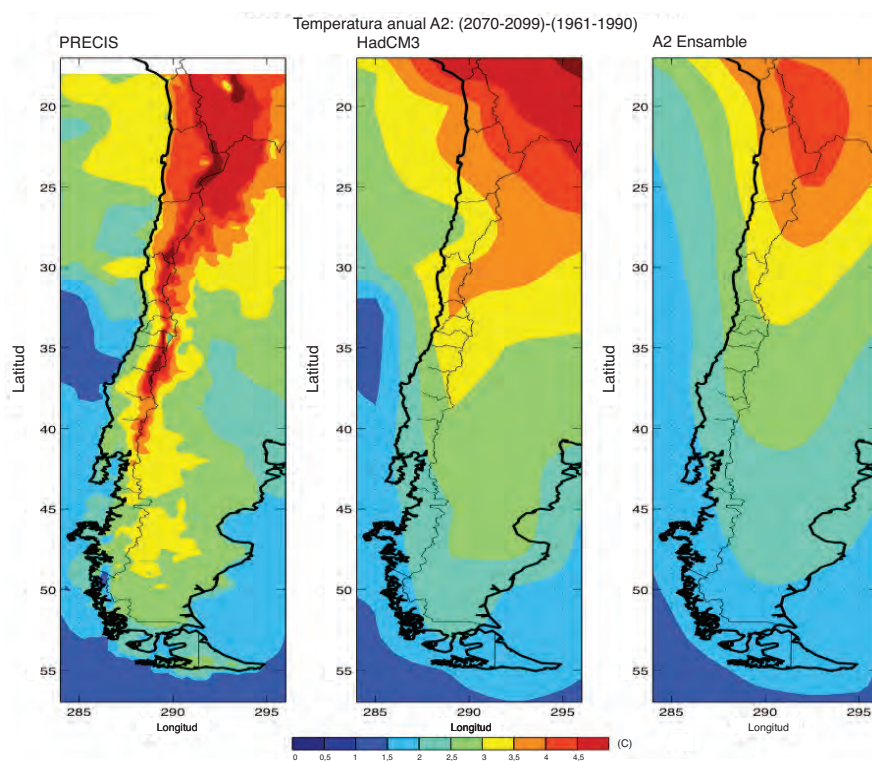
A modo de ejemplo, el gráfico A1.2 muestra el año en que se alcanza un cierto cambio de temperatura versus longitud en la zona 4. La línea roja en las barras corresponde a la mediana para el escenario A2, los bordes de la barra corresponden al percentil 25 y 75, respectivamente, las líneas punteadas al percentil 10 y 90 y los cruces rojos *outliers*. La línea magenta corresponde al cambio del modelo HadCM3. En el último panel del gráfico se muestra la topografía media de la zona como referencia. Nótese la diferencia en años, en el que se espera un cambio de 1 °C, 2 °C o 3 °C para las distintas longitudes.

Por ejemplo, para 1 °C, en promedio, sobre el océano Pacífico, se espera llegar en el año 2045-2050, en cambio sobre la cordillera, dicha temperatura, se espera mucho antes, alrededor del año 2020. El gráfico además indica que no se esperan cambios de 3 °C durante este siglo para el océano en esta zona.

Con respecto a la dispersión de los resultados, se observa que para el umbral de 1 °C, existe buena concordancia entre los modelos, mientras que para umbrales más altos la dispersión aumenta, indicando las diferentes sensibilidades climáticas de estos, con variaciones de hasta 30 años.

En HadCM3 se observa que para el umbral de 1 °C, el calentamiento se encuentra cercano a la media. Para el umbral de 2 °C y 3 °C, el modelo HadCM3 cae cerca del percentil 20 y 10 respectivamente.

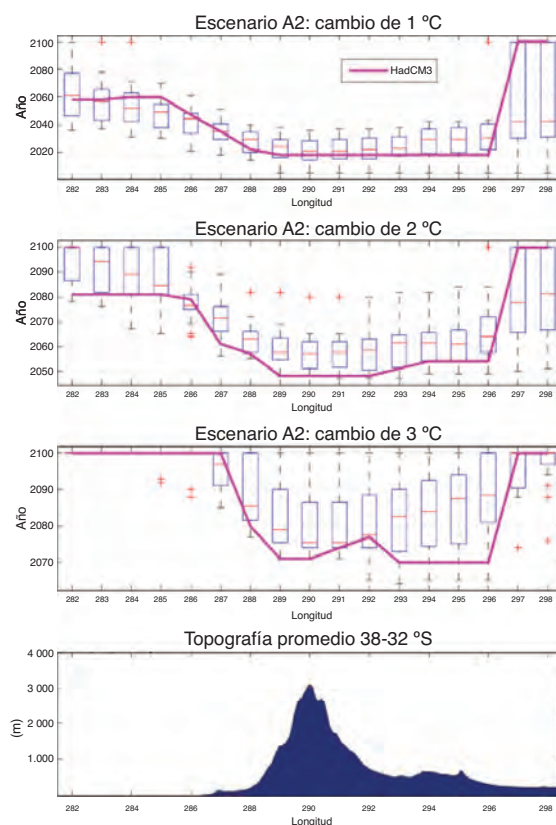
MAPA A1.4
PROYECCIONES DE TEMPERATURA EN EL ESCENARIO A2, 2070-2099
(Cambios en grados Celsius por sobre base histórica)



Fuente: Elaboración propia.

O sea, HadCM3 es uno de los modelos que indica más calentamiento en esta región. Para las otras regiones al sur de 30 °S, se ha visto que HadCM3 también muestra un mayor calentamiento que la media de los modelos. En el caso del altiplano, hay poca dispersión para los tres umbrales y HadCM3 se comporta cercano a la media.

GRÁFICO A1.2
AÑO DE OCURRENCIA DE UN CAMBIO DE TEMPERATURA DE
1 °C, 2 °C Y 3 °C EN LA ZONA 4: 32°-38 °S
(Panel inferior: topografía promedio en esa franja latitudinal)



Fuente: Elaboración propia.

2. Precipitación

La segunda variable que se ha analizado es la precipitación. En los siguientes mapas se muestran las diferencias en el período anual de precipitación para los tres períodos futuros, respecto del período de referencia (1961-1990). El panel izquierdo corresponde al modelo HadCM3, el panel central al ensamble de SRES A2 y el panel derecho muestra el porcentaje de modelos que proyectan un cambio positivo en precipitación para cada período. Por lo tanto, el último panel es indicativo del nivel de acuerdo entre los modelos en el signo del cambio para ese escenario. Esta medida fue utilizada en el informe IPCC AR4 (Christensen y otros, 2007).

Para el primer período de análisis, se proyectan disminuciones de un 10% a un 30% en el promedio anual, de las regiones IV a X. Sin embargo, el secamiento proyectado no es significativo, por lo menos hasta los 35 °S. Entre los 35° y 43 °S hay más acuerdo entre los modelos. Otra región donde hay acuerdo entre modelos respecto del signo del cambio en precipitación, es la zona austral del país. Allí, el 100% de los modelos proyecta un aumento de precipitación, que en todo caso, va de un 0% a un 10% en el período 2010-2039. El modelo HadCM3 proyecta una disminución en precipitaciones en la zona altiplánica y norte, en discordancia con el ensamble, y una disminución entre los 37°-45 °S, en acuerdo con el ensamble, y menos de un 5% de cambio en el resto del territorio.

En el período 2040-2069, el patrón de cambios en la precipitación se acentúa y con una menor dispersión asociada. En todo el país, hasta los 43 °S se proyecta una disminución en las precipitaciones, tanto en el ensamble como en HadCM3, y un aumento en la zona austral de Magallanes.

Finalmente, en el período 2070-2099, se consolida una disminución en las precipitaciones desde la III a la XI región, con valores de hasta el 50% de la precipitación anual actual. Existe un buen acuerdo entre modelos en la zona de 35°-45 °S. Para la región austral, también existe acuerdo en un leve aumento de las precipitaciones, que van del 5% al 10%.

Al analizar los cambios por estación se ha visto que los mayores cambios están proyectados para el otoño (septiembre-octubre-noviembre), seguidos por el verano. En una buena parte del territorio las precipitaciones de verano representan una proporción muy baja respecto de la precipitación anual, salvo en la zona 1 (altiplano) donde representan aproximadamente un 80% de las precipitaciones anuales.

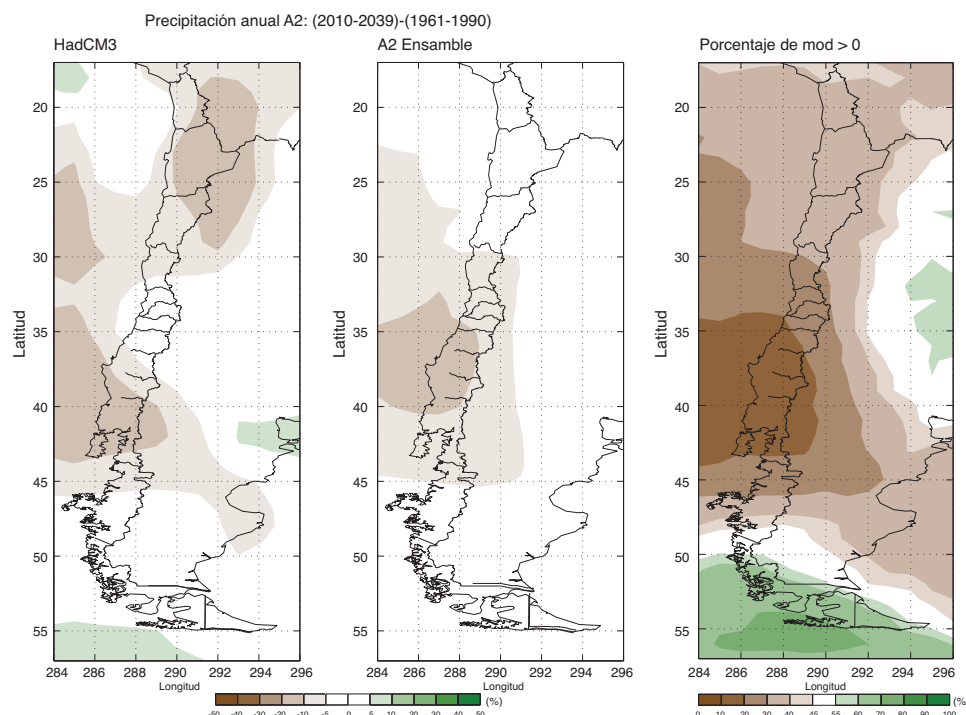
El panel derecho en los mapas A1.5, A1.6 y A1.7 muestra el grado de acuerdo entre los modelos en el signo del cambio. Otra manera de informar sobre la incertidumbre asociada al cambio proyectado es mostrar la distribución de modelos para una cierta región.

El gráfico A1.3 muestra en forma de histogramas los cambios de precipitación promediados para dos zonas: 1 y 4, el punto amarillo corresponde al modelo HadCM3. Por ejemplo, para la zona 1, en el período 2010-2039, el 40% de los modelos simula una disminución de precipitación de un 0% a un 10%, un 15% una disminución de un 10% a un 20% y un 40% de los modelos un aumento de precipitaciones. Por lo tanto, la distribución para esta región no permite hacer una proyección certera sobre el cambio esperado en el futuro. Esta situación es similar para los dos períodos futuros.

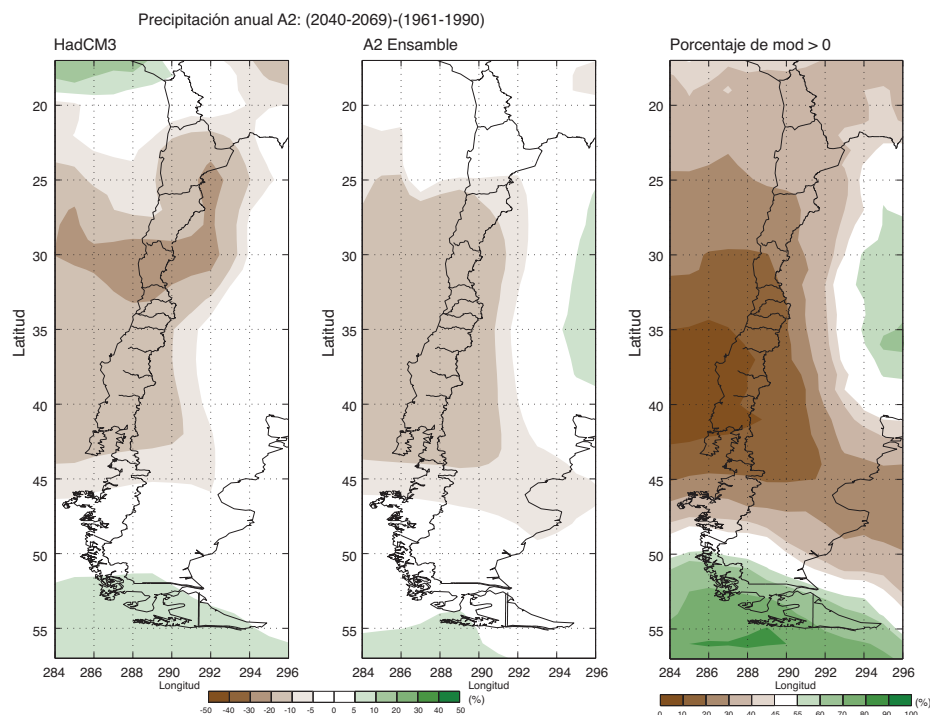
MAPA A1.5

PROYECCIONES EN PRECIPITACIÓN EN EL ESCENARIO A2, 2010-2039

(Cambios porcentuales sobre base histórica y modelos que proyectan un cambio positivo)



Fuente: Elaboración propia.

MAPA A1.6**PROYECCIONES EN PRECIPITACIÓN EN EL ESCENARIO A2, 2040-2069***(Cambios porcentuales sobre base histórica y modelos que proyectan un cambio positivo)***Fuente:** Elaboración propia.

En cambio, en la zona 4 (32° -38 °S), menos de un 10% de los modelos proyecta un cambio positivo de precipitación para el primer período de análisis y para los dos períodos futuros, esto disminuye a un 0% y menos de un 5%, respectivamente.

Para las zonas 2 y 3, se observa un patrón similar a la zona 1. Gran dispersión, sin señal nítida en el signo de cambio. Las zonas 4, 5 y 6, en cambio, muestran una clara señal de secamiento, aunque pequeña en las zonas 5 y 6. Finalmente, en la zona 7 hay una clara señal de un pequeño aumento de precipitaciones de hasta un 10%.

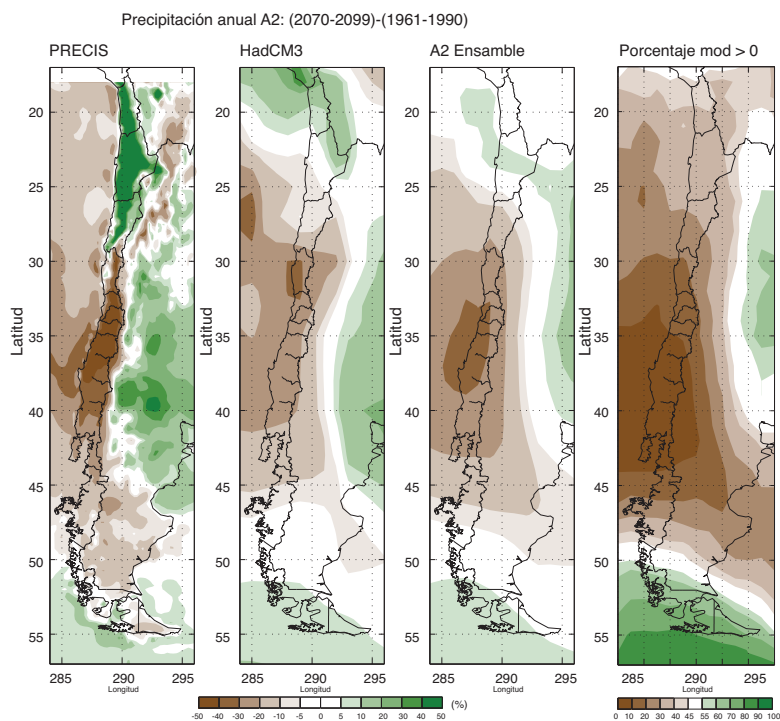
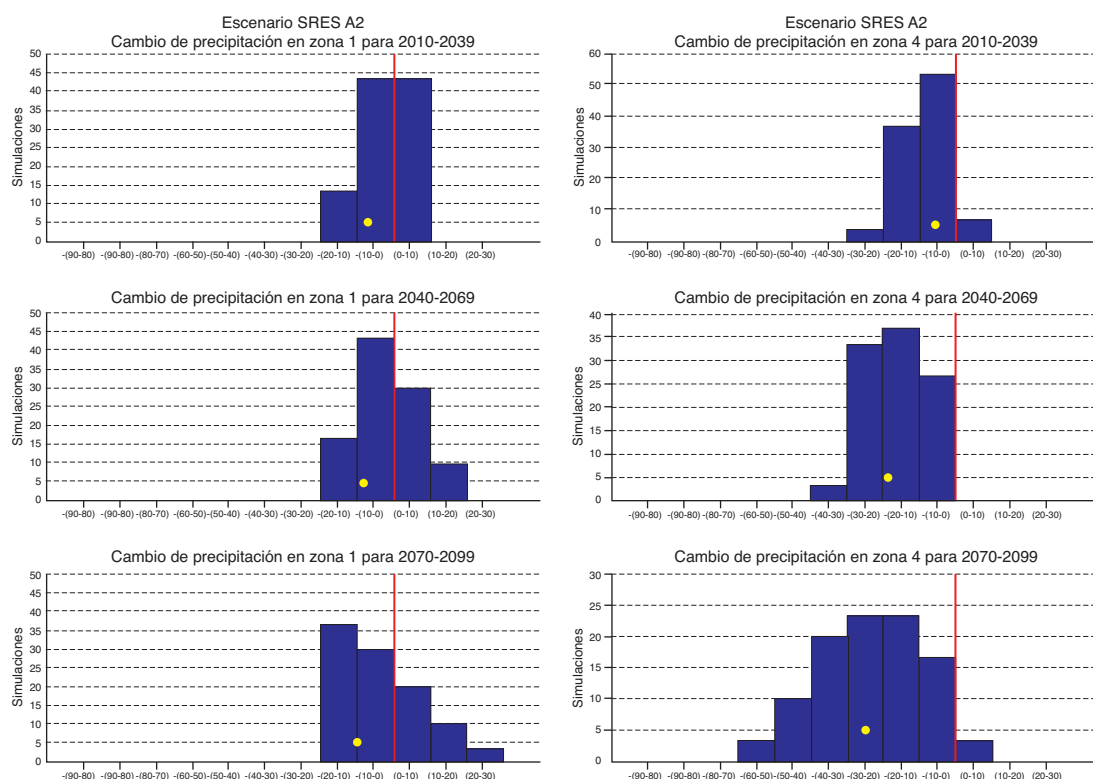
MAPA A1.7**PROYECCIONES EN PRECIPITACIÓN EN EL ESCENARIO A2, 2070-2099***(Cambios porcentuales sobre base histórica y modelos que proyectan un cambio positivo)***Fuente:** Elaboración propia.

GRÁFICO A1.3
HISTOGRAMA DE PORCENTAJE DE MODELOS CON CIERTO PORCENTAJE DE
CAMBIO EN ZONAS 1 Y 4
(En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia.

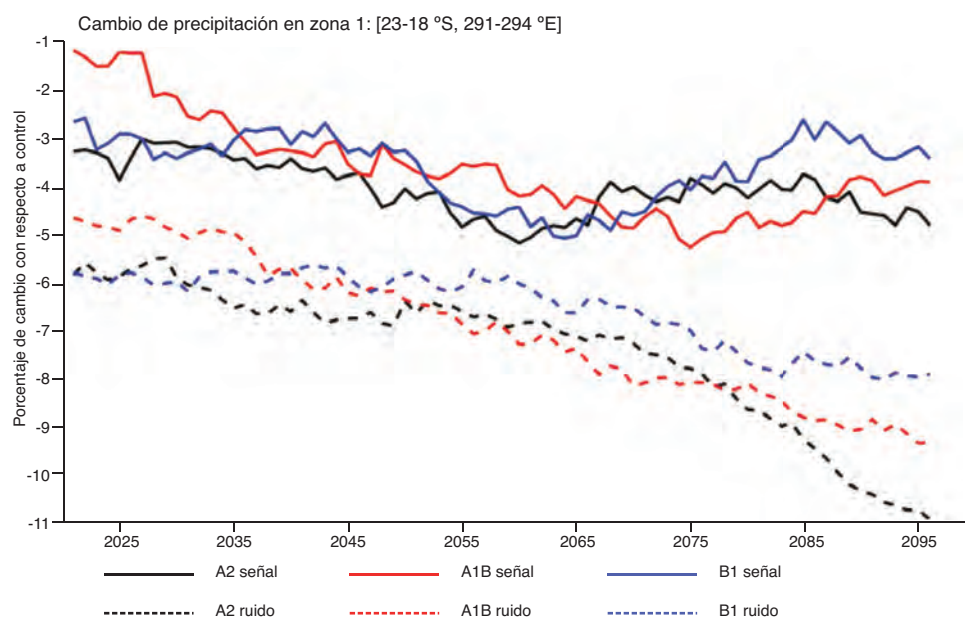
a) *Time of emergence*

Un procedimiento de evaluación de cambio, que tome en cuenta la variabilidad decadal natural, además de la variabilidad entre modelos, es la aplicada por Giorgi y Bi (2009), y que ellos denominaron *Time of Emergence* (TOE). La idea es diagnosticar el tiempo en el futuro en que se puede esperar que el cambio en precipitación en alguna región sea distinguible por sobre el nivel de ruido. Es decir, que la señal de cambio supere el nivel de ruido. El ruido corresponde a la variabilidad natural del sistema climático y está dado por la incertidumbre asociada a tres factores: el escenario de emisiones, incertidumbre estructural, evaluando variabilidad intermodelo, y variabilidad natural decadal, evaluada por variabilidad en cada modelo con más de una simulación por escenario. Para mayor detalle de la metodología véase Giorgi y Bi (2009). Para este análisis se utilizaron los tres escenarios disponibles y se llevó a cabo con las precipitaciones anuales. Se debe recordar que las señales de cambio dependen de la estación y, por ejemplo, para las zonas de Chile central y centro sur, es en otoño donde se observa la mayor concordancia y magnitud de la señal de secamiento.

Por ejemplo, el gráfico A1.4 muestra el cálculo de TOE para la zona del altiplano, donde los tres escenarios proyectan disminución en las precipitaciones durante el siglo XXI, de un 1% a un 5%. Sin embargo, el ruido es mayor que la señal de secamiento en los tres escenarios a lo largo de todo el siglo XXI (con valores de un 5% a un 11%). Es decir, para esta zona no se prevé una señal de cambio climático distinguible para el siglo XXI. Por otra parte, el gráfico A1.5 muestra el cálculo de TOE para

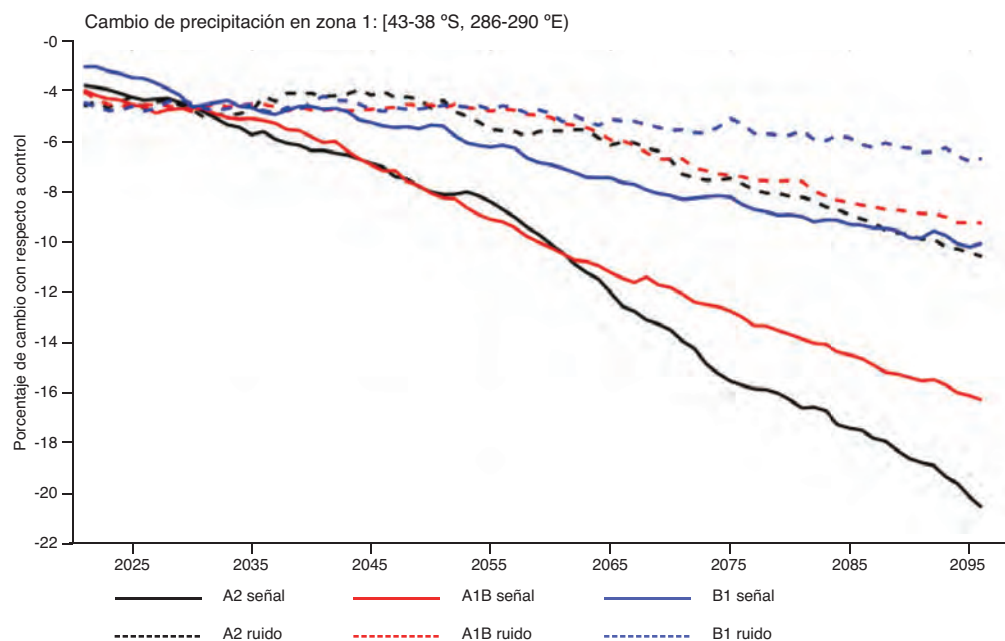
la zona 4, donde los tres escenarios proyectan una disminución que va de un 5% a comienzos del siglo XXI, a un 13-30% hacia fines de siglo, dependiendo del escenario. El ruido en esta región comienza con valores de un 8% a un 10%, pero hacia el año 2035 la señal comienza a ser mayor que el nivel de ruido y permanece así por el resto del siglo. Entonces, para esta zona se puede observar una señal distinguible de secamiento dentro del período 2015-2035 (el año 2035 corresponde a un promedio móvil). Finalmente, el gráfico A1.6 muestra el cálculo de TOE para la zona 5. Dada la variabilidad intermodelo, como la variabilidad interdecadal en los modelos, se puede esperar que la señal de secamiento en esta zona sobrepase el nivel de ruido en el período 2010-2030.

GRÁFICO A1.4
TIME OF EMERGENCE EN LA ZONA 1
 (En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO A1.6
TIME OF EMERGENCE PARA LA ZONA 5
 (En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia.

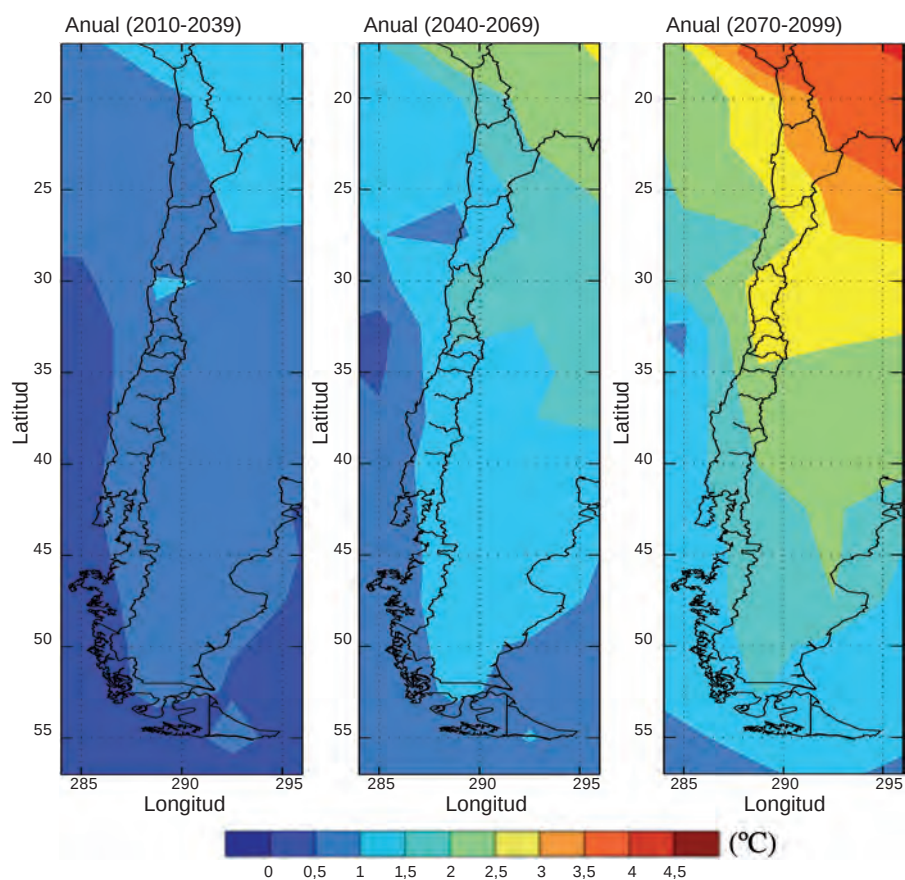
b) Comparación con escenario B2

Hasta el momento la mayoría de los análisis se han realizado con el escenario SRES A2, que constituye un escenario de altas emisiones de aquí a fin de siglo. Para tener otra proyección, se presentarán algunos resultados para el escenario B2. Este escenario corresponde a emisiones moderadas de aquí a fin de siglo, y no fue considerado para las simulaciones de CMIP3, por lo que solamente mostraremos los resultados del modelo HadCM3, para los tres períodos de análisis (véanse los mapas A1.8 y A1.9).

Los cambios anuales en temperatura en el primer período no tienen diferencias cuantitativas con el escenario SRES A2. En el segundo período, se comienzan a ver diferencias más importantes, con un máximo calentamiento en la simulación B2 de 2° a 2,5 °C en la cordillera en Chile central en verano, comparado con los 3° a 3,5° en el escenario A2. En el último período, el escenario B2 proyecta un máximo de calentamiento de 3° a 3,5 °C, comparado con los sobre 4,5 °C en el escenario A2. En resumen, el calentamiento en HadCM3 muestra una relación lineal con el nivel de concentraciones de CO₂ con el cual es forzado.

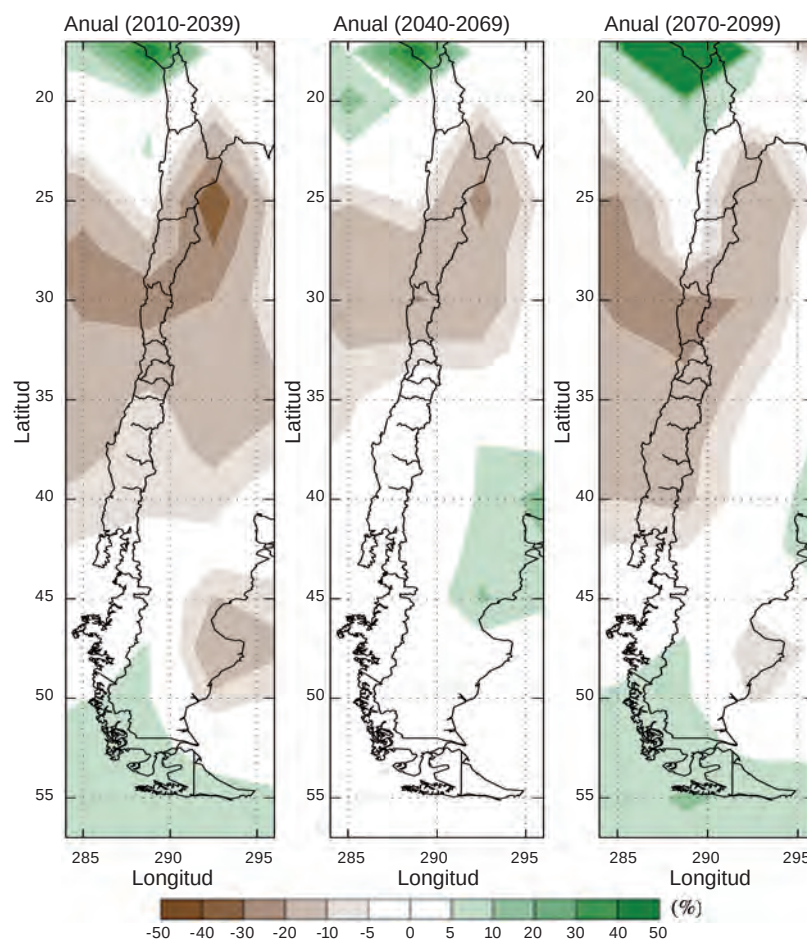
En el caso de la precipitación, la respuesta es similar al escenario A2 en su distribución espacial y signo de cambio, y al igual que con la temperatura, es más débil que el escenario A2, excepto en la zona altiplánica, donde HadCM3 proyecta un cambio positivo en las precipitaciones, que es mayor (>50%) que el cambio proyectado en la simulación A2 (20 a 30%).

MAPA A1.8
PROYECCIONES DE TEMPERATURA EN EL ESCENARIO B2,
2010-2039, 2040-2069, 2070-2099
(Cambios en grados Celsius por sobre base histórica)



Fuente: Elaboración propia.

MAPA A1.9
PROYECCIONES EN PRECIPITACIÓN EN EL ESCENARIO B2,
2010-2039, 2040-2069, 2070-2099
(Cambios porcentuales por sobre base histórica)



Fuente: Elaboración propia.

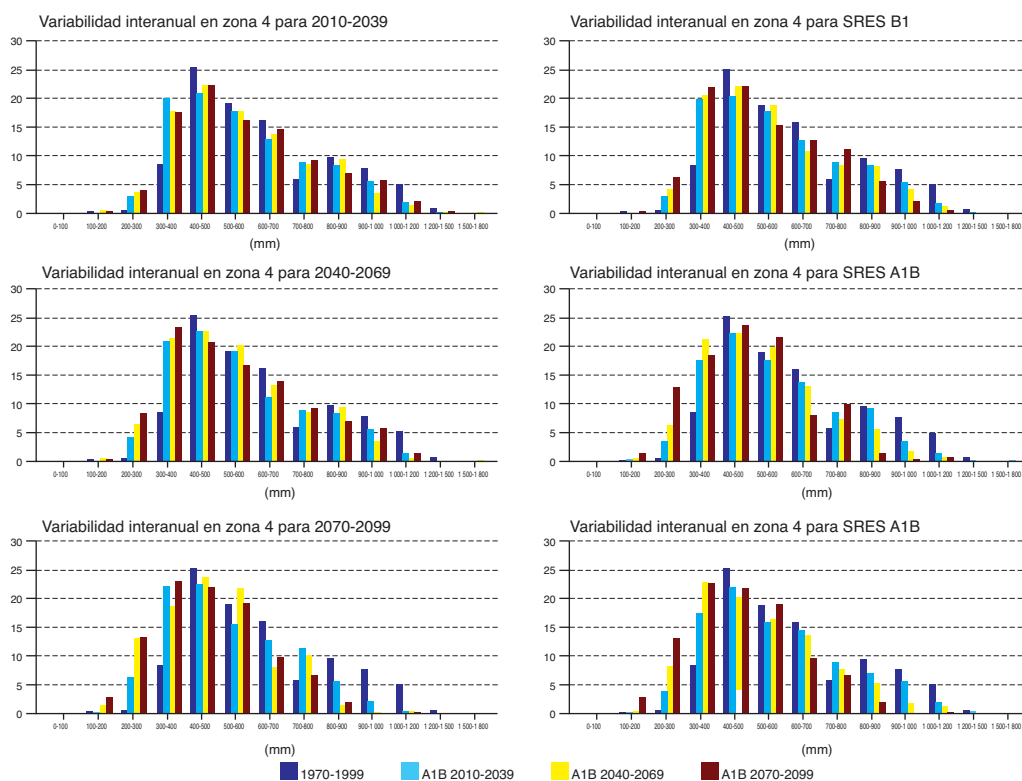
3. Cambios en valores extremos

Un primer análisis de evaluación de cambios en valores extremos fue realizado con datos mensuales, para estudiar cambios en la variabilidad interanual.

a) Variabilidad interanual en sequías

El gráfico A1.7 muestra para la zona 4 dos maneras de evaluar la variabilidad interanual en los tres períodos de análisis: por período y por escenario. En el primer período aumenta la probabilidad de años con precipitaciones menores a 400 mm, pasa de un 10% a un 15%. Para el segundo y tercer período se incrementa la probabilidad en este rango del 10% al 20%, y disminuye fuertemente con precipitaciones sobre los 800 mm. El rango de 700 a 800 mm por año aumenta la probabilidad del 10% al 5%. En este rango, existe una diferencia más marcada entre los escenarios considerados, con disminuciones menores en el escenario B1 respecto de los escenarios A1B y A2.

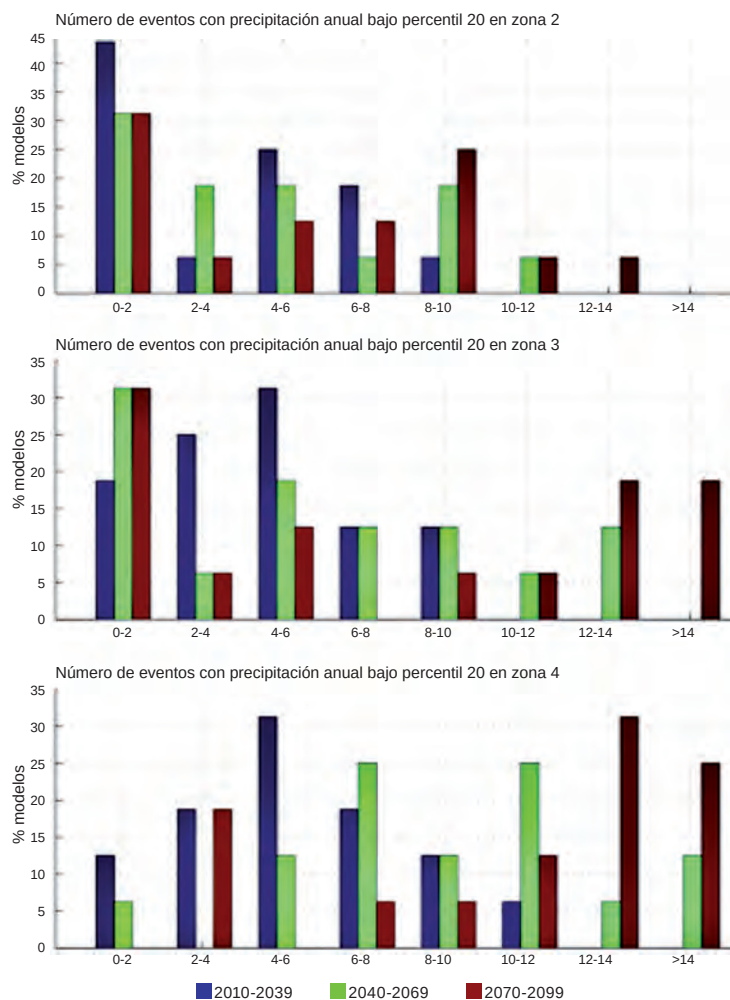
GRÁFICO A1.7
DISTRIBUCIÓN DE PRECIPITACIÓN ANUAL PARA LOS TRES
ESCENARIOS POR PERÍODO
(En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia.

Un último aspecto que se evaluó en relación con las precipitaciones es la probabilidad de sequías. Se definió un evento de sequía como dos años consecutivos en que la precipitación anual en una cierta zona cae por debajo del percentil 20. El gráfico A1.8 muestra el número de eventos en un período de tres décadas, el número máximo de eventos entonces es 15, lo que significaría que todos los años del período tienen precipitaciones por debajo del percentil 20. Este gráfico muestra para las zonas 2, 3 y 4 el número de eventos, en el período 2010-2039 (barras azules), 2040-2069 (barras verdes) y 2070-2099 (barras rojas). Por ejemplo, en la zona 4 en el período 2010-2039, un 30% de los modelos proyectan de tres a cuatro eventos de sequías y hacia fines de siglo, más del 55% de los modelos proyectan entre 12 y 14 eventos de sequía. Esto quiere decir que prácticamente todo el período de 30 años va a tener precipitaciones anuales que son igual o menores a las precipitaciones anuales que en la actualidad ocurren cada 20 años.

GRÁFICO A1.8
EVENTOS DE 2 AÑOS SEGUIDOS DE PRECIPITACIONES BAJO
EL PERCENTIL 20 EN EL FUTURO



Fuente: Elaboración propia.

b) Extremos diarios

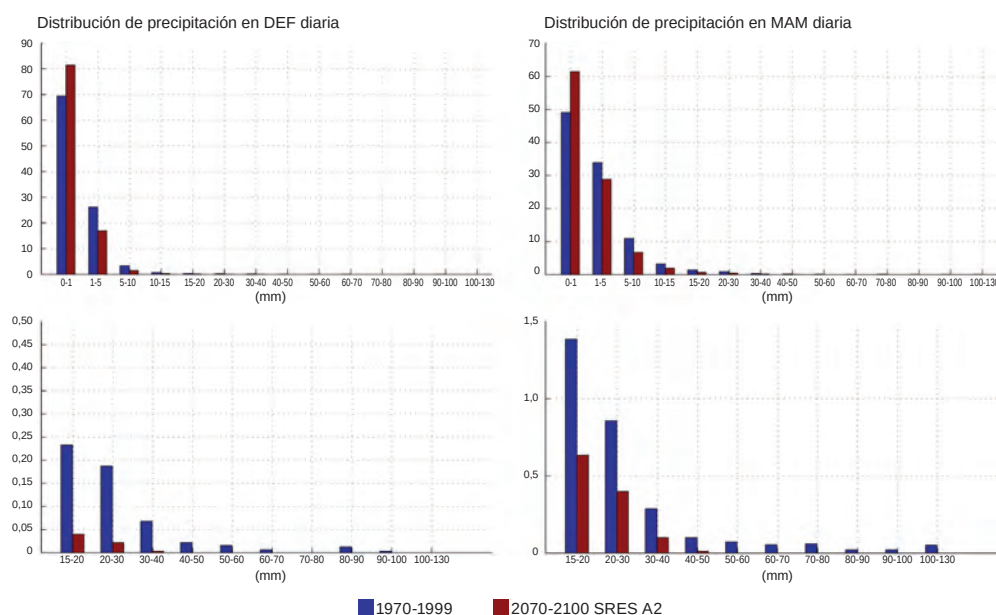
Para la mayoría de los modelos solo se cuenta con datos diarios para los últimos 20 años del siglo XXI, por lo que el análisis de cambios en eventos extremos se llevó a cabo solo para el período 2070-2099.

Una primera conclusión es el cambio en la distribución de la intensidad de los eventos de precipitación. Por ejemplo, para la zona 36°-40 °S en invierno, hay un aumento de la frecuencia de eventos de baja intensidad (0 a 1 mm y 1 a 5 mm), junto con una disminución de eventos moderados a intensos (20 a 40 mm), y los eventos por sobre los 50 mm desaparecen por completo. En las otras tres estaciones solo aumentan los eventos de 0 a 1 mm y todas las otras intensidades disminuyen.

Finalmente, los gráficos A1.9 y A1.10 muestran para los tres sectores latitudinales en Chile centro sur la relación entre eventos de precipitación y la temperatura, para las estaciones de otoño (marzo, abril y mayo), invierno (junio, julio, agosto), primavera (septiembre, octubre y noviembre) y verano (diciembre, enero y febrero). En azul se muestran los datos en el período 1970-1999, y en rojo en el período 2070-2099. Para las tres estaciones se contaron el número de eventos sobre un cierto umbral, por ejemplo 25 mm en otoño e invierno, y 20 mm en primavera. Comparando el período base con el futuro, se observa que en todas las regiones y estaciones los eventos intensos disminuyen. Sin embargo, cuando se consideran los eventos intensos que ocurren a temperaturas cálidas (más de 10° y 12 °C), se observa que los eventos cálidos aumentan en las tres zonas y en las tres estaciones. Por lo tanto, se espera para el futuro un aumento del riesgo de inundación producto de eventos de lluvia intensa en condiciones cálidas.

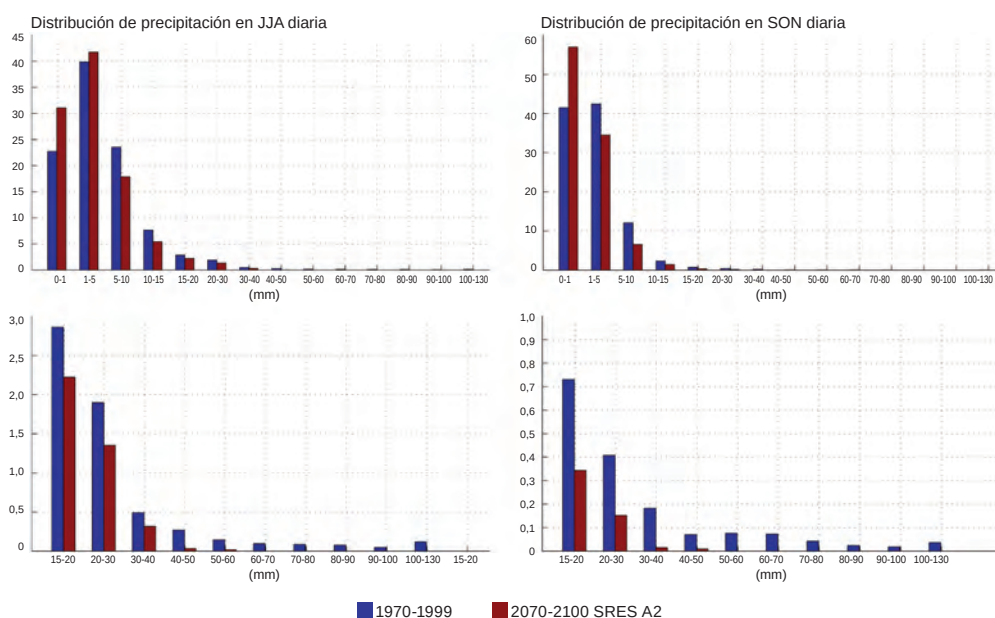
Los gráficos A1.11 y A1.12 muestran los eventos de precipitación diaria *versus* temperatura en tres zonas. Se observa que, aunque los eventos fuertes de precipitación (mayores a 30 mm) disminuyen en el futuro, los eventos en que además las temperaturas son altas, es decir, eventos cálidos, aumentan. Por ejemplo, para la zona alrededor de Santiago (32°-35 °S), los eventos sobre 33 mm disminuyen de 93° a 80°, los eventos cálidos aumentan de 21 a 63 hacia fin de siglo en invierno.

GRÁFICO A1.9
DISTRIBUCIÓN DE PRECIPITACIÓN DIARIA EN VERANO Y OTOÑO ENTRE 37°-40 °S
(En porcentajes)



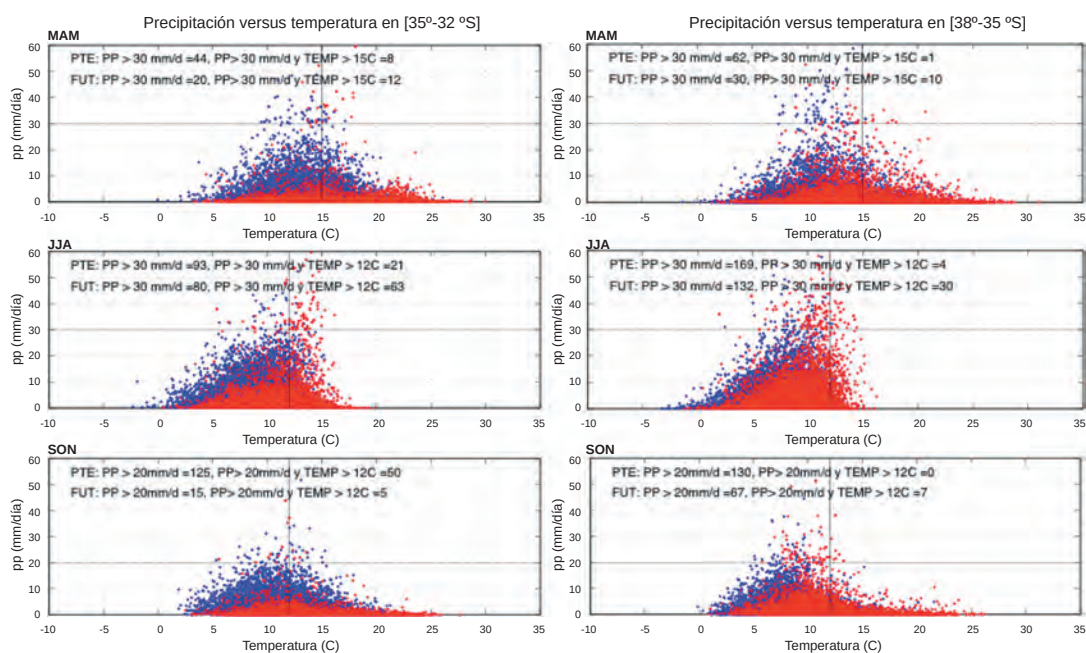
Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO A1.10
DISTRIBUCIÓN DE PRECIPITACIÓN DIARIA EN INVIERNO Y
PRIMAVERA ENTRE 37°-40 °S
(En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia.

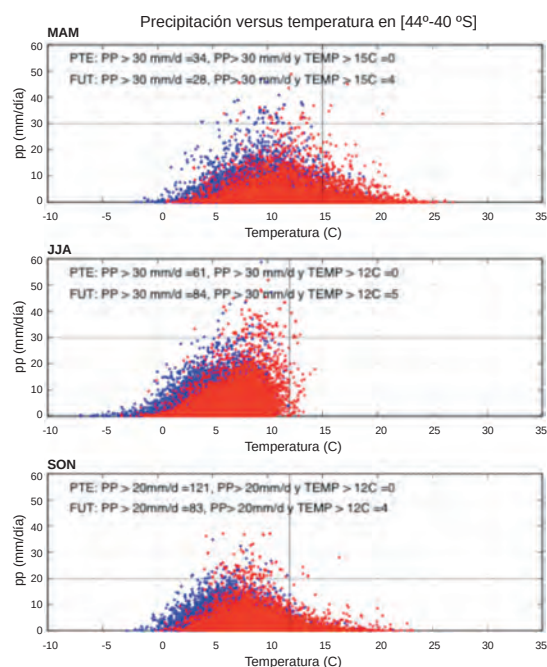
GRÁFICO A1.11
EVENTOS DE PRECIPITACIÓN VERSUS TEMPERATURA
ENTRE 32°-35 °S Y 35°-38 °S



Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO A1.12

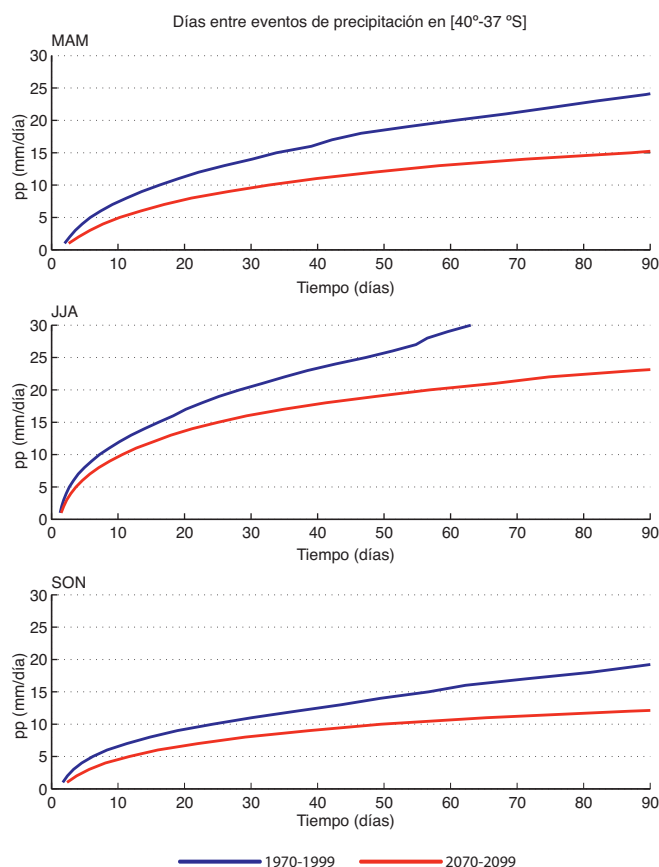
EVENTOS DE PRECIPITACIÓN VERSUS TEMPERATURA ENTRE 40°-44 °S



Fuente: Elaboración propia.

Por último, el gráfico A1.13 muestra el tiempo que transcurre entre eventos de precipitación, en tres estaciones en la zona comprendida entre los 37°-40 °S. Por ejemplo, en otoño (marzo, abril y mayo), en el período de control (1970-1999) un evento de 10 mm ocurre en promedio cada 17 días, mientras que a fines de siglo (2070-2099) transcurren en promedio 40 días. En otoño, en promedio, no ocurrirían eventos de más de 15 mm, en invierno (junio, julio y agosto) no ocurrirían eventos de más de 23 mm, y en primavera (septiembre, octubre y noviembre) eventos de más de 12 mm.

GRÁFICO A1.13
TIEMPO TRANSCURRIDO ENTRE EVENTOS DE PRECIPITACIÓN ENTRE 37°-40 °S



Fuente: Elaboración propia.

E. Resumen y conclusiones

Este informe resume los estudios llevados a cabo con el fin de analizar la incertidumbre asociada a las proyecciones de cambio climático que se están utilizando en el país, para evaluar probables impactos en distintos sectores productivos. Los análisis fueron realizados para siete zonas del país y para tres períodos futuros. Además se han analizado algunos cambios en eventos extremos para la zona centro-sur del país.

Los resultados principales por zona se pueden resumir en lo siguiente:

Zona 1: Altiplano (18°-23 °S)

Cambios en temperatura: esta es una de las zonas que exhibiría el mayor calentamiento, especialmente en invierno. Cuánto aumentará, depende del escenario y período a considerar. El modelo HadCM3 y, por lo tanto el PRECIS, se encuentran en la cola superior de la distribución en la medida que más se avanza hacia fines de siglo. Un cambio de 3 °C se espera alrededor del año 2065. Existe poca dispersión entre los modelos con las proyecciones de temperatura en esta zona.

Cambios en precipitación: no existe una señal clara, el cálculo del *Time of Emergence* (TOE) muestra una señal pequeña en la disminución en los tres escenarios a lo largo del siglo XXI, sin embargo, esta señal es siempre más pequeña que el ruido.

Zona 2: Norte grande (23°-27 °S)

Cambios en temperatura: de forma similar que en la zona altiplánica, se esperan importantes aumentos de temperatura en esta zona: 3 °C entre el año 2065 y 2075 cerca de la costa y en el año 2060 sobre la cordillera.

Cambios en precipitación: la señal de cambio en precipitación en esta zona es algo más definida comparada con el altiplano, pero con cambios importantes a lo largo del siglo. En el primer y segundo período alrededor del 60 al 70% de los modelos proyectan una disminución en precipitación. Para fines de siglo se observa en el escenario SRES A2 una distribución bimodal y un 50% de los modelos proyectan una disminución de las precipitaciones, y el otro 50% un aumento. El cálculo del TOE indica que la señal es siempre menor al ruido durante el siglo XXI.

Zona 3: Norte chico (28°-32 °S)

Cambios en temperatura: se proyectan cambios de temperatura similares a las dos zonas más nortinas. El calentamiento llega a su máximo en invierno. Según HadCM3, esta zona en particular se encuentra en el lado inferior de la distribución.

Cambios en precipitación: los resultados de cambio en precipitación en esta zona son muy similares a la zona 2. Una distribución normal se centra en un -5% en el primer período, que se ensancha bastante hacia fin de siglo. No hay TOE.

Zona 4: Chile central (32°-38 °S)

Cambios en temperatura: a partir de esta zona se espera un cambio de temperatura menor a la región del altiplano y norte, con mayor calentamiento en verano y menor en invierno. También existe una gradiente, con menor calentamiento esperable en la costa y mayor en la cordillera.

Cambios en precipitación: para esta zona existe un acuerdo de una progresiva disminución de las precipitaciones a medida que avanza el siglo XXI. Cálculo que indica que este secamiento es significativo y se puede esperar que desde el período 2015-2035, la señal pase el umbral de ruido.

Zona 5: Zona sur (38°-42 °S)

Cambios en temperatura: desde la cuarta región hacia el sur, existe un patrón que se distingue de la zona norte. El máximo calentamiento se proyecta para el verano y existe una marcada gradiente hacia el oeste, con mayor calentamiento en la cordillera. En esta zona HadCM3 proyecta un fuerte calentamiento en verano, muy por encima de la media.

Cambios en precipitación: para esta zona se comienza a ver una señal más clara de disminución en precipitaciones desde el primer período de análisis. El cálculo del TOE, indica que a partir del período 2010-2030 se puede esperar que la señal supere en magnitud el nivel de ruido. Esta es la zona del país donde se espera que la señal de secamiento emerja por sobre el nivel de ruido en un período más cercano.

Zona 6: Patagonia (44°-49 °S)

Cambios en temperatura: se espera que un cambio de 2 °C ocurra de 2075 a 2080 en esta zona.

Cambios en precipitación: para esta zona no existe una señal significativa. En los tres escenarios se proyecta un decrecimiento de las precipitaciones, pero es menor a la variabilidad en los modelos.

Zona 7: Magallanes (50°-55 °S)

Cambios en temperatura: para esta zona se proyectan los menores aumentos de temperaturas, que debieran llegar a 2 °C hacia la década de 2080 a 2090. En esta zona HadCM3 proyecta un aumento de 2 °C alrededor del año 2075-2080.

Cambios en precipitación: existe gran concordancia entre los modelos de un pequeño cambio positivo de precipitación para esta zona (de un 5% a un 10% de la precipitación actual), sin embargo, el cálculo del TOE muestra que nunca sobrepasa el nivel de variabilidad natural.

Para las zonas 4 y 5 se llevaron a cabo algunos análisis de valores extremos diarios. Por ejemplo, se verifica el importante aumento de la probabilidad de eventos fuertes de precipitación (>30mm) cálidos (es decir, con temperaturas mayores a 15 °C). También se confirma un significativo aumento del tiempo transcurrido entre eventos de precipitación, es decir, períodos secos.

En conclusión, existe una alta probabilidad de una disminución de precipitaciones en la zona entre los 32°-42 °S, para la cual podemos esperar que la señal de cambio climático sea mayor a la variabilidad en un futuro cercano (2010-2030). Esta señal es reproducida por el modelo HadCM3 y, por lo tanto, por el modelo regional PRECIS que ha sido utilizado para varios estudios específicos de impactos en distintos sectores productivos. Con respecto a estos resultados es importante notar que a pesar de que son robustos, están basados en la evaluación de la variabilidad climática dada por las diferencias intermodelos que nos proporciona el ensamble de tres escenarios de emisiones. Sin embargo, no se ha comparado esta variabilidad con la variabilidad real del clima en estas zonas.

Bibliografía

- Christensen, J. H. y otros (2007), “Regional climate projections”, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, S. D. Solomon y otros (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Estados Unidos.
- Déqué y otros (2007), “An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections”, *Climatic Change*, 81(S1).
- Dessai, S. (2005), “Robust adaptation decisions amid climate change uncertainties”, tesis de doctorado, Norwich, University of East Anglia, inédito.
- Dessai, S. y M. Hulme (2007), “Assessing the robustness of adaptation decisions to climate change uncertainties: A case study on water resources management in the East of England”, *Global Environmental Change*, vol. 17, N° 1.
- Giorgi, F. (2005), “Climate change prediction”, *Climatic Change*, vol. 73, DOI: 10.1007/s10584-005-6857-4.
- Giorgi, F. y X. Bi (2009), “Time of Emergence (TOE) of GHG-forced precipitation change hot-spots”, *Geophys Res Lett*, 36, L06709, doi:10.1029/2009GL037593.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007), “Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change”, M. L. Parry (eds.), Cambridge University Press, Reino Unido.
- Meehl, G. A. y otros (2007), “The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climate change research”, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 88, N° 9.
- Moss, R. H. y otros (2008), “Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies”, IPCC Expert Meeting Report, IPCC, Ginebra.
- Pierce, W. y otros (2009), “Selecting global climate models for regional climate change studies”, *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, vol. 106, N° 21.

- Räisänen, J. (2007), “How reliable are climate models?”, *Tellus*, vol. 59, N° 1.
- Tsuneyuki, M., N. Nakicenovic y J. Robinson (2000), “Overview of mitigation scenarios for global climate stabilization based on new IPCC emission scenarios (SRES)”, *Environmental Economics and Policy Studies*, vol. 3, N° 2 [en línea] <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=1008887> [fecha de consulta: 30 de enero de 2012].
- Wilby, R. L. e I. Harris (2006), “A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: low flow scenarios for the River Thames”, *Water Resources Research*, vol. 42, W02419, doi:10.1029/2005WR004065, Reino Unido.

Apéndice IIa

Downscaling climático del sector recursos hídricos

A. Introducción

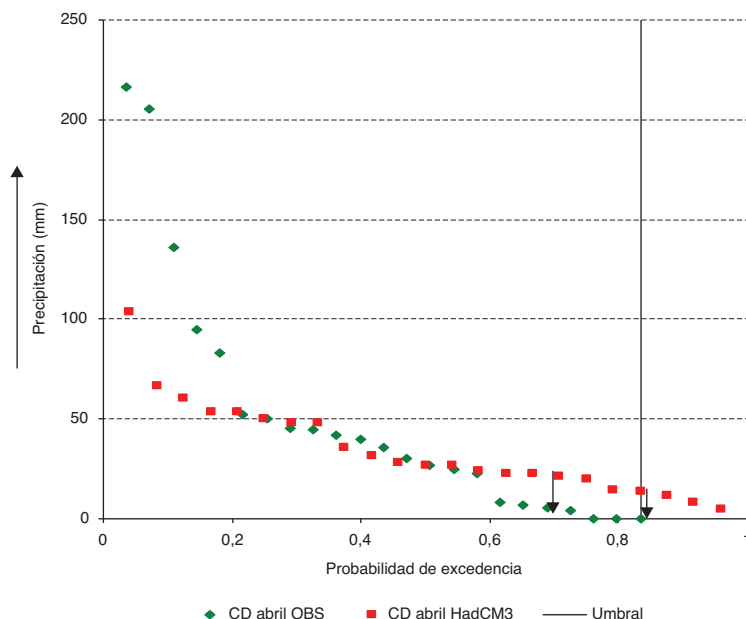
Este apéndice presenta una metodología válida para escalar las variables meteorológicas del modelo HadCM3 y ser luego usadas en modelos hidrológicos desarrollados para los sistemas estudiados (Maipo Alto, Maule Alto y Laja). La metodología apunta a una corrección de tipo estadística, dado que no existe una relación temporal, y trata de mantener los datos estadísticos como promedio, desviación y coeficiente de variación. En el gráfico A2a.1 se puede observar la relación que existe entre las curvas de duración entre las variables meteorológicas provenientes del modelo y los datos observados. Cabe recordar que una curva de duración presenta la relación entre valores de la variable de interés y la probabilidad de excedencia asociada a dichos valores, es decir, una medida de la clasificación de cada valor dentro de la serie completa estudiada.

En general, las estimaciones meteorológicas del modelo HadCM3 y, en particular, la precipitación, tienen dos problemas: el primero es que subestiman los valores máximos de precipitación y temperatura; el segundo es que no contienen valores nulos. Esto último no representa necesariamente un problema para la temperatura, pero en el caso de la precipitación es necesario corregirlo, pues existen meses, principalmente en verano, en que la precipitación observada es nula, en circunstancias de que el modelo HadCM3 entrega valores no negativos (véase el gráfico A2a.1). Por lo tanto, la metodología para escalar estos datos busca definir una relación que permita:

- i) definir un umbral bajo el cual todos los valores de HadCM3 sean nulos (para el caso de la precipitación);
- ii) construir relaciones mensuales que permitan transformar los valores de HadCM3 a valores observados, para corregir la subestimación y mantener estacionalidad (para la precipitación y la temperatura); y
- iii) construir las relaciones anuales para mantener el volumen de precipitación observado.

En el punto B se explica en qué consiste la corrección y cómo esta se aplica a ambas variables y los supuestos que se hacen para corregir los valores futuros de HadCM3.

GRÁFICO A2a.1
RELACIÓN ENTRE CURVAS DE DURACIÓN EN EL MES DE ABRIL EN EL
SISTEMA MAIPO ALTO ENTRE LOS DATOS METEOROLÓGICOS OBSERVADOS Y
PROVENIENTES DE HadCM3
(En milímetros)



Fuente: Elaboración propia.

B. Descripción de la metodología del escalamiento de las variables meteorológicas

Los datos meteorológicos futuros provienen del modelo HadCM3. Como este modelo posee una grilla espacial muy gruesa, impide utilizar los datos de manera directa, pues no representan a cada sistema modelado. Para corregir este problema se interpolan los datos de la grilla que contiene a cada sistema a un punto característico de este (definido dentro del sistema).

La metodología que se detalla a continuación se basa en que se cuenta con una serie de precipitaciones y temperaturas de HadCM3 interpolada para cada sistema, las que se denominarán “ Pp^{HAD} ” y “ T^{HAD} ” respectivamente. El intervalo temporal de estas series se divide en dos: la línea de base (LB) y el escenario futuro simulado (que puede ser A2 o B2). La línea de base se define como el intervalo de tiempo comprendido entre enero de 1960 y diciembre de 2000. Los escenarios A2 y B2 se definen entre enero de 2001 y diciembre de 2100. Teniendo esto en consideración se detallan los pasos para lograr el escalamiento de cada variable.

1. Precipitación

Debido a que, como se aprecia en el gráfico A2a.1, la serie “ Pp^{HAD} ” tiende a subestimar la variabilidad interanual de la precipitación mensual, es necesario hacer una corrección. Para esto se deben sensibilizar los valores de la serie “ Pp^{HAD} ” con los datos observados en un período concurrente. Una vez logrado esto, se debe verificar la mantención de la estacionalidad y el orden de magnitud de la precipitación en este período.

a) Ajuste mensual de la precipitación

El primer ajuste a la precipitación consiste en corregir cada mes mediante la relación entre las curvas de duración de los valores simulados y observados en una estación base de cada sistema, para el mismo período de tiempo.

Esta relación tiene por objetivo ajustar el rango de la precipitación de HAD al rango de precipitación de los datos observados. El intervalo de tiempo debe pertenecer al período de línea de base (1960-2000). Este intervalo depende en gran medida de la disponibilidad de datos observados en dicho período, por lo que es distinto en cada sistema, sin embargo, en todos los casos se han contado con más de 25 años de información para las relaciones.

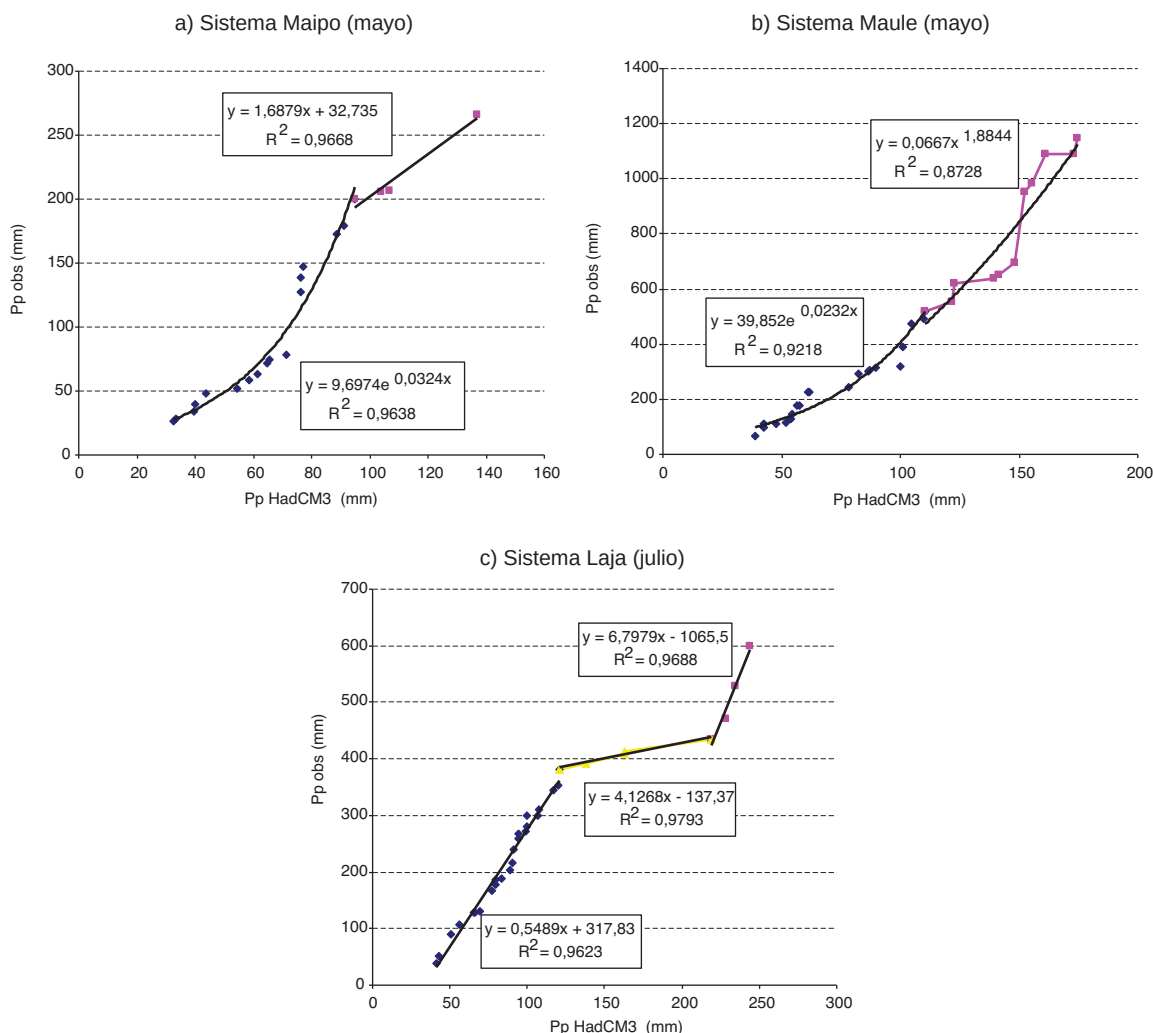
Cabe destacar que, en la mayoría de los datos observados, existen meses (especialmente en verano) donde no se ha registrado precipitación. A diferencia de esto, los datos de la serie “ Pp^{HAD} ” no poseen valores nulos para ningún mes, por lo que es necesario hacer un ajuste a la relación mensual, de tal manera de definir un valor umbral (asociado a una probabilidad de excedencia) a partir del cual los datos provenientes de la serie “ Pp^{HAD} ” sean definidos como nulos, producto de que le corresponden valores nulos de precipitación observados. Luego se establecerá la relación entre las curvas de duración entre los datos observados y datos “ Pp^{HAD} ” solo para aquellos datos no nulos.

Dependiendo del mes y régimen hidrológico de la cuenca, esta relación puede resultar más o menos compleja, presentándose no linealidades en algunos intervalos. Se ha privilegiado en esos casos un ajuste por intervalos, para caracterizar mejor el comportamiento de la relación en vez de adoptar una única relación válida para el rango de valores, a los que se les denomina límites de la relación mensual.

Esto último define un supuesto intrínseco del análisis y es que estas relaciones encontradas en el período base se mantengan en el período futuro (2001-2100), según sea el escenario analizado. Este supuesto será discutido en los siguientes pasos de la metodología. Un ejemplo de las relaciones encontradas se presenta en el gráfico A2a.2, donde se muestra la relación entre precipitaciones mensuales simuladas por el modelo HadCM3 y las observadas en estaciones pluviométricas de referencia. Debido a que no existe correspondencia cronológica entre los valores observados y los simulados, es decir, si bien el período línea de base corresponde a 1960-2000, el primer valor simulado no tiene por qué corresponder a lo observado en enero de 1960, se definen estas relaciones para pares de valores de igual probabilidad de excedencia.

GRÁFICO A2a.2

**RELACIONES MENSUALES ENCONTRADAS ENTRE PRECIPITACIÓN SIMULADA
(PP HadCM3) Y PRECIPITACIÓN OBSERVADA (PP OBS) PARA IGUAL PROBABILIDAD
DE EXCEDENCIA EN EL PERÍODO BASE**
(En milímetros)



Fuente: Elaboración propia.

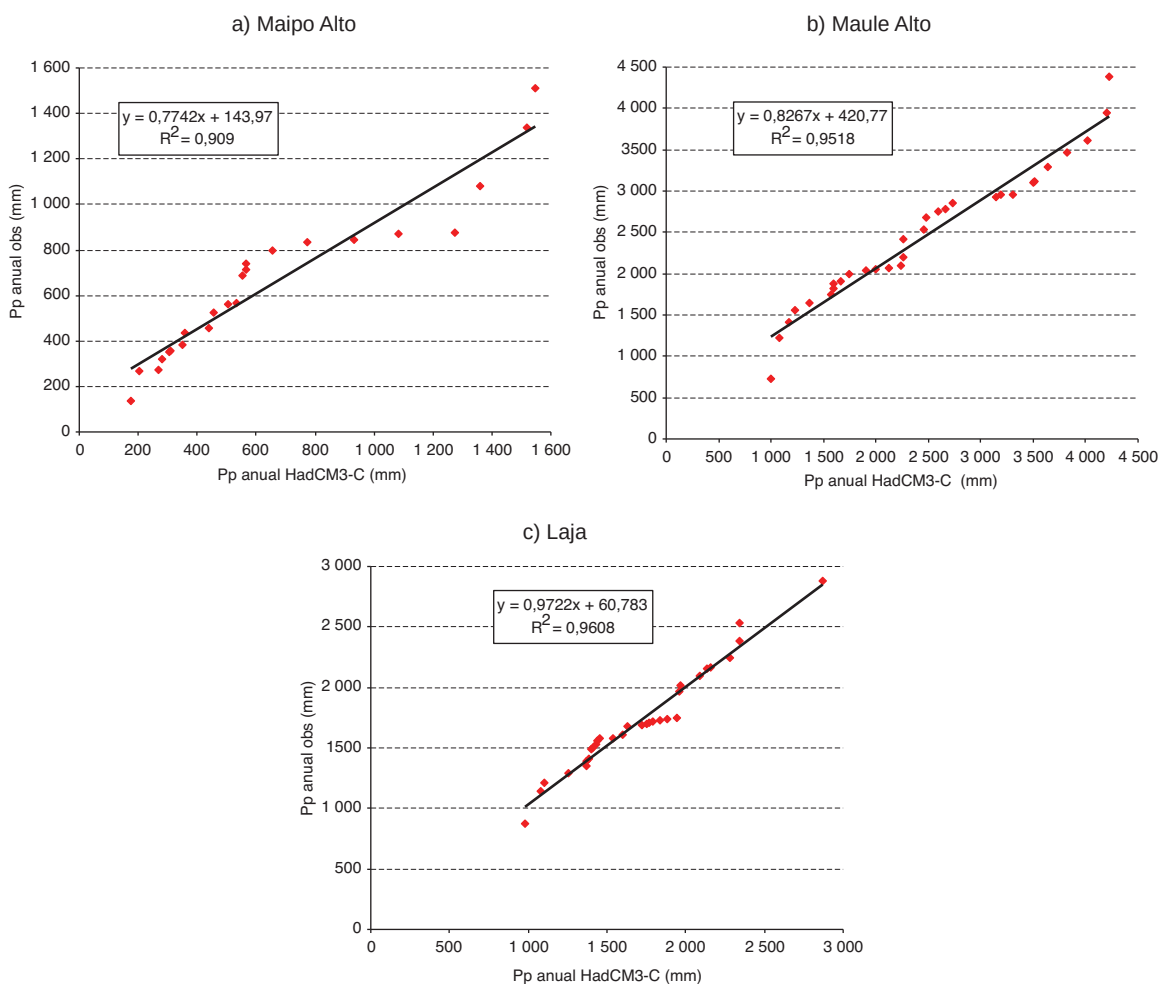
b) Corrección anual de la precipitación

Si bien es importante la corrección mensual, dado que permite respetar la estacionalidad del régimen de precipitaciones, no asegura que el monto total anual de precipitación se mantenga. Para esto es necesario realizar un ajuste anual, luego de haber ajustado los montos mensuales.

Este ajuste anual se define como la relación entre las curvas de duración de los totales anuales provenientes de los datos observados y de los totales anuales de la serie “Pp^{HAD}” una vez que esta ha sido corregida por las relaciones mensuales descritas en el punto anterior.

Esta relación es generalmente lineal y no presenta quiebres que definan límites. El detalle de estas relaciones se puede observar en el gráfico A2a.3.

GRÁFICO A2a.3
RELACIONES ANUALES ENCONTRADAS PARA LOS SISTEMAS MAIPO ALTO,
MAULE ALTO Y LAJA^a
(En milímetros)



Fuente: Elaboración propia.

^a La sigla HadCM3-C hace referencia a los valores de HadCM3 una vez que se han aplicado las correcciones mensuales encontradas.

Una vez corregido el monto anual de precipitación es necesario repartir la diferencia en cada uno de los meses según la variabilidad de cada estación. Para esto definimos el factor de proporción $C_{(i,j)}$ que indica el porcentaje de precipitación del mes i en el año j . Se define como:

$$C_{(i,j)} = \frac{P_{p \text{ (mes "i", año "j")}}}{P_{p \text{ (año "j")}}} = \frac{P_{p \text{ (i,j)}}}{P_{p \text{ (j)}}$$

Se debe cumplir entonces que para un año j cualquiera:

$$\sum_{i=1}^{i=12} C_{(i,j)} = 1$$

Luego el monto a corregir para un año j en un mes i , $M_{(i,j)}$ se define como:

$$M_{(i,j)} = C_{(i,j)} \left[P_{PC-M}^{HAD} - P_{RC-A}^{HAD} \right]^{A-o j} \quad i = (1,...,12); \quad j = (1,...,n)$$

Donde:

P_{PC-M}^{HAD} = precipitación de HadCM3 corregida por las relaciones mensuales encontradas en el punto anterior; P_{RC-A}^{HAD} = precipitación de HadCM3 corregida por la relación anual, después de efectuarse la corrección mensual; n = número de años con información en el período concurrente en la línea de base.

Por ende la precipitación del modelo HadCM3 corregida, llamada desde ahora HadCM3-M (modelada) se define como:

$$P_{P(i,j)}^{HADCM3-M} = M_{(i,j)} + P_{PC-M(i,j)}^{HAD} \quad i = (1,...,12); \quad j = (1,...,n)$$

Con esto se termina la corrección en el período de la línea de base.

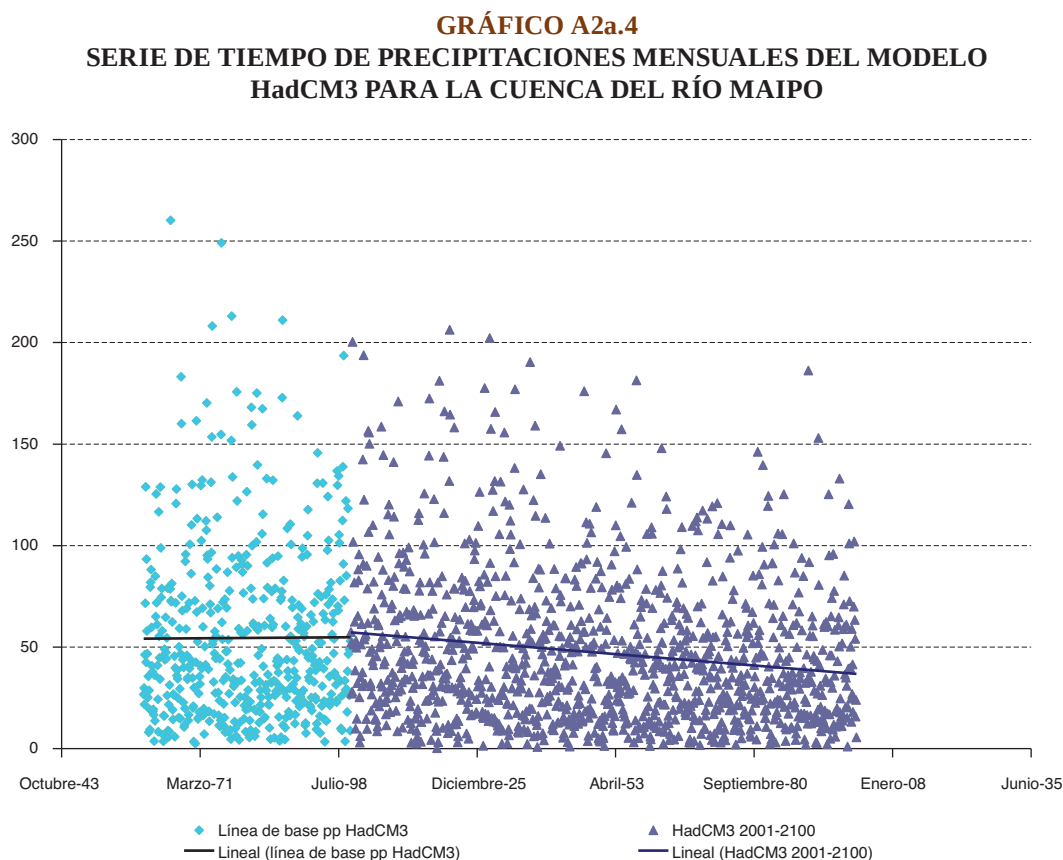
c) Aplicación de las relaciones en el período futuro

Tal como se comentó anteriormente, uno de los grandes supuestos es que las relaciones encontradas en los puntos a y b son válidas en el período futuro (2001-2100). Sin embargo, es claro que existe una tendencia a la disminución de las precipitaciones en el tiempo, esta tendencia proviene del modelo HadCM3, tal como se puede apreciar en el gráfico A2a.4.

Debido a esta tendencia a la baja en la precipitación los valores umbrales encontrados en el punto b presentan variaciones. Para poder definir umbrales en el período futuro y así corregir o escalar los valores de precipitación proyectados, se adopta el supuesto de que se mantiene invariable la probabilidad de excedencia del valor umbral (calculada respecto de una ventana de tiempo de al menos 30 años), y que es el valor o magnitud del umbral lo que cambia, en función de las características estadísticas de la serie de tiempo proyectada.

Para una mejor estimación de estos umbrales se ha dividido el período futuro en tres intervalos o ventanas. La definición de estas ventanas se muestra en el cuadro A2a.1.

Por lo tanto, para cada ventana definida en el cuadro A2a.1 se recalculan los límites y umbrales. Una vez recalculados los límites y umbrales se proceden a aplicar las mismas funciones obtenidas para la corrección mensual y anual, pero ahora a cada subperíodo definido en el cuadro. Luego de aplicar la corrección se revisa su consistencia procurando que el cambio de límites no incurra en la transformación de, por ejemplo, precipitaciones negativas en el caso de las precipitaciones más bajas y se verifica que el cambio de límite sea consistente, de modo que a un mayor valor de precipitación de HadCM3 en el subperíodo analizado, le corresponda una precipitación corregida mayor.



Fuente: Elaboración propia.

CUADRO A2a.1
DEFINICIÓN DE LAS VENTANAS DE TIEMPO PARA EL ANÁLISIS DE DATOS
FUTUROS

Ventana o intervalo temporal	Período de tiempo
Futuro a corto plazo	Enero de 2010 a diciembre de 2040
Futuro a mediano plazo	Enero de 2041 a diciembre de 2070
Futuro a largo plazo	Enero de 2071 a diciembre de 2071

Fuente: Elaboración propia.

d) Resultados del escalamiento

A continuación se presentan las series de precipitación HadCM3 modificada (HadCM3-M) para los tres sistemas estudiados.

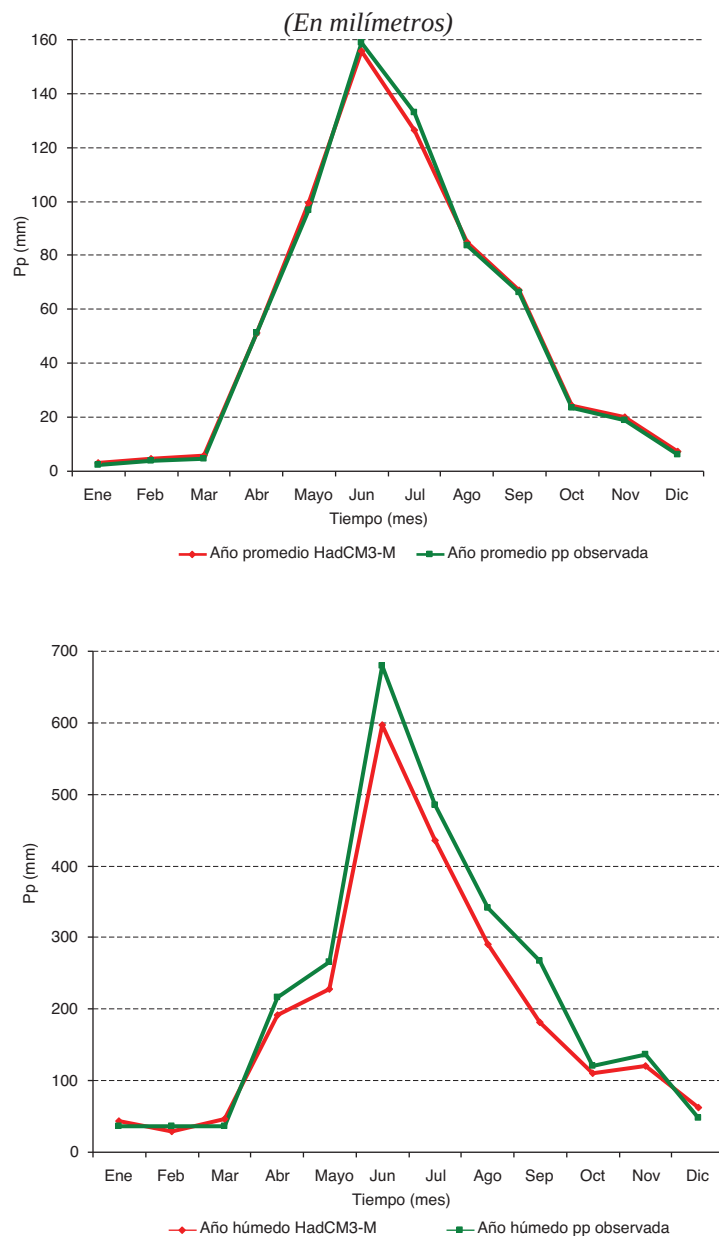
Sistema Maipo Alto

En el caso del Sistema Maipo Alto el ajuste a la precipitación del Modelo HadCM3 resultó sumamente satisfactorio. Se procuró mantener los datos estadísticos de media, desviación, coeficientes de variación mensual y mantención de la estacionalidad así como el promedio de precipitación anual.

En el gráfico A2a.5 se presenta la comparación entre la precipitación HadCM3-M para el sistema y la precipitación observada para el año promedio y para el año más húmedo, calculado a partir de las máximas precipitaciones mensuales.

Tal como se puede apreciar en el gráfico A2a.5, el año promedio queda perfectamente representado, manteniéndose su estacionalidad y promedios mensuales. En el caso del año más húmedo, la corrección subestima de manera leve las máximas observadas, con un promedio de subestimación de aproximadamente 50 mm en la época pluvial (de mayo a septiembre).

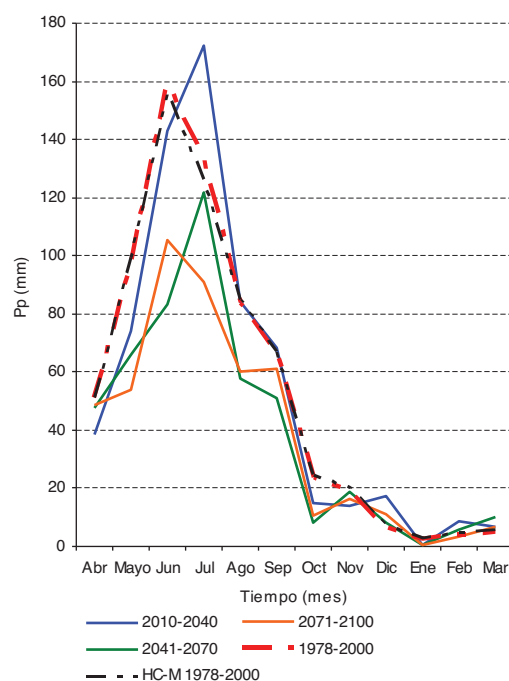
GRÁFICO A2a.5
COMPARACIÓN ESTACIONAL ENTRE AÑOS PROMEDIO (ARRIBA) Y
HÚMEDOS (ABAJO) PARA LA PRECIPITACIÓN DE HadCM3-M Y OBSERVADA
DEL SISTEMA MAIPO ALTO



Fuente: Elaboración propia.

El gráfico A2a.6 presenta una comparación del cambio estacional de la precipitación en un año promedio para cada ventana de tiempo analizada.

GRÁFICO A2a.6
COMPARACIÓN DE LA ESTACIONALIDAD DE LA PRECIPITACIÓN
PARA UN AÑO PROMEDIO PARA CADA VENTANA DE TIEMPO
ANALIZADA PARA EL SISTEMA MAIPO ALTO
(En milímetros)



Fuente: Elaboración propia.

Tal como se puede apreciar en este gráfico en los subperíodos 2010-2040 y 2041-2070 se observa que el punto más alto de la precipitación se alcanza en el mes de julio, no así en el subperíodo 2071-2100, donde el punto más alto vuelve a observarse en el mes de junio, tal como se puede apreciar en el caso del período de observación. HC-M hace referencia a la precipitación HadCM3-M.

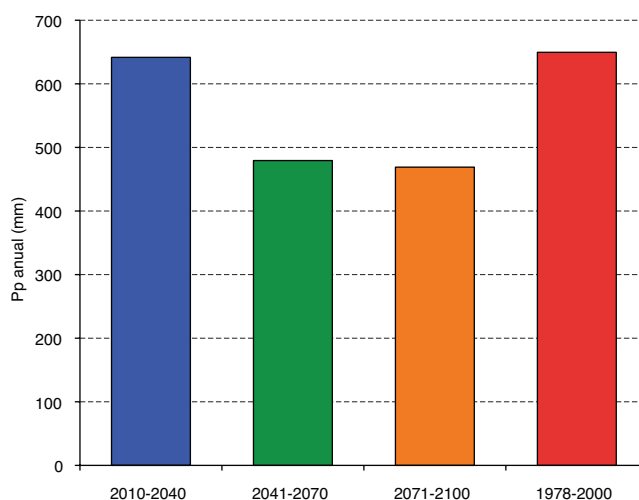
Otra comparación relevante es la variación de los totales anuales de precipitación. En el gráfico A2a.7 se observa cómo la precipitación experimenta fuertes disminuciones, principalmente en las ventanas de 2041-2070 y de 2070-2100, donde se presentan porcentajes de reducción del 26% y del 28%, respectivamente.

Sistema Maule Alto

En el sistema Maule Alto también se encontraron buenos ajustes, tanto mensuales como anuales que permitieron reproducir los datos estadísticos más importantes de la serie de precipitaciones. Aquí también se observa una tendencia al descenso de las precipitaciones, manifestado, a diferencia del sistema anterior, en las tres ventanas de tiempo analizadas.

El ajuste del año promedio conserva perfectamente la estacionalidad de la precipitación, tanto en montos mensuales como anuales. Con respecto al ajuste del año húmedo, este también conserva la estacionalidad y se puede apreciar además una subestimación de los valores máximos de la serie. La

GRÁFICO A2a.7
MONTOS ANUALES DE PRECIPITACIÓN PARA LAS VENTANAS DE TIEMPO
ANALIZADAS EN EL SISTEMA MAIPO ALTO, 1978-2000, PERÍODO OBSERVADO
(En milímetros)



Fuente: Elaboración propia.

subestimación promedio es del orden de los 50 mm, pero está concentrada en los meses de junio y julio con aproximadamente 80 mm de diferencia.

En el gráfico A2a.9 se puede apreciar que los máximos de precipitación se atrasan un mes con respecto al período base, sin embargo, esto ocurre solo para las primeras dos ventanas de tiempo, en la ventana de 2070 a 2100 se vuelve a retomar el punto más alto en el mes de junio.

Con respecto a las precipitaciones anuales que se presentan en el gráfico A2a.10 cabe destacar la confirmación de la tendencia a la baja, obteniéndose porcentajes de reducción importantes para cada ventana, a diferencia del sistema Maipo Alto, donde la ventana del período 2010-2040 era más bien de transición. En este caso se observan descensos de montos anuales del 14%, 22% y 38% sucesivamente.

Sistema Laja

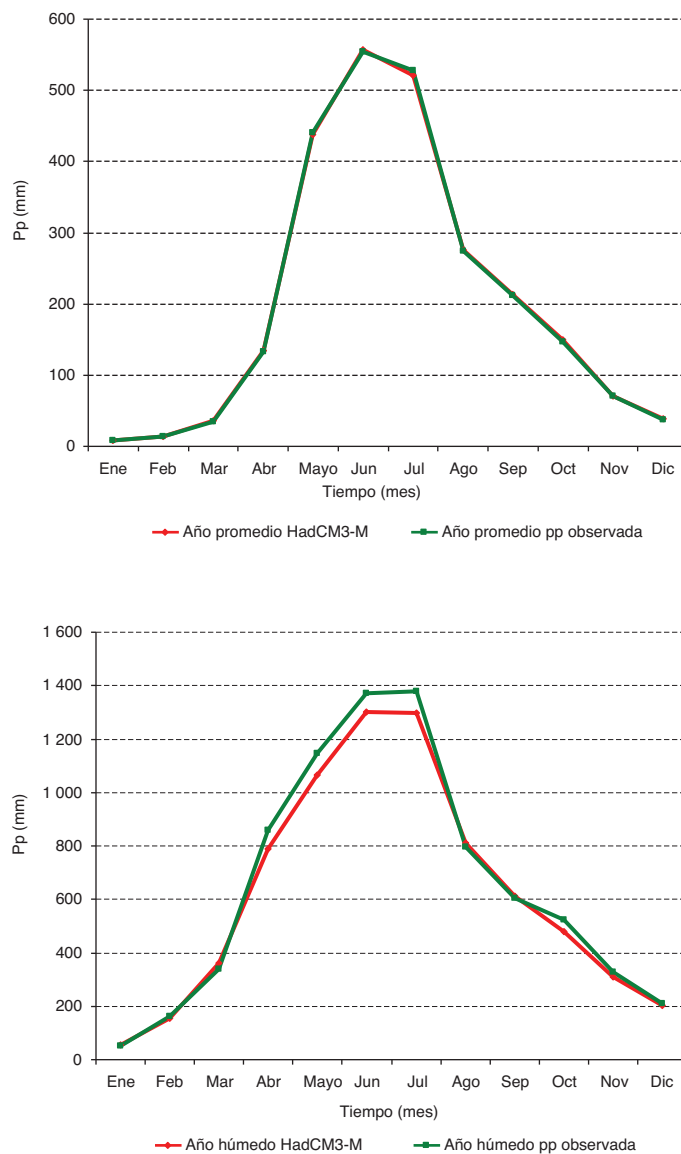
Este sistema presenta buenos ajustes mensuales y anuales, tal como los sistemas anteriores. Se han mantenido con éxito los datos estadísticos como media, desviación estándar y coeficientes de variación.

La estacionalidad de la precipitación ha quedado perfectamente representada. En el gráfico A2a.11 se puede apreciar que para un año promedio la precipitación HadCM3-M es prácticamente la misma que la observada. En el caso del año más húmedo se observa, al igual que en los sistemas anteriores, una subestimación del orden de los 50 mm en aquellos casos donde esta existe.

En cuanto al análisis de los años promedio por ventana, se puede apreciar que no existen cambios en la estacionalidad, no hay un atraso o adelanto del punto más alto de precipitación y, tal como en el caso del sistema Maule Alto, los cambios y descensos en la precipitación se aprecian desde la ventana del futuro a corto plazo. Los porcentajes de reducción de la precipitación encontrados fueron de un 8%, un 19% y un 26%, por lo que se entiende que la disponibilidad del recurso hídrico se encontraría con una posible disminución en el corto plazo, al igual que la generación de energía.

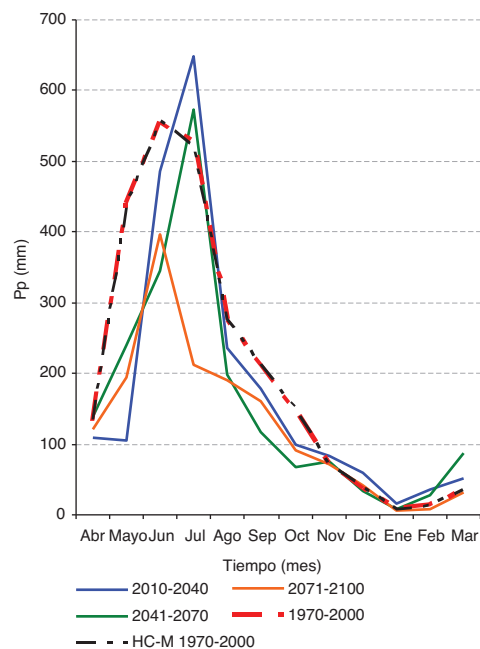
En el caso de los totales anuales se ratifica completamente lo observado en el gráfico A2a.12, donde hay una disminución sostenida de la precipitación.

GRÁFICO A2a.8
COMPARACIÓN ESTACIONAL ENTRE AÑOS PROMEDIO (ARRIBA)
Y HÚMEDOS (ABAJO) PARA LA PRECIPITACIÓN DE HadCM3-M Y
OBSERVADA DEL SISTEMA MAULE ALTO
(En milímetros)



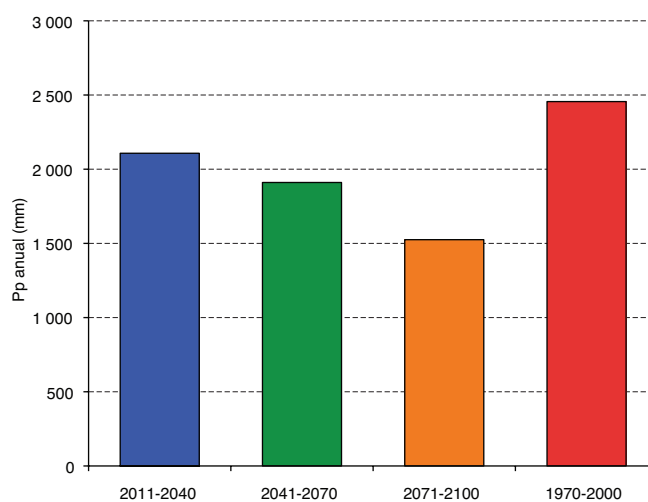
Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO A2a.9
COMPARACIÓN DE LA ESTACIONALIDAD DE LA PRECIPITACIÓN DEL
AÑO PROMEDIO PARA CADA VENTANA DE TIEMPO ANALIZADA PARA EL
SISTEMA MAULE ALTO
(En milímetros)



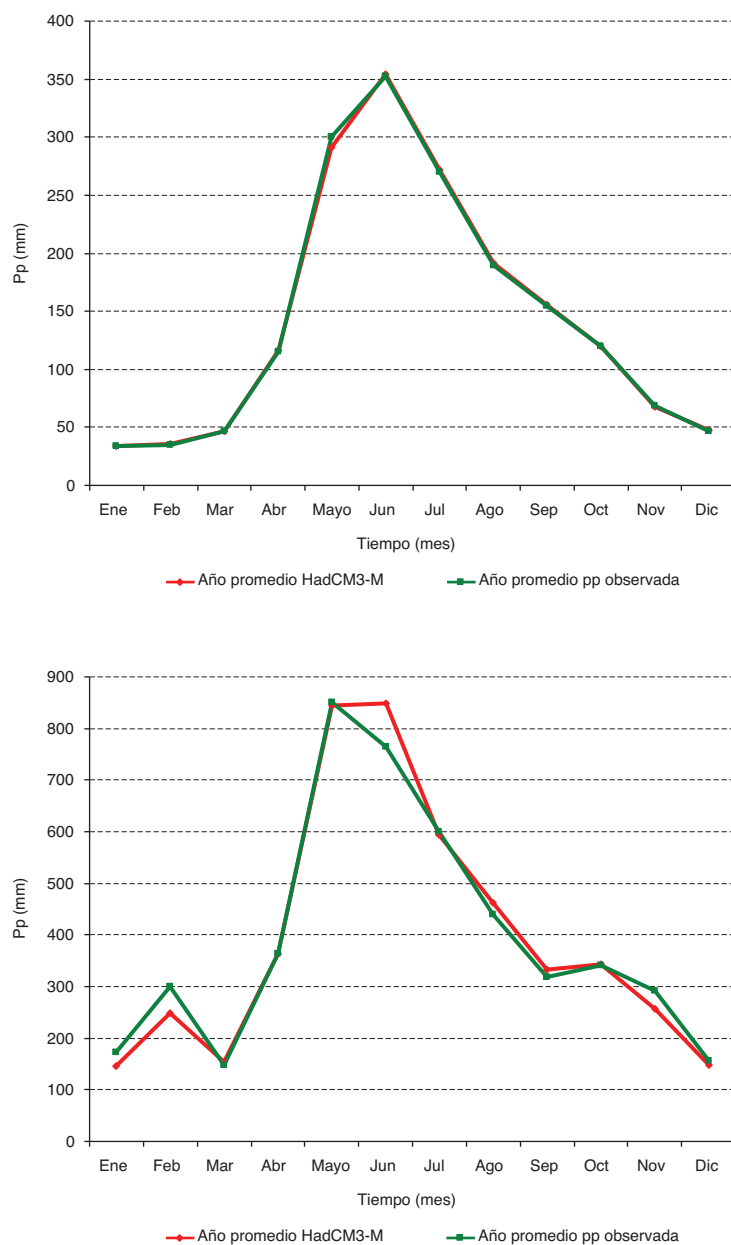
Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO A2a.10
MONTOS ANUALES DE PRECIPITACIÓN PARA LAS VENTANAS DE TIEMPO
ANALIZADAS EN EL SISTEMA MAULE ALTO, 1970-2000, PERÍODO OBSERVADO
(En milímetros)



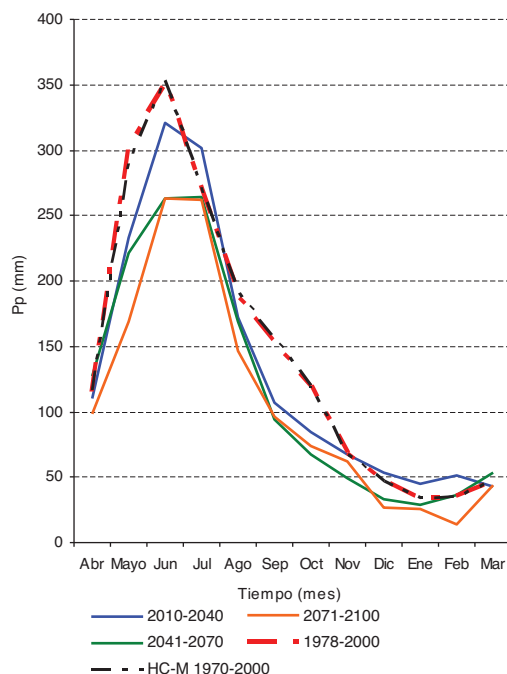
Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO A2a.11
COMPARACIÓN ESTACIONAL ENTRE AÑOS PROMEDIO (ARRIBA)
Y HÚMEDOS (ABAJO) PARA LA PRECIPITACIÓN DE HadCM3-M Y
OBSERVADA DEL SISTEMA LAJA
(En milímetros)



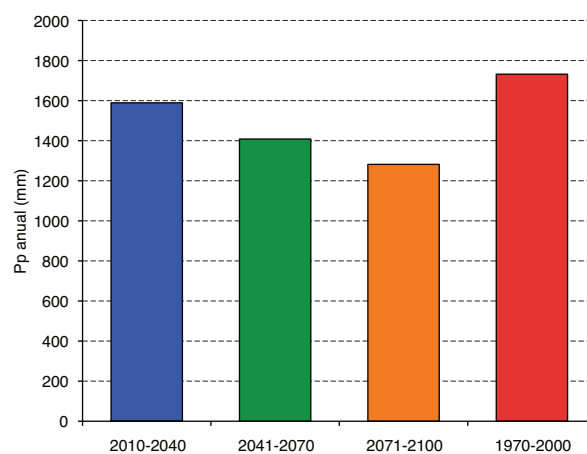
Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO A2a.12
COMPARACIÓN DE LA ESTACIONALIDAD DE LA PRECIPITACIÓN
DEL AÑO PROMEDIO PARA CADA VENTANA DE TIEMPO ANALIZADA
PARA EL SISTEMA MAIPO LAJA
(En milímetros)



Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO A2a.13
MONTOS ANUALES DE PRECIPITACIÓN PARA LAS VENTANAS DE TIEMPO
ANALIZADAS EN EL SISTEMA LAJA, 1970-2000, PERÍODO OBSERVADO
(En milímetros)



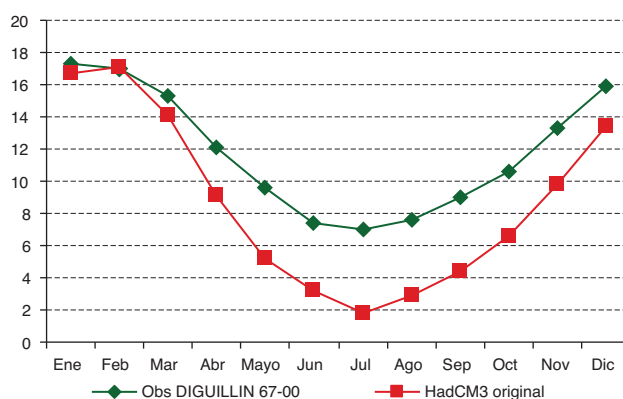
Fuente: Elaboración propia.

2. Temperatura

En el caso de la temperatura se ha seguido una metodología similar a la utilizada en el caso de la precipitación. Mediante la comparación de curvas de duración, entre la temperatura denominada en el punto dos como “ T^{HAD} ” y la temperatura observada, se han construido relaciones mensuales que permiten corregir la subestimación de la serie de “ T^{HAD} ” observada para todos los sistemas. Un ejemplo de esta subestimación para el año promedio se presenta en el gráfico A2a.14, donde se puede apreciar que la subestimación está localizada entre los meses de marzo a diciembre con un promedio de 4 °C de diferencia, aunque la máxima diferencia se encuentra en el período de mayo a septiembre, con un promedio de 5 °C. Esto condiciona de gran manera el funcionamiento de los modelos hidrológicos, específicamente en los parámetros de los puntos de derretimiento y congelamiento descritos en el informe de modelación hidrológica.

Sin embargo, en este caso una corrección anual no tiene sentido, por lo que la corrección final consiste en la aplicación directa de las relaciones mensuales encontradas.

GRÁFICO A2a.14
SUBESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA PARA UN AÑO PROMEDIO
PARA EL SISTEMA LAJA



Fuente: Elaboración propia.

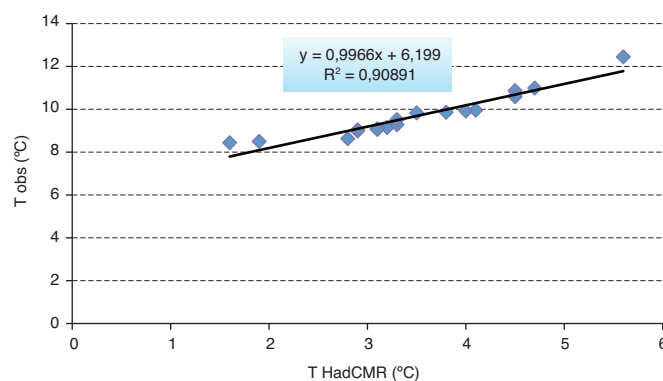
a) Ajuste mensual de la temperatura

Al igual que en el caso de la precipitación, se construye la relación entre las curvas de duración para la temperatura media mensual observada y la serie “ T^{HAD} ”. Con esas relaciones se corrige la temperatura a nivel mensual para toda la serie. El gráfico A2a.15 presenta un ejemplo de las relaciones mensuales encontradas para la temperatura en el mes de agosto, para los tres sistemas en estudio.

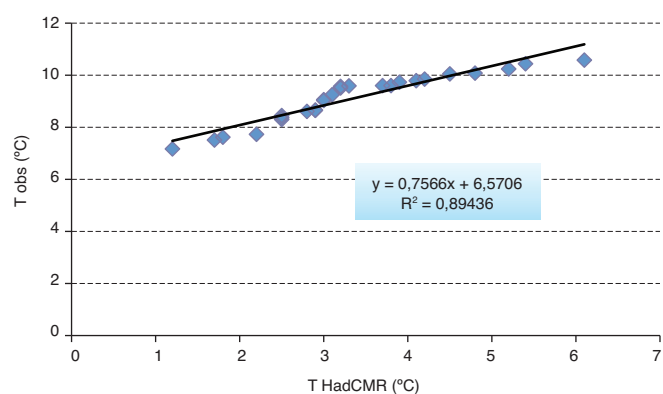
Como se puede apreciar, la diferencia entre las series es del orden de los 6 °C con una clara subestimación de los datos provenientes del modelo HadCM3.

GRÁFICO A2a.15
RELACIONES MENSUALES DE TEMPERATURA PARA EL MES DE AGOSTO PARA
LOS SISTEMAS MAIPO, MAULE Y LAJA
(En grados Celsius)

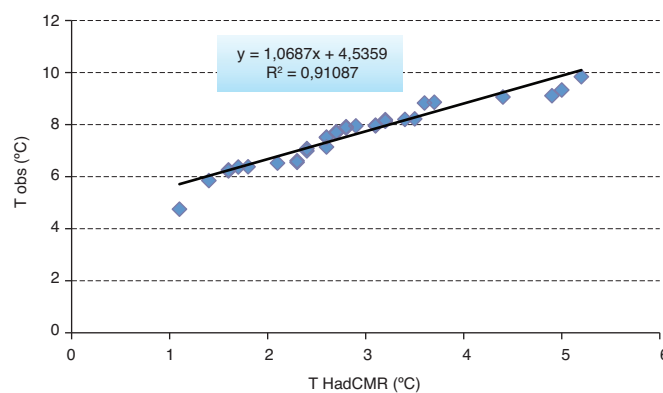
a) Sistema Maipo (agosto)



b) Sistema Maule (agosto)



c) Sistema Laja (agosto)



Fuente: Elaboración propia.

b) Aplicación de las relaciones en el período futuro

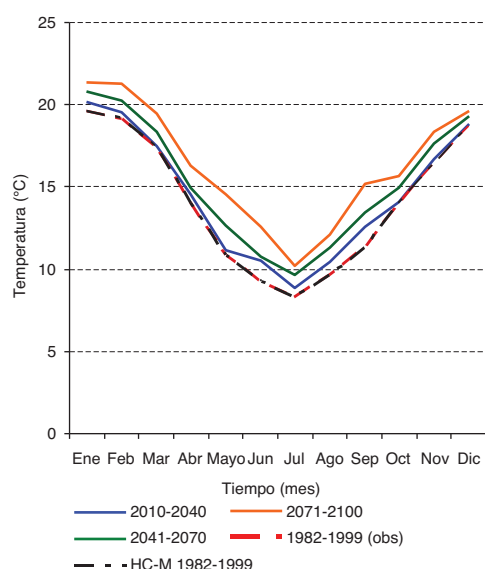
Dado que en este caso las relaciones no dependen de ningún valor umbral y no poseen límites, sino que todas las relaciones son lineales y únicas, el único supuesto es que estas relaciones se mantienen en el período futuro y serán aplicadas directamente a la serie de temperaturas futuras desde el año 2001 a 2100, completándose la corrección de las dos variables hidrometeorológicas de entrada más importantes para los modelos de simulación hidrológica. Cabe destacar que sí se observa una tendencia al alza de la temperatura en los tres sistemas en estudio.

c) Resultados del escalamiento

Sistema Maipo Alto

En el caso del sistema Maipo, el ajuste mensual tuvo un resultado bastante acorde con los datos observados. En el gráfico A2a.16 se puede notar el excelente ajuste del año promedio de los datos observados (línea roja punteada) y los datos HadCM3-M (línea negra punteada). Se mantiene el ciclo anual y se registra también el aumento sostenido de la temperatura para las distintas ventanas de tiempo adoptadas.

GRÁFICO A2a.16
AJUSTE DE LA SERIE DE TEMPERATURAS PARA EL AÑO PROMEDIO
PARA EL SISTEMA MAIPO ALTO
(En grados Celsius)



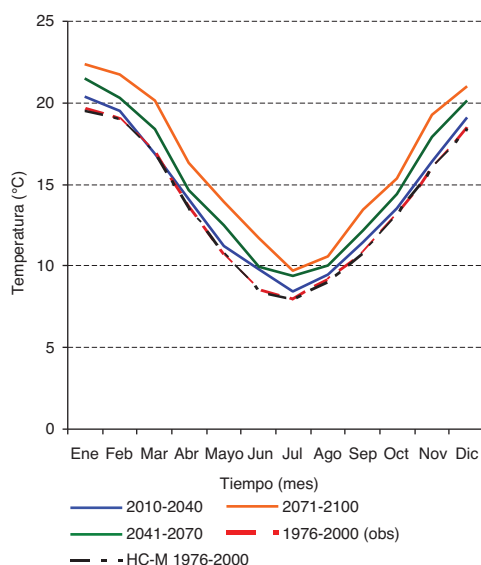
Fuente: Elaboración propia.

Sistema Maule Alto

En el caso del sistema Maule Alto, se observa un excelente ajuste para el año promedio. La serie modelada en el período base está perfectamente representada en términos de media, desviación y coeficientes de variación. Se respeta el ciclo anual y además el aumento de temperatura en las ventanas futuras.

El gráfico A2a.17 muestra los resultados para este sistema.

GRÁFICO A2a.17
AJUSTE DE LA SERIE DE TEMPERATURAS PARA EL AÑO PROMEDIO
PARA EL SISTEMA MAULE ALTO
(En grados Celsius)

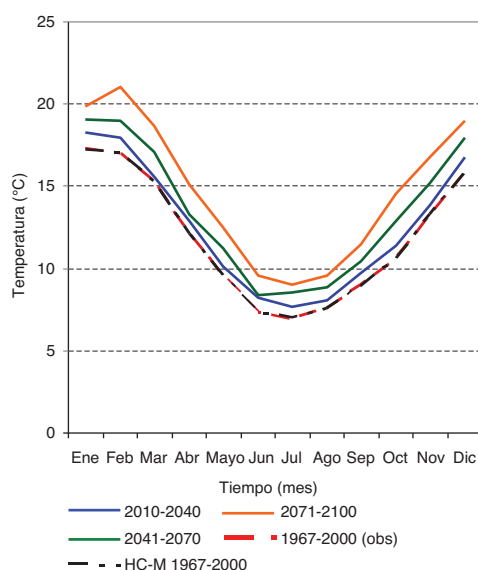


Fuente: Elaboración propia.

Sistema Laja

En el caso del sistema Laja, se observa un buen ajuste tal como en los sistemas anteriores. Se puede apreciar en el gráfico A2a.18 que la simulación en el período de la línea de base es bastante buena y que además se conservan los datos estadísticos importantes como media, desviación y coeficiente de variación. Se vuelve a mostrar el sostenido aumento de la temperatura para el sistema, que en promedio alcanza los 3 °C.

GRÁFICO A2a.18
AJUSTE DE LA SERIE DE TEMPERATURAS PARA EL AÑO PROMEDIO
PARA EL SISTEMA LAJA
(En grados Celsius)



Fuente: Elaboración propia.

C. Conclusiones

La metodología empleada para el escalamiento de la precipitación y temperatura resultó satisfactoria para los tres sistemas en estudio. La metodología permite construir en un subperíodo de la línea de base (1960-1990) relaciones mensuales y anuales para corregir los datos meteorológicos del modelo HadCM3 y sensibilizarlos con los datos observados en este mismo subperíodo. Para el caso de la precipitación se necesitan relaciones tanto mensuales como anuales; y en el caso de la temperatura solo relaciones mensuales.

La corrección de ambas variables mantiene los datos estadísticos de media, desviación y coeficientes de variación de todas las series, sin embargo no tiene una relación temporal con las series de datos observados, dado que la corrección de estas se ha basado en la relación entre las curvas de duración de ambas, por lo tanto estadísticamente hablando son comparables, pero no presentan una relación temporal.

Asimismo, se mantiene la estacionalidad y los montos anuales de precipitación, tanto para un año normal, como para un año húmedo. En todos los sistemas se presentan reducciones de cerca de un 30% hacia la ventana del período 2070 -2100.

Apéndice IIb

Downscaling climático del sector agrícola

A. Introducción

A partir de la aparición del modelo regional Providing Regional Climates for Impact Studies (PRECIS), que tiene resolución espacial de 25 x 25 km, se generó un *downscaling* basado en interpolaciones espaciales de variables climáticas provenientes de estaciones meteorológicas. Esto permitió, por una parte, corregir errores de estimación en algunos parámetros del modelo PRECIS y, por otra, obtener una mayor resolución, de 5 x 5 kilómetros, en la estimación de las variables climáticas en el territorio nacional. Este proceso garantizó el enriquecimiento del *downscaling* realizado con PRECIS, por adición de información empírica disponible localmente.

B. Metodología

Se construyó una línea de base con datos provenientes de estaciones meteorológicas del período 1960-1990. Luego se realizó un tratamiento de las series históricas disponibles, con el objetivo de validar la información y obtener promedios y estadísticas de dispersión. Se aplicó el método cartográfico de interpolación *kriging*, que permitió hacer interpolaciones confiables para obtener patrones de variación espacial de cada variable. En esta etapa, se aplicaron técnicas de interpretación de imágenes satelitales (NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration; AVHRR: Advanced Very High Resolution Radiometer) que entregan el conocimiento de las variaciones espaciales del régimen térmico (véase el mapa A2b.1). Con estas imágenes es posible obtener detalles que los algoritmos de interpolación espacial son capaces de representar, como islas térmicas de concentración de masas de aire frío, efecto Föhn (contraste climático entre dos laderas, con una gran humedad y lluvias en las de barlovento, y mayor temperatura y cielos más despejados en las sotavento), y el efecto atemperador de un cuerpo de agua sobre los bordes (véase el mapa A2b.2), entre otros.

Una vez establecidos los patrones de variación espacial de las variables en el escenario base (línea de base) en una malla de 5 x 5 km, se aplicaron los diferenciales de temperatura, precipitación y radiación solar, según lo pronosticado por PRECIS en los diversos escenarios. Esto permitió reajustar los valores de las variables climáticas primarias en cada punto de la malla, dando así el detalle deseado a cada uno de ellos.

Todo el procedimiento se hizo sobre el modelo de terreno que permite considerar el efecto modelador del relieve, altitud, exposición, así como otros efectos locales que determinan el comportamiento local de las variables climáticas.

Una vez realizado el *downscaling* numérico para las principales variables climáticas y para cada escenario, se superpuso la malla fina al mapa de comunas, para obtener los valores medios para cada polígono comunal.

Con los escenarios comunales se alimentó el modelo SIMPROC, que permitió establecer la conducta productiva de los cultivos en cada comuna y para cada escenario climático. El modelo SIMPROC generó para cada unidad el rendimiento potencial y los requerimientos hídricos de cada especie, suponiendo ausencia de restricciones de riego y grados crecientes de restricción en la dotación de riego.

MAPA A2b.1
VARIACIONES DE LA TEMPERATURA A MICROESCALA
DURANTE UNA HELADA EN ROMERAL^a

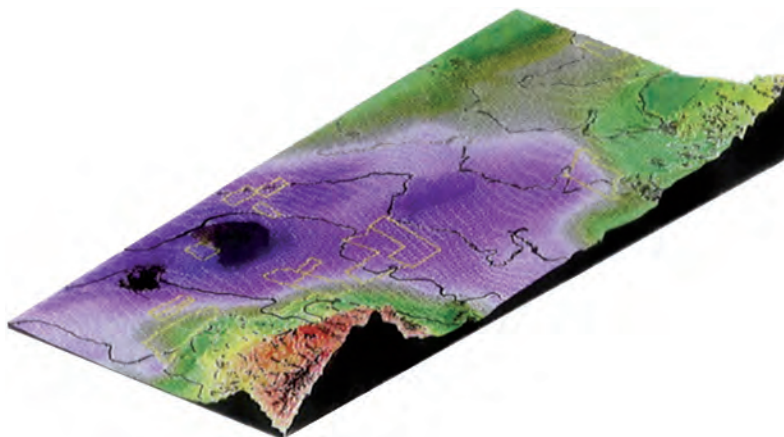
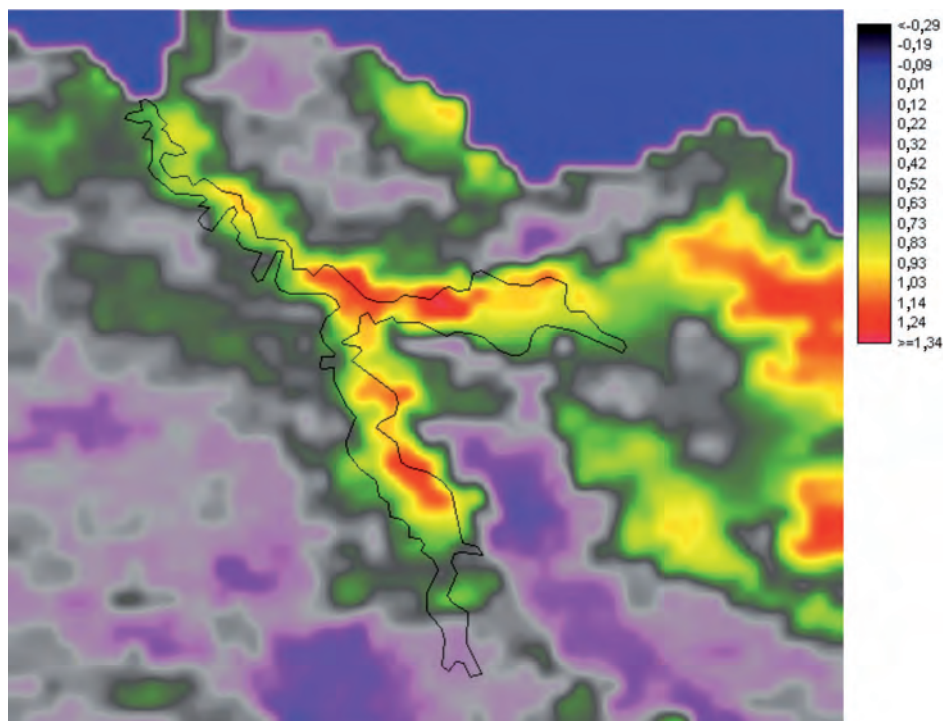


Imagen satelital del 14 de mayo de 1995. Representación de la topografía en tres dimensiones.

Fuente: Elaboración propia.

^a Técnica utilizada para refinar la cartografía agroclimática.

MAPA A2b.2
TEMPERATURAS MÍNIMAS DEL LAGO RAPEL (7:40 A.M.)^a



Densificación de imagen RR-E.img (tres veces).

Fuente: Elaboración propia.

^a Efecto de borde de un cuerpo de agua, establecido mediante termografía.

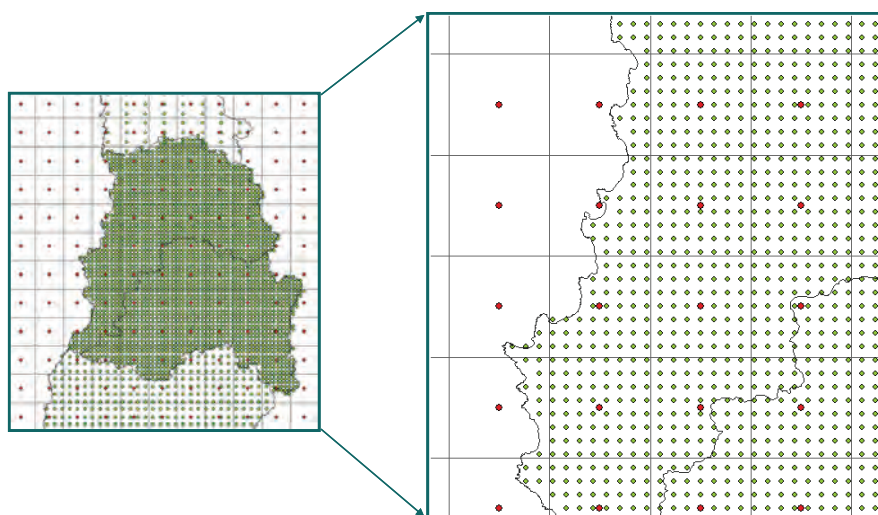
C. Generación de escenarios de variación climática para períodos intermedios del siglo XXI

Las estimaciones de temperatura realizadas con PRECIS hacia fines del siglo XXI (2070-2100) mostraron una tendencia lineal en el tiempo. Por otra parte, el análisis de las tendencias realizadas con los datos reales del período 1960-1990 mostraron similar tendencia. La pendiente o tasa de variación temporal de la temperatura no fue significativamente distinta en uno y otro período, lo que permite poner ambos conjuntos de datos en una sola regresión 1960-2100.

Para cada punto de la malla de PRECIS se hizo una regresión única para el período 1960-2100. Este procedimiento se repitió para las temperaturas máximas, mínimas, precipitación y radiación solar. A partir de las ecuaciones resultantes, se estimaron estas variables climáticas para los períodos intermedios centrados en 2020 y 2050.

Una vez estimados los nuevos valores para cada variable en cada punto de la malla PRECIS, se corrigieron los valores de las respectivas variables en los puntos de la malla topoclimática correspondientes a cada cuadrante de la malla PRECIS (véase el diagrama A2b.1).

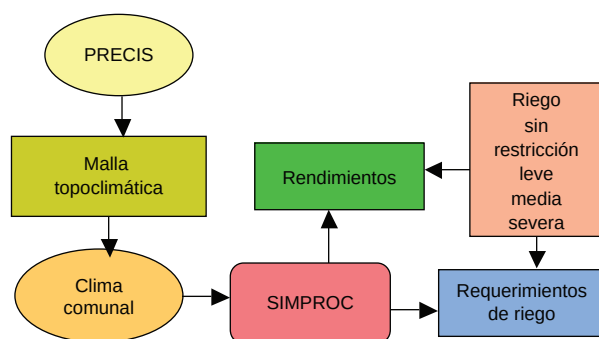
DIAGRAMA A2b.1
MALLA PRECIS (PUNTOS ROJOS), MALLA GENERADA SOBRE LA BASE DE INTERPOLACIONES (PUNTOS VERDES)^a



Fuente: Elaboración propia.

^a Con la malla fina se refinan y corrigen los valores entregados por PRECIS.

DIAGRAMA A2b.2
PROCEDIMIENTOS PARA EL DOWNSCALING DE LOS MODELOS DE ESTIMACIÓN DE RENDIMIENTOS Y REQUERIMIENTOS HÍDRICOS



Fuente: Elaboración propia.

Apéndice IIc

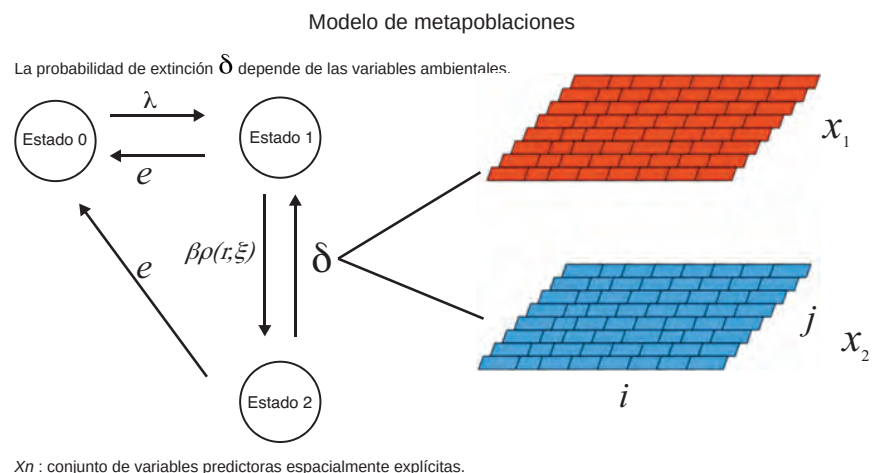
Downscaling climático del sector biodiversidad

El análisis del impacto del cambio climático sobre la biodiversidad a escala regional en Chile, contempla una muestra de especies para la que es posible generar modelos de distribución espacial en función del clima, y proyectarlos al período 2070-2100 usando las predicciones emanadas de los modelos PRECIS-HadCM3.

Los datos climáticos disponibles para generar los modelos dinámicos de distribución de especies provienen del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, y son fruto del “Estudio de variabilidad climática en Chile para el siglo XXI” encargado por la Comisión Nacional de Medio Ambiente (CONAMA). Los datos corresponden a coberturas climáticas interpoladas para Chile continental. Las variables climáticas seleccionadas fueron: temperatura máxima ($T_{\max}$, °C), temperatura mínima ($T_{\min}$, °C), temperatura promedio (T_{mean} , °C), y precipitación total (Prec_{tot} , mm/área). La resolución espacial de estos datos (0,25 por 0,25 grados de latitud) fue reducida usando *splines* cúbicos, a 1 x 1 km. Para la temperatura, la reducción de escala consideró una tasa de lapso de 6,49 °C por cada 1.000 metros de variación altitudinal.

La estrategia de modelación dinámica se basa en la implementación del modelo metapoblacional estocástico propuesto por Keymer y otros (2000). El modelo considera un *lattice* o grilla bidimensional regular con límites absorbentes, donde, a cada instante de tiempo, una celda r en la grilla puede estar en uno de los estados posibles $S=\{0,1\}$ (véase el diagrama A2c.1). El estado 0 representa una celda o sitio en nuestro caso, donde la especie no está presente, en tanto que el estado 1 corresponde a la presencia. En este modelo el estado de cada celda o sitio es dinámico y cambia en función de los procesos de colonización (transición $0 \rightarrow 1$) o extinción (transición $1 \rightarrow 0$). El proceso de

DIAGRAMA A2c.1
ESQUEMA DEL MODELO DINÁMICO DE NICHOS USADO EN LAS SIMULACIONES



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Los elementos del paisaje (celdas) pueden estar en uno de tres estados posibles: 0 = hábitat no habitable, 1 = hábitat habitable, y 2 = hábitat habitado o colonizado por una especie. En el modelo la colonización es función de las características del ambiente, representado como una serie de variables (X_n) espacialmente explícitas.

colonización se modela de la siguiente manera: cuando una celda r está disponible para ser colonizada ($S=0$), la colonización tomará lugar con probabilidad directamente proporcional al número de celdas ocupadas ($S=1$) en su vecindad, sea $\beta \cdot \rho(r, \xi)$ donde β corresponde a la probabilidad de colonización potencial y $\rho(r, \xi)$ corresponde a la proporción de celdas ocupadas en la vecindad asociada a la posición r . De manera similar, una especie en una celda o sitio ocupado ($S=1$) se extinguirá en dicho sitio con una probabilidad δ . En nuestro modelo δ varía en función de las características climáticas asociadas a cada celda en la grilla y es inversamente proporcional a la probabilidad de encontrar la especie presente en esa celda, valor que fuera estimado con máxima entropía, MaxEnt (Phillips, Anderson y Schapire, 2006; Phillips y Dudík, 2008). Por lo tanto, para cada especie modelada, la probabilidad de extinción de una población en un sitio variará temporalmente en función de los cambios ambientales. Para evaluar este cambio en las distintas celdas analizadas utilizamos una interpolación anual del modelo PRECIS-HadCM3, entre los años 1990 y 2070 (véase la metodología más adelante). El modelo dinámico empieza con el mapa de ocupación actual derivado del uso de MaxEnt, y este evoluciona de acuerdo con la dinámica de colonización y extinción dependiente de los cambios en el clima.

Interpolación climática

Para predecir la variación anual en las variables climáticas utilizadas en el modelo dinámico de distribución en el período no cubierto por el modelo PRECIS-HadCM3, de 1990 a 2070, consideramos como línea de base los valores mensuales usados por PRECIS en el período 1960-1990 y los valores proyectados por el modelo HadCM3 global (resolución de $2,5^\circ \times 3,75^\circ$ de latitud x longitud) para el mismo período. Dado que nuestro interés está en el proceso de dispersión, elegimos un mes de primavera (octubre) para realizar la interpolación (véase el mapa A2c.1).

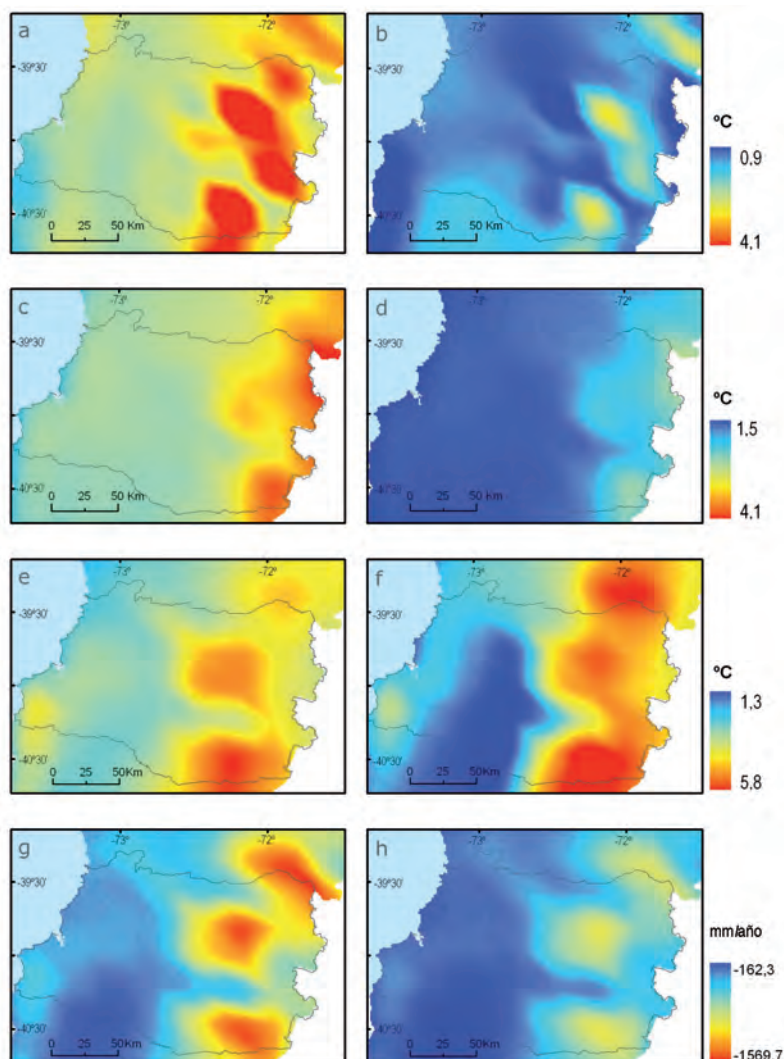
El modelo predictivo se desarrolló con el objetivo de:

- i) reconstruir en forma consistente la dinámica local observada en la línea de base para cada una de las celdas de 25×25 km presentes en el área de estudio; y
- ii) ser capaz de reproducir la tendencia proyectada por el modelo HadCM3 para el área de estudio en los escenarios A2 y B2.

Para alcanzar estos objetivos usamos una aproximación de reconstrucción de la serie de tiempo que combina una descomposición *wavelet*, usando una *wavelet Daubechies* de orden cinco y cuatro escalas, y métodos convencionales de análisis de series de tiempo (Box, Jenkins y Reinsel, 1994) de acuerdo con la siguiente secuencia (véase el diagrama A2c.2):

- i) para extraer la tendencia proyectada para el cambio en las variables de interés (temperatura y precipitación total), se utilizó la proyección del modelo global HadCM3, no escalado (resolución de $2,5^\circ \times 3,75^\circ$ de latitud x longitud equivalente a una celda de 295×278 km a 45° latitud sur), y se extrajo la serie de aproximación (el *wavelet* padre o tendencia) a la que se le ajustó un modelo lineal que capturó su comportamiento de largo plazo en el período 1990-2070;
- ii) para modelar la dinámica local, se llevó a cabo una descomposición *wavelet* de la línea de base para cada una de las celdas PRECIS del área de estudio (véase el diagrama A2c.2). Para esto se extrajo una serie de tiempo para cada escala *wavelet*, que se trataron como series independientes;
- iii) realizar el escalograma de la serie basal descompuesta e identificar la escala más importante de variabilidad. La serie temporal asociada a esta escala se utilizó para predecir los valores futuros del coeficiente *wavelet* asociado, utilizando el procedimiento de Holt-Winters que es el método más simple que permite lidiar con la variación estacional (Chatfield, 1978).

MAPA A2c.1
ANOMALÍAS CLIMÁTICAS PARA EL PERÍODO 2070-2100 PARA LOS
ESCENARIOS A2 Y B2 PARA EL ÁREA DE ESTUDIO



Fuente: Elaboración propia.

Nota: a) Temperatura mínima A2, b) Temperatura mínima B2, c) Temperatura promedio A2, d) Temperatura promedio B2, e) Temperatura máxima A2, f) Temperatura máxima B2, g) Precipitación total anual A2, h) Precipitación total anual B2.

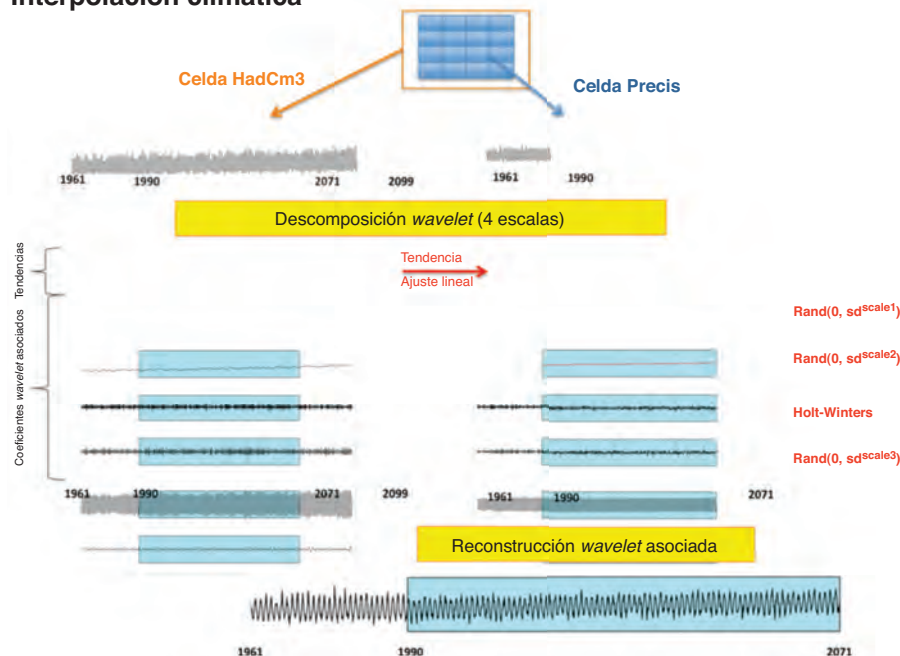
Las otras escalas fueron tratadas como componentes aleatorios, cuyos valores se tomaron de una variable aleatoria con media 0 y desviación estándar equivalente a la asociada a cada escala de descomposición *wavelet*; y

- iv) una vez realizados estos pasos se procedió a la interpolación de los valores de las variables climáticas. Para esto se usó la *wavelet* padre como tendencia y la reconstrucción *wavelet* asociada a cada una de las series temporales asociadas a las celdas presentes en el área de estudio.

DIAGRAMA A2c.2

DESCRIPCIÓN ESQUEMÁTICA DEL PROCEDIMIENTO DE INTERPOLACIÓN

Interpolación climática



Fuente: Elaboración propia.

Bibliografía

- Box, G. E. P., G. M. Jenkins y G. C. Reinsel (1994), *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, Englewood Cliffs, Nueva Jersey, Prentice-Hall.
- Chatfield, C. (1978), "The Holt-Winters forecasting procedure", *Journal of the Royal Statistical Society, Series C (Applied Statistics)*, vol. 27, N° 3.
- Keymer, J. E. y otros (2000), "Extinction thresholds and metapopulation persistence in dynamics landscapes", *The American Naturalist*, vol. 156, N° 5.
- Philips, S. J., R. P. Anderson y R. E. Schapire (2006), "Maximum entropy modeling of species geographic distributions", *Ecological Modelling*, 190.
- Phillips, S. J. y M. Dudík (2008), "Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation", *Ecography*, vol. 31, N° 2.

Apéndice III

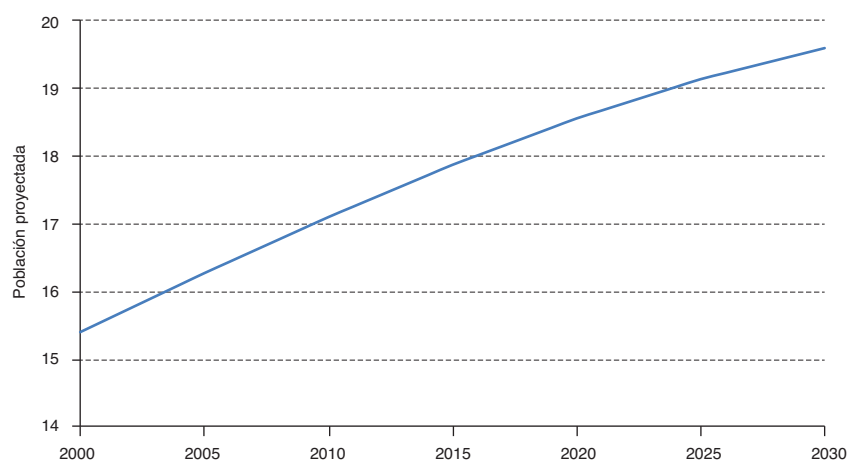
Escenarios socioeconómicos de Chile

A. El contexto nacional, población y densidad

Al año 2007, se estimó que la población chilena era de 16.598.074 habitantes, de los cuales 8.216.068 son hombres y 8.382.006 son mujeres. En 2050 se estima llegar a 20.204.779 habitantes: 9.904.861 hombres y 10.299.918 mujeres (INE, 2008). En el gráfico A3.1 se presenta la proyección de habitantes hasta el año 2030. La densidad de población de Chile es de 22,0 habitantes por km², concentrándose fuertemente en la Región Metropolitana (alrededor de un 40% de la población nacional). Además, como es la que menos superficie del territorio nacional tiene, posee la mayor densidad del país (433,5 hab/km²). Del total de la población, solo el 13% vive en áreas rurales (INE, 2007).

En 2006, la fuerza de trabajo ocupada del país ascendía a 6.410.980 personas. La Región Metropolitana concentró el mayor número: 2.705.000. Los servicios comunales, sociales y personales es la actividad económica que incluye la mayor cantidad de ocupados a nivel nacional, según cifras de octubre a diciembre de 2006, con 1.757.160 personas mayores de 15 años, seguida por el comercio con 1.266.370. Por el contrario, es en electricidad, gas y agua, donde está el menor número, 38.330 ocupados (INE, 2007).

GRÁFICO A3.1
PROYECCIÓN DE LA POBLACIÓN DE CHILE
(En millones)



Fuente: Instituto Nacional de Estadísticas (INE), “Proyecciones y estimaciones de población”, 2008 [en línea] <http://ine.cl> [fecha de consulta: 9 de diciembre de 2011].

MAPA A3.1 DISTRIBUCIÓN DE POBLACIÓN DE CHILE



Fuente: Mapas de Chile (2011) [en línea] <http://www.mapasdechile.cl> [fecha de consulta: 9 de diciembre de 2011].

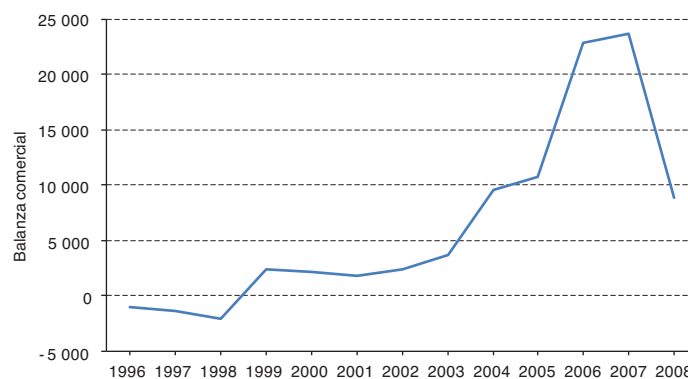
B. Antecedentes económicos

Desde 1990, Chile ha experimentado un rápido crecimiento económico, cada vez más diversificado y encabezado por las exportaciones (CEPAL y OCDE, 2005). Una explicación a dicho crecimiento económico se encontraría en la buena gobernabilidad que en el país se ha desarrollado, desde el retorno a la democracia en 1990. Dicha gobernabilidad se entiende como la interacción entre: i) consensos razonables acerca de aspectos básicos del desarrollo (democracia e integración internacional, entre otros); ii) instituciones políticas capaces de captar y guiar los consensos básicos; y iii) correctas políticas públicas (Marshall, 2005). La combinación armónica de los tres elementos anteriores ha dado como resultado políticas específicas que han definido la estrategia de desarrollo del país, por medio de incentivos y restricciones en la economía. De esta forma, la política económica chilena durante los últimos años se ha enfocado en instrumentos que favorezcan el crecimiento económico y mantengan la inflación estable. Asimismo, la política fiscal, enmarcada en la regla de balance estructural, ha continuado jugando un papel estabilizador del ciclo económico chileno (Ministerio de Hacienda, 2008).

La orientación hacia una política de desarrollo enfocada en las exportaciones se puede apreciar en el gráfico A3.2, donde se presenta la evolución de saldo de la balanza de pagos, y se puede observar que desde el año 1999 es positivo, expandiéndose este indicador durante el período 2002-2007. Del valor total de las exportaciones, se puede observar que la minería representa el sector de mayor importancia desde el año 2003, aportando más de un 50% del valor total de todos los bienes exportados (véase el gráfico A3.3). Respecto de las importaciones, los bienes intermedios (lubricantes, combustibles y petróleo, entre otros) son los que representan la mayor proporción de bienes importados, con más del 50% del valor total (véase el gráfico A3.4).

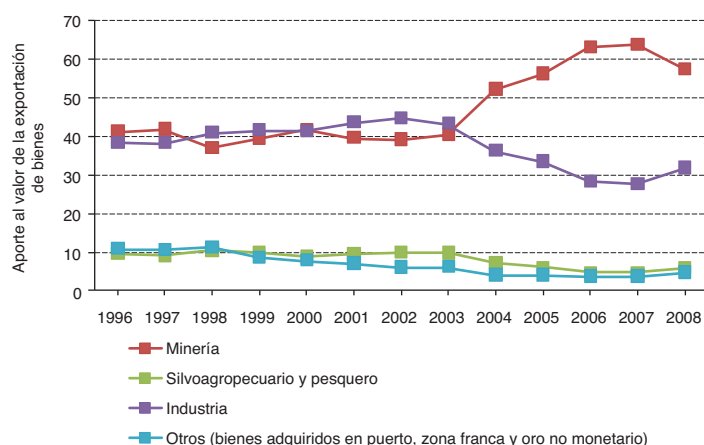
Si bien la economía de Chile se fundamenta en el aprovechamiento de recursos naturales (actividad minera y silvoagropecuaria), el sector de servicios financieros y personales es el que aporta la mayor proporción al PIB, seguido de la industria manufacturera. Esto se debe a los encadenamientos hacia adelante y hacia atrás que las actividades primarias desarrollan con el resto de las actividades de la economía (servicios, transporte y comunicaciones, entre otros). En el gráfico A3.5 se presenta la evolución del aporte al PIB según la actividad económica y la distribución esquemática de las principales actividades económicas del país.

GRÁFICO A3.2
EVOLUCIÓN DE LA BALANZA DE PAGOS
(En miles de millones de dólares)



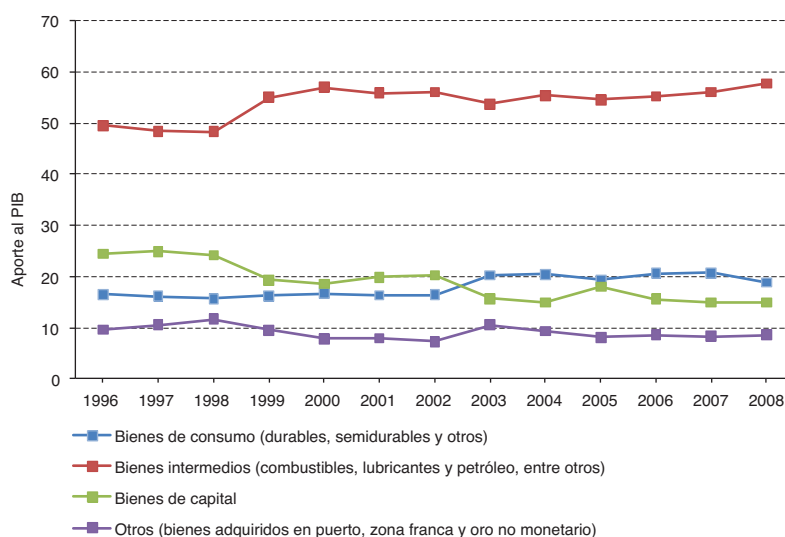
Fuente: Elaboración propia sobre la base de información del Banco Central de Chile, “Informe de política monetaria de mayo de 2009”, Santiago de Chile, 2009.

GRÁFICO A3.3
EVOLUCIÓN DEL APOORTE AL VALOR DE LAS EXPORTACIONES
DE BIENES SEGÚN ACTIVIDAD ECONÓMICA
(En porcentajes)



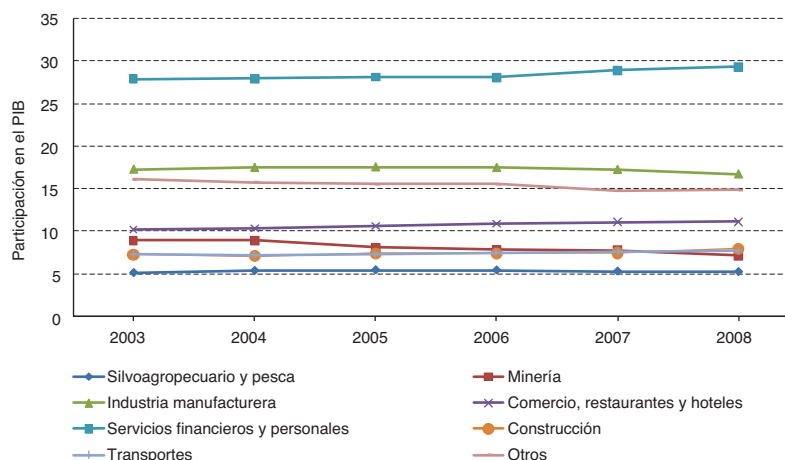
Fuente: Elaboración propia sobre la base de información del Banco Central de Chile, “Informe de política monetaria de mayo de 2009”, Santiago de Chile, 2009.

GRÁFICO A3.4
EVOLUCIÓN DEL APOORTE AL VALOR DE LAS IMPORTACIONES
DE BIENES SEGÚN TIPO DE BIEN
(En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia sobre la base de información del Banco Central de Chile, “Informe de política monetaria de mayo de 2009”, Santiago de Chile, 2009.

GRÁFICO A3.5
EVOLUCIÓN DEL APOORTE AL PIB SEGÚN ACTIVIDAD ECONÓMICA
(En porcentajes)



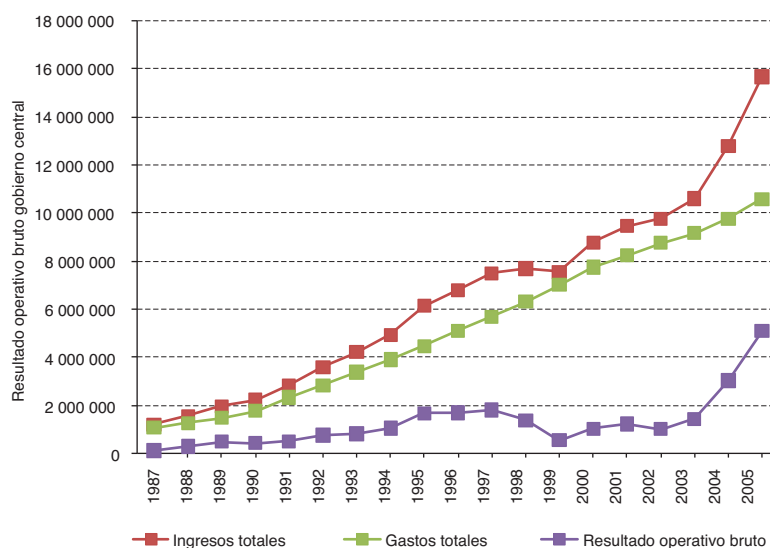
Fuente: Elaboración propia sobre la base de información del Banco Central de Chile, “Informe de política monetaria de mayo de 2009”, Santiago de Chile, 2009.

En el gráfico A3.6 se presenta la evolución del resultado operativo (ingresos totales menos gastos totales) del gobierno central. En ella se puede observar la tendencia creciente de los ingresos y gastos durante todo el período analizado. Asimismo, los ingresos han sido mayores a los gastos, lo que ha determinado que el resultado operativo sea permanentemente positivo. Del total de los ingresos del gobierno central, más de un 70% proviene de ingresos tributarios netos (véase el gráfico A3.7). Respecto de los gastos, las partidas que representan las mayores proporciones del total son subsidios y donaciones y prestaciones previsionales, ambos con una importancia cercana al 30% de los gastos totales (véase el gráfico A3.8).

La expansión económica de Chile entre los años 1997 y 2007 fue en promedio de un 4% anual (Banco Mundial, 2009), mayor al 3% que presentó en promedio Sudamérica. Comparado con otros países de la región, el crecimiento económico de Chile en dicho período superó a países como la Argentina, el Brasil y México, que presentaron crecimientos de un 3,3%, un 2,7% y un 3,6%, respectivamente. Sin embargo, después de varios años de fuerte expansión, la actividad económica se encuentra en un retroceso caracterizado por una inflación moderada. La desaceleración de la economía mundial, las condiciones financieras más estrictas y un menor nivel de actividad, consumo e inversión, implicó un crecimiento proyectado entre -0,75% y 0,25% en el año 2009. Sin embargo, a fines del año 2009 y de 2010 la actividad económica retomó valores positivos y más cercanos a la tasa de crecimiento de largo plazo (Banco Central, 2009).

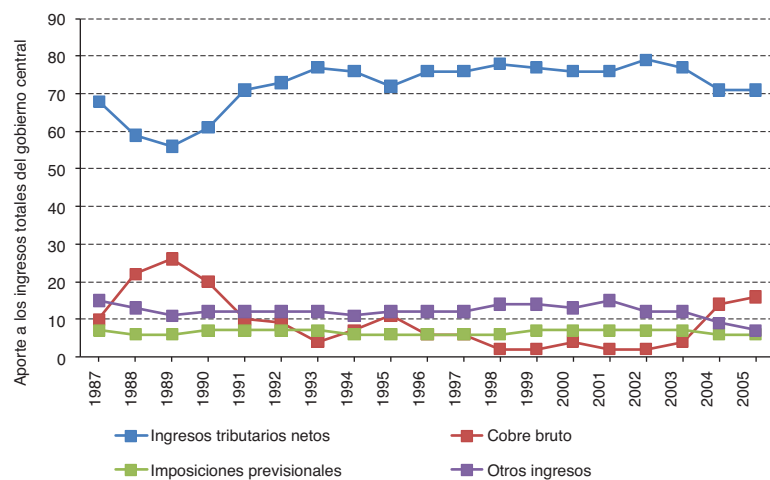
En relación con la informalidad económica, Chile se encuentra enfocado en fomentar el cumplimiento con la normativa fiscal y mercantil. No obstante, existen importantes desafíos para reducir los espacios de informalidad en la dinámica económica del país como, por ejemplo, modificaciones al sistema tributario para las empresas, especialmente las pyme, y la legislación de protección al empleo más flexible (al menos para los contratos indefinidos). El bajo nivel del capital humano sigue siendo un obstáculo importante en la reducción de la informalidad laboral, por lo tanto, las iniciativas políticas para mejorar las habilidades de la fuerza de trabajo mediante el sistema educativo y de formación laboral y la habilidad de certificación, también contribuirían a reducir la informalidad en el futuro (OCDE, 2007).

GRÁFICO A3.6
EVOLUCIÓN DEL RESULTADO OPERATIVO DEL GOBIERNO CENTRAL
(En millones de pesos)



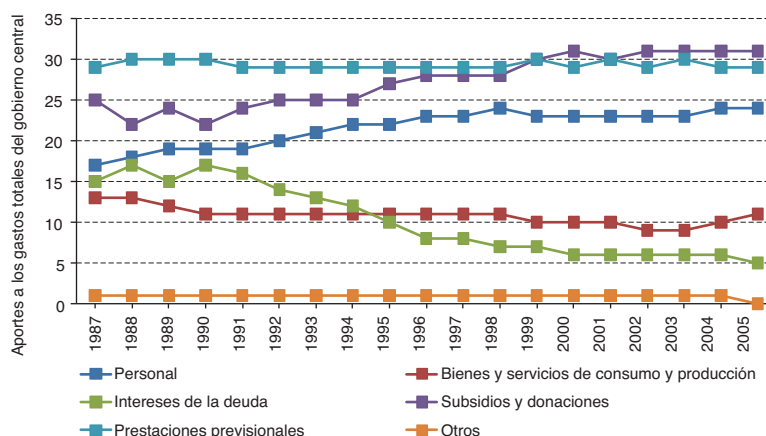
Fuente: Elaboración propia sobre la base de información del Banco Central de Chile, “Informe de política monetaria de mayo de 2009”, Santiago de Chile, 2009.

GRÁFICO A3.7
EVOLUCIÓN DEL APOORTE A LOS INGRESOS TOTALES DEL GOBIERNO CENTRAL
SEGÚN TIPO DE INGRESO
(En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia sobre la base de información del Banco Central de Chile, “Informe de política monetaria de mayo de 2009”, Santiago de Chile, 2009.

GRÁFICO A3.8
EVOLUCIÓN DEL APOORTE A LOS GASTOS TOTALES DEL GOBIERNO CENTRAL
SEGÚN TIPO DE GASTO
(En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia sobre la base de información del Banco Central de Chile, “Informe de política monetaria de mayo de 2009”, Santiago de Chile, 2009.

C. Proyecciones económicas

Después de varios años de fuerte expansión, la actividad económica se encuentra en un retroceso caracterizado por una inflación moderada. La desaceleración de la economía mundial, las condiciones financieras más estrictas y menores inversiones en la minería y la energía implicarán un lento crecimiento en los próximos años. Los superávits por cuenta corriente han desaparecido a consecuencia de la disminución de los altos precios del cobre (OCDE, 2008).

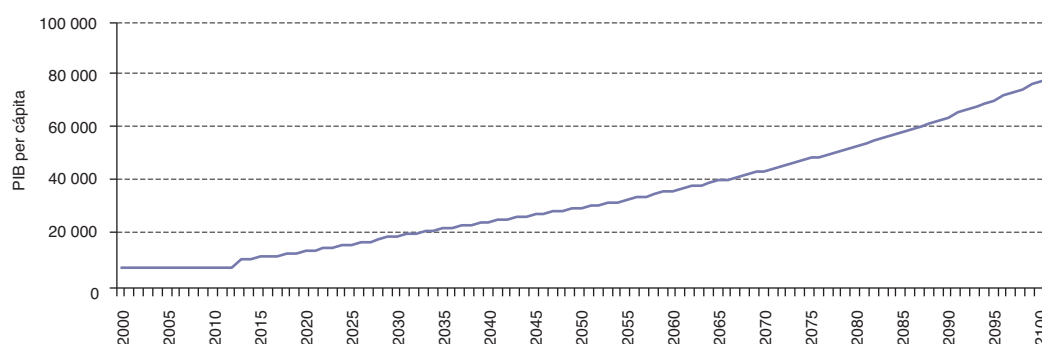
El cuadro A3.1 resume algunas tendencias de los principales indicadores macroeconómicos para el país en los próximos años.

En materia de reducción de la pobreza, la década de 1990 permitió dar un importante paso, disminuyendo, en un decenio, en cerca de 20 puntos porcentuales el total de personas en situación de pobreza. Durante la última década, ha continuado la tendencia de manera más pausada, alcanzando cifras de pobreza cercanas al 14% en el año 2006, según se puede observar en el gráfico A3.10 (MIDEPLAN, 2006).

El desarrollo del país ha permitido una mejor calidad de vida a sus habitantes. La evolución del índice de desarrollo humano (IDH) de Chile es prueba fehaciente de estas transformaciones (véase el gráfico A3.11). En efecto, Chile presenta un incremento constante del IDH en las últimas décadas y hoy se sitúa entre los países que tienen un desarrollo humano alto (valores IDH sobre 0,8), ocupando además un lugar de avanzada en el contexto latinoamericano (PNUD, 2009).

La inversión de Chile en investigación y desarrollo alcanzó un 0,67% del PIB en 2004, equivalente a un tercio del promedio de países de la OCDE del 2,26%. Esto se explica por la baja participación del sector industrial y de la pequeña y mediana empresa en investigación y desarrollo, que se encuentra altamente concentrada en universidades. Chile cuenta con 3,2 investigadores por cada 1.000 personas empleadas, cifra por sobre la mayoría de los países en desarrollo. Sin embargo, los esfuerzos gubernamentales en la formación de capital humano especializado, no han sido suficientes para alcanzar las tasas de especialización en áreas de ciencia e ingeniería que ostentan los países desarrollados. Por otra parte, Chile presenta un bajo nivel de publicaciones per cápita (aunque por

GRÁFICO A3.9
PROYECCIÓN DE CRECIMIENTO DEL PRODUCTO INTERNO BRUTO
PER CÁPITA, 2000-2100
(En dólares de 2009)



Fuente: Elaboración propia sobre la base de diversas fuentes.

CUADRO A3.1
PROYECCIÓN DE LOS PRINCIPALES INDICADORES MACROECONÓMICOS

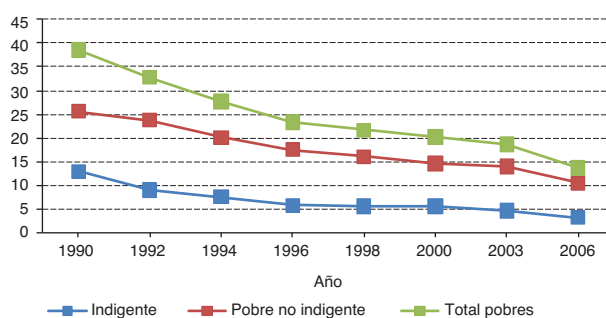
Indicador	2006	2007	2008	2009	2010
Crecimiento PIB real	4,3	5,1	3,9	2,6	3,1
Inflación ^a	3,4	4,4	8	5,6	3,8
Balance fiscal ^b	7,7	8,8	7	1,5	1,6
Estructura balance fiscal ^b	1	1	0,5	0,5	0,5
Balance cuenta actual ^b	5	4	-1,6	-2,9	-2,6

Fuente: [en línea] http://www.oecd-ilibrary.org/economics/country-statistical-profile-chile_20752288-table-chl [fecha de consulta: 20 de enero de 2012].

^a Inflación de referencia con promedio del IPC.

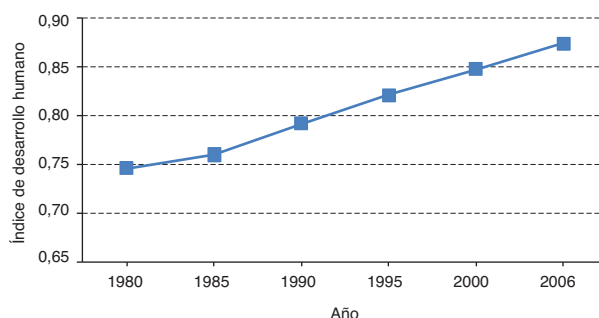
^b En porcentaje del PIB.

GRÁFICO A3.10
EVOLUCIÓN DE LA POBREZA E INDIGENCIA
(En porcentajes)



Fuente: Ministerio de Desarrollo Social (MIDEPLAN), “Resultados Nacionales, Encuesta CASEN 2007”, Santiago de Chile, 2007.

GRÁFICO A3.11
EVOLUCIÓN DEL ÍNDICE DE DESARROLLO HUMANO



Fuente: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), *Desarrollo humano en Chile: la manera de hacer las cosas*, Santiago de Chile, 2009, enero.

sobre el promedio latinoamericano) y bajos niveles de nuevos patentamientos, lo que refleja la falta de incentivos en temáticas de investigación y desarrollo (OCDE, 2008).

Asimismo, el indicador de la Sociedad de la Información de Chile, que mide el grado de avance tecnológico en países latinoamericanos, ha ido aumentando con el tiempo, a punto de ser el país con mayor grado de avance de Latinoamérica (Everis y IESE Business School, 2008).

Bibliografía

- Banco Central de Chile (2009), “Informe de política monetaria de mayo de 2009”, Santiago de Chile.
- Banco Mundial (2009) [en línea] <http://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.MKTP.KD.ZG> [fecha de consulta: 20 de enero de 2012].
- CEPAL y OCDE (Comisión Económica para América Latina y el Caribe y Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos) (2005), “Evaluaciones del desempeño ambiental: Chile” (LC/L.2305/E), Santiago de Chile, mayo.
- Everis y IESE Business School (2008), *Indicador de la Sociedad de la Información (ISI). Situación de las tecnologías de la información en Argentina, Brasil, Chile, Colombia y México*.
- INE (Instituto Nacional de Estadísticas) (2008), “Proyecciones y estadísticas de población” [en línea] <http://www.ine.cl> [fecha de consulta: 9 de diciembre de 2011].
- ____ (2007), *Compendio estadístico año 2007*, Santiago de Chile.
- Mapas de Chile (2011), “Distribución de población” [en línea] <http://www.mapasdechile.cl> [fecha de consulta: 9 de diciembre de 2011].
- Marshall, J. (2005), “Chile: experiencia de gobernabilidad”, Centro para la Apertura y el Desarrollo de América Latina (CADAL), año III, N° 39, septiembre.
- MIDEPLAN (Ministerio de Desarrollo Social) (2007), “Resultados nacionales, encuesta CASEN 2007”, Santiago de Chile.
- ____ (2006), “Resultados nacionales, encuesta CASEN 2006”, Santiago de Chile.
- Ministerio de Hacienda (2008), Estado de la hacienda pública 2008, Gobierno de Chile [en línea] <http://www.minhda.cl/documentos/estado-de-la-hacienda-publica/estado-de-la-hacienda-publica-2008.html> [fecha de consulta: 20 de enero de 2012].
- OCDE (Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos) (2008), “OECD Science, Technology and Industry Outlook”.

____ (2007), *Policy Brief: Economic Survey of Chile, 2007* [en línea] <http://www.google.com/search?q=Economic+Survey+of+Chile%2C+2007&ie=utf-8&oe=utf-8&aq=t&rls=org.mozilla:es-ES:official&client=firefox-a>.

PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo) (2009), *Desarrollo humano en Chile: la manera de hacer las cosas*, Santiago de Chile, enero.

POCH Ambiental (2009), “Proyección de la evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector energía. Años 2000-2025”, estudio elaborado para la Comisión Nacional de Energía (CNE).

Apéndice IVa

Impactos en la disponibilidad de agua para riego

En estudios anteriores, los análisis de cambio en la productividad agrícola fueron hechos en función de diversos escenarios de cambio climático, sin considerar la disponibilidad real de agua para riego. En esta ocasión, se ha tratado de avanzar en el nivel de realismo al complementar estos dos temas para explorar la productividad real esperada, tomando en cuenta los efectos que puedan tener los impactos climáticos en las condiciones hidrológicas y, por ende, en la disponibilidad de agua para riego (entre otros usos).

Con el objeto de determinar las cuencas en las que es necesario evaluar la productividad agrícola en función de una restricción en la oferta de agua en escenarios de cambio climático, se utilizó información proveniente del *Balance hídrico de Chile* (DGA, 1987). Una primera etapa del análisis consistió en decidir qué cuencas podrían tener potencialmente una restricción en la disponibilidad de agua para riego en escenarios de cambio climático. Con la información básica del *Balance hídrico* se clasificaron las cuencas de Chile en cuatro grupos principales. La variable utilizada en esta selección es la división entre la evaporación total y precipitación. Mientras más alto es el valor de esta variable se estima que la cuenca se encuentra en un mayor nivel de estrés hídrico. En el mapa A4a.1 se presentan los resultados de esta clasificación. Se ha decidido en esta primera etapa solo considerar cuencas con un factor de estrés mayor al 50% (cuencas de color amarillo y rojo en el mapa).

En las cuencas seleccionadas se procedió luego a analizar la disponibilidad futura para riego sobre la base de los escenarios de cambio climático (A2 y B2), en los períodos 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100, considerando los cambios en precipitaciones y temperaturas. Las variables que el balance hídrico entrega para cada cuenca del país se presentan a continuación:

$$P + Q_{si} + Q_{ui} - E - ET_{Nat} - ET_{Irrig} - Q_{so} - Q_{uo} + \Delta S + \eta = 0$$

Siendo:

- P : Precipitación.
- Q_{si} : Caudal afluente superficial a la cuenca.
- Q_{ui} : Caudal afluente subterráneo a la cuenca.
- E : Evapotranspiración desde superficies de agua libre.
- ET_{Nat} : Evapotranspiración natural.
- ET_{Irrig} : Evapotranspiración riego.
- Q_{so} : Caudal efluente superficial.
- Q_{uo} : Caudal efluente subterráneo.
- ΔS : Variación del almacenamiento de agua en la cuenca.
- η : Término residual de discrepancia.

Cada una de estas variables fue modificada siguiendo la siguiente metodología:

- i) los cambios en evaporación natural son estimados primero asumiendo un cambio en la demanda por evaporación usando la fórmula de Blannet Criddle, según la ecuación 1;

- ii) esta demanda potencial es ajustada de acuerdo con el cambio en la disponibilidad de agua producto del cambio en precipitación. Con esto se obtiene la nueva evaporación natural según lo expuesto en la ecuación 2;
- iii) el caudal remanente en la desembocadura del río se ajusta, asumiendo cambios relativos al cambio de precipitación y la necesidad de mantener ciertos caudales mínimos en el balance hídrico (asociados a caudales ecológicos o agua que recircula en la cuenca);
- iv) finalmente se calcula la demanda evaporativa como el mínimo de dos términos: el primero equivalente a la demanda ajustada de la misma manera que para el caso de la evaporación natural y el segundo equivalente a la disponibilidad de agua en la cuenca, o sea, la precipitación menos la evaporación natural y menos el caudal remanente en la desembocadura de la cuenca; y
- v) si la demanda potencial es mayor que la demanda real disponible entonces existe una restricción que se calcula de acuerdo con lo establecido en la ecuación 3.

$$fDemPot = \frac{0,46 * (T + \Delta T) + 8,13}{0,46 * (T) + 8,13} \quad (1)$$

$$ET_{Nat}(fut) = ET_{Nat}(hist) * fDemPot * \frac{P(fut)}{P(hist)} \quad (2)$$

$$RRiego = 1 - \frac{Disp(fut)}{ETIrr(fut)} \quad (3)$$

Donde $Disp(fut)$ es la disponibilidad de agua para riego futura.

Sobre la base de estos cálculos, se han establecido factores de restricción para las distintas cuencas seleccionadas de acuerdo con lo presentado en el cuadro A4a.1. Estos factores son replicados para las comunas cercanas a cada cuenca para determinar un factor a nivel comunal.

El trabajo de análisis de disponibilidad de agua para riego que se presentó tiene un número importante de limitaciones:

- i) al hacer un análisis de una cuenca completa no es posible reconocer las diferencias que puedan existir en el interior de esta. Por ejemplo, es posible que la parte alta de una cuenca esté limitada hídricamente, pero que la parte baja, en parte gracias a los afloramientos de aguas subterráneas o flujos de retorno de aguas de riego, esté en una situación de holgura. al agregar ambos sectores es imposible ver estas sutilezas;
- ii) en el análisis no se toman en cuenta componentes del balance hídrico que también pueden afectar la disponibilidad de agua para riego, como el agua subterránea; y
- iii) en el análisis no se consideran potenciales impactos asociados a cambios en la variabilidad climática. El trabajo se realiza sobre la base de la perturbación de condiciones promedio y no toma en cuenta, por ejemplo, cambios que podrían existir en la frecuencia de eventos extremos, tales como una sequía.

Sobre la base de esta metodología se obtienen escenarios de restricción de riego cuyos principales resultados se resumen en los siguientes puntos:

- i) agricultores ubicados al sur de la cuenca del río Maipo no deberían tener problemas de abastecimiento de agua para riego en términos generales, obviamente existen salvedades;

- ii) de la cuenca del río Maipo (incluida) al norte se proyectan restricciones en la disponibilidad de agua para riego que dependen del escenario (A2 o B2) y del período considerado;
- iii) en el período temprano, las restricciones varían de un 0% (escenario B2 en todas las cuencas excepto la del Aconcagua) a un 15% (escenario A2 para la cuenca del río Aconcagua); y
- iv) en el período tardío las restricciones varían de un 30% (escenario B2 en la cuenca del río Maipo) a un 65% (escenario A2 para la cuenca del río Aconcagua).

Estos escenarios implican fuertes restricciones en la productividad de cultivos, lo que será analizado en una sección posterior. Es importante mencionar que la metodología utilizada solamente permite llevar a cabo análisis regionales a gran extensión. Por cierto, cuando se analizan estos temas en detalle, existen diferencias significativas entre usuarios dentro de una misma cuenca o entre tipos de agricultores, lo que va a incidir de distinta manera en el impacto real que perciban fruto de los cambios en la hidrología.

MAPA A4a.1
CLASIFICACIÓN DE CUENCAS DE ACUERDO CON ESTRÉS HÍDRICO
(En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia.

CUADRO A4a.1
RESTRICCIÓN DE RIEGO PARA DIFERENTES ESCENARIOS

Cuenca	A2			B2		
	2011-2040	2041-2070	2070-2100	2011-2040	2041-2070	2070-2100
Río Limarí	6%	40%	64%	0%	15%	42%
Río Aconcagua	15%	40%	64%	11%	23%	39%
Río Maipo	6%	34%	57%	0%	13%	31%
Río Rapel	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Río Mataquito	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Río Maule	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Río Itata	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Río Biobío	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Río Imperial	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Río Tolón	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Fuente: Elaboración propia.

Bibliografía

DGA (Dirección General de Aguas) (1987), *Balance hídrico de Chile*, Santiago de Chile, Ministerio de Obras Públicas.

Apéndice IVb

Impactos en la productividad del sector silvoagropecuario

A. Introducción

El presente informe resume las condiciones metodológicas de la evaluación de los impactos en la productividad del sector silvoagropecuario, en escenarios de cambio climático que se desprenden del proyecto ERECC-Chile. A su vez, se presentan los resultados derivados de este análisis.

Los impactos en productividad bajo nuevas condiciones climatológicas se derivan del uso del modelo SIMPROC (simulador de la producción de los cultivos) desarrollado por el Centro de Agricultura y Medio Ambiente (AGRIMED). Una completa descripción de la metodología usada se desprende del capítulo “Impactos productivos en el sector silvoagropecuario de Chile frente a escenarios de cambio climático” del estudio *Análisis de vulnerabilidad del sector silvoagropecuario, recursos hídricos y edáficos de Chile frente a escenarios de cambio climático* que AGRIMED realizara para la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), la Fundación para la Innovación Agraria (FIA) y la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA) a raíz del Informe de la segunda Comunicación Nacional de Chile frente a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, UNFCCC (AGRIMED, 2008). En el anexo A de este apéndice se presenta de manera resumida esta metodología de análisis.

Para satisfacer las necesidades de este proyecto en particular se ha ampliado el espectro de análisis de AGRIMED (2008) en dos sentidos. Primero, se ha agregado un nuevo escenario temporal de análisis correspondiente al período 2010-2040. Originalmente en AGRIMED (2008) se incluían solamente los escenarios 2040-2070 y 2070-2100. Segundo, para evaluar los posibles impactos productivos de la limitada dotación de agua de riego que podría acompañar a los nuevos escenarios climáticos, se ha diseñado un conjunto de hipótesis y algoritmos con los cuales se ha construido un módulo complementario del modelo SIMPROC de evaluación de productividad bajo riego deficitario. A continuación se detalla la metodología asociada a este nuevo módulo de análisis.

Son varias las modalidades en que una reducida dotación de agua podría operar sobre los cultivos. Algunas de estas son:

- i) menor disponibilidad de agua a lo largo de toda la temporada. Mantención de la frecuencia de riego pero con limitada cantidad de agua;
- ii) cargas normales de riego, pero con menor frecuencia de riego; y
- iii) alternancia entre períodos con normal dotación y períodos sujetos a las restricciones i) o ii).

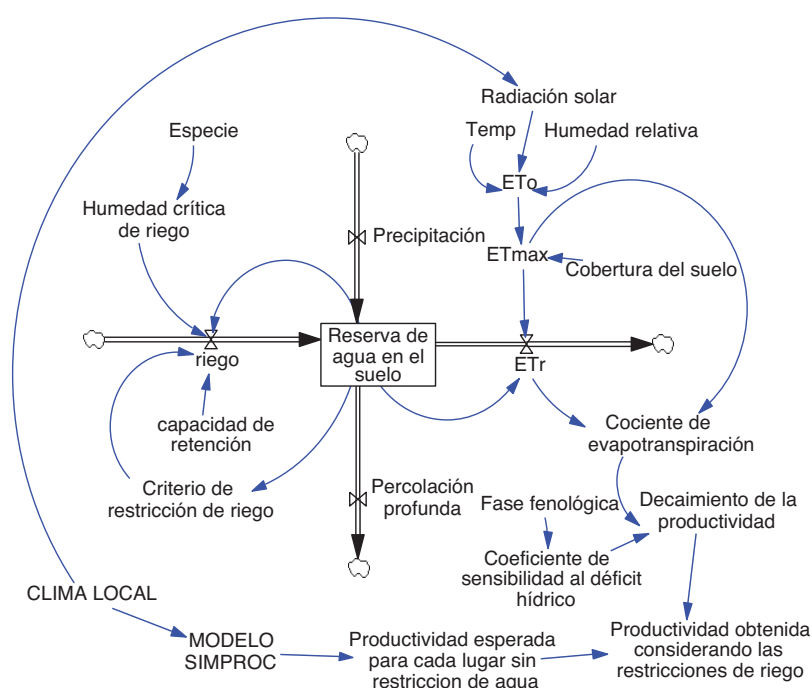
El modelo SIMPROC condensa los datos en una escala de tiempo semanal, por lo que puede soportar cualquiera de los supuestos anteriores. Por razones prácticas, hemos elegido la primera modalidad, para producir una limitación en la dotación de riego a lo largo de todo el ciclo de cada cultivo. El efecto de esta limitación varía dentro del ciclo, por cuanto el modelo SIMPROC maneja las sensibilidades a la sequía en cada fase de desarrollo de las plantas.

El modelo utilizado se alimenta de la información climática de una base de datos que contiene los valores de las variables para la línea de base, así como para los distintos escenarios de condiciones climáticas futuras. A partir de ellos se realiza una simulación del comportamiento productivo de cada cultivo, así como un balance hídrico al cual se le agregó un módulo que regula el riego, suponiendo

restricciones en las dotaciones de agua disponible. Este módulo puede suponer restricciones durante toda la temporada o focalizar el déficit de riego en determinadas fases del cultivo. En este proyecto hemos preferido considerar el primer criterio, ya que no existen antecedentes suficientes que justifiquen una focalización más detallada de las restricciones de agua.

La restricción opera suponiendo que cada vez que se requiere riego, solo se repone una fracción de la demanda y no la totalidad de lo requerido para una supresión del déficit. Así, se van acumulando déficits durante la temporada, que van operando negativamente sobre la productividad, provocando un decaimiento de los rendimientos (véase el diagrama A4b.1).

DIAGRAMA A4b.1
DIAGRAMA DE FORRESTER DEL MÓDULO DE RESTRICCIÓN DE RIEGO
PARA PROYECTAR LOS IMPACTOS PRODUCTIVOS DE LA REDUCCIÓN EN LAS
DOTACIONES DE AGUA



Fuente: Elaboración propia sobre la base de datos del modelo SIMPROC, F. Santibáñez, “Simulador de la productividad de cultivos (SIMPROC)”, *Revista de Agrometeorología*, Argentina, 1998.

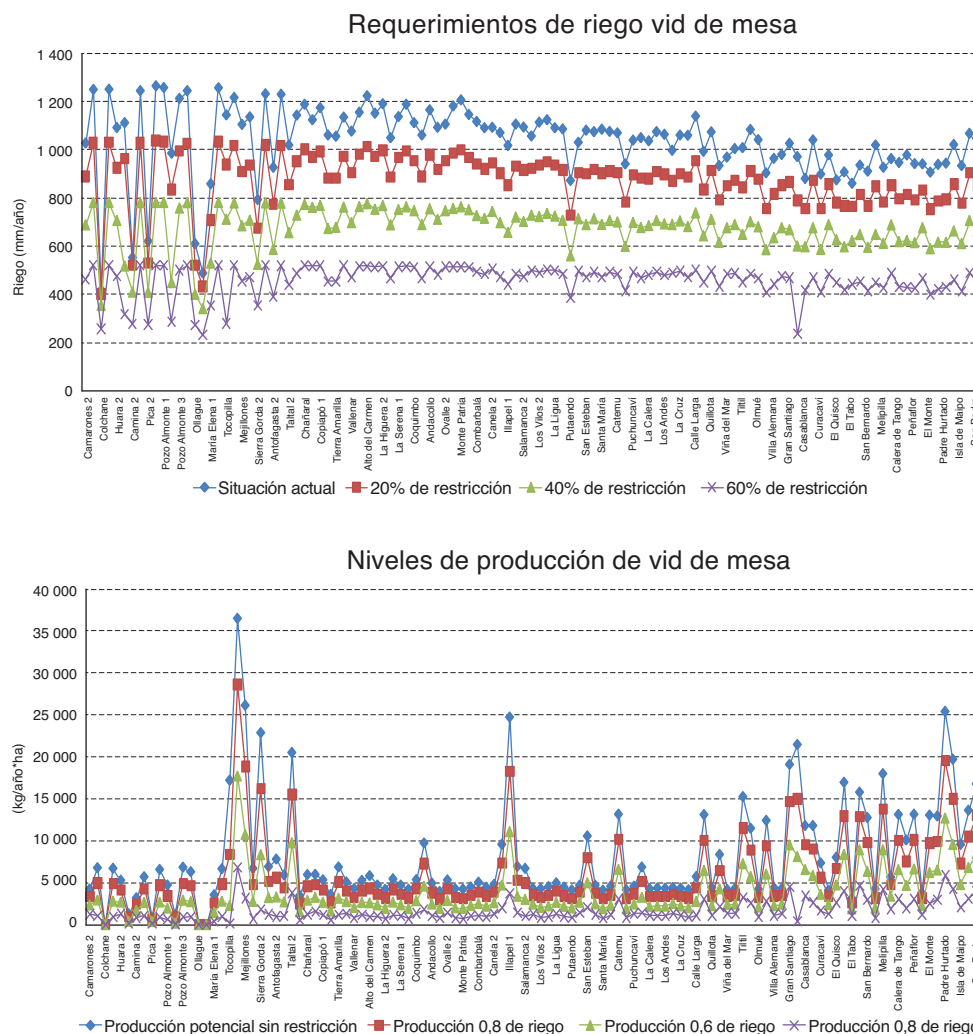
B. Pruebas y calibraciones

Se calibró el módulo de restricción hídrica, verificando la consistencia de los resultados a lo largo de todo el territorio nacional. Para este propósito, se utilizaron algunas especies frutales debido a que estas tienen un ciclo de vida fijo y no variable como los cultivos anuales, lo que hace más fácil la calibración. El gráfico A4b.1 muestra el tipo de resultados que se están obteniendo, los que se ven bastante consistentes.

Sobre la base de una metodología elaborada por el Centro de Cambio Global de la Pontificia Universidad Católica de Chile se han desarrollado los escenarios de restricción de riego para cada una de las unidades territoriales consideradas en el análisis (véase el anexo B de este apéndice). Usando esta información se producen nuevos cambios en la productividad.

GRÁFICO A4b.1

DOTACIONES DE RIEGO Y PRODUCTIVIDAD PARA VIDES EN DISTINTOS LUGARES DE LAS REGIONES I A X



Fuente: Elaboración propia sobre la base de datos del modelo SIMPROC, F. Santibáñez, “Simulador de la productividad de cultivos (SIMPROC)”, *Revista de Agrometeorología*, Argentina, 1998.

C. Análisis de resultados

Para determinar la sensibilidad de la producción frente a diversos grados de restricción hídrica, se realizaron simulaciones bajo supuestos de dotación de riego de 100, 80, 60 y 40% de los requerimientos del cultivo. Se supone al menos un riego semanal cuando es necesario. En todos los casos, el modelo hizo una aproximación iterativa, entregando el resultado para el mejor caso, es decir, para la fecha de siembra que obtiene el más alto rendimiento.

El uso consumo desciende gradualmente de norte a sur. Para la mayor parte de los cultivos, estos van desde más de 6.000 m³/ha en las áreas desérticas, hasta unos 4.000 m³/ha en la zona central. En todas las regiones se produce una importante atenuación del uso consumo en las zonas costeras comparadas con las zonas interiores.

Junto con la variación en los requerimientos de riego, que aumentan con el calentamiento global, se producen compensaciones que tienden a reducirlos, lo que se traduce en el acortamiento de los ciclos de vida en las especies anuales y el desplazamiento en las fechas de siembra. Estos factores se contrapesan, redundando en un elevado grado de proporcionalidad entre la restricción hídrica y la productividad. Esta proporcionalidad sufre modificaciones como consecuencia del efecto marino. En condiciones de baja demanda atmosférica hacia la costa, la evapotranspiración de referencia se reduce más que la productividad en la mayor parte de las especies, lo que tiene como consecuencia un alza en la eficiencia productiva del agua comparada con las áreas interiores.

Un análisis espacial de los resultados obtenidos se puede apreciar en el anexo B de este apéndice.

1. Frutales

Los nuevos escenarios climáticos afectarán de forma negativa a las especies frutales fundamentalmente debido al aumento de los niveles de estrés térmico y a la disminución de las horas de frío.

En el valle central se espera un notable incremento de los niveles de estrés térmico lo que redundará en menores tasas fotosintéticas y en una aceleración de los procesos de maduración. No todas las especies son igualmente sensibles al estrés térmico. Esto afectará de manera considerable a pomáceas, frambuesas y arándanos. Los cerezos también se verán afectados por las altas temperaturas, que incluso podrían en ocasiones provocar problemas de fertilidad y cuaja. Estos factores adversos se irán intensificando gradualmente dentro del siglo, adquiriendo su máxima expresión a partir de la mitad de este.

La disminución del frío invernal se superpondrá al fenómeno anterior (véase el cuadro A4b.1). La ocurrencia de veranos que prolongan las elevadas temperaturas hacia el otoño se irán haciendo más frecuentes, creando problemas con el inicio del reposo invernal, que será más tardío e imperfecto, afectando el vigor de la brotación y la fertilidad de las yemas florales.

Dentro de las especies menos afectadas por estos fenómenos están los carozos y las vides, que tienen menores requerimientos de frío y mayor resistencia a las temperaturas elevadas.

Uno de los factores que más incide en la caída de los rendimientos en frutales caducos, es la fuerte disminución del frío invernal. Por ello, gran parte de esta caída de rendimiento podrá prevenirse con el reemplazo de variedades por unas de menores requerimientos de frío o, en ciertos casos, por el uso de estimulantes para el reposo invernal, de uso corriente en la actualidad en la zona norte del país.

En el caso de las especies persistentes, cuyos umbrales de estrés son considerablemente más elevados, estos factores no operaran en el mismo sentido, ya que el efecto de la atenuación del frío invernal es beneficioso y mucho más favorable que la ocurrencia de posibles episodios ocasionales de estrés térmico estival.

Al incremento del estrés que afectará el rendimiento y calibre de la fruta, es necesario agregar otros importantes factores climáticos que amenazarán su calidad. Dentro de estos factores, cabe citar el posible aumento de la incidencia de los golpes de sol, debido a la combinación adversa de temperatura, humedad del aire, radiación solar y problemas de pérdida de coloración, producto del aumento de las temperaturas nocturnas y del deterioro de la vida poscosecha debido a una madurez más acelerada. Estos factores serán particularmente relevantes en pomáceas y carozos.

Los requerimientos de riego aumentarán como consecuencia del incremento en las demandas hídricas o evapotranspiración de referencia, asociadas al calentamiento global. La evapotranspiración de referencia aumentará a razón de un 6% (áreas poco ventosas) a un 10% (áreas mas expuestas a los vientos) por cada grado de aumento en la temperatura.

CUADRO A4b.1
VALLE CENTRAL REGADO (VI REGIÓN): CAMBIOS POSIBLES EN ALGUNAS
VARIABLES AGROCLIMÁTICAS

RESUMEN DE VALORES ANUALES PARA ALGUNOS PARÁMETROS CLIMÁTICOS				
Parámetro	Unidad	Línea de base	A220	A240
Temperatura máxima	°C	20,8	22,1	23,0
Temperatura mínima	°C	7,9	9,1	9,9
Temperatura media	°C	3,7	14,9	15,7
Días grados	D.G	1 643	1 960	2 193
DG acumulados	D.G	1 643	1 960	2 193
Días cálidos	Días	99	123	139
Horas de frío	Horas	1 275	783	495
Radiación solar	cal/cm2/día	398	394	392
HR	%	72	71	71
Precipitación	mm	490,3	490,3	367,6
Evaporación potencial	mm	1 230,0	1 398,0	1 506,0
Déficit hídrico	mm	960,3	1 107,8	1 245,1
Excedente hídrico	mm	20,6	200,1	106,7
Índice humedad	pp/etp	0,40	0,35	0,24
Heladas	días	15,6	6,9	3,4

Fuente: Elaboración propia sobre la base de datos de la malla agroclimática de Chile (LB) y resultados del modelo SIMPROC, F. Santibáñez, “Simulador de la productividad de cultivos (SIMPROC)”, *Revista de Agrometeorología*, Argentina, 1998.

2. Cultivos anuales

Estas especies podrían observar una caída de rendimientos en la zona central, debido al acortamiento de su ciclo y por un aumento de los niveles de estrés térmico, que podrían reducir las tasas fotosintéticas a pesar del efecto positivo del aumento de CO₂ atmosférico.

Si bien muchas especies tendrán la posibilidad de compensar el aumento de la temperatura con el desplazamiento de las fechas de siembra hacia los períodos más frescos del año, hay ciertos casos donde esto no alcanza a compensar el efecto depresor de los rendimientos de la aceleración de la madurez. En ciertos casos el desplazamiento de las fechas de siembra está limitado por el exceso de precipitación invernal que afecta negativamente al cultivo.

En general, todas las especies anuales se verán beneficiadas por la disminución de la incidencia de heladas, especialmente en primavera, lo que permitirá adelantar las siembras en la medida que el régimen de precipitaciones lo permita.

A diferencia de los frutales, los requerimientos de riego podrán aumentar o disminuir en los escenarios futuros, dependiendo de los desplazamientos de las fechas de siembra. Cuando este desplazamiento permita un mejor aprovechamiento de las precipitaciones invernales, y cuando coincida gran parte del ciclo en períodos del año con menor demanda atmosférica, los requerimientos podrían disminuir. Tal es el caso del maíz, frijol, girasol, papas y otros cultivos de verano.

3. Cambios en la eficiencia productiva del agua

Una variable especialmente importante en escenarios restrictivos en materia de recursos hídricos, es la llamada eficiencia productiva del agua, E_{pa} (véanse los gráficos A4.b2 y A4.b3). Esta variable evalúa el rendimiento del agua de riego a partir del cociente entre cosecha obtenida por unidad de agua agregada:

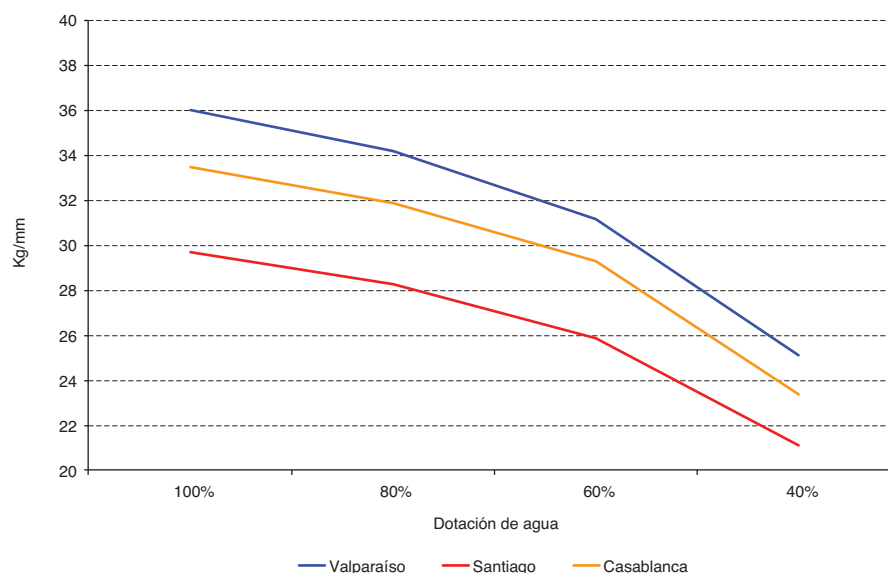
$$E_{pa} = \frac{\text{rendimiento}}{\text{agua de riego aplicada}}$$

En zonas costeras, la eficiencia productiva del agua se sitúa por sobre los 40 kg/mm, en la zona norte y ligeramente por debajo de esta cifra en la zona central. En zonas interiores, esta cifra es cercana a 20 kg/mm. Las restricciones de riego hacen caer la eficiencia productiva del agua, tanto en zonas costeras como interiores. A pesar de esto, se mantiene una clara diferencia a favor de las zonas costeras. Esto sugiere el interés que tendría el país, en un contexto de recursos hídricos escasos, de privilegiar el uso del agua en las áreas con alta influencia marina, donde se logra una mayor eficiencia. Esta variable es fuertemente sensible tanto a la demanda atmosférica como al resto de las variables que inciden en los rendimientos de los cultivos, por lo que posibilita identificar los lugares donde el agua permite el mayor retorno productivo.

El análisis de las variaciones espaciales de esta dimensión, muestra que la eficiencia productiva del agua en cultivos anuales aumenta gradualmente hacia la costa, situación que se verá exacerbada con el calentamiento global.

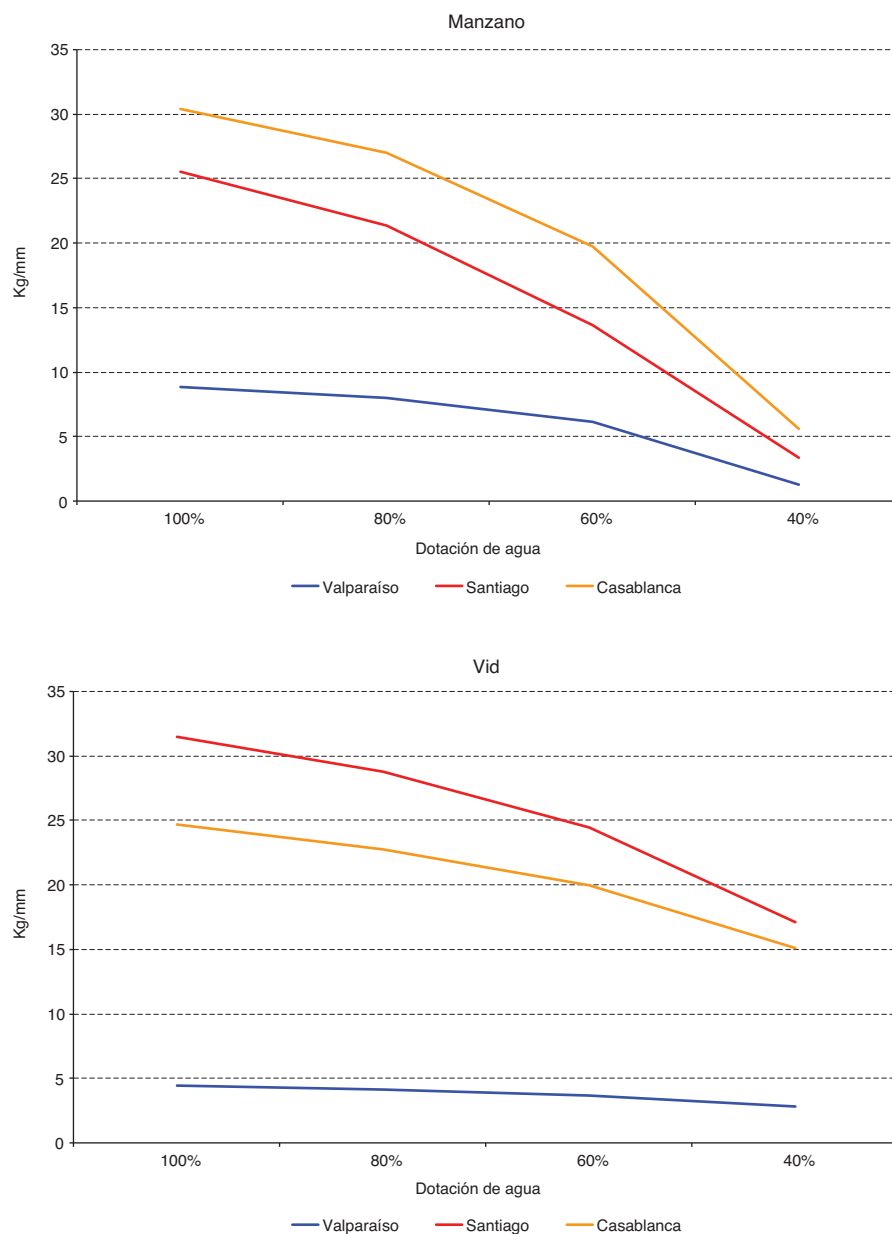
En el caso de los frutales, esta variable se maximiza en una franja intermedia entre el valle central y la costa, como consecuencia de que en ambientes muy marítimos, el rendimiento cae fuertemente como consecuencia de la falta de calor estival para una buena maduración y la ausencia de frío invernal.

GRÁFICO A4b.2
CAMBIOS EN LA EPA EN EL CULTIVO DE MAÍZ EN EL ESCENARIO A2, 2070
(En kg/mm)



Fuente: Elaboración propia sobre la base de datos del modelo SIMPROC, F. Santibáñez, “Simulador de la productividad de cultivos (SIMPROC)”, *Revista de Agrometeorología*, Argentina, 1998.

GRÁFICO A4b.3
CAMBIOS EN LA EPA DE RIEGO EN RELACIÓN CON LA LOCALIZACIÓN
GEOGRÁFICA Y LA RESTRICCIÓN EN LA DOTACIÓN DE RIEGO EN DOS FRUTALES,
ESCENARIO A2, 2040
(En kg/mm)



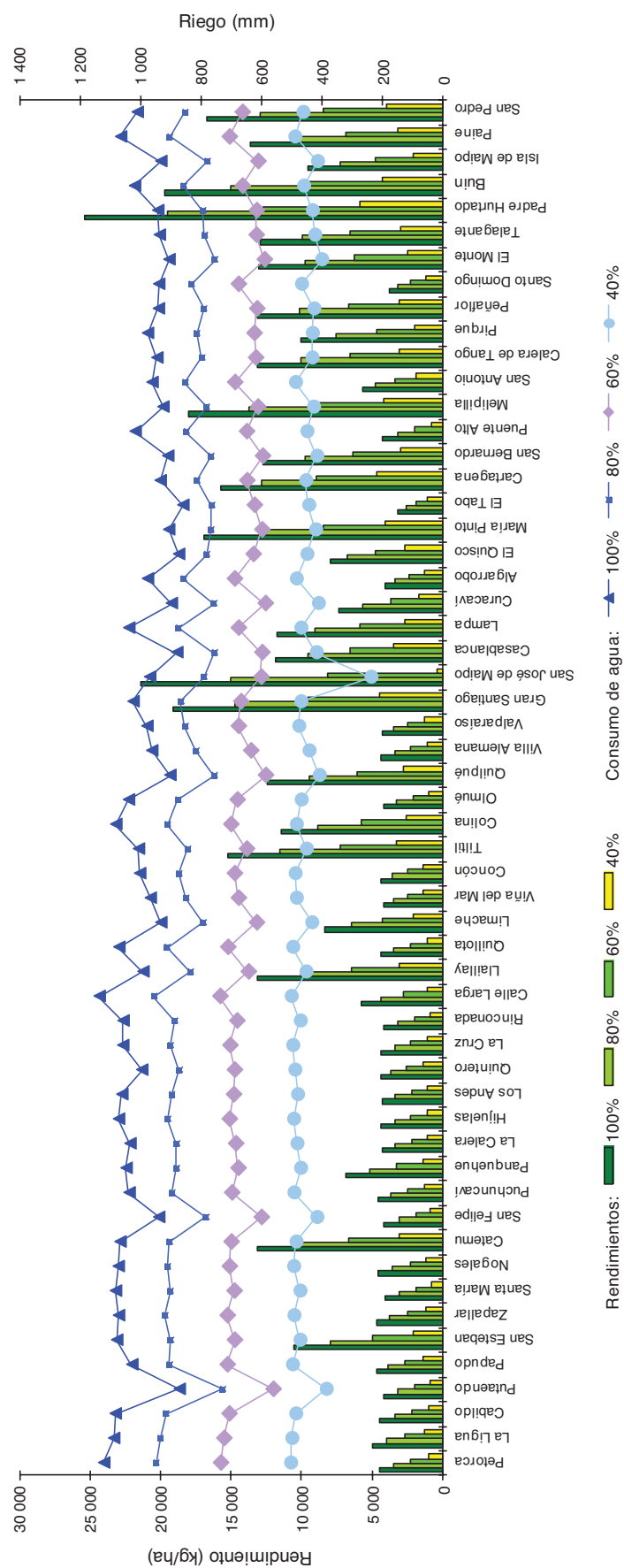
Fuente: Elaboración propia sobre la base de datos del modelo SIMPROC, F. Santibáñez, “Simulador de la productividad de cultivos (SIMPROC)”, *Revista de Agrometeorología*, Argentina, 1998.

4. Cambios en los rendimientos como consecuencia de una restricción en la dotación de agua

En general, el rendimiento de cultivos y frutales sufre una fuerte caída como consecuencia de una restricción en la dotación de agua de riego. Esta caída es notable en áreas interiores, donde la demanda atmosférica es más elevada y la mantención del balance hídrico del suelo es precaria. Este efecto sobre el rendimiento podría ser catastrófico en extensas regiones del país que cuentan con suelos delgados, pedregosos y de baja capacidad de retención de agua. Las restricciones en la dotación de riego podrán operar en el futuro en dos sentidos: i) reducción de los tiempos y cargas de agua; y ii) reducción de la frecuencia de riego por cambios de los turnos.

Siendo muy incierto el escenario de cambios en el sistema de turnos, en este caso hemos supuesto una reducción en los tiempos de riego. El gráfico A4b.4 muestra un ejemplo de las simulaciones con un 100%, 80%, 60% y 40% de dotación de riego en relación con las demandas del cultivo.

GRÁFICO A4b.4
RENDIMIENTOS Y CONSUMOS DE AGUA DE LA VID EN LA ZONA CENTRAL, ESCENARIO A2, 2070
 (En kg/ha y en mm)



Fuente: Elaboración propia sobre la base de datos del modelo SIMPROC, F. Santibáñez, “Simulador de la productividad de cultivos (SIMPROC)”, *Revista de Agronomía*, Argentina, 1998.

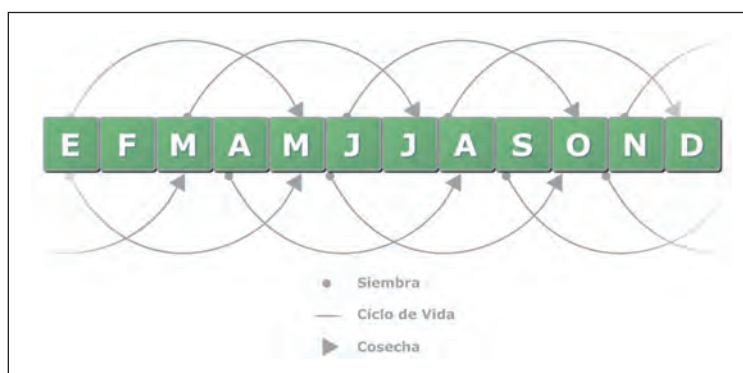
Anexo A.

Resumen de la metodología base del impacto de los escenarios sobre la productividad de especies cultivadas

El modelo utilizado simula el crecimiento y producción de los cultivos, integrando los principales procesos ecofisiológicos y su regulación climática. Una ventaja importante del modelo SIMPROC frente a otros modelos de cultivo, es que la simulación la realiza de manera iterativa, es decir, considera todas las fechas de siembra y escoge la que maximice el rendimiento. El modelo entrega como resultado la fecha de siembra y de cosecha como se muestra en el diagrama 1. Esto permite elegir la mejor siembra para informar el rendimiento potencial a la vez que la fecha de siembra óptima.

Gracias a esta aproximación iterativa, el modelo es capaz de detectar cambios en las fechas de siembra que podrían ocurrir en los nuevos escenarios climáticos. Esto es esencial, por cuanto sería un error evaluar el comportamiento futuro de un cultivo suponiendo que se mantiene la fecha de siembra actual. En el caso de las especies frutales, lo que representa la mayor movilidad es la fecha de maduración de los frutos.

DIAGRAMA 1
SIMULACIONES ITERATIVAS REALIZADAS POR EL MODELO SIMPROC

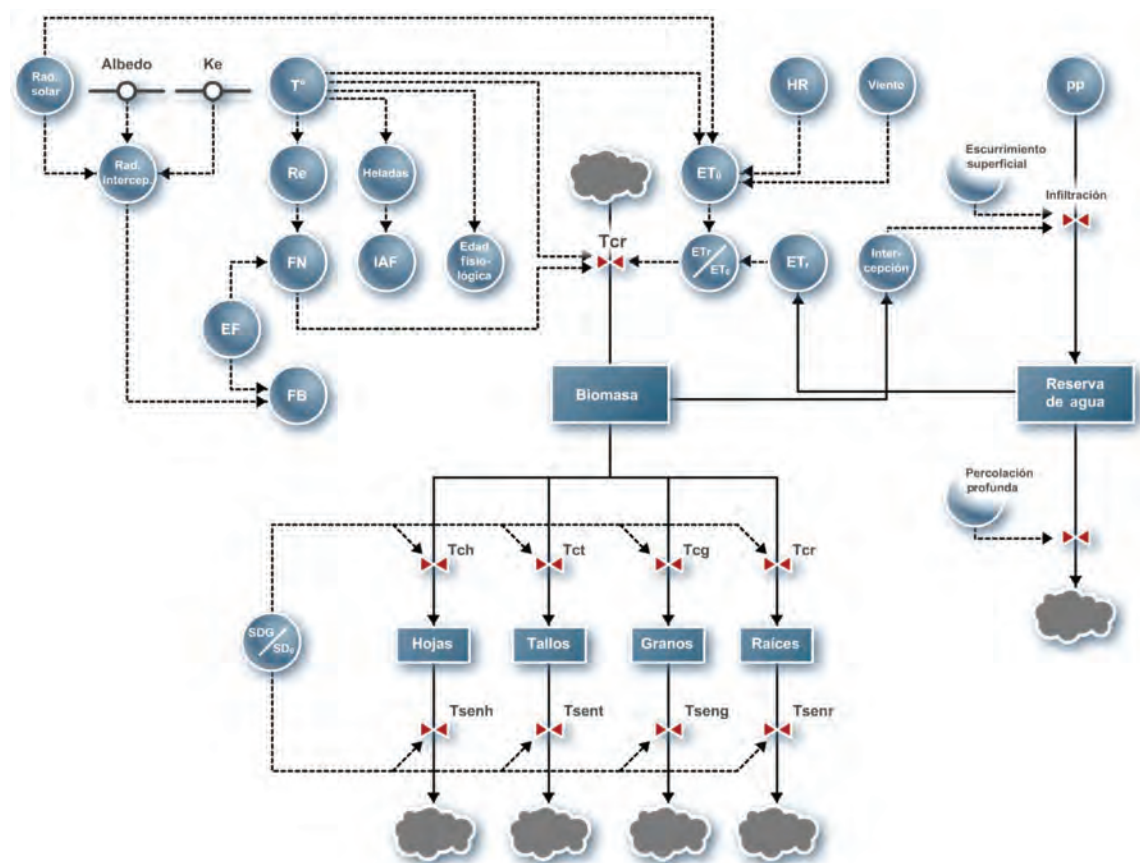


Fuente: Elaboración propia.

1. Síntesis del modelo SIMPROC

El modelo SIMPROC integra en el tiempo las respuestas ecofisiológicas de los cultivos, frente a los estímulos climáticos. El crecimiento es simulado entre la emergencia y la cosecha. A partir de la interceptación de la radiación solar y del área foliar, simula en cada instante la producción fotosintética bruta. Una vez considerados los costos respiratorios se establece el potencial de producción de materia seca, proceso en el que influyen las temperaturas y la disponibilidad de agua en el suelo. Mediante un balance hídrico del suelo se establece el grado de satisfacción de las demandas hídricas del cultivo, lo que a su vez, regula la velocidad del crecimiento. El modelo simula la fenología del cultivo a partir de la acumulación de días grado, variable de base para establecer en todo instante la edad fisiológica del cultivo. A partir de esta, se modula el coeficiente de reparto del crecimiento entre los distintos órganos de la planta, así como su sensibilidad frente a eventos catastróficos como las heladas, el estrés térmico y la sequía (véase el diagrama 2). El área foliar del cultivo crece hasta que la fenología gatilla la senescencia, momento a partir del cual comienza a disminuir el área de hojas expuesta a la radiación solar y, con ello, la fotosíntesis hacia el final del ciclo.

DIAGRAMA 2
DIAGRAMA SIMPLIFICADO DEL MODELO SIMPROC



Fuente: Elaboración propia.

2. Variables de entrada del modelo

Variables climáticas: temperaturas máximas y mínimas, precipitación semanal, radiación solar, evapotranspiración potencial, humedad relativa.

Variables ecofisiológicas: temperaturas mínimas, óptima y máxima de crecimiento, días grado para el desarrollo y maduración, sensibilidad a heladas y al déficit hídrico por fases fenológicas, profundidad de raíces, eficiencia fotosintética, relación área-peso de las hojas, tasa de respiración de mantención y de crecimiento.

3. Variables de salida

Producción de materia seca, rendimiento de grano, frutos o parte cosechada, índice de área foliar, fecha de siembra y cosecha óptimas, consumo de agua, eficiencia productiva del riego y riesgos de heladas, de sequía y de estrés térmico en distintos momentos del año para cada especie.

A continuación se muestra un diagrama simplificado del modelo:

Donde:

IAF : Índice de área foliar.	Pp. : Precipitación semanal.
EF : Eficiencia fotosintética de cada especie.	SD ₀ : Suma de días grado de referencia.
FN : Fotosíntesis neta.	Tsenh : Tasa de senescencia hojas.
FB : Fotosíntesis bruta.	Tsent : Tasa de senescencia tallos.
Re : Respiración de mantenimiento.	Tseng : Tasa de senescencia granos.
Cr : Tasa de crecimiento.	Tsenr : Tasa de senescencia raíces.
HR : Humedad relativa.	Tch : Tasa de crecimiento hojas.
ET ₀ : Evapotranspiración de referencia.	Tct : Tasa de crecimiento tallos.
ETr : Evapotranspiración real.	Tcg : Tasa de crecimiento granos.
SDG : Suma de días grado.	Tcr : Tasa de crecimiento raíces.

A partir de la línea de base se estimaron los potenciales de producción para los principales cultivos anuales, especies frutales, praderas y especies forestales. Esto representa la línea de base para estimar el impacto productivo de los cambios climáticos en el país. Los resultados de la aplicación del modelo SIMPROC permiten conocer los niveles de rendimiento, la estacionalidad de las fechas de siembra y cosecha, el consumo de agua, así como los riesgos de heladas, de sequía y de estrés térmico en distintos momentos del año para cada especie y comuna.

4. Cambios en los potenciales de producción

Los rendimientos potenciales fueron evaluados para los dos escenarios de cambio climático A2 y B2, para los años 2020, 2040 y 2070. Para el análisis de escenarios climáticos futuros, así como para la evaluación de sus impactos, se usó la comuna como unidad espacial. En esta unidad se compiló la información climática y agrícola recolectada y los resultados derivados de los modelos de análisis. Esto, en virtud de la disponibilidad de información censal y de la posibilidad que ofrece un sistema comunal de agrupar los resultados por provincia y región.

Es una realidad que las variaciones del clima siguen más bien límites naturales que administrativos, pero la extensión territorial de las comunas es suficientemente pequeña como para considerar que los cambios climáticos serán homogéneos en su interior. Los mapas producidos muestran los rendimientos por comunas de manera homogénea, pero el rendimiento mostrado en cada mapa, corresponde siempre a la zona de valles donde es posible el desarrollo agrícola, excluyendo de esta forma las zonas de cerros y cuerpos de agua del análisis. Siendo la comuna la unidad administrativa básica del país, esto tiene el beneficio adicional de proporcionar una unidad territorial mínima para la implementación de las medidas de mitigación.

Bibliografía

- AGRIMED (Centro de Agricultura y Medio Ambiente) (2008), “Impactos productivos en el sector silvoagropecuario de Chile frente a escenarios de cambio climático”, *Análisis de vulnerabilidad del sector silvoagropecuario, recursos hídricos y edáficos de Chile frente a escenarios de cambio climático*, Santiago de Chile.
- Santibáñez, F. (1998), “Simulador de la productividad de cultivos (SIMPROC)”, *Revista de Agrometeorología*, Argentina.

Anexo B. Análisis espacial de los cambios proyectados en la productividad y consumo de agua de los cultivos

Como consecuencia del alza en las temperaturas y de una posible disminución en la precipitación, tanto los cultivos anuales como las especies frutales registrarían cambios conductuales como variaciones en la productividad y en los requerimientos de riego. Estos cambios no se expresarán de igual forma en todas las regiones del país. Mientras en el centro norte habrá una disminución de la productividad en la mayoría de las especies, en las regiones situadas al sur de Temuco los cambios serán positivos.

1. Frutales

En especies frutales hay que hacer la distinción entre las de hoja caduca y de hoja persistente. En el primer caso, la disminución del frío invernal y el aumento del estrés térmico estival, deteriorará fuertemente las condiciones productivas del valle central. A partir de la región del Biobío se produce una transición hacia una situación claramente positiva que se expresa de Temuco al sur. Es importante notar que en la zona central, contrariamente a lo que ocurriría en el valle, las condiciones de la precordillera mejorarían al aumentar las temperaturas estivales, al disminuir las heladas, manteniendo adecuados niveles de frío invernal.

Los frutales de hoja persistente muestran una situación distinta, por cuanto su mayor tolerancia a las elevadas temperaturas y sus nulas exigencias en frío invernal, hacen que respondan positivamente a los cambios climáticos en casi todas las regiones. El mejoramiento en las condiciones productivas es notable hacia la zona sur.

Los requerimientos de riego aumentarán en todas las especies frutales como consecuencia de las mayores temperaturas y del aumento de la ventosidad. Estos requerimientos pueden llegar a superar los 500 mm por año, lo que representará un incremento significativo en las necesidades de agua para riego en las cuencas.

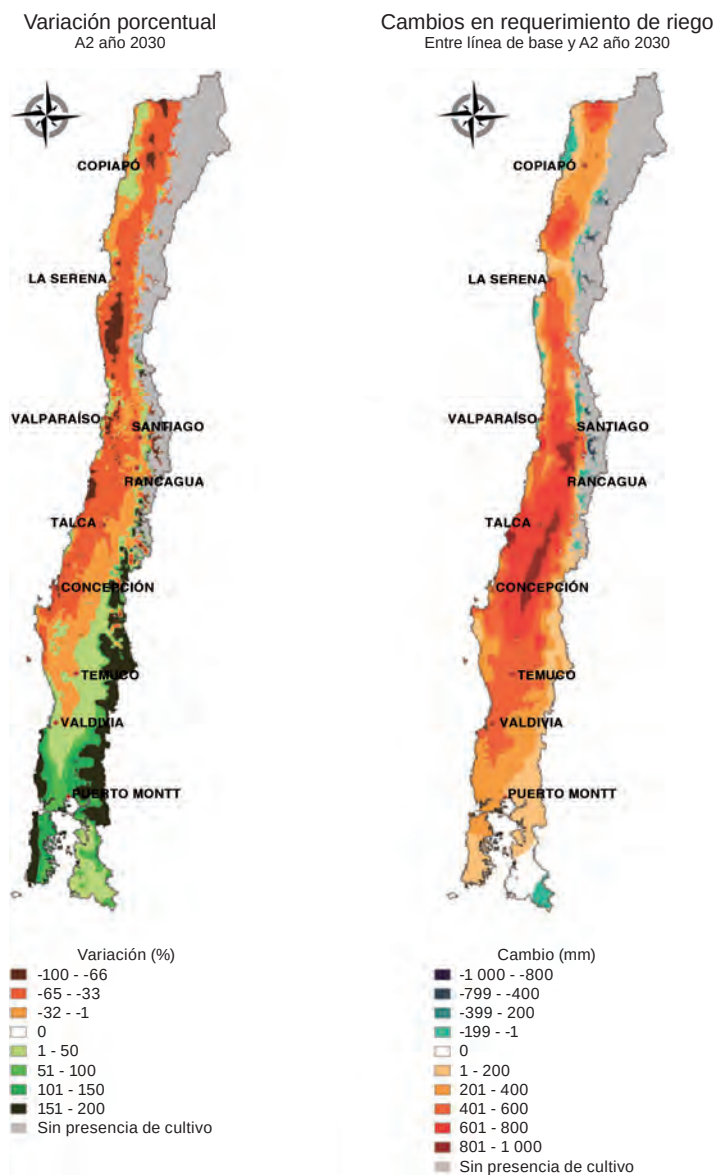
2. Cultivos anuales

En las especies anuales hay dos situaciones: la de los cultivos de invierno y la de los de verano. En el primer caso los impactos son más bien negativos, debido principalmente al acortamiento del ciclo de vida de dichos cultivos. Esto afecta mayormente a la zona central, pero también se manifiesta hacia el extremo sur. Se exceptúan de esta tendencia las áreas con alta influencia marina como la costa de la región de Los Lagos y de Chiloé. En condiciones de secano, la tendencia hacia la disminución de los rendimientos se revierte al sur de Temuco, donde el alza de la temperatura invernal es más importante que la disminución de la precipitación.

En el caso de los cultivos de verano, los efectos son más bien negativos en la zona central, como consecuencia del doble efecto de las elevadas temperaturas estivales, que acortan el ciclo de vida y crean niveles negativos de estrés térmico.

MAPA 1

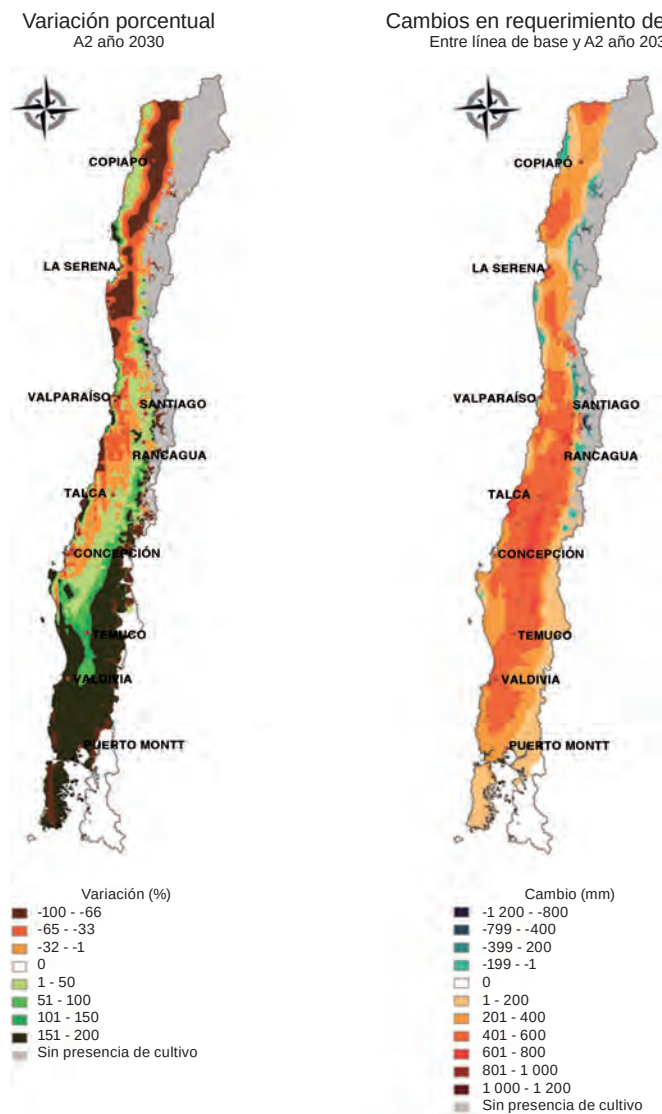
VARIACIÓN ESPACIAL DEL COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO Y NECESIDADES DE RIEGO DEL MANZANO



Fuente: Elaboración propia.

MAPA 2

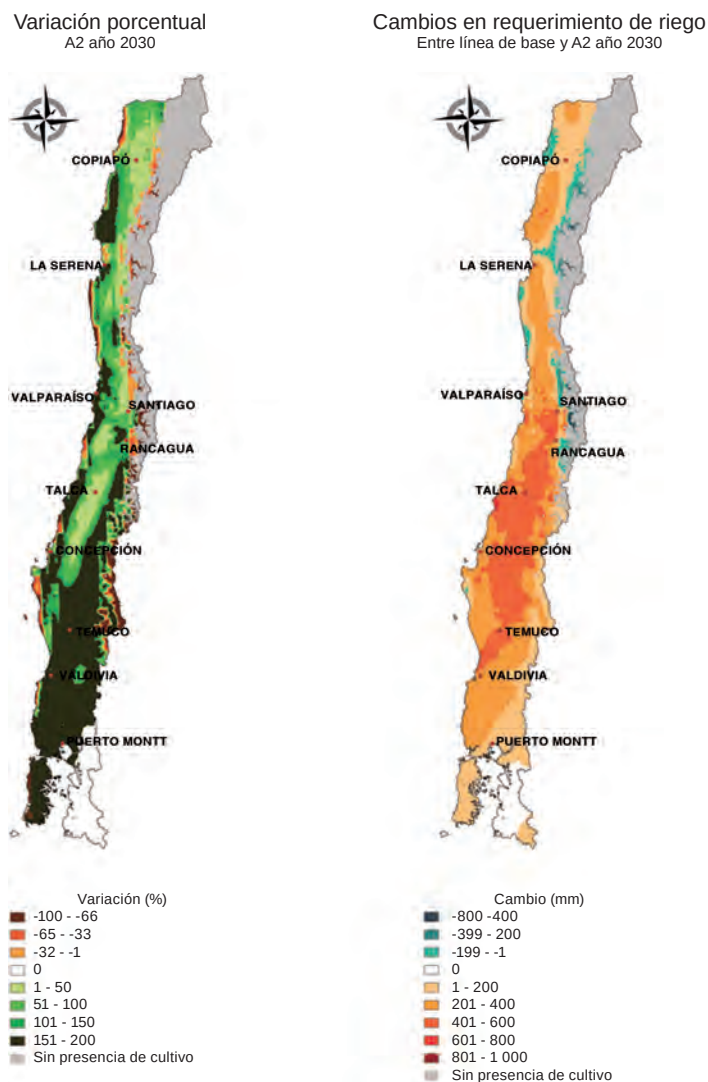
VARIACIÓN ESPACIAL DEL COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO Y NECESIDADES DE RIEGO DE LA VID



Fuente: Elaboración propia.

MAPA 3

VARIACIÓN ESPACIAL DEL COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO Y NECESIDADES DE RIEGO DEL NARANJO



Fuente: Elaboración propia.

MAPA 4**VARIACIÓN ESPACIAL DEL COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO DEL TRIGO**Variación porcentual trigo en riego
A2 año 2030

Variación (%)

- 100 - -66
- 65 - -33
- 32 - -1
- 0
- 1 - 50
- 51 - 100
- 101 - 150
- 151 - 200
- Sin presencia de cultivo

Variación porcentual trigo en secano
A2 año 2030

Variación (%)

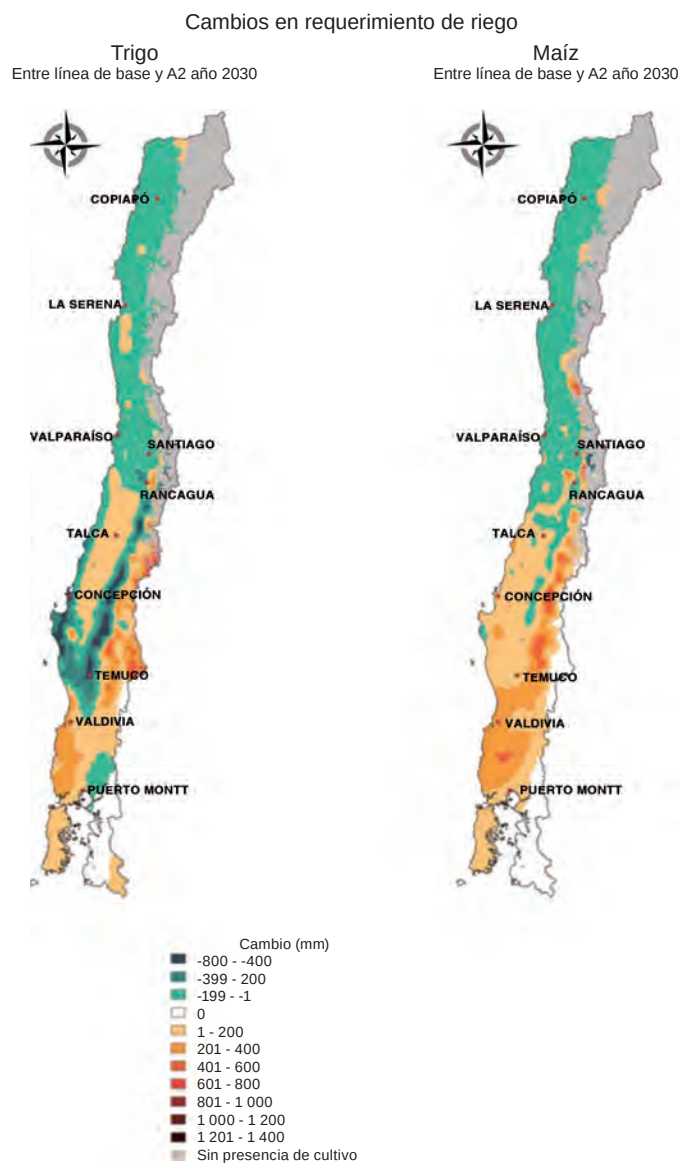
- 100 - -66
- 65 - -33
- 32 - -1
- 0
- 1 - 50
- 51 - 100
- 101 - 150
- 151 - 200
- Sin presencia de cultivo

Fuente: Elaboración propia.

MAPA 5**VARIACIÓN ESPACIAL DEL COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO DEL MAÍZ**Variación porcentual maíz en riego
A2 año 2030Variación porcentual maíz en secano
A2 año 2030**Fuente:** Elaboración propia.

MAPA 6

VARIACIÓN ESPACIAL DE LAS NECESIDADES DE RIEGO DEL MAÍZ Y DEL TRIGO



Fuente: Elaboración propia.

Apéndice IVc

Casos de estudio de impactos en la productividad del sector pecuario

A. Introducción

Según los antecedentes entregados por la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias de Chile (ODEPA), el subsector ganadería aportó a la actividad económica del país un 0,8% del producto interno bruto (PIB) nacional (MM\$ 413.788) y un 22,4% del PIB silvoagropecuario durante el año 2003. Si bien en términos de su aporte al PIB nacional pareciera que la ganadería es un rubro menor, debe considerarse que se desarrolla muchas veces en áreas geográficas que no tienen el potencial de ser utilizadas para otras actividades agrícolas, por lo que cumple un rol social relevante. Además, los productos de la ganadería sirven de materias primas a la industria de los alimentos, por lo que al agregar al PIB de la ganadería el PIB de la industria procesadora de carne y leche (dos industrias importantes, pero no las únicas que dependen de la ganadería), el PIB conjunto se eleva a más del doble (MM\$ 871.551).

En Chile la existencia de ganado bovino, que en su totalidad suma 3.719.709 cabezas según el Censo agropecuario nacional del año 2007 (INE, 2007), se concentra mayoritariamente en la zona centro-sur, en especial entre la IX y X regiones con un 63% del total nacional. En tanto el ganado ovino, sector representado por 3.889.319 cabezas a nivel nacional, se encuentra en mayor número en las regiones X, XI y XII con un 73% del total nacional. Considerando dicho ganado, es claro que las regiones de mayor importancia para la ganadería basada en praderas en Chile se ubican desde la IX región al sur.

La ganadería ovina y bovina pasa por momentos complejos en nuestro país. Según la ODEPA, en los últimos años ha habido una tendencia a la disminución del beneficio de novillos, con una tasa promedio anual negativa de -0,4% (de 2004 a 2008). Esta situación se ve agravada por un aumento constante en el número de vaquillas beneficiadas en ese período, con una tasa de crecimiento promedio anual del 9,12%. Con estas cifras, las expectativas del rubro no parecen ser alentadoras, ya que una mayor matanza de vaquillas a nivel nacional implicaría un menor número de animales disponibles como reproductores y una disminución de la masa ganadera a mediano y largo plazo.

Los escenarios climáticos predichos por los expertos para Chile durante este siglo sugieren que los cambios para el sector ganadero y agrícola pueden ser negativos o positivos dependiendo de la región de producción. En el caso de la ganadería ovina y bovina los efectos se traducirán principalmente en cambios en la estacionalidad de la producción de las praderas con diferencias más o menos marcadas de acuerdo con la zona geográfica.

Entre las regiones IV y X se espera una disminución general de la productividad por hectárea, principalmente debido a una menor disponibilidad de agua en el suelo por el cambio en los regímenes de precipitación. Hoy, ya se puede observar una reducción de un 10% a un 40% en los montos anuales de precipitación entre Copiapó y Puerto Montt (Ministerio de Agricultura, 2008). Algunas excepciones se presentarían en las regiones Metropolitana y V, donde un aumento de la temperatura traería una disminución de las heladas invernales, que, acompañada de un aumento en la radiación solar, permitiría una estación de crecimiento más larga y compensaría la menor disponibilidad de agua permitiendo un crecimiento anual de las praderas similar o ligeramente superior al actual.

En la zona sur (XI y XII regiones) se espera un aumento en la productividad de las praderas ubicadas en la vertiente occidental de la cordillera, debido a un aumento en la temperatura y en la pluviometría, mientras que las praderas de la vertiente oriental tenderían a disminuir su productividad debido a una disminución de la radiación solar.

El objetivo del presente estudio es determinar cómo los escenarios climáticos futuros impactarán la rentabilidad del sector ganadero, particularmente en los casos de productores que utilizan las praderas naturales como única fuente alimenticia para su ganado. Para ello se seleccionaron tres casos de estudio dentro de las regiones ganaderas más importantes del país y que pretenden abarcar diferentes especies y sistemas productivos.

B. Metodología

El análisis de los impactos del cambio climático en la ganadería en Chile se realizó mediante la metodología de estudios de caso. Para ello se seleccionaron tres casos (detallados más adelante) que intentaron incorporar las principales zonas ganaderas del país y diferentes sistemas de producción. Los casos escogidos se basan en el uso de la pradera natural como fuente principal de alimento, ya que nuestro estudio se concibió como una continuación del análisis iniciado por AGRIMED. Dicho análisis estimó el cambio en la productividad de las praderas naturales por efectos del cambio climático para los escenarios 2040-2070 y 2070-2100, y se extendió durante el desarrollo del Estudio Regional de la Economía del Cambio Climático (ERECC) para predecir también la productividad de las praderas naturales en el período 2010-2040.

El objetivo fue representar una parte importante de las principales zonas ganaderas del país y sistemas productivos contrastantes entre sí, pero a la vez de gran representatividad dentro de cada una de las zonas geográficas seleccionadas. Si bien esta estrategia no permite extrapolar directamente los resultados de cada estudio a otras combinaciones de zonas y sistemas productivos, permitirá tener una noción de la tendencia que seguirán los cambios en la productividad y algunas medidas de manejo para adaptarse a los cambios u optimizar los sistemas productivos. El estudio se dividió en cinco etapas:

Etapas 1

Correspondió a la recolección de información agroecológica de las tres zonas de estudio, lo que incluye tipo y fertilidad de suelos, características de la pradera natural, clima, pluviometría y sistemas de producción más comunes. El objetivo de esta etapa fue definir las principales variables que determinan la producción de carne, leche o lana y obtener valores representativos para cada producto.

Etapas 2

A partir de los datos recolectados durante la etapa previa y de los datos históricos de productividad de las praderas entregados por AGRIMED, se construyó una planilla modelo que permitió estimar la carga animal que maximiza el uso de la pradera natural a lo largo del año. Esto se hizo utilizando los datos mensuales de composición del rebaño modelo, la tasa de acumulación de materia seca de la pradera, una estimación de la calidad del forraje que se produce, el consumo por parte de los animales y la época más adecuada para conservación. Se determinaron también los meses del año en que la disponibilidad de forraje no satisface las necesidades de consumo de los animales y la cantidad de forraje conservado necesario para satisfacer dicho requerimiento.

Etapla 3

Una vez estimada la producción para cada caso de estudio, se realizó la evaluación económica del sistema productivo para utilizar este valor como línea de base. Debido a las incertidumbres asociadas a la proyección de precios en los períodos a evaluar, la evaluación se hizo con los precios reales promedio de los últimos diez años para los ítems disponibles en la base de datos de la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). Para insumos menores se utilizaron precios actuales.

Etapla 4

Se repitió el proceso descrito en las etapas 2 y 3 para el escenario A en los períodos 2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100, y para el escenario B en los períodos 2040-2070 y 2070-2100.

Etapla 5

Se estudiaron las medidas de manejo para optimizar la producción y se evaluaron sus costos y beneficios. Esto permitió elegir las propuestas que ayudan a reducir los impactos negativos o potenciar los impactos positivos del cambio climático en los casos estudiados.

Selección de zonas de estudio

Los estudios de casos en producción bovina se encuentran en la IX y X regiones del país, ya que esta zona (regiones IX, XIV y X) concentra un 60,4% de las explotaciones que poseen animales y un 62,8% de las existencias totales bovinas de Chile.

Caso 1: productor criancero bovino Melipeuco

En el primer caso de estudio se evaluó una producción con un rebaño de tamaño medio de 200 vientres, basado en el uso de praderas naturales con suplementación estratégica invernal.

Melipeuco, el área de estudio escogida, es una comuna ubicada en la cordillera andina de la IX región de La Araucanía. Del total de la superficie destinada a usos agropecuarios en esta comuna, el 24,8% está dedicada a praderas naturales. Asimismo, Melipeuco, pertenece a la provincia de Cautín, que concentra más del 50% de la superficie de praderas naturales de la IX región, razón por la cual se eligió esta zona para el estudio de la producción ganadera.

Melipeuco se caracteriza por poseer suelos de tipo volcánico, en su mayoría trumaos de lomajes, de fertilidad baja a moderada, textura media y buen drenaje (Granzotto del Pe y otros, 1984; Catrileo, 2005). Pese a las excelentes propiedades físicas del suelo, su uso agrícola se ve seriamente limitado por la alta capacidad de fijación de sus coloides inorgánicos (Ruiz, 1988). Los datos climáticos para la línea de base se muestran en el cuadro A4c.1.

CUADRO A4c.1
PRINCIPALES VARIABLES CLIMÁTICAS PARA LA ZONA DE MELIPEUCO
DURANTE EL PERÍODO LÍNEA DE BASE

Parámetros ^a	ENE	FEB	MAR	ABR	MAYO	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Tmáx (°C)	16	15,2	13	10	7	4,8	4	4,4	6,3	9,3	12,6	15,1	9,8
Tmín (°C)	2,5	2,3	1,9	1,2	0,6	0,2	0	0,2	0,2	0,9	1,6	2,3	1,2
Tmed (°C)	8,8	8,4	7,1	5,4	3,6	2,4	1,9	2,2	3,1	4,9	6,8	8,3	5,2
Pp (mm)	108,6	101,8	170,8	284,6	642,9	711,1	633,7	510,7	331,7	208,2	167	129,2	4 000,3

Fuente: Elaboración propia.

^a Información entregada por AGRIMED.

Caso 2: pequeño productor mixto leche/carne Cudico

Como segundo caso, se evaluó a un pequeño productor con un rebaño de alrededor de 30 cabezas bajo un sistema de producción de leche de una ordeña al día en la mañana, con ternero al pie que es separado de la madre durante la noche.

La zona de estudio, Cudico, pertenece a la comuna de La Unión, que posee 16.340 vacas lecheras, quedando como décima comuna del país. Un 25,6% del total de la superficie destinada a usos agropecuarios en La Unión son praderas naturales. La Provincia de Ranco, a la que pertenece Cudico, posee casi el 37% de las praderas naturales de la XIV región. La localidad de Cudico se encuentra en la cordillera de la costa y presenta suelos de tipo rojo arcillosos derivados de cenizas volcánicas, con bajo nivel de fertilidad, pH muy ácido (<5,1) y un nivel de erosión moderado (Ruiz, 1988).

Sus características físicas son poco deseables, por su alto contenido de arcilla de tipo plástica y adhesiva (más del 50% de arcilla) y su tendencia a formar pie de arado en el horizonte B (Torres, 1994). Es posible encontrar precipitaciones anuales que varían de 1.200 a 3.000 mm con una distribución de un 43% en invierno, 18% en primavera, 10% en verano y 29% en otoño. La distribución y cantidad de las precipitaciones en primavera y verano suelen ser irregulares (Torres, 1994). El crecimiento invernal de las praderas depende de las temperaturas, que en promedio son superiores a los 5 °C, siendo la nieve un fenómeno poco común. Los datos climáticos para la línea de base se muestran en el cuadro A4c.2.

CUADRO A4c.2
PRINCIPALES VARIABLES CLIMÁTICAS PARA LA ZONA DE CUDICO
DURANTE EL PERÍODO LÍNEA DE BASE

Parámetros ^a	ENE	FEB	MAR	ABR	MAYO	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Tmáx (°C)	22,8	22	19,8	16,8	13,8	11,6	10,8	11,2	13,1	16,1	19,4	21,9	16,6
Tmín (°C)	7,8	7,5	6,6	5,4	4,3	3,4	3,1	3,4	3,9	5,1	6,4	7,4	5,4
Tmed (°C)	14,6	14,1	12,6	10,6	8,6	7,2	6,6	7	8,1	10,1	12,3	14	10,5
Pp (mm)	39,9	35,9	61,9	94,6	179,2	189,9	176,1	138,8	108,2	69,1	59,7	46,8	1 200,1

Fuente: Elaboración propia.

^a Información entregada por AGRIMED.

Caso 3: productor ovino carne/lana Valle Simpson

En este tercer caso de estudio, se evaluó una producción de tamaño medio de 200 vientres en Valle Simpson de la XI región de Aysén. Valle Simpson es parte de la zona intermedia o valles cordilleranos de la región, ubicándose al sur de la ciudad de Coyhaique. La comuna de Coyhaique tiene 147.435 ovinos según el Censo agropecuario de 2007 (INE, 2007), pudiendo ser ubicada en el sexto lugar entre las comunas a nivel país y siendo la comuna con más ovinos fuera de la XII región. Aunque más de la mitad de las existencias ovinas de Chile se encuentran concentradas en la región de Magallanes (INE, 2007), se seleccionó el Valle Simpson como zona de estudio, ya que los pronósticos indican un aumento de la radiación y de las temperaturas para esta área geográfica, lo que favorecería la producción ovina por el aumento del potencial productivo de las praderas naturales.

Además, en la XI región existe un mayor número de productores pequeños y medianos (1.538 predios y 198 animales promedio por predio según el Censo agropecuario de 2007) comparado con la XII región en que hay menos predios y de mayor tamaño (544 predios y 4.054 animales promedio por predio). Asimismo, la comuna de Coyhaique tiene un 37% de la superficie destinada a usos agropecuarios de producción de praderas naturales, siendo la comuna de la XI región que más superficie y proporción tiene de estas praderas.

Los suelos de la zona intermedia son profundos, ligera a moderadamente ácidos (5,9-6,1), livianos y de tipo depositacional con una marcada discontinuidad litológica, inestables y susceptibles a diversos tipos de erosión (Ganderats, 2001). Esta zona tiene un déficit hídrico en cuatro meses, con 500 a 1.500 mm de precipitación anual. La pluviosidad disminuye rápidamente hacia las cuencas orientales con valores de 1.000-1.500 mm en los valles intermontanos a 500-700 mm en sectores de transición hacia la estepa fría (Ganderats, 2001). Los datos climáticos para la línea de base se muestran en el cuadro A4c.3 y corresponden a la zona occidental de la comuna de Coyhaique.

CUADRO A4c.3
PRINCIPALES VARIABLES CLIMÁTICAS PARA LA ZONA DE VALLE SIMPSON
DURANTE EL PERÍODO LÍNEA DE BASE

Parámetros ^a	ENE	FEB	MAR	ABR	MAYO	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Tmáx (°C)	17,8	16,9	14,5	11,2	8	5,6	4,7	5,1	7,3	10,6	14,1	16,8	11,1
Tmín (°C)	6,2	5,7	4,4	2,6	0,8	-0,5	-1	-0,5	0,4	2,2	4,1	5,6	2,5
Tmed (°C)	11,5	10,8	9	6,6	4,2	2,4	1,8	2,2	3,7	6,1	8,7	10,7	6,5
Pp (mm)	36,5	30,8	55,6	71,9	79,7	68,1	77,2	54,8	78,9	52,3	52,3	41,9	700

Fuente: Elaboración propia.

^a Información entregada por AGRIMED

Detalle de los casos de estudio

Caso Melipeuco

El rebaño modelo constó de 200 vientres bovinos destinados a producción de carne. Las pariciones se concentraron en 75 días, desde la segunda quincena de septiembre a finales de noviembre, para hacer coincidir la mayor disponibilidad y calidad de forrajes en estos meses con los más altos requerimientos de las vacas y el inicio del consumo de forrajes por parte de los terneros. Los parámetros reproductivos y de mortalidad que se usaron para estimar la composición del rebaño a lo largo del año se indican en el cuadro A4c.4. Se consideró que junto a la venta de terneros y animales de desecho, se vendió el número de vacas necesarias para mantener estable el número de cabezas en el rebaño.

CUADRO A4c.4
PARÁMETROS REPRODUCTIVOS Y DE MORTALIDAD
DEL REBAÑO BOVINO MELIPEUCO

Parámetro	Unidad
Reemplazo de vientres	20%
Fertilidad vaquillas	95%
Fertilidad vacas	89%
Terneros nacidos vivos	94%
Mortalidad estimada de vaquillas preencaste	2%
Mortalidad de vacas y vaquillas	2%
Mortalidad de terneros	4%

Fuente: Elaboración propia.

Durante la primera quincena de marzo, se realizó el destete y la venta de los terneros de 5 a 7 meses en la localidad de Freire. Los animales de desecho –vacas viejas, vacas o vaquillas que no han quedado preñadas o aquellas con problemas físicos– también fueron llevados a la feria. Para la venta de los animales se consideró un costo de transporte de \$ 180.000 por camión.

El período de encaste comenzó el 15 de diciembre y terminó a fines de febrero, momento en el que las vaquillas presentaron un peso promedio de 258 kg. El encaste se hizo por monta natural, tanto para las vacas como para las vaquillas. Los toros del rebaño fueron reemplazados cada tres años, para evitar problemas de consanguinidad en la masa. Los toros de reemplazo que se integraron al rebaño fueron adquiridos en un predio ganadero vecino como toretes de aproximadamente 8 meses y con 240 kg de peso vivo. Se estimó que el precio pagado por ellos corresponde al precio asignado a la categoría ternero, más un 10%.

El peso promedio de los terneros para cada mes se estimó utilizando los requerimientos según Agricultural and Food Research Council (AFRC, 1993) y considerando la disponibilidad de leche y la calidad de las praderas. El peso al nacimiento se estimó en 32 kg/ternero. La producción diaria de leche se estimó a partir de National Research Council (NRC, 2000). La máxima producción de leche de la vaca se consideró 10 kg/día, a las 8 semanas de lactancia. Para determinar la calidad de la pradera se clasificó el crecimiento de cada mes y el residuo del mes anterior de acuerdo con los parámetros indicados en el cuadro A4c.5.

Al crecimiento del mes se le asignó calidad 1, excepto en los meses de verano, donde se clasificó el crecimiento con calidad 2 debido a que las altas temperaturas provocan que las plantas se encañen rápidamente, lo que se traduce en una calidad inferior del forraje consumible. El residuo que queda del mes anterior se clasificó con una calidad en una unidad más baja, excepto en los meses de verano donde se consideró el residuo con una clasificación de calidad inferior en dos unidades, pero con un tope mínimo de calidad 4. Esto se justifica principalmente por la falta de precipitaciones y las altas temperaturas de los meses de verano que producen una mayor tasa de senescencia de la pradera. Para aquellos meses en que la pradera se hace insuficiente para cubrir los requerimientos de consumo de los animales, se dispuso de forraje conservado como heno que proviene de la misma pradera. A este heno se le asignó una calidad 3.

Por último, la calidad final del forraje consumido se determinó de acuerdo con las proporciones del consumo correspondiente al crecimiento del mes, residuo del mes anterior o heno, ponderado cada uno según la clasificación de calidad. La carga animal se ajustó de manera que no hubiese más de tres meses al año en que fuera necesario suplementar a los animales con heno.

Dentro de los costos, se consideraron los siguientes manejos sanitarios: vacunación de las terneras del rebaño a los 5 a 7 meses contra la brucelosis y a todo el rebaño contra el carbunco bacteridiano y clostridios. También se contempló la aplicación de antiparasitarios intestinales y fasciolidas (internos), y contra la mosca de los cuernos (externo) y un costo por tratamientos antibióticos y curativos.

CUADRO A4c.5
CLASIFICACIÓN DE LA CALIDAD UTILIZADA PARA ESTIMAR
LA COMPOSICIÓN DE LAS PRADERAS

	Clasificación de la pradera			
	Muy buena (1)	Buena (2)	Regular (3)	Mala (4)
EM (Mcal/kg MS)	2,5	2,3	2,1	1,9
FDN (%)	36	43	58	72
PC (%)	18	15	12	8

Fuente: Elaboración propia.

Como costo de fertilización se consideró el costo de aplicar urea, superfosfato triple y fosfato de potasio, que permitiera reponer a la pradera el equivalente de lo extraído por los animales que salen del predio a la venta.

Para realizar los manejos propios del predio se consideró un empleado permanente más mano de obra temporal según los manejos sanitarios y reparaciones necesarias. Para la mano de obra permanente se asignó un sueldo mensual de \$ 220.000 y para la mano de obra temporal un sueldo de \$ 12.000 por jornada de trabajo. Esto se hizo para poder estimar los costos totales, a pesar de que, en general, los sistemas ganaderos basados en praderas naturales corresponden a sistemas de tipo familiar en que el dueño del predio es quien lo trabaja.

En la infraestructura del predio se consideraron cercos perimetrales, cerco eléctrico, una manga, corrales y un galpón de guarda para los fardos. Se estimó que los recursos destinados a la mantención de esta infraestructura son de un 5% anual respecto de su valor total. Para el cálculo de depreciación se considera que los equipos y cercos se deprecian en diez años, mientras que los galpones se deprecian en 30 años.

Caso Cudico

El rebaño modelo consta de 18 vientres de tipo doble propósito, en un sistema de producción mixta de carne y leche con el ternero al pie de la vaca durante el día. Las pariciones se inician en la segunda quincena de agosto para aprovechar el crecimiento de primavera de las praderas en el período de mayor producción de leche de las vacas. Los parámetros reproductivos y de mortalidad que se usaron para estimar la composición del rebaño a lo largo del año se indican en el cuadro A4c.6. Se consideró que, junto a la venta de terneros y animales de desecho, se vendió un número de vacas necesarias para mantener estable el número de cabezas en el rebaño.

Durante la primera quincena de marzo se realizó el destete y la venta de los terneros en la localidad de Río Bueno. Las vacas o vaquillas que no quedaron preñadas también fueron llevadas a la feria. Para la venta de los animales se consideró un costo de transporte de \$ 36.000 por camión.

El período de encaste comenzó el 15 de noviembre y terminó a fines de enero, momento en el que las vaquillas presentan un peso promedio de 264 kg. El encaste se hizo por monta natural, tanto para las vacas como para las vaquillas. Los toros del rebaño se reemplazaron cada dos años. Los toros de reemplazo que se integraron al rebaño fueron adquiridos en algún predio ganadero vecino como torete de aproximadamente 8 meses y con 240 kg de peso vivo. Se estima que el precio pagado por ellos corresponde al valor asignado a la categoría ternero, más un 10%.

CUADRO A4c.6
PARÁMETROS REPRODUCTIVOS Y DE MORTALIDAD
DEL REBAÑO BOVINO DE CUDICO

Parámetro	Unidad
Reemplazo de vientres	27%
Fertilidad vaquillas	98%
Fertilidad vacas	75%
Terneros nacidos vivos	94%
Mortalidad estimada de vaquillas preencaste	2%
Mortalidad de vacas y vaquillas	2%
Mortalidad de terneros	4%

Fuente: Elaboración propia.

El peso promedio de los terneros para cada mes se estimó utilizando los requerimientos según AFRC (1993) y considerando la disponibilidad de leche y la calidad de las praderas. El peso al nacimiento se estimó en 35 kg/ternero. La producción diaria de leche se estimó a partir de AFRC (1993). La máxima producción de leche de la vaca se consideró de 17 kg/d a las 12 semanas de lactancia. Se planteó que el ternero consume durante siete meses un tercio de la leche producida por la vaca, pero con un mínimo de 4 kg/d durante los primeros tres meses de lactancia. La leche consumida por el ternero se descontó de la leche producida para determinar la leche que se vende.

Para establecer la calidad de la pradera, la carga animal, el costo de los manejos sanitarios, fertilización y mano de obra se utilizó el mismo sistema descrito anteriormente para Melipeuco. En la infraestructura de este predio se consideró una sala con un equipo de ordeña móvil para dos vacas, además de cercos perimetrales, cerco eléctrico, una manga, corrales y un galpón de guarda para los fardos. Para el cálculo de depreciación se consideró que la sala y el equipo de ordeña se deprecian en 20 años.

Caso Valle Simpson

El rebaño modelo consta de 200 vientres ovinos de raza Suffolk, cuyo objetivo productivo es la venta de corderos para carne. Las pariciones se inician desde la segunda quincena de octubre para terminar a mediados de diciembre. Los parámetros reproductivos y de mortalidad que se usaron para estimar la composición del rebaño a lo largo del año se indican en el cuadro A4c.7. Junto con la venta de corderos y animales de desecho se vendió el número de ovejas necesarias para mantener estable el número de cabezas del rebaño.

Durante el mes de marzo se realizó el destete de los corderos con 3 a 5 meses de edad, y en la segunda quincena de abril se procedió a su venta con 4 a 6 meses en la feria de Coyhaique. Para la venta de los animales se consideró un costo de transporte de \$ 90.000 por camión.

El período de encaste comenzó el 15 de mayo, momento en que las borregas presentan un peso promedio de 45 kg. El encaste se realiza por monta natural, tanto para las ovejas como para las borregas. Los carneros del rebaño son el 3,5% de los vientres totales y son reemplazados cada dos años. Los carneros comprados que se integran al rebaño son adquiridos en un predio ganadero vecino como carnerillo de aproximadamente 6 meses y con 40 kg de peso vivo. Se estima que el precio pagado por ellos corresponde al precio asignado a la categoría cordero, más un 10%.

El peso promedio de los carneros para cada mes se estimó utilizando los requerimientos según AFRC (1993) y considerando la disponibilidad de leche de las ovejas y la calidad de las praderas. El

CUADRO A4c.7
PARÁMETROS REPRODUCTIVOS Y DE MORTALIDAD
DEL REBAÑO OVINO DE VALLE SIMPSON

Parámetro	Unidad
Reemplazo de vientres	20%
Parición borregas	70%
Parición ovejas	84%
Nacidos vivos en borregas	110%
Nacidos vivos en ovejas	150%
Mortalidad de corderas seleccionadas	1,9%
Mortalidad de ovejas y borregas	4,0%
Mortalidad de corderos	12%

Fuente: Elaboración propia.

peso al nacimiento se estimó en 3,8 kg/cordero. La producción diaria de leche por oveja se estimó a partir de AFRC (1993).

Para determinar la calidad de la pradera, la carga animal, la mano de obra y el costo de fertilización se utilizó el mismo sistema que para Melipeuco. La esquila se hizo en enero y para ello se contrató un servicio externo. En ese momento también se hizo el despalde para evitar problemas de pudrición de la pezuña. También se aprovechó de pasar a las ovejas por un pediluvio con una solución de sulfato de cobre al 5%. Se consideró además dentro de los costos baños antisépticos dos veces al año. Las vacunas utilizadas fueron contra el carbunco bacteriano y clostridios en todos los vientres del rebaño, en los carneros y en las corderas seleccionadas como reemplazo. También se aplicaron antiparasitarios intestinales, fasciolicidas y contra la sarna (internos), así como contra piojos masticadores y chupadores y falsa garrapatas (externo). Además, se consideró un gasto en tratamientos antibióticos y curativos.

En la infraestructura del predio se consideraron cercos perimetrales, cerco eléctrico, una manga, corrales, un galpón de guarda de fardos, un galpón de encierre y esquila y un baño sanitario. Para las construcciones se determinó una depreciación en 30 años y para los corrales, cercos y equipos se consideró una depreciación en 10 años. Se consideró un gasto de 3% anual del valor de la inversión para la mantención de la infraestructura y equipos.

C. Resultados y discusión

1. Evaluación productiva

Utilizando los datos entregados por AGRIMED para cada localidad –biomasa en pie en la pradera natural sin utilización por el ganado (véase el gráfico A4c.1)– se calculó la tasa de crecimiento de materia seca promedio para cada mes del año. Las tasas de descarga de la pradera fueron más altas de lo esperado que para praderas permanentes. Considerando esto y que la mayor parte de la pradera es consumida por los animales y no queda expuesta a procesos de degradación natural, se decidió trabajar sobre la base de tasas de acumulación positivas. En aquellos meses en que la tasa de acumulación de la pradera sin animales fue negativa, ese valor se igualó a cero.

El gráfico A4c.2 muestra las tasas de acumulación de materia seca por hectárea para las comunas en que se encuentra cada localidad. La tasa fue estimada a partir de los datos de AGRIMED y con las correcciones antes señaladas. Para ambos escenarios en las comunas de La Unión (caso Cudico) y Coyhaique (caso Valle Simpson), se observa que el crecimiento primaveral de las praderas naturales tiende a adelantarse en su inicio y en su término, mientras que el crecimiento de otoño se inicia más o menos en las mismas fechas, pero tiende a prolongarse. Estos cambios se traducen en un invierno más corto y un verano seco más prolongado.

En Melipeuco, existe un quiebre importante en el patrón de cambio entre los períodos 2010-2040 y 2040-2070 en el escenario A. En los dos primeros períodos se observa una curva de crecimiento centrada en los meses de verano con su nivel más alto en la primera mitad de diciembre, y para los dos períodos finales se observan dos curvas de crecimiento, una centrada en octubre y la otra en marzo. La curva de crecimiento para la línea de base parece ser consistente con los datos climáticos entregados por AGRIMED para ese mismo período, particularmente la abundancia de precipitación y una temperatura media mayor a 5 °C entre noviembre y abril (véase el cuadro A4c.1).

Sin embargo, los datos de temperaturas medias entre los años 1960 y 1990 obtenidos en la base de datos del modelo PRECIS más cercanos a Melipeuco (en <http://mirasol.dgf.uchile.cl/conama/>) muestran temperaturas medias más altas en verano y más bajas en invierno. Los reportes de precipitaciones anuales de la zona fluctúan entre 1.900 y 2.500 mm anuales (Granzotto del Pe y otros, 1984; Ruiz, 1988;

Catrileo, 2005), muy por debajo de los 4.000 mm utilizados en la modelación. Varios estudios indican que la mayor parte de la producción de las praderas de la zona se concentra durante la primavera. Granzotto del Pe y otros (1984) reportan que un 48% de la producción total ocurre durante la primavera, mientras que Rojas (2004) sitúa este porcentaje en un 55,9%. Catrileo (1993) señala que las praderas de la zona comienzan a secarse a partir del mes de diciembre y se recuperan con las primeras lluvias de otoño.

Estos antecedentes llevan a pensar que los datos en los períodos línea de base y 2010-2040 tienen algún tipo de anomalía que provoca las marcadas diferencias entre las curvas de crecimiento de las praderas entre los períodos 2010-2040 y 2040-2070. Sin embargo, quienes produjeron la información de acumulación de biomasa en las praderas señalaron que no había ningún error en los datos y los autores consideraron no tener las herramientas adecuadas para hacer correcciones, por lo que los datos fueron utilizados sin cambios.

La producción anual de praderas en el período línea de base para Valle Simpson fue la más alta con 6.145 kg MS/ha/año (MS: materia seca). Con esa productividad se estimó que un rebaño de 200 vientres necesita una superficie de praderas de 33 ha con una carga animal de 6,85 UA/ha (UA: oveja de 60 kg de peso vivo). Melipeuco mostró una producción primaria intermedia (4.795 kg MS/ha) y Cudico la más baja (3.500 kg/ha). En estos últimos casos, la superficie necesaria de praderas correspondió a 334,6 y 44,4 ha y las cargas animales a 0,71 y 0,50 UA/ha (UA: vaca de 500 kg de peso vivo), respectivamente.

El modelo utilizado para estimar el crecimiento de las crías y la producción de leche permitió obtener estimaciones realistas del peso de las crías según sus requerimientos energéticos y del suministro de nutrientes desde la leche materna y la pradera (véase el cuadro A4c.8).

En el cuadro A4c.9 se muestra un cuadro resumen con las principales características productivas de los tres casos estudiados en el período línea de base, donde además se señala la producción secundaria (carne, leche o lana, según corresponda) obtenida en un año.

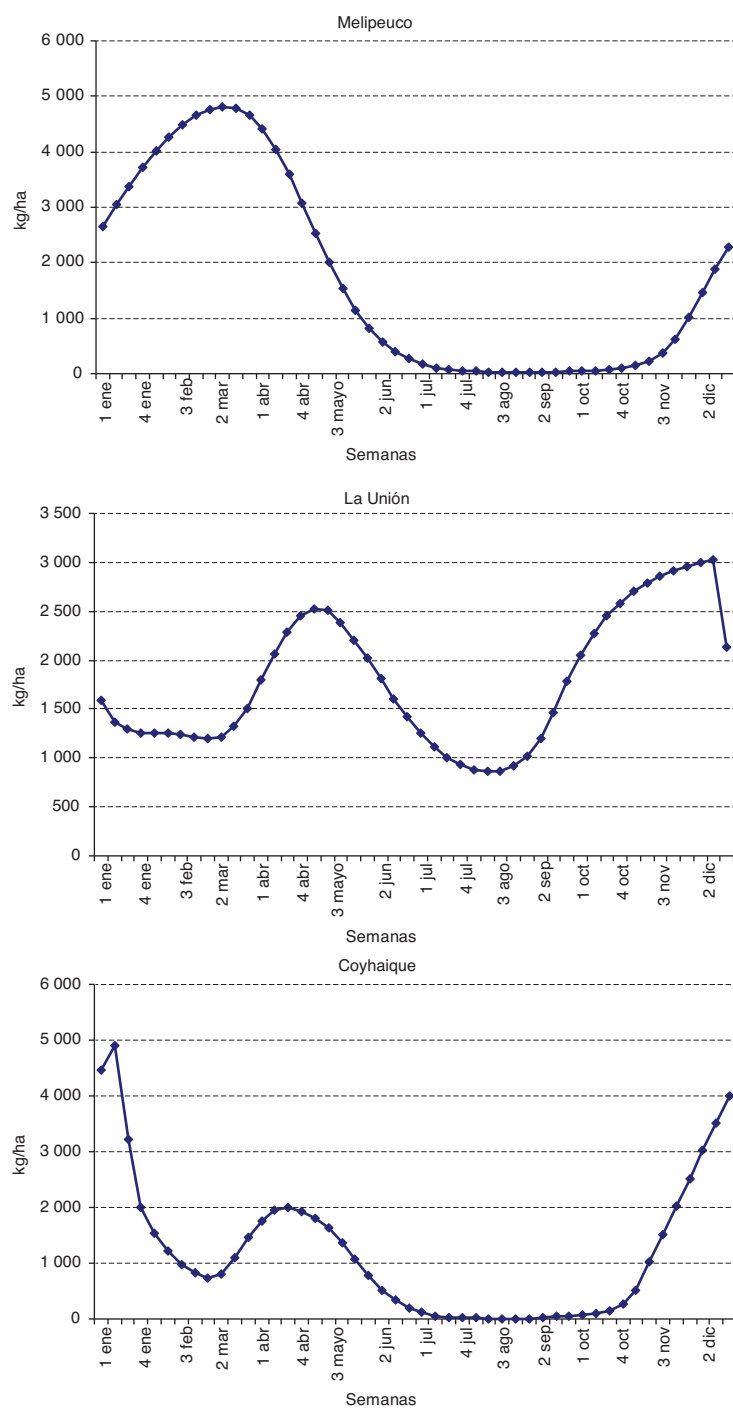
A partir de los datos de crecimiento de las praderas naturales en los diferentes períodos, se estimaron los cambios en la producción total de la pradera y su capacidad para alimentar los rebaños antes descritos. Como se mencionó anteriormente, para el caso Melipeuco se observó que los períodos línea de base y 2010-2040 son similares entre sí, con un pequeño aumento en la producción anual y un máximo crecimiento de la pradera en el mes de diciembre (véase el gráfico A4c.2a). En cambio, durante los períodos 2040-2070 y 2070-2100 se ve que las curvas de producción se dividen en un crecimiento de primavera y otro de otoño, y que la producción anual cae en más de 1.500 kg de materia seca por hectárea. Tanto la carga animal como la producción de carne por hectárea siguen un patrón de cambio similar (véase el cuadro A4c.10).

En el caso Cudico se observa un cambio más gradual a lo largo del tiempo en ambos escenarios. La estación de crecimiento primaveral tiende a adelantarse, mientras que el crecimiento de otoño se alarga ligeramente, pero alcanza además tasas de crecimiento mensuales más altas. Este comportamiento se repite en el caso Valle Simpson, donde se acentúa más aún el desplazamiento del crecimiento primaveral hacia fines de invierno (véanse los gráficos A4c.2a y A4c.2b).

En el escenario A, la producción anual de praderas se incrementa en Cudico desde la línea de base hasta el período 2040-2070 y presenta un ligero retroceso en el período 2070-2100, para llegar a valores similares al período 2010-2040 (véase el cuadro A4c.11). En el escenario B, se ve un aumento en la producción de las praderas para ambos períodos estudiados. La carga animal y la producción de carne siguen la misma tendencia.

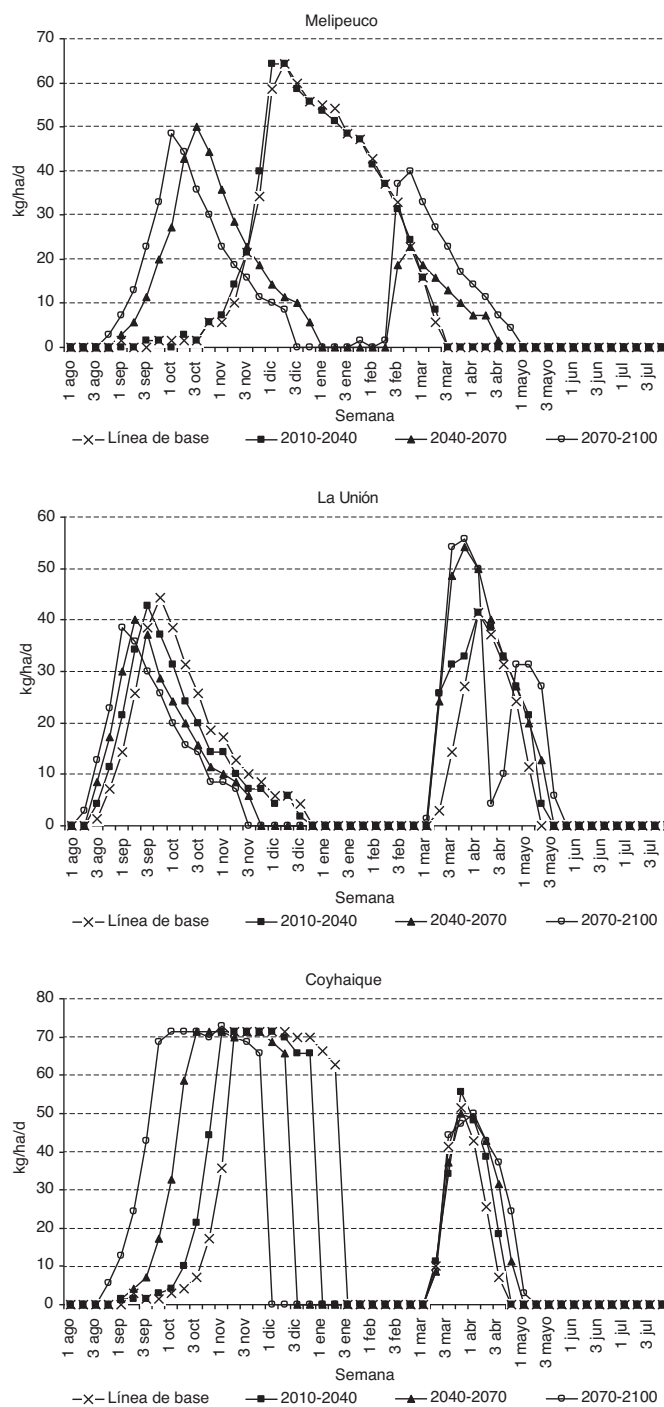
En Valle Simpson en cambio, en el escenario A se observa una caída en la productividad por hectárea entre la línea de base y el período 2010-2040 para luego recuperarse y alcanzar los niveles más altos en el período 2070-2100 (véase el cuadro A4c.12). De forma similar, en el escenario B la

GRÁFICO A4c.1
ACUMULACIÓN DE MATERIA SECA EN PIE A PARTIR DEL MES DE AGOSTO
PARA LAS COMUNAS EN QUE SE ENCUENTRA CADA LOCALIDAD
(En kg/ha)



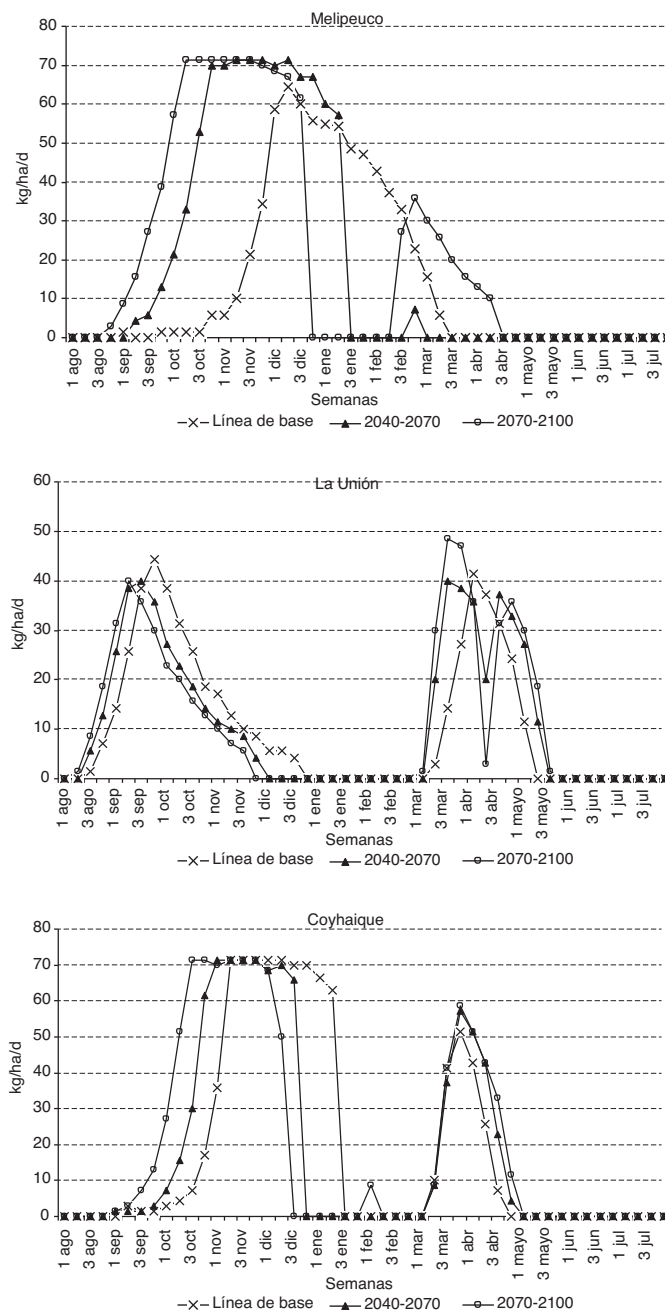
Fuente: Sobre la base de los datos de AGRIMED para el período histórico (línea de base).

GRÁFICO A4c.2a
TASAS DE ACUMULACIÓN DE MATERIA SECA A PARTIR DEL MES DE AGOSTO
PARA LAS COMUNAS EN QUE SE ENCUENTRA CADA LOCALIDAD EN EL
ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO A
(En kg/ha/d)



Fuente: Tasas estimadas sobre la base de los datos de AGRIMED para el período histórico (línea de base) y los períodos 2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100.

GRÁFICO A4c.2b
TASAS DE ACUMULACIÓN DE MATERIA SECA A PARTIR DEL MES DE AGOSTO
PARA LAS COMUNAS EN QUE SE ENCUENTRA CADA LOCALIDAD EN EL
ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO B
(En kg/ha/d)



Fuente: Tasas estimadas sobre la base de los datos de AGRIMED para el período histórico (línea de base) y los períodos 2040-2070 y 2070-2100.

CUADRO A4c.8**RESUMEN DE LAS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS ANIMALES DE CADA PREDIO PARA LOS TRES CASOS ESTUDIADOS EN EL PERÍODO LÍNEA DE BASE**

Localidad	Hembras reproductoras ^a	Peso promedio hembra adulta (kg)	Peso ternero 7 meses ^b (kg)	Peso cordero 5 meses ^b (kg)	Producción de leche ^c (kg/vaca)
Melipeuco	200	430	222	-	-
Cudico	18	440	163	-	2 991
Valle Simpson	200	57,1	-	40,9	-

Fuente: Elaboración propia.

^a En Melipeuco y Cudico corresponde al número de vacas y vaquillas y en Valle Simpson corresponde al número de ovejas y borregas.

^b Estimado según los requerimientos de energía del animal y del suministro de energía del forraje y la leche de la madre.

^c Producción de leche en diez meses de lactancia. Estimado según los requerimientos de energía del animal y del suministro de energía del forraje.

CUADRO A4c.9**RESUMEN DE LAS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS PRODUCTIVAS DE LOS PREDIOS PARA LOS TRES CASOS ESTUDIADOS EN EL PERÍODO LÍNEA DE BASE**

Localidad	Producción praderas (kg MS/ha)	Superficie praderas (ha)	Carga animal ^a (UA/ha)	Producción peso vivo (kg/ha/año)	Producción leche (kg/ha/año)	Producción de lana (kg/ha/año)
Melipeuco	4 795	334,6	0,71	129	-	-
Cudico	3 500	44,4	0,50	83	875	-
Valle Simpson	6 145	33,0	6,85	260	-	14,4

Fuente: Elaboración propia.

^a En bovinos una unidad animal equivale a una vaca de 500 kg, mientras que en ovinos una unidad animal equivale a una oveja de 60 kg.

CUADRO A4c.10**RESUMEN DE LAS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS PRODUCTIVAS DEL CASO MELIPEUCO EN LOS DISTINTOS PERÍODOS DE ESTUDIO**

Período	Escenario	Producción praderas ^a (kg MS/ha)	Carga animal ^b (UA/ha)	Producción de carne ^c (kg/ha)
Línea de base		4 795	0,71	129
2010-2040	A	4 885	0,71	130
2040-2070	A	3 260	0,46	86
2070-2100	A	3 790	0,54	101
2040-2070	B	6 190	0,88	160
2070-2100	B	7 160	1,02	186

Fuente: Elaboración propia.

^a Producción de materia seca en la pradera durante el año.

^b UA: unidades animales. En bovinos una unidad animal equivale a una vaca de 500 kg.

^c Corresponde al peso vivo de los animales vendidos anualmente.

CUADRO A4c.11
RESUMEN DE LAS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS PRODUCTIVAS
DEL CASO CUDICO EN LOS DISTINTOS PERÍODOS DE ESTUDIO

Período	Escenario	Producción praderas ^a (kg MS/ha)	Carga animal ^b (UA/ha)	Producción de carne ^c (kg/ha)	Producción de leche ^d (kg/ha)
Línea de base		3 500	0,50	83	875
2010-2040	A	3 833	0,54	75	887
2040-2070	A	3 970	0,57	82	983
2070-2100	A	3 780	0,55	78	939
2040-2070	B	3 770	0,54	77	923
2070-2100	B	3 800	0,54	78	935

Fuente: Elaboración propia.

^a Producción de materia seca en la pradera durante el año.

^b UA: unidades animales. En bovinos una unidad animal equivale a una vaca de 500 kg.

^c Corresponde al peso vivo de los animales vendidos anualmente.

^d Kilogramos de leche fluida producida durante una lactancia de diez meses.

CUADRO A4c.12
RESUMEN DE LAS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS PRODUCTIVAS
DEL CASO VALLE SIMPSON EN LOS DISTINTOS PERÍODOS DE ESTUDIO

Período	Escenario	Producción praderas ^a (kg MS/ha)	Carga animal ^b (UA/ha)	Producción de carne ^c (kg/ha)	Producción de lana (kg/ha)
Línea de base		6 145	6,85	260	14,4
2010-2040	A	5 970	6,51	248	13,7
2040-2070	A	6 390	7,03	268	14,8
2070-2100	A	6 810	7,54	287	15,9
2040-2070	B	5 850	6,43	245	13,6
2070-2100	B	6 330	6,97	266	14,7

Fuente: Elaboración propia.

^a Producción de materia seca en la pradera durante el año.

^b UA: unidades animales. En ovinos una unidad animal equivale a una oveja de 60 kg.

^c Corresponde al peso vivo de los animales vendidos anualmente.

productividad de las praderas cae en el período 2040-2070, para luego alcanzar valores mayores a la línea de base en el período 2070-2100. Nuevamente la carga animal y la producción secundaria siguen el mismo patrón de cambio que la producción de biomasa en la pradera.

a) Evaluación económica

La evaluación económica de los casos arrojó valores positivos para Melipeuco y Cudico, aunque los márgenes son pequeños y no consideran el valor alternativo del uso de la tierra. Los sistemas ganaderos basados en praderas naturales por lo general son manejados por el dueño del predio en un sistema de producción familiar. En la mayor parte de estos casos, la venta o arriendo de la tierra no es una opción ya que el dueño no está dispuesto a dejarla.

El análisis económico para Melipeuco sigue un patrón similar al observado para las características productivas (véase el cuadro A4c.13). En él, se observa un quiebre entre los períodos 2010-2040 y 2040-2070 del escenario A, con una caída en los márgenes de un 54% y una recuperación

significativa en el período 2070-2100, aunque no lo suficiente para recuperar los valores del período de línea de base. La caída en los márgenes se debe principalmente a una disminución de los ingresos por una reducción en los kilos de carne producidos. En el escenario B los márgenes para ambos períodos son mayores que en el período de línea de base.

Para el caso de Cudico, los márgenes más altos se alcanzan en el período 2040-2070 en el escenario A y 2070-2100 en el escenario B (véase el cuadro A4c.14). El aumento en los márgenes se debe principalmente a un incremento en los ingresos, ya que los costos se mantienen estables. La caída en los márgenes del último período del escenario A se debe principalmente a una disminución en la capacidad de carga del predio, que disminuye el total de leche vendida y la venta de terneros y animales de descarte.

El caso de estudio Valle Simpson fue el único que mostró márgenes negativos. El peor resultado económico en el escenario A se obtuvo en el período de línea de base con una importante reducción de las pérdidas (31,9%) hacia el período 2070-2100 (véase el cuadro A4c.15). En cambio en el escenario B el período con mayores pérdidas fue 2040-2070. La existencia de márgenes negativos podría explicarse por el pequeño tamaño del predio estudiado y por la inclusión dentro de los costos del contrato de una persona permanente más algunas jornadas de mano de obra temporal. Por lo general, en un predio de estas características, son el dueño y su familia los que lo trabajan directamente y no existe un trabajador asalariado, por lo que el sueldo que se consideró como costo queda en manos del dueño. Además, este tipo de agricultores familiares muchas veces tienen otras fuentes de ingreso directas o indirectas.

Finalmente, la depreciación corresponde a cerca de la mitad del margen negativo para cada período, pero es común que los agricultores pequeños consideren solo los flujos de caja para determinar si permanecen en una actividad específica. Esto se debe a que la construcción de infraestructura nueva o la compra de equipos es ocasional, después de años en que las condiciones climáticas y de precios

CUADRO A4c.13
RESUMEN DE LAS PRINCIPALES VARIABLES ECONÓMICAS DEL CASO
MELIPEUCO EN LOS DISTINTOS PERÍODOS DE ESTUDIO
(En pesos)

Escenario A	Línea de base	Período		
		2010-2040	2040-2070	2070-2100
Ingresos	21 164 164	21 354 009	14 142 501	16 651 532
Costos directos	9 441 927	9 553 125	7 542 894	6 969 197
Costos indirectos	820 484	820 484	820 484	820 484
Depreciación	2 056 101	2 056 101	2 056 101	2 056 101
Margen bruto	8 845 653	8 924 300	3 723 023	6 805 751
Margen bruto por hectárea	26 440	26 672	11 127	20 340
Cambio en margen por hectárea	—	0,9%	-57,9%	2,3%
Escenario B				
Ingresos	—	—	26 274 551	30 601 910
Costos directos	—	—	14 296 206	13 824 470
Costos indirectos	—	—	820 484	820 484
Depreciación	—	—	2 056 101	2 056 101
Margen bruto	—	—	9 101 761	13 900 855
Margen bruto por hectárea	—	—	27 202	41 545
Cambio en margen por hectárea	—	—	2,9%	57,1%

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO A4c.14
RESUMEN DE LAS PRINCIPALES VARIABLES ECONÓMICAS DEL CASO CUDICO
EN LOS DISTINTOS PERÍODOS DE ESTUDIO
(En pesos)

Escenario A	Línea de base	Período		
		2010-2040	2040-2070	2070-2100
Ingresos	7 527 352	7 403 932	8 190 182	7 824 423
Costos directos	5 123 934	4 999 651	5 147 844	5 088 923
Costos indirectos	503 374	481 820	491 531	488 470
Depreciación	907 439	885 926	896 094	892 859
Margen bruto	992 604	1 036 536	1 654 714	1 354 170
Margen bruto por hectárea	22 332	23 319	37 226	30 465
Cambio en margen por hectárea	—	4,4%	66,7%	36,4%
Escenario B				
Ingresos	—	—	7 693 838	789 141
Costos directos	—	—	5 117 642	5 083 948
Costos indirectos	—	—	496 623	488 355
Depreciación	—	—	900 948	892 723
Margen bruto	—	—	1 178 625	1 324 114
Margen bruto por hectárea	—	—	26 516	29 789
Cambio en margen por hectárea	—	—	18,7%	33,4%

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO A4c.15
RESUMEN DE LAS PRINCIPALES VARIABLES ECONÓMICAS DEL CASO
VALLE SIMPSON EN LOS DISTINTOS PERÍODOS DE ESTUDIO
(En pesos)

Escenario A	Línea de base	Período		
		2010-2040	2040-2070	2070-2100
Ingresos	5 783 952	5 502 311	5 950 246	6 387 519
Costos directos	6 050 520	5 756 116	6 094 408	6 104 684
Costos indirectos	457 334	423 280	462 796	465 717
Depreciación	935 174	896 350	941 755	946 417
Margen bruto	-1 659 076	-1 573 436	-1 548 712	-1 129 298
Margen bruto por hectárea	-50 219	-46 236	-46 931	-34 221
Cambio en margen por hectárea	—	7,9%	6,5%	31,9%
Escenario A				
Ingresos	—	—	5 447 911	5 921 641
Costos directos	—	—	5 953 862	6 036 325
Costos indirectos	—	—	444 927	455 957
Depreciación	—	—	920 167	933 986
Margen bruto	—	—	-1 871 045	-1 504 627
Margen bruto por hectárea	—	—	-56 698	-45 595
Cambio en margen por hectárea	—	—	-12,9%	9,2%

Fuente: Elaboración propia.

permiten una entrada importante de capital, y una vez hecho el gasto es considerado simplemente como un costo hundido.

En todo caso, la condición de rentabilidad negativa predicha en este estudio para el período de línea de base se ha visto reflejada en la tendencia observada al reemplazo de ganado ovino por ganado bovino en la XI región entre los años 1997 y 2007, indicada por los censos agropecuarios del INE. Entre estos años la región ha disminuido su masa ovina en un 10% (desde 337.565 a 304.936 cabezas) y ha aumentado su masa bovina en un 15% (desde 168.770 a 193.802 cabezas), lo que sugiere que la producción de carne bovina sería una alternativa más rentable.

b) Manejos de adaptación

Dado que la ganadería basada en el uso de praderas naturales en Chile es mayoritariamente de bajos insumos y tecnología, se consideró pertinente buscar medidas de adaptación que no requirieran grandes inversiones de capital. Además, debido a que, en general, se apreció que las predicciones de productividad y cambios en los márgenes económicos eran beneficiosos para estos sistemas, se evaluaron medidas de manejo técnicamente sencillas de implementar por productores del tipo agricultura familiar campesina.

Caso Melipeuco

Ya que el inicio del crecimiento de las praderas se adelanta dos meses entre los períodos de línea de base y 2070-2100, se evaluó el efecto de adelantar el comienzo de la fecha de parto desde mediados de septiembre a mediados de julio en el período 2070-2100.

En el escenario A, este manejo exige reducir la carga animal de 0,54 a 0,51 UA/ha al aumentar considerablemente las necesidades de henificación, ya que se requiere conservar una mayor cantidad de forraje para alimentar a los terneros durante un verano seco más prolongado. Como resultado el margen por hectárea disminuye desde \$ 20.340 a \$ 8.432.

En el escenario B, adelantar los partos requiere una reducción de la carga animal desde 1,02 a 0,97 UA/ha. Sin embargo, la mejor sincronía entre el crecimiento de la pradera y los requerimientos de los animales disminuyen considerablemente los costos de henificación, ya que en este escenario la estación sin crecimiento estival dura solo seis semanas. Como resultado, adelantar los partos produce un aumento en el margen económico desde \$ 41.545 a \$ 51.088.

A continuación, se evaluó el efecto de mantener la fecha de parto y transformar el sistema a uno basado solo en pastoreo. Optimizando el pastoreo fue posible conservar una carga de 0,54 UA/ha en el escenario A y 1,02 UA/ha en el escenario B. Los meses críticos fueron agosto y septiembre, respectivamente, coincidentes con la baja producción de forraje durante el invierno y el término del forraje en pie disponible para el pastoreo. El cambio a una estrategia basada en pastoreo permitió un aumento del margen a \$ 26.655/ha en el escenario A y \$ 59.958/ha en el escenario B, sobre todo por la importante reducción del costo de henificación.

Caso Cudico

Al igual que en el caso Melipeuco, se evaluó el efecto de adelantar las fechas de parto en el período 2070-2100, debido al inicio más temprano del crecimiento de las praderas. Se adelantó el inicio de los partos desde mediados de agosto a mediados de julio. El efecto de este manejo es que la carga animal que soporta el predio se reduce de 0,55 a 0,54 UA/ha en el escenario A y se mantiene en 0,54 UA/ha en el escenario B. Esta estrategia produce cambios menores en la productividad del predio para ambos escenarios: aumenta los kilos a la venta de terneros y disminuye la producción de leche. El efecto final es que el margen de utilidades se reduce levemente (1%) en el escenario A y se mantiene en el escenario B.

Se consideró además la posibilidad de entregar a las vacas 1 o 2 kg de concentrado por día durante la ordeña (contenido de EM –energía metabolizable– de 2,8 Mcal/kg MS, precio por kg \$ 126), durante los primeros cuatro meses de la lactancia. En el escenario A la producción de leche aumentó de 2.942 a 2.961 y 2.981 kg/lactancia/vaca, respectivamente, y el margen de utilidad cambió desde \$ 30.465 /ha a \$ 31.378 /ha con 1 kg de concentrado y a \$ 32.267 /ha con 2 kg de concentrado. En el escenario B, la producción de leche aumentó de 2.944 a 2.963 y 2.983 kg/lactancia/vaca, respectivamente, y el margen de utilidad cambió desde \$ 29.789 /ha a \$ 30.663 /ha con 1 kg de concentrado y a \$ 31.545 /ha con 2 kg de concentrado. No se evaluó la posibilidad de entregar más de 2 kg de concentrado, ya que se consideró que dejaría de representar las características propias del sistema productivo descrito.

A continuación, se evaluó el efecto de convertir el sistema en uno basado completamente en pastoreo. En este caso la carga animal subió de 0,55 a 0,56 UA/ha en el escenario A y de 0,54 a 0,56 UA/ha en el escenario B. El cambio a este sistema disminuye la productividad de leche por vaca, pero aumenta los kilos de peso vivo vendidos y los kilos de leche vendidos por hectárea. Además, los costos de henificación desaparecen, lo que produce un aumento del margen por hectárea de \$ 30.465 a \$ 43.425 en el escenario A y de \$ 29.789 a \$ 43.008 en el escenario B.

Caso Valle Simpson

Nuevamente se evaluó el efecto de adelantar las fechas de parto de forma similar a como se adelanta el crecimiento primaveral de las praderas. Se adelantó el inicio de los partos desde la segunda mitad de octubre hasta la segunda mitad de agosto.

Bajo este manejo, en el escenario A es posible aumentar la carga animal de 7,54 a 7,57 UA/ha. La producción de peso vivo y lana por hectárea se mantiene, pero los costos de henificación caen en aproximadamente \$ 560.000. El resultado final es una reducción en las pérdidas desde \$ 34.221 /ha a \$ 13.684 /ha. En el escenario B, es posible aumentar la carga desde 6,97 a 7,17 UA/ha y reducir los costos de henificación en \$ 489.927. Al igual que en el escenario A, la producción de peso vivo y lana por hectárea se mantiene, con lo que la pérdida por hectárea se reduce de \$ 45.595 a \$ 29.818.

Si se transforma el sistema a uno sin conservación de forraje y con la fecha de parto ajustada como se indicó en el párrafo anterior, es posible aumentar la carga animal de 7,54 a 7,59 UA/ha en el escenario A, mientras que la carga se reduce de 7,17 a 7,05 UA/ha en el escenario B. Este cambio no altera mayormente la producción de peso vivo y lana por hectárea, pero el costo de henificación desaparece. El resultado es que en el escenario A las pérdidas se ven reducidas a un 21% del valor inicial alcanzando ahora \$ 7.421 /ha, mientras que en el escenario B se reducen a un 45% del original alcanzando \$ 20.584.

D. Conclusiones

El análisis de los tres casos estudiados indica que el mayor efecto que se espera sobre la producción de las praderas naturales de la zona centro-sur del país es un cambio en la estacionalidad del crecimiento. El crecimiento primaveral tendería a iniciarse y a terminar antes. El crecimiento otoñal se iniciaría en fechas muy similares a las actuales, pero podría alargarse levemente hacia el invierno y tendería a alcanzar tasas máximas de producción más altas. Como consecuencia, se esperan períodos de bajo crecimiento invernal más cortos y períodos de bajo crecimiento estival más largos.

La producción total de biomasa en las praderas naturales en general tendería a aumentar, aunque dependiendo de la zona, podría haber reducciones de crecimiento en algunos períodos. La carga animal que cada predio puede soportar para mantener un balance entre el crecimiento y el consumo de la pradera seguiría el mismo patrón de cambio que la producción total de biomasa.

Los cambios en estacionalidad y productividad de las praderas en los sistemas estudiados, en general, no provocarían grandes caídas en su rentabilidad. Más aún, en la mayor parte de los casos los efectos del cambio climático serían positivos. En todo caso, debe destacarse que este estudio se realizó con valores de productividad promedio para los períodos y no considera la incertidumbre de precipitación ni temperatura.

Los manejos de adaptación al cambio climático estudiados tendrían efectos distintos según cada caso. Adelantar la fecha de parto sería beneficioso siempre que eso requiera más heno para suplementar a los animales durante el período estival. Reducir la conservación de forraje en forma de heno sería beneficioso en un año promedio. Sin embargo, este último manejo aumenta el riesgo de quedar sin alimento para los animales en los meses críticos, especialmente en años en que los regímenes de temperatura y pluviometría reduzcan las tasas de crecimiento de las praderas o modifiquen su estacionalidad.

Bibliografía

- AFRC (Agricultural and Food Research Council) (1993), “Energy and Protein Requirements of Ruminants”, CAB International, Wallingford, Reino Unido.
- Catrileo, A. (2005), “Producción y manejo de carne bovina en Chile, Instituto de Investigaciones Agropecuarias”, Centro Regional de Investigación Carillanca, Temuco, Chile.
- ____ (1993), “Establecimiento y manejo de praderas para producción de leche y carne”, Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Centro Regional de Investigación Carillanca, Temuco, Chile.
- Ehijos, J. (1992), “Engorda intensiva de corderos en praderas naturales fertilizadas en la zona intermedia de Aysén”, tesis de grado en ciencias agrarias, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
- Ganderats, S. (2001), “Antecedentes sobre la producción de praderas en Aysén”, *Boletín INIA*, N° 69, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Coyhaique, Chile.
- Granzotto del Pe, A. y otros (1984), “Sistema de producción con ganado Hereford en praderas naturales [*Agrostis tenuis*, *Holcus lanatus*, *Lolium perenne*, *Plantago lanceolata*, *Hipochaeris radicata*] de la precordillera andina de Cautín”, *Agricultura Técnica*, vol. 44, N° 2, abril-junio.
- INE (Instituto Nacional de Estadísticas) (2007), “Resultados del VIII Censo Nacional Agropecuario” [en línea] <http://www.censoagropecuario.cl/noticias/09/07042009.html> [fecha de consulta: 9 de diciembre de 2010].
- ____ (1997), “VI Censo Nacional Agropecuario, resultados preliminares”, Santiago de Chile.
- Ministerio de Agricultura (2008), “Cambio climático, medio ambiente y agua”, *Nuestra Tierra*, 254 [en línea] www.fucoa.gob.cl.
- NRC (National Research Council) (2000), “Nutrient Requirements of Dairy Cattle”, National Academy Press, Washington, D. C. Estados Unidos.
- ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, Ministerio de Agricultura) (2010) [en línea] <http://www.odepa.gob.cl/>.
- Rojas, C. (2004), “Concentración de partos”, *Manual de producción de bovinos de carne para la VII, IX y X Regiones*, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Temuco, Santiago de Chile.
- Ruiz, I. (1988), *Praderas para Chile*, Santiago de Chile, Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Torres, A. (1994), “Producción de forrajes y potencial de las áreas agroecológicas de la décima región”, seminario Corrección de la fertilidad y uso de enmiendas en praderas y cultivos forrajeros, Osorno, Chile, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Estación Experimental Remehue.

Apéndice IVd

Impactos económicos y sociales en el sector silvoagropecuario

A. Introducción

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) indica que numerosos sistemas ecológicos se ven afectados por cambios en el clima regional, debido a las variaciones en los patrones de temperatura, lluvia y concentración de CO₂ (2007). En relación con los impactos del cambio climático, se prevé un incremento en los costos en la agricultura –asociados a sistemas de riego tecnificado–, una pérdida de biodiversidad y masa forestal, elevación del nivel del mar, enfermedades, costos energéticos, costos por migraciones, desastres naturales, pérdidas en actividades recreativas y problemas de suministro de agua, entre otros (Padilla, 2006). Con esto, se espera que toda actividad relacionada con los fenómenos naturales se vea afectada en alguna medida. De lo anterior, se desprende que la actividad silvoagropecuaria es un sector que se verá influenciado por el cambio climático, ya que muchas de sus actividades dependen directa e indirectamente de los fenómenos climáticos. De esta forma, el cambio climático podría alterar los rendimientos de los cultivos, su distribución geográfica y los precios de sus productos (véase el cuadro A4d.1).

En este contexto, la estimación de impacto del cambio climático sobre la agricultura es una actividad crucial a fin de adoptar estrategias de prevención, adaptación y mitigación de sus efectos. Asimismo, la evaluación socioeconómica del impacto del cambio climático permitirá apoyar a las autoridades a establecer cómo, dónde y cuándo aplicar dichas estrategias (Parry, Rosenzweig e Iglesias, 1998). Para desarrollar el estudio de impacto económico en el sector silvoagropecuario es necesario contar con estimaciones de rendimientos esperados de las especies cultivadas en cada escenario de cambio climático y estimar los ingresos netos esperados. Con esto, se estima un modelo de asignación de tierras que depende de la relación entre los ingresos netos por hectárea de las distintas especies cultivadas. Con las estimaciones del modelo de asignación de tierras, es posible estimar además los ingresos netos, la demanda de trabajo total y la demanda de trabajo femenino. Este estudio se aplica de la región de Atacama a la región de Los Lagos, sin incluir la provincia de Palena.

CUADRO A4d.1
IMPACTOS Y CONSECUENCIAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO
SOBRE LA AGRICULTURA

Tipos de impacto del cambio climático sobre la actividad agrícola
1. Cambios en la distribución geográfica de cultivos.
2. Cambios en rendimientos de los cultivos.
3. Cambio en el tipo, distribución e intensidad de enfermedades, plagas y malezas.
Consecuencias de uno o más impactos
1. Cambio en el <i>mix</i> de cultivos producidos, en el tipo de agricultura y el uso de la tierra.
2. Cambios en producción, ingresos agrícolas y empleo rural.
3. Cambios en ingresos rurales, contribución al PIB y a la balanza comercial.

Fuente: Elaboración propia sobre la base de M. Parry, C. Rosenzweig y A. Iglesias, “Agriculture”, *Handbook on Methods for Climate Change Impact Assessment and Adaptation Strategies*, J. Feenstra y otros (eds.), United Nations Environment Programme e Institute for Environmental Studies, 1998.

B. Desarrollo metodológico

En este apartado se explica la metodología utilizada en la estimación del impacto socioeconómico del cambio climático.

1. Fuentes de datos

La información utilizada en este estudio proviene de tres fuentes:

- i) el VI y VII Censo agropecuario fueron utilizados para obtener la superficie cultivada de cada especie a nivel comunal. Asimismo, se usó la información referente a la producción para las especies en que se reporta dicha información;
- ii) fichas técnicas: que complementan la información de los censos como fichas técnico-económicas. Para el año 2007, se utilizó la información generada por Agrogestión (Fundación Chile) y otras fuentes, mientras que para el año 1997, se utilizaron fichas del año 1995, disponibles en la base de datos del Departamento de Economía Agraria. En estas fichas técnicas se encuentra información de campo referida a los costos de producción, insumos, precios y rendimientos esperados para la especie en cuestión y para una región en particular. Todos los precios y costos de las fichas técnicas fueron convertidos a precios reales de diciembre de 2007; y
- iii) resultados del estudio AGRIMED: para estimar los márgenes esperados de las principales especies cultivadas en el país, se utilizaron las estimaciones del estudio *Análisis de vulnerabilidad del sector silvoagropecuario, recursos hídricos y edáficos de Chile frente a escenarios de cambio climático*, ejecutado por el Centro de Agricultura y Medio Ambiente (AGRIMED) de la Universidad de Chile. En dicho estudio se hace una proyección de los rendimientos de 12 especies bajo cuatro diferentes escenarios de cambio climático (A240, A270, B240 y B270). Las especies consideradas son durazno, manzano, naranjo, vid, frijol de riego y seco, maíz de riego y seco, papa de riego y seco, remolacha de riego y seco, trigo de riego y seco, pradera, pino radiata y eucaliptus. El estudio realizado por AGRIMED fue ampliado y se incorporó el escenario A220 en las estimaciones de rendimientos.

El presente estudio contempló el desarrollo de fichas técnicas para todas las especies y comunas para los años 1997 y 2007. Sin embargo, en algunos casos no se obtuvo información de rendimientos válida para todas las comunas del país. Por este motivo, se utilizaron los rendimientos esperados de la línea de base del estudio “Impactos productivos en el sector silvoagropecuario en Chile frente a escenarios de cambio climático” para las 12 especies antes referidas. La metodología para completar la información para todo el país consistió en construir un índice, utilizando las estimaciones de AGRIMED, que indica la razón entre el rendimiento para la comuna *i* y especie *j* y el máximo de rendimiento para la especie *j* de la región para la cual aplica la ficha técnica. De esta manera, el índice representa la diferencia relativa entre el rendimiento de una comuna para un cultivo particular y el rendimiento máximo de la región en la que aplica la ficha técnica.

Sin embargo, como en el presente estudio se modela un mayor número de especies que en el de AGRIMED, se le solicitó definir especies homologables para aquellas que no estaban presentes en ese estudio. Así, los rendimientos para las comunas y especies que no tenían ficha técnica fueron contruidos multiplicando el rendimiento de la ficha técnica por el índice de su especie u homólogo en cada región.

Respecto de los costos de producción, se determinó un costo variable unitario (que cambia según los rendimientos) y un costo fijo para todas las especies según las fichas técnicas. Los costos

variables por hectárea se calcularon para cada especie y comuna multiplicando los rendimientos por el costo variable unitario. El costo fijo se asumió constante para todas las comunas del país.

Finalmente, los precios de venta de los productos indicados en las fichas técnicas fueron comparados con diversas fuentes para verificar que estén correctamente estimados. Debido a la irregular disponibilidad de precios regionales de productos agrícolas para estos períodos, se utilizó precios de venta constante para todo el país.

2. Metodología aplicada

Para la estimación del impacto socioeconómico del cambio climático en la agricultura, es necesario evaluar el impacto que tendrá en el uso del suelo. De esta manera, se propone un modelo de uso del suelo que permita utilizar los cambios en rendimientos calculados por el estudio desarrollado por AGRIMED. En este estudio, se estiman los niveles de productividad de 12 cultivos (durazno, manzano, naranjo, vid, frijol de riego y seco, maíz de riego y seco, papa de riego y seco, remolacha de riego y seco, trigo de riego y seco, pradera, pino radiata y eucalipto) según diferentes condiciones climáticas, en un escenario base y en cuatro escenarios de cambio climático. Estos escenarios de cambio climático se basan en las proyecciones del modelo de clima global Hadley Centre Coupled Model, versión 3 (HadCM3): un escenario severo (A2) y un escenario moderado (B2). El escenario A2 considera un alto nivel de emisión de gases de efecto invernadero (GEI), mientras que el escenario B2 considera un menor nivel de emisión de GEI. Ambos escenarios son evaluados en los años 2020, 2040 y 2070. En el estudio se analizan cinco escenarios: A220, A240, A270, B240 y B270. Se debe indicar que para el 2020 solo se considera un escenario (A2) debido a que no existen diferencias importantes entre los escenarios A2 y B2 para ese año, y se espera que no exista adaptación por parte de los agricultores al cambio climático debido a que la percepción de los impactos es paulatina, por lo que los productores responden también de manera paulatina. Para cada uno de estos se estima el impacto socioeconómico del cambio climático¹.

Los resultados de este estudio, que forma parte de los estudios asociados al Informe de la Segunda Comunicación Nacional de Chile para la UNFCCC, han sido ampliados en esta iniciativa para incluir los efectos asociados a una nueva productividad en algunas comunas del país, ya que se consideró de manera explícita la restricción hídrica en materia de suministro de agua para riego producto de los cambios hidrológicos proyectados².

El modelo de asignación del uso del suelo utilizado considera que la tierra en la comuna c es asignada a sus varios usos en dos etapas. Primero, hay una etapa de la asignación entre distintos tipos de uso –forestal, praderas, frutales y cultivos–. Luego de la tierra dedicada, por ejemplo, a plantaciones forestales, hay una etapa de asignación entre pino radiata, eucalipto y otras especies. En la tierra dedicada a la producción de cultivos, hay una etapa de la asignación entre trigo seco, maíz y otras siembras.

En cada etapa de asignación de tierra usamos un modelo econométrico donde las participaciones (S_{ic}), es decir, la proporción de la tierra dedicada al cultivo i en la comuna c , está dada por:

$$S_{ic} = \frac{\exp[f(x_c|\beta_i)]}{\sum_{j=1}^K \exp[f(x_c|\beta_j)]} \quad (1)$$

¹ En este informe, los escenarios A240 y B240 equivalen a los escenarios A2 y B2 evaluados en el período 2040-2070, respectivamente, del informe síntesis. Asimismo, los escenarios A270 y B270 equivalen a los escenarios A2 y B2 evaluados en el período 2070-2100..

² Para mayores detalles véanse los apéndices IVa y IVb.

Donde el vector x_c representa las variables explicativas, incluyendo los ingresos netos o márgenes de los productos, y β_i son parámetros. Se puede transformar esta forma no lineal a una forma lineal en términos de participaciones relativas entre el cultivo i y el cultivo 1:

$$\ln(S_{ic}/S_{lc}) = f(x_c|\beta_i) - f(x_c|\beta_l) = (\beta_i - \beta_l)'x_c = \alpha'_i x_c \quad (2)$$

Si se estiman los parámetros α'_i , se pueden predecir las participaciones relativas de cada especie o grupo de especies para los escenarios futuros (año 20YY) utilizando los nuevos niveles de $(x_c)_H$ para el año 20YY:

$$\ln(S_{ic}/S_{lc})_{20YY} = \alpha'_i (x_c)_H \quad (3)$$

Por último, las participaciones simples (las S_{ic}) son predichas por el hecho de que las participaciones suman uno:

$$\sum_{i=2}^K \frac{S_{ic}}{S_{lc}} = \frac{1 - S_{lc}}{S_{lc}} = Z_c \Rightarrow S_{lc} = \frac{1}{1 + Z_c} \Rightarrow S_{ic} = \frac{S_{ic} * (1 + Z_c)^{-1}}{S_{lc}} \quad (4)$$

Donde K representa el número total de especies o grupos. De esta manera, en la primera etapa $i = C, Fr, F$ o P (cultivos, frutales, forestales o pradera), y en la siguiente $k = P, E, O$ (pino radiata, eucalipto u otros). Si la comuna c tiene A_c hectáreas totales, la asignación de hectáreas a trigo en la comuna c (A_{Tc}) es estimable por una multiplicación simple:

$$A_{Tc} = A_c * S_{Cc} * S_{Tc} \quad (5)$$

Donde S_{Cc} representa la proporción de cultivos en la comuna c y S_{Tc} representa la proporción de trigo de la superficie dedicada a cultivos en la comuna c .

Variables independientes

El vector x_c representa las variables explicativas. Del conjunto de variables explicativas el subconjunto de más interés es el de los ingresos netos (por hectárea) de los productos. El ingreso neto (o margen) por hectárea (π_{ic}) de un producto es igual al ingreso bruto (precio por rendimiento, $p_{ic} y_{ic}$) menos costos (precios de factores por el uso por hectárea de los factores, $w_{ic}'z_{ic}$, incluyendo mano de obra y fertilizantes, entre otros). Es decir,

$$(6) \quad \pi_{ic} = p_{ic} y_{ic} - w_{ic}' z_{ic}$$

La asignación de la tierra a un producto específico en la comuna c depende de todos los ingresos netos de los productos que compiten por el mismo espacio. Dentro del grupo de cultivos, por ejemplo, la participación de trigo secano puede depender del ingreso neto del trigo de riego, maíz, papa de riego y de secano y de varios otros cultivos. Además, la asignación de participaciones de la tierra de cultivos

generalmente a cultivos específicos depende de los ingresos relativos. Para incorporar este enfoque, se elige la siguiente forma funcional:

$$f(x_c | \beta_i) = \beta_{i0} + \sum_{j=2}^K \beta_{ij} (\ln(\pi_{jc} / \pi_{lc})) \quad (7)$$

Entonces la regresión básica toma la forma:

$$\ln(S_{ic} / S_{lc}) = \alpha_0 + \sum_{i=2}^K \alpha_i \ln(\pi_{ic} / \pi_{lc}) \quad (8)$$

De no mediar otros cambios, los nuevos niveles, $(x_c)_H$, de las variables explicativas en 20YY están basados en cambios en rendimientos pronosticados para cada escenario de cambio climático.

En etapas de asignación agregada, por ejemplo, entre cultivos, frutales, forestal y praderas, los ingresos netos de los productos agregados son estimados por un índice calculado por la suma ponderada de los ingresos netos de los productos más desagregados. Por ejemplo, el ingreso neto de cultivos, π_{Cc} , es la suma del ingreso neto de trigo seco ponderado por la participación de trigo seco dentro del grupo cultivos más el ingreso neto de maíz ponderado por la participación de maíz:

$$\pi_{Cc} = \sum_{i \in \text{cultivos}} S_{ic} \pi_{ic} \quad (9)$$

De igual modo se construyen para frutales, forestal y praderas.

Para la estimación de los cambios de la demanda de mano de obra por comuna, se utilizan las predicciones del uso del suelo para cada especie, considerando la información de las fichas técnicas, de donde se obtiene el número de jornadas por hectárea, J_{ic} , asociado a cada especie i . En términos del número de personas, la demanda de mano de obra en la comuna c técnicamente vinculada al producto i es:

$$D_{ic} = A_{ic} \cdot J_{ic} \quad (10)$$

Para estimar el requerimiento de trabajo femenino, se aplicaron los coeficientes de trabajo femenino que indican la proporción de los trabajadores totales que son mujeres. Estos coeficientes fueron obtenidos del VII Censo agropecuario.

Las especies consideradas en este estudio, junto con su coeficiente femenino se presentan en el cuadro A4d.2.

Dicho coeficiente femenino corresponde a la proporción de las jornadas femeninas del total de jornadas. Este índice permitirá estimar el impacto sobre el requerimiento de trabajo femenino bajo los escenarios de cambio climático.

El impacto socioeconómico del cambio climático se evalúa considerando que existe un rezago en la adaptación endógena que tiene el sector. Los cambios en la productividad por el cambio climático son percibidos por los agricultores de manera paulatina, lo que origina una reacción que también es paulatina. De esta manera, en este estudio se consideró que el rezago para completar una adaptación completa, es decir, de todos los agricultores, es de 30 años, por lo que el impacto socioeconómico para un escenario en particular (ingresos y requerimiento de trabajo) se estima considerando el uso de

CUADRO A4d.2
PROPORCIÓN DE TRABAJADORAS SOBRE EL TOTAL
DE DEMANDA DE MANO DE OBRA

Especie	Coficiente femenino
Alfalfa	0,225
Arroz	0,100
Avena secano	0,197
Barbecho	0,000
Cerezo	0,148
Ciruelo	0,135
Duraznero	0,454
Eucaliptus	0,264
Frijol	0,223
Maíz	0,257
Manzano	0,258
Naranja	0,155
Nogal	0,155
Olivo	0,243
Palto	0,284
Papa riego	0,204
Papa secano	0,210
Peral	0,381
Pino radiata	0,207
Pradera mejorada	0,225
Pradera natural	0,225
Remolacha	0,071
Trigo riego	0,190
Trigo secano	0,204
Uva de mesa	0,282
Vid vinífera	0,178

Fuente: Elaboración propia.

suelo del escenario anterior, pero bajo las condiciones climáticas vigentes. Se debe indicar que para los escenarios A240 y B240, los resultados de uso del suelo son idénticos, debido a que ambos se basan en el mismo escenario climático inicial (A220).

A continuación se presentan los supuestos del modelo:

- i) todos los ingresos corresponden a ingresos netos anuales. Para el caso de las especies forestales, el ingreso neto anual corresponde al ingreso anual equivalente. En la construcción de las fichas técnicas se determinaron para algunas especies y comunas ingresos netos negativos, lo que quiere decir que efectivamente los agricultores están teniendo pérdidas económicas bajo esas condiciones;
- ii) las fichas técnicas representan aproximaciones de lo que ocurre en cada explotación y, como tales, capturan mejor el sentido de las variaciones, más que su valor exacto. Esto es especialmente cierto al usarse precios promedios reales de diez años. El modelo es un modelo en desequilibrio, en el sentido de que no impone una restricción de ingresos netos

positivos, lo que concuerda con muchos estudios que indican que en un determinado año los agricultores pueden tener pérdidas económicas. Esta característica permite capturar la inercia en el cambio en el uso de la tierra que, en el contexto del cambio climático, se interpreta como el proceso de aprendizaje y adaptación a las nuevas condiciones climáticas e hídricas;

- iii) el modelo no considera precios de la tierra (no es ricardiano), sino que ingresos netos anuales;
- iv) la productividad de los cultivos se altera exclusivamente por los cambios climáticos y por las variaciones en la disponibilidad hídrica;
- v) la disponibilidad total de tierras se mantiene constante a nivel comunal; y
- vi) se asume que los precios de los bienes transables no cambian. Para los bienes no transables, los precios dependen de sus niveles de producción nacional. Los precios de los productos no transables son proyectados para cada escenario basado en una estimación de la flexibilidad de los precios con respecto a la producción y a los niveles de producción proyectados.

C. Resultados a nivel nacional³

En este apartado se analizan los resultados a nivel nacional respecto del uso de suelo, ingresos y requerimiento de trabajo.

1. Uso de suelo

Como se indicó anteriormente, para los escenarios A240 y B240, los resultados de uso del suelo son idénticos, debido a que ambos se basan en el mismo escenario inicial (A220). En el cuadro A4d.3 se presenta el uso de suelo para cada rubro con las dos especies de mayor relevancia en el país. En ella se puede apreciar que los cultivos sufrirán una caída en su superficie nacional en los escenarios A240 y B240, pasando de 508.000 ha a 470.000 ha, lo que representa una caída de un 7% en la superficie. Sin embargo, entre los escenarios A240-A270 y B240-B270, la superficie se incrementará en un 7,4% y en un 13%, respectivamente. En este último caso, la superficie en B270 será mayor que en la línea de base. A nivel de especies, tanto el trigo secano como el maíz verán disminuidas las superficies, producto de la sustitución por otras con mayor rentabilidad.

Los resultados del rubro frutal muestran que la superficie caerá en cerca de 26.000 ha en los escenarios A240 y B240, lo que representa una caída de un 7%. Sin embargo, entre los escenarios A240-A270 y B240-B270, la superficie se incrementará en un 6% y en un 14%, respectivamente. En este último caso, y al igual que en el de los cultivos, la superficie en B270 será mayor que en la línea de base. A nivel de especies, se puede ver que la uva de mesa perderá superficie debido a la baja en el rendimiento, producto de la restricción hídrica, lo que disminuye la competitividad de esta especie respecto de otras. Por el contrario, la superficie plantada con paltos aumentará por las mejores condiciones para su producción, aun bajo restricción hídrica.

Los resultados del rubro praderas y forrajeras muestran un incremento en aproximadamente 2.900 ha entre la línea de base y los escenarios A240 y B240. Sin embargo, entre los escenarios A240-A270 y B240-B270, se presentan caídas en las superficies, disminuyendo en un 1,8%, y 1,3%, respectivamente. Cabe mencionar que si bien las caídas en términos relativos pueden parecer menores,

³ El análisis nacional excluye las regiones extremas, considerando desde la región de Atacama hasta la región de Los Lagos y excluye la provincia de Palena.

en términos absolutos representan una superficie significativa si se compara con cultivos y frutales. A nivel específico, se puede observar que la superficie con praderas naturales disminuirá en todos los escenarios de cambio climático, mientras que la pradera mejorada se incrementará, por los mejores rendimientos obtenidos.

Para el sector forestal, se espera un incremento en la superficie en todos los escenarios de cambio climático. En el escenario A240 y B240, el incremento será cercano a las 83.000 ha (3%) respecto de la línea de base. Luego, la superficie se incrementará entre los escenarios A240 y A270 en 81.000 ha aproximadamente (3%), mientras que entre los escenarios B240 y B270, la superficie aumentará en 41.000 ha (2%). Esta alza es determinada por el incremento de la superficie de eucaliptus y una moderada caída en la superficie de pino radiata.

Al comparar la evolución por sectores, se puede ver que, en los escenarios A240 y B240, el grupo de cultivos y frutales pierde superficie, mientras que praderas, forrajeras y plantaciones forestales incrementan su importancia. La tendencia en el escenario A270 se revierte para los cultivos y frutales, aumentando su superficie hasta niveles un poco menores a los de la línea de base. La superficie de praderas y forrajeras cae en el escenario A270, llegando a niveles menores que la línea de base. El sector forestal seguirá incrementando su importancia, aunque en forma moderada. Los resultados muestran que en los escenarios B270 y A270 la superficie de cultivos y frutales crece y, en algunos casos, sobrepasa los niveles de la línea de base. Las praderas y forrajeras perderán importancia, llegando a superficies menores que la línea de base y, finalmente, el sector forestal seguirá con su aumento en la superficie. Un detalle de los efectos a nivel regional para cada sector se presenta en el cuadro A4d.4.

CUADRO A4d.3
USO DEL SUELO A NIVEL PAÍS
(En hectáreas)

Rubro y especie	Línea de base	Escenario			
		A240	A270	B240	B270
Cultivos	507 778	469 887	504 705	469 887	529 904
Trigo secano	179 410	123 409	128 219	123 409	149 417
Maíz	101 525	60 297	53 145	60 297	53 567
Frutales	356 367	330 587	350 472	330 587	375 267
Uva de mesa	60 783	47 401	32 262	47 401	48 058
Palto	39 760	42 579	49 412	42 579	56 409
Praderas y forrajeras	8 178 763	8 181 631	8 068 080	8 181 631	8 026 734
Pradera natural	6 803 598	6 264 165	6 098 364	6 264 165	6 092 908
Pradera mejorada	952 006	1 135 763	1 042 238	1 135 763	1 062 192
Forestales	2 522 611	2 605 523	2 686 262	2 605 523	2 646 417
Pino radiata	1 635 535	1 518 824	1 493 099	1 518 824	1 512 646
Eucaliptus	887 076	1 086 698	1 193 163	1 086 698	1 133 771
Total nacional	11 565 520	11 587 628	11 609 519	11 587 628	11 578 322

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO A4d.4
USO DE SUELO POR REGIÓN, RUBRO Y ESCENARIO
(En hectáreas)

Región y rubro	Escenario					
	Línea de base	A220	A240	A270	B240	B270
Atacama						
Cultivo	445	445	194	18	194	69
Frutal	13 026	13 026	9 818	7 074	9 818	10 240
Pradera y forrajera	92 021	92 021	95 857	100 201	95 857	95 968
Forestal	297	297	290	320	290	293
Total	105 788	105 788	106 159	107 613	106 159	106 570
Coquimbo						
Cultivo	5 912	5 912	2 239	292	2 239	1 436
Frutal	35 460	35 460	27 461	20 530	27 461	31 816
Pradera y forrajera	3 192 798	3 192 798	3 212 115	3 231 230	3 212 115	3 212 237
Forestal	3 263	3 263	3 495	3 994	3 495	3 809
Total	3 237 432	3 237 432	3 245 311	3 256 046	3 245 311	3 249 298
Valparaíso						
Cultivo	5 707	5 707	1 331	371	1 331	737
Frutal	53 211	53 211	44 106	44 157	44 106	49 135
Pradera y forrajera	355 771	355 771	375 824	384 172	375 824	372 924
Forestal	53 670	53 670	51 404	51 708	51 404	52 090
Total	468 358	468 358	472 665	480 409	472 665	474 885
Metropolitana						
Cultivo	20 143	20 143	5 269	376	5 269	2 308
Frutal	50 836	50 836	57 970	50 989	57 970	73 213
Pradera y forrajera	191 754	191 754	207 287	234 465	207 287	200 232
Forestal	7 168	7 168	6 320	6 115	6 320	6 026
Total	269 902	269 902	276 846	291 945	276 846	281 779
O'Higgins						
Cultivo	57 743	57 743	32 301	18 460	32 301	25 483
Frutal	99 957	99 957	110 192	132 275	110 192	121 872
Pradera y forrajera	430 416	430 416	433 950	431 373	433 950	427 224
Forestal	131 918	131 918	141 625	144 848	141 625	147 004
Total	720 034	720 034	718 068	726 956	718 068	721 583
Maule						
Cultivo	84 109	84 109	87 267	86 055	87 267	92 990
Frutal	78 968	78 968	54 502	60 430	54 502	58 939
Pradera y forrajera	1 038 704	1 038 704	1 072 152	1 069 793	1 072 152	1 058 937
Forestal	485 826	485 826	477 697	469 571	477 697	475 975
Total	1 687 607	1 687 607	1 691 617	1 685 849	1 691 617	1 686 841
Biobío						
Cultivo	125 870	125 870	132 013	153 667	132 013	153 397
Frutal	20 388	20 388	21 731	27 824	21 731	23 612
Pradera y forrajera	761 185	761 185	726 141	700 409	726 141	711 476
Forestal	961 502	961 502	973 829	963 592	973 829	954 699
Total	1 868 946	1 868 946	1 853 714	1 845 492	1 853 714	1 843 184

(continúa)

Cuadro A4d.4 (conclusión)

Araucanía						
Cultivo	156 407	156 407	134 046	142 134	134 046	155 516
Frutal	3 156	3 156	2 908	4 669	2 908	3 789
Pradera y forrajera	948 667	948 667	946 202	898 306	946 202	899 761
Forestal	563 132	563 132	604 570	642 296	604 570	625 396
Total	1 671 363	1 671 363	1 687 726	1 687 405	1 687 726	1 684 462
Los Ríos						
Cultivo	22 723	22 723	12 473	19 083	12 473	16 043
Frutal	640	640	441	268	441	291
Pradera y forrajera	415 789	415 789	406 443	365 604	406 443	380 257
Forestal	232 065	232 065	251 342	284 599	251 342	273 650
Total	671 216	671 216	670 700	669 554	670 700	670 241
Los Lagos						
Cultivo	28 719	28 719	62 754	84 249	62 754	81 925
Frutal	725	725	1 457	2 255	1 457	2 361
Pradera y forrajera	751 657	751 657	705 660	652 526	705 660	667 719
Forestal	83 771	83 771	94 951	119 219	94 951	107 474
Total	864 873	864 873	864 822	858 249	864 822	859 479
Total Nacional						
Cultivo	507 778	507 778	469 887	504 705	469 887	529 904
Frutal	356 367	356 367	330 587	350 472	330 587	375 267
Pradera y forrajera	8 178 763	8 178 763	8 181 631	8 068 080	8 181 631	8 026 734
Forestal	2 522 611	2 522 611	2 605 523	2 686 262	2 605 523	2 646 417
Total	11 565 520	11 565 520	11 587 628	11 609 519	11 587 628	11 578 322

Fuente: Elaboración propia.

2. Ingresos netos

Los ingresos netos para cada rubro y escenario de cambio climático se presentan en el cuadro A4d.5. Se debe indicar que en este análisis se han incorporado los costos asociados a la inversión intrapredial en sistemas de riego en las comunas donde se presenta un incremento en la superficie de riego. La inversión en infraestructura extrapredial que asegure la provisión de agua a los predios, no está considerada en este análisis. Se observa que, a nivel agregado, el sector silvoagropecuario sufrirá una pérdida en sus ingresos netos para todos los escenarios, a excepción del B240, donde se espera un aumento de un 0,4%. En el escenario A2, se espera una caída en los ingresos netos en el período intermedio de un 6% respecto de la línea de base y en el período final, la pérdida respecto de la línea de base es de un 15%.

Al analizar los resultados por rubros, se puede apreciar que el de los cultivos y el forestal verán incrementados sus ingresos en todos los escenarios, debido a que se espera, en términos generales, un aumento en los rendimientos para ambos grupos. El mismo comportamiento se presenta en las praderas y forrajeras, a excepción del escenario A270, donde los ingresos son menores respecto de la línea de base. Por último, el rubro frutal es el que más se ve afectado en los escenarios de cambio climático, debido a que caen los ingresos en todos los escenarios respecto de la línea de base. En el escenario A270, se espera una caída de un 77% en los ingresos, mientras que en el escenario B270, la caída es de un 32%. El rubro frutal se ve mayormente afectado, porque las condiciones asociadas a los escenarios de cambio climático, sumadas al efecto de la restricción hídrica, afectan de manera negativa la productividad de las especies frutales.

CUADRO A4d.5
INGRESOS NETOS POR RUBRO A NIVEL PAÍS
(En millones de dólares de 2007)

Rubro	Escenario					
	Línea de base	A220	A240	A270	B240	B270
Cultivo	329,5	331,4	368,6	420,7	364,1	452,1
Frutal	676,0	531,6	413,9	156,9	571,3	458,4
Pradera y forrajera	673,0	654,4	680,3	658,7	688,1	676,7
Forestal	749,0	759,3	816,8	832,7	813,9	829,7
Total	2 427,5	2 276,7	2 279,5	2 069,0	2 437,4	2 417,0

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO A4d.6
INGRESOS NETOS POR REGIÓN A NIVEL PAÍS
(En millones de dólares de 2007)

Región	Escenario					
	Línea de base	A220	A240	A270	B240	B270
Atacama	22,4	4,8	-17,2	-6,7	-0,3	-16,0
Coquimbo	54,7	13,2	-38,5	-53,7	-7,9	-35,7
Valparaíso	122,7	66,3	54,0	13,6	97,7	73,2
Metropolitana	151,6	119,6	72,5	3,3	160,4	95,9
O'Higgins	335,3	323,3	350,4	253,9	345,3	379,1
Maule	494,6	478,4	474,3	435,4	484,4	480,4
Biobío	478,3	476,6	502,1	520,6	501,4	524,6
Araucanía	389,1	404,2	458,7	473,2	458,2	494,6
Los Ríos	209,1	212,5	214,1	220,4	212,2	215,7
Los Lagos	169,7	177,9	209,1	209,2	186,2	205,3
Total	2 427,5	2 276,7	2 279,5	2 069,0	2 437,4	2 417,0

Fuente: Elaboración propia.

En el cuadro A4d.6 se presentan los ingresos netos desagregados por región. Se puede ver cómo caen los ingresos desde la región de Valparaíso hacia el norte en todos los escenarios de cambio climático. Lo anterior se explica, en parte, por la merma en rendimientos que se espera en las especies de riego, producto de la restricción hídrica y de las nuevas condiciones climáticas. En la Región Metropolitana y la región de O'Higgins se observa que para algunos escenarios los ingresos caen y en otros se incrementan respecto de la línea de base. La región del Maule espera una caída de los ingresos en todos los escenarios. En la zona sur del país (región de La Araucanía al sur) se espera un incremento en los ingresos netos en todos los escenarios de cambio climático.

3. Requerimiento de mano de obra anual

En el cuadro A4d.7 se presenta el requerimiento de trabajadores (hombres y mujeres) totales equivalentes año para todas la comunas incluidas en el estudio. A nivel agregado, el número de trabajadores disminuye en todos los escenarios de cambio climático. La caída de mayor importancia se presenta en el escenario A270, donde se espera una disminución de un 18%.

CUADRO A4d.7
TRABAJADORES TOTALES EQUIVALENTES AÑO A NIVEL NACIONAL POR RUBRO
(En miles)

Rubro	Escenario					
	Línea de base	A220	A240	A270	B240	B270
Cultivo	19,62	19,62	19,94	21,45	19,76	22,07
Frutal	115,54	109,59	96,03	84,60	101,67	103,03
Pradera y forrajera	147,47	142,81	131,32	122,46	132,65	126,89
Forestal	12,97	13,06	13,67	13,87	13,65	13,82
Total	295,60	285,07	260,96	242,38	267,73	265,83

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados por rubro muestran que el requerimiento de cultivos se mantiene más bien estable en los escenarios A240 y B240, para incrementarse en los escenarios A270 y B270 en un 0,8% y un 1%, respectivamente, respecto de la línea de base. Este incremento se debe sobre todo al aumento en la productividad de los cultivos, lo que implica un mayor requerimiento de trabajo variable. En el rubro frutal habrá una disminución del requerimiento de trabajadores totales en todos los escenarios, porque las condiciones de los escenarios de cambio climático y la restricción hídrica mermarán los rendimientos y la superficie cultivada. En el rubro praderas y forrajeras hay una caída en el requerimiento de trabajo en todos los escenarios de cambio climático. En el rubro forestal, el requerimiento de trabajadores aumentará, debido al aumento de la superficie y de los rendimientos.

En el cuadro A4d.8 se presenta el requerimiento anual de trabajadores equivalentes por región y escenario. En todas las regiones del país se espera una caída de la demanda de trabajo, con excepción de la región de O'Higgins, en que se espera un incremento en el requerimiento de trabajo en todos los escenarios.

CUADRO A4d.8
TRABAJADORES TOTALES EQUIVALENTES AÑO A NIVEL NACIONAL POR REGIÓN
(En miles)

Región	Escenario					
	Línea de base	A220	A240	A270	B240	B270
Atacama	7,00	6,21	3,72	2,43	4,43	3,53
Coquimbo	54,65	51,65	43,98	39,44	44,81	44,22
Valparaíso	27,36	24,81	19,08	17,50	20,60	20,62
Metropolitana	26,93	25,87	23,47	18,35	26,48	25,24
O'Higgins	39,20	39,37	42,28	40,87	41,78	44,23
Maule	30,94	30,16	28,06	28,72	28,28	29,20
Biobío	49,26	48,69	44,68	43,58	45,17	44,51
Araucanía	30,11	29,07	27,33	25,49	27,92	27,34
Los Ríos	12,43	11,79	10,29	9,07	10,62	9,71
Los Lagos	17,72	17,45	18,07	16,92	17,64	17,22
Total	295,60	285,07	260,96	242,38	267,73	265,83

Fuente: Elaboración propia.

a) Requerimiento de mano de obra anual femenina

En el cuadro A4d.9 se presenta el requerimiento de trabajadoras totales según rubro y escenario de cambio climático. El requerimiento a nivel agregado cae en todos los escenarios de cambio climático. En los escenarios A270 y B270, la disminución esperada respecto de la línea de base es de un 17% y 9% respectivamente.

Según los rubros, se puede apreciar que el requerimiento de trabajadoras cae fuertemente en frutales. En los escenarios A270 y B270, la disminución respecto de la línea de base alcanza el 24% y 8%, respectivamente. En las praderas y forrajeras, el requerimiento de trabajo femenino cae en todos los escenarios, y en el rubro forestal, el requerimiento se incrementa en todos los escenarios.

En el cuadro A4d.10 se presenta el requerimiento anual de trabajadoras según región y escenario. Se puede ver el mismo comportamiento que en el caso del requerimiento total de trabajadores, pues hay una caída generalizada en la demanda de trabajo femenino en todas las regiones, con la excepción de la región de O'Higgins, donde el requerimiento esperado es mayor al de la línea de base en todos los escenarios.

CUADRO A4d.9
TRABAJADORAS TOTALES EQUIVALENTES AÑO A NIVEL NACIONAL POR RUBRO
(En miles)

Rubro	Escenario					
	Línea de base	A220	A240	A270	B240	B270
Cultivo	4,2	4,2	4,1	4,4	4,1	4,5
Frutal	27,5	25,9	22,8	20,9	24,2	25,2
Pradera y forrajera	33,2	32,1	29,6	27,6	29,9	28,6
Forestal	2,9	3,0	3,1	3,2	3,1	3,2
Total	67,8	65,1	59,6	56,0	61,3	61,4

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO A4d.10
TRABAJADORAS TOTALES EQUIVALENTES AÑO A NIVEL NACIONAL POR REGIÓN
(En miles)

Región	Escenario					
	Línea de base	A220	A240	A270	B240	B270
Atacama	1,9	1,7	1,0	0,6	1,2	0,9
Coquimbo	12,7	11,9	10,1	9,1	10,3	10,2
Valparaíso	7,1	6,4	4,6	4,3	5,0	5,0
Metropolitana	6,3	6,0	5,5	4,4	6,2	6,1
O'Higgins	9,1	9,1	10,2	10,5	10,1	11,2
Maule	6,5	6,3	6,0	6,1	6,0	6,2
Biobío	10,8	10,6	9,8	9,6	9,9	9,7
Araucanía	6,8	6,5	6,1	5,8	6,2	6,1
Los Ríos	2,8	2,7	2,3	2,0	2,4	2,2
Los Lagos	4,0	3,9	4,0	3,8	3,9	3,8
Total	67,8	65,1	59,6	56,0	61,3	61,4

Fuente: Elaboración propia.

Bibliografía

- AGRIMED (Centro de Agricultura y Medio Ambiente) (2009), “Impactos productivos en el sector silvoagropecuario de Chile frente a escenarios de cambio climático”, *Análisis de vulnerabilidad del sector silvoagropecuario, recursos hídricos y edáficos de Chile frente a escenarios de cambio climático*, Segunda comunicación nacional de Chile, Santiago de Chile.
- Donoso, G., J. P. Montero y S. Vicuña (2001), “Análisis de los mercados de derechos de aprovechamiento de agua en las cuencas del Maipo y el sistema Paloma en Chile: efectos de la variabilidad en la oferta hídrica y de los costos de transacción”, *Revista de Derecho Administrativo Económico*, vol. III, N° 2.
- IPCC (Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) (2007), *Cambio climático 2007: Informe de síntesis*, Organización Meteorológica Mundial (OMM) y Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).
- Figueroa, E. y otros (1996), “Sustentabilidad ambiental del sector exportador chileno”, *Sustentabilidad ambiental del crecimiento económico chileno*, O. Sunkel (ed.), Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Jordán, C. (2007), “Análisis del mercado de derechos de aprovechamiento de aguas de la primera sección del río Maipo, Región Metropolitana: comportamiento de los diferentes agentes económicos y variabilidad en precios”, tesis de magíster en economía agraria, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile.
- Padilla, E. (2006), “Revisión crítica de las limitaciones y sesgos del análisis económico convencional de las políticas de cambio climático. Hacia un análisis coherente con el desarrollo sostenible”, Universitat Autònoma de Barcelona Departament d’Economia Aplicada [en línea] http://ddd.uab.cat/pub/estudis/2006/hdl_2072_2087/wp0206cast.pdf [fecha de consulta: 9 de diciembre de 2011].
- Parry, M., C. Rosenzweig y A. Iglesias (1998), “Agriculture”, *Handbook on Methods for Climate Change Impact Assessment and Adaptation Strategies*, J. Feenstra y otros (eds.), United Nations Environment Programme e Institute for Environmental Studies.
- Peña, H. (2002), “Mercados de aguas: la experiencia chilena”, Conferencia Internacional de Organismos de Cuenca, Madrid, España.
- Pizarro, R. y otros (2002), “Aguas continentales”, *Informe país: estado del medioambiente en Chile*, Universidad de Chile, Instituto de Asuntos Públicos y LOM Ediciones, Santiago de Chile.

Apéndice V

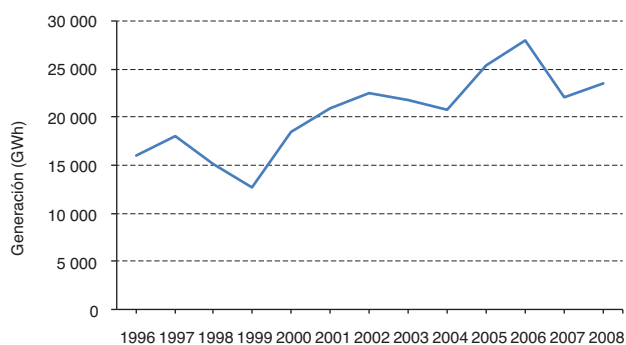
Impactos en la generación hidroeléctrica

A. Introducción

La energía hidroeléctrica representa aproximadamente el 60% de la generación de electricidad en el Sistema Interconectado Central (SIC) y un 40% a nivel nacional⁴. Por sus bajos costos de operación es la primera alternativa de generación. Sin embargo, la disponibilidad de esta fuente de energía es altamente variable y dependiente de las condiciones climáticas. En el gráfico A5.1 se puede apreciar la alta variabilidad existente en la generación hidroeléctrica en el país, justificada principalmente por esta alta variabilidad climática. En períodos donde las condiciones climatológicas reducen la disponibilidad de generación hidroeléctrica existe un costo muy relevante para el país, tanto de tipo económico, al implicar un aumento de la generación mediante fuentes más costosas (por ejemplo carbón y diésel), y climático, muy relevante ya que significa un aumento en la emisión de GEI.

En esta sección se describe el análisis para evaluar los impactos del cambio climático en la generación de energía hidroeléctrica en Chile, tanto desde el punto de vista económico como del cambio en emisión de GEI. Para caracterizar este sector productivo, en virtud de los plazos y recursos disponibles, se ha optado por seleccionar dos sistemas de generación representativos, en las cuencas de los ríos Maule Alto y Laja. Estos sistemas representan más del 40% de la potencia hidroeléctrica total instalada en el SIC. En los mapas A5.1 y A5.2 se presenta la ubicación de estas cuencas y cómo se encuentran acopladas al SIC. Para ambos sistemas se han desarrollado modelos hidrológicos que son capaces de representar, en condiciones históricas y futuras, el caudal de ingreso a las centrales de generación a nivel mensual. Por otra parte, para estos sistemas se han deducido relaciones estadísticas entre el caudal de ingreso a las centrales y la generación hidroeléctrica. En el caso del sistema Laja, por su alta capacidad de regulación de caudal, la relación buscada incluye condiciones históricas con desfase en cuanto a las condiciones hidrológicas.

GRÁFICO A5.1
GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA EN EL SISTEMA INTERCONECTADO CENTRAL
(En GWh)



Fuente: Elaboración propia.

⁴ Estadísticas del *Anuario* de la Comisión Nacional de Energía [en línea] http://www.cne.cl/estadisticas/anuario/electricidad/php_electricidad-2.01.php.

MAPA A5.1
SISTEMA MAULE ALTO Y LAJA EN EL SISTEMA INTERCONECTADO CENTRAL

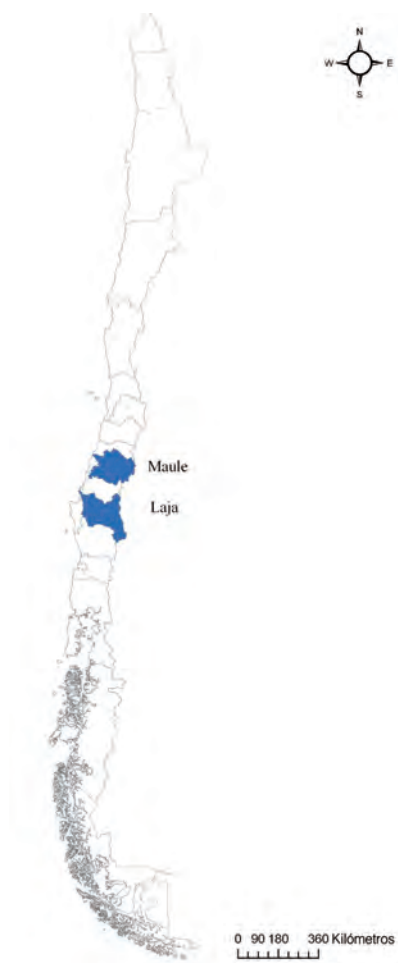


Fuente: Centro de Despacho Económico de Carga Sistema Interconectado Central (CDEC-SIC), “Estadísticas de operación 2001-2010”, 2011 [en línea] Santiago de Chile, <http://www.cdec-sic/datos/anuario2011.pdf> [fecha de consulta: 9 de diciembre de 2011].

Las condiciones climáticas futuras utilizadas consideran la misma base empleada en todos los estudios sectoriales (HadCM3), sin embargo, esta información tuvo que ser escalada de manera especial para corresponder estadísticamente a las estaciones meteorológicas seleccionadas en la zona de estudio. La metodología de escalamiento de las condiciones climatológicas se presenta en los apéndices IIa, IIb y IIc. Estas proyecciones se consideran como dato de entrada del análisis.

El impacto de las proyecciones de cambio climático sobre la disponibilidad de recursos hídricos para generación hidroeléctrica en las cuencas de los ríos Maule y Laja se lleva a cabo utilizando técnicas de modelación hidrológica. En este caso, se considera el uso del software WEAP (Water Evaluation and Planning System; Stockholm Environmental Institute) que ha sido usado previamente para hacer simulaciones hidrológicas bajo escenarios de cambio climático, tanto en cuencas de Chile como de otras regiones (Vicuña, Garreaud y McPhee, 2010; Purkey y otros, 2008). Este modelo utiliza representaciones conceptuales simplificadas de las interacciones atmósfera-suelo y río-acuífero para generar series de caudales con datos de entrada climatológicos, de uso de suelo y operacionales. El análisis hidrológico, en este caso, se llevará a cabo mensualmente. Una parte significativa de las metodologías empleadas en este estudio han sido aplicadas en trabajos anteriores, entre los que destaca el informe para la Segunda Comunicación de CONAMA sobre cambio climático “Vulnerabilidad de recursos hídricos y edáficos”.

MAPA A5.2
UBICACIÓN CUENCAS MAULE Y LAJA



Fuente: Elaboración propia.

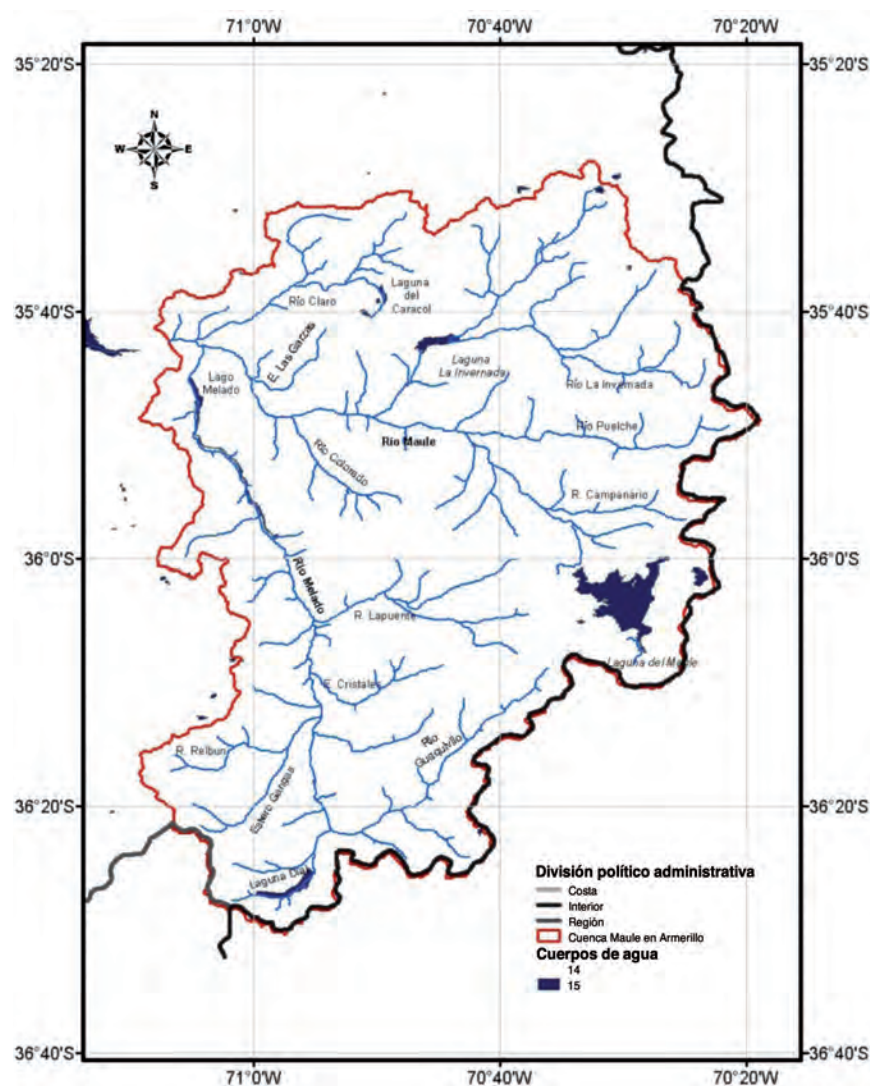
1. Descripción de los sistemas en estudio

a) Sistema Maule Alto

El sistema Maule Alto corresponde a la cuenca definida por la estación fluviométrica Maule en Armerillo, que se ubica en el río Maule aproximadamente a 60 km al sureste de la ciudad de Talca, en la región del Maule. El sistema Maule Alto es uno de los más importantes del país. Cuenta actualmente con cinco centrales de pasada y una central con control de embalse (Pehuenche). Además, una parte de las aguas que pasan por el río Maule en Armerillo, desembocan en el Embalse Colbún y son generadas en el sistema Colbún-Machicura, Chiburgo y San Ignacio.

El mapa A5.3 muestra los principales cauces naturales y cuerpos de agua presentes en el sistema Maule Alto. Los principales elementos de este sistema se describen a continuación (véanse los cuadros A5.1 y A5.2)

MAPA A5.3
CAUCES NATURALES DEL SISTEMA MAULE ALTO



Fuente: Elaboración propia.

CUADRO A5.1

DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPALES CAUCES NATURALES EN EL SISTEMA MAULE ALTO

Río	Descripción
Río Invernada	Este río nace en la parte alta de la cuenca y se desarrolla 32 km hasta desembocar en la laguna Invernada.
Río Puelche	Río que nace en la alta cordillera y que confluye con el río Maule.
Río Maule	Principal río del sistema. Nace de los efluentes de la laguna del Maule. En su recorrido recibe los aportes de los tributarios río Campanario, río Puelche, río Cipreses, río Colorado, estero Las Garzas y finalmente el río Melado. Su desarrollo aproximado es de 75,8 km con una pendiente media de 0,027 m/m.
Río Guaiquivilo	Principal río afluente del Río Melado. Se caracteriza por su fuerte régimen nival. Posee un desarrollo de 58,5 km y una pendiente media de 0,023 m/m.
Río Melado	Es el nombre que recibe el río Guayquivilo después de la junta con el río De la Puente. Sus aguas desembocan en el embalse Melado, uno de los principales embalses del sistema (junto con laguna La Invernada y laguna del Maule). Tiene un importante trasvase de aguas destinadas a riego hacia el río Ancoa.
Río Cipreses	Es el nombre que reciben los efluentes de la laguna La Invernada. Es un río de fuerte pendiente (0,025 m/m) y de un desarrollo que alcanza los 17 km. Sus aguas abastecen directamente a la central de pasada Cipreses y las siguientes centrales de pasada ubicadas en serie con respecto a Cipreses: Curillínque y Loma Alta. Es afluente del río Maule.
Río Claro	Río con un régimen nivopluvial que se encuentra hacia el norte del río Maule, justo antes de llegar a la estación Maule en Armerillo.

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO A5.2

DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPALES CUERPOS DE AGUA EN EL SISTEMA MAULE ALTO

Cuerpos de agua	Descripción
Laguna del Maule	Ubicada en el nacimiento del río Maule, aproximadamente 160 km al oriente de la ciudad de Talca, tiene un volumen de regulación útil de 1.420 Hm ³ . La operación de este embalse permite regular interanualmente los recursos de la hoya alta del río Maule, supliendo con las entregas del embalse el déficit que se produce en los canales del sistema durante la época de riego. La utilización de las aguas de la laguna del Maule se rige por el Convenio Riego-Endesa, de fecha 2 de septiembre de 1947, que, en términos generales, establece las condiciones y montos de las extracciones desde el embalse, tanto para riego como para generación hidroeléctrica.
Embalse Melado	El embalse Melado pertenece al sistema de riego Melado, sistema compuesto por un grupo de canales destinados al riego del valle central de la región del Maule. Del río Melado se deriva el canal Melado Fiscal, que hace un trasvase de agua para riego hacia el río Ancoa. La capacidad máxima de este canal es de 19 m ³ /s, con un desarrollo aproximado de 23 km.
Laguna La Invernada	Nace de las aguas del río Invernada que se depositan en la laguna después de juntarse con un río montañoso de la zona. Abastece directamente a la central Cipreses y, por ende, tiene un efecto regulador sobre esta. Su capacidad máxima es de 220 Hm ³ .

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro A5.3 muestra información relevante respecto de las centrales hidroeléctricas existentes en el sistema Maule Alto.

Todas las centrales del sistema se encuentran conectadas y reutilizan los caudales de generación sucesivamente, como se indica en el diagrama A5.1.

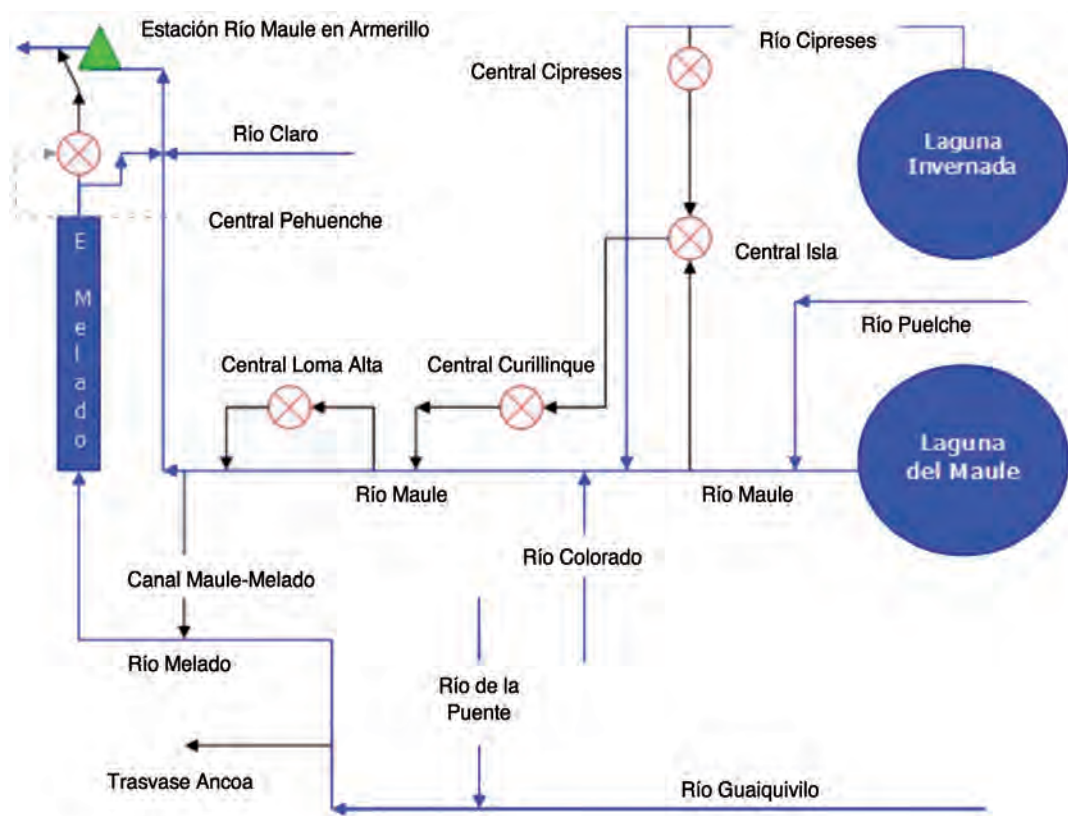
CUADRO A5.3
PRINCIPALES CENTRALES HIDROELÉCTRICAS PRESENTES EN EL SISTEMA

Central	Latitud (°)	Longitud (°)	Cliente	Año término	Tipo	Pot. (MW)	EMAG (GWh)	A.P. (m)	Q.C. (m³/s)	A.C. M
Isla	-70,835	-35,81	Endesa	1963	Pasada	68	500	-	84	92
Cipreses	-70,811	-35,788	Endesa	1955	Embalse	106	528	28	36	359
Curillinque	-70,937	-35,807	Pehuenche S.A.	1993	Pasada	89	590		84	112
Pehuenche	-71,087	-35,758	Pehuenche S.A.	1991	Embalse	566	2.5	90	300	188
Loma Alta	-70,998	-35,796	Pehuenche S.A.	1997	Pasada	40	255		84	50

Fuente: Elaboración propia.

Donde Pot = Potencia; EMAG = energía media anual generable; A.P. = altura de presa; Q.C. = caudal de diseño de la central; A.C. = altura de caída.

DIAGRAMA A5.1
ESQUEMA TOPOLÓGICO SISTEMA MAULE ALTO



Fuente: Elaboración propia.

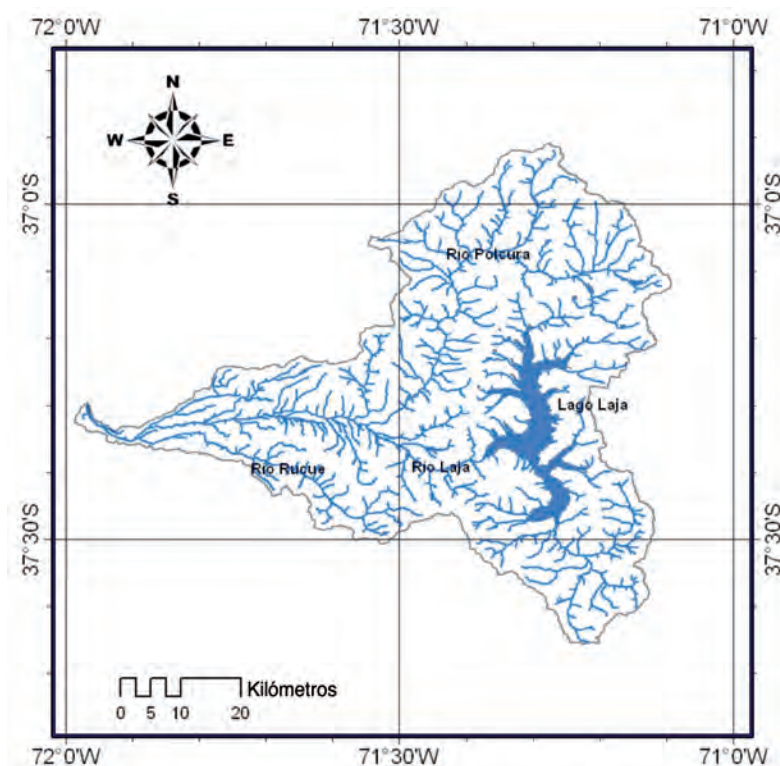
b) Sistema Laja

En el mapa A5.4 se muestran los principales cauces naturales y cuerpos de agua presentes en el sistema Laja. Los principales elementos de este sistema se describen a continuación (véanse los cuadros A5.4 y A5.5).

El sistema Laja está compuesto por las centrales hidroeléctricas que utilizan las aguas de los ríos Laja (efluentes de la laguna Laja), Polcura y Rucue. Se ubica aproximadamente 100 km al este de la ciudad de Los Ángeles, en la región del Biobío. Se seleccionó como punto de salida de la cuenca la zona aguas abajo de la bocatoma Tucapel, que extrae aguas para la demanda hídrica de los canales Laja Sur y Laja Diguillín. Poco antes de esta bocatoma se encuentra la entrega al río Laja del canal de descarga que evacúa las aguas de la central hidroeléctrica Quilleco, última central hidroeléctrica de importancia en el sistema.

El cuadro A5.6 muestra información relevante respecto de cada una de las centrales que componen el sistema. Reunidos los principales elementos físicos de este, se identifican los más relevantes con información disponible (véase el diagrama A5.2).

MAPA A5.4
CAUCES NATURALES DEL SISTEMA LAJA



Fuente: Elaboración propia.

CUADRO A5.4

DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPALES CAUCES NATURALES EN EL SISTEMA LAJA

Río	Descripción
Río Laja	Debido a la naturaleza permeable del material volcánico que forma la barrera natural de la laguna Laja, se producen grandes filtraciones que dan origen al río del mismo nombre, que tiene un caudal medio de 27 m ³ /s (ENDESA, 1986). Posteriormente el río se mueve hacia el norponiente y luego gira hacia el poniente, recibiendo contribuciones del río Polcura, el estero Pichipolcura y el río Rucue, entre otros.
Río Polcura	Nace en la alta cordillera, al nororiente del lago Laja y está formado por la unión de los esteros Quemazones, Vallecito y Calabocillo. A partir de esta unión sigue la dirección poniente, virando a continuación bruscamente hacia el sur, dejando entre sí y el lago Laja una cadena de cerros llamada cordillera Polcura. Finalmente desemboca en el río Laja, a unos 7 km aguas abajo del pueblo de Abanico.
Río Rucue	Tiene su origen a los pies del antiguo volcán Sierra Velluda (situado al sur del Antuco), hoy inactivo, y posee una altura de 3.865 m.s.n.m. El río se desarrolla hacia el norponiente, para desembocar finalmente en el río Laja unos 10 km antes del pueblo de Tucapel.

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO A5.5

DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPALES CUERPOS DE AGUA EN EL SISTEMA LAJA

Cuerpos de agua	Descripción
Laguna Laja	Corresponde al mayor embalse con que cuenta el país, puede almacenar un volumen de 7.500 millones de metros cúbicos. Se encuentra ubicado en la alta cordillera de los Andes, a 90 km al oriente de la ciudad de Los Ángeles y a 1.360 m.s.n.m. Su origen se remonta a unos 200 mil años, en la época glacial, cuando fue excavada su cuenca. Más tarde fue vaciado y llenado en numerosas oportunidades producto de la erosión y las erupciones del antiguo volcán Laja y actualmente del Antuco, que removían y peraltaban su barrera natural. Su actual forma se debe a la barrera que formaron las últimas erupciones del volcán Antuco, entre 1739 y 1911.

Fuente: Elaboración propia.

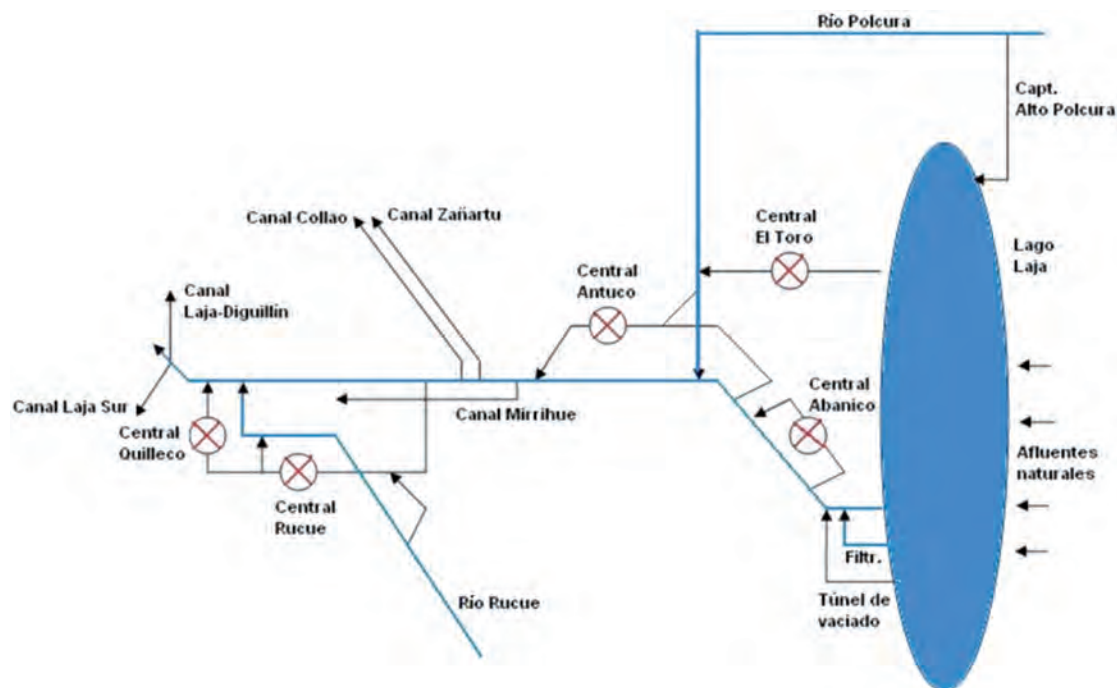
CUADRO A5.6

CENTRALES HIDROELÉCTRICAS SISTEMA LAJA

Central	Latitud (°)	Longitud (°)	Cliente	Año término	Tipo	Pot. (MW)	EMAG (GWh)	Q.C. (m ³ /s)	A.C. M
El Toro	-37,27	-71,46	Endesa	1973	Embalse	450	1 510	97	545
Abanico	-37,36	-71,49	Endesa	1948-1959	Pasada	136	360	107	147
Antuco	-37,31	-71,62	Endesa	1981	Pasada	320	1 610	190	190
Rucue	-37,36	-71,87	Colbún	1998	Pasada	170	980	65	140
Quilleco	-37,35	-71,90	Colbún	2007	Pasada	70	450	130	60

Fuente: Elaboración propia.

DIAGRAMA A5.2 ESQUEMA TOPOLÓGICO DEL SISTEMA LAJA



Fuente: Elaboración propia.

2. Metodología de análisis

La metodología requerida para llevar a cabo el análisis de los impactos del cambio climático en las cuencas de estudio contempla dos etapas: la primera consiste en el desarrollo de modelos hidrológicos; y la segunda en establecer relaciones entre las condiciones hidrológicas y la generación de electricidad en ambas cuencas.

a) Construcción del modelo hidrológico

La construcción del modelo hidrológico consta de cuatro subetapas principales. En primer lugar, un análisis climatológico que busca caracterizar las variables forzantes principales (precipitación y temperatura) en la zona de estudio. En segundo lugar, el análisis físico-espacial que busca representar el sistema hidrológico mediante relaciones matemáticas simplificadas. Esta última etapa comprende la construcción, calibración y validación de los modelos hidrológicos por cada subcuenca relevante en el sistema de generación hidroeléctrica. Una vez que se cuenta con un modelo calibrado es posible realizar simulaciones bajo condiciones futuras previa generación de estos escenarios climatológicos. A continuación se describe brevemente cada una de estas etapas.

Análisis climatológico

La información climatológica está basada en las estaciones meteorológicas disponibles en la zona de estudio, principalmente aquellas a cargo de la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas (DGA-MOP). Los casos en que la estadística presenta vacíos, fueron rellenados con datos de estaciones contiguas con las que se tiene un grado aceptable de correlación, ya sea directa o sobre la base de modelos estadísticos. Debido a que los sistemas presentan comportamientos hidrológicos mixtos, siendo de tipo nival en las cabeceras y pluvial en su desembocadura, se produjeron diversas

subcuencas y se agruparon mediante el uso de bandas altitudinales. La metodología se adecuó sobre la base de las características de cada variable y estación meteorológica, con el objetivo de minimizar el error. Una descripción detallada del proceso de análisis climatológico se puede revisar en el apéndice IIa.

Análisis físico-espacial

Parámetros tales como permeabilidad, dimensiones de los acuíferos y usos del suelo, entre otros, son definidos en primera instancia a partir de estudios disponibles en la bibliografía. En una segunda etapa, son ajustados durante el proceso de calibración del modelo hidrológico, de tal forma que la interacción de elementos del sistema entregue como respuesta lo observado en los diversos nodos de control (caudal) definidos dentro de los sistemas.

Una primera etapa del análisis físico espacial consiste en la definición de subcuencas, lo que tiene directa relación con la disponibilidad de las estaciones de control disponibles y los puntos de extracción y restitución que tengan influencia sobre el comportamiento global del sistema. Esta subdivisión permite hacer una clasificación hidroclimática del sistema, agrupando subcuencas con un mismo régimen hidrológico. El criterio para determinar los puntos de salida de cada una fueron:

- i) coincidencia con estaciones fluviométricas que permitan medir flujos intermedios, lo que permite controlar y calibrar el modelo hasta dicho punto de control;
- ii) coincidencia con bocatomas de importancia;
- iii) medición de los aportes de cuencas intermedias; y
- iv) delimitar la cuenca según los regímenes de caudales (nivales y nivopluviales).

En el sistema Maule Alto se definieron un total de siete subcuencas, que se detallan en el cuadro A5.7. La caracterización de las subcuencas se presenta en el mapa A5.5.

En el sistema Laja se definieron nueve subcuencas que son descritas en el cuadro A5.8 y que se ilustran en el mapa A5.6.

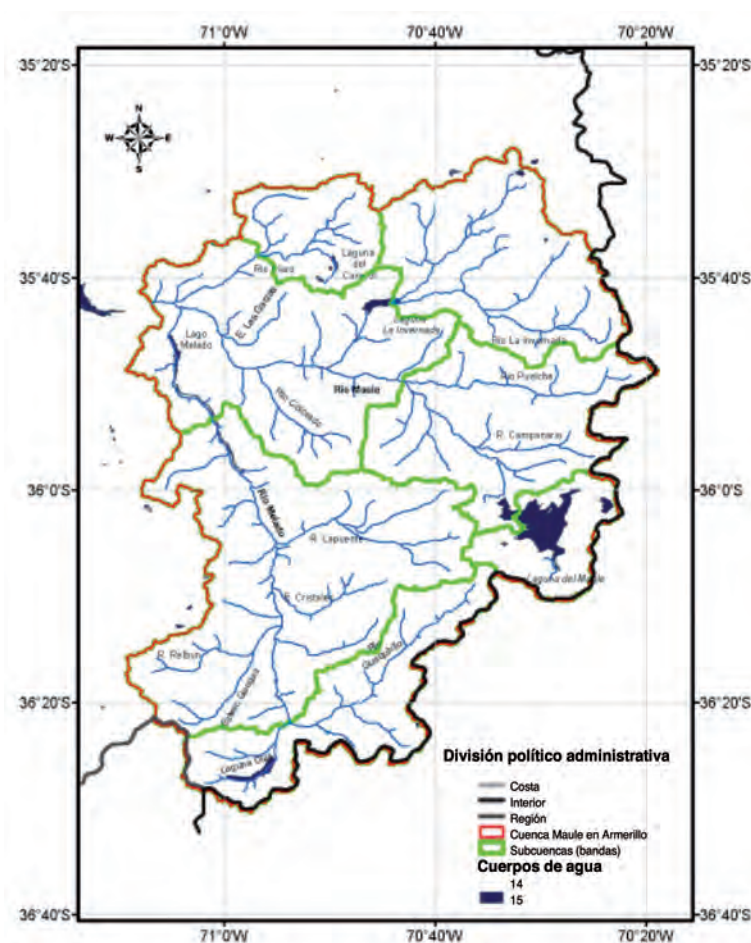
A continuación se determinaron las bandas de elevación de ambos sistemas, lo que tiene directa relación con la definición de los puntos o lugares de interés de cada subcuenca. La subdivisión de la cuenca en bandas de elevación permitirá identificar con mayor precisión los eventuales cambios en la estacionalidad de los caudales. En cada una de las subcuencas se define una división por bandas altitudinales, que son espaciadas cada 300 metros aproximadamente.

CUADRO A5.7
PUNTOS DE CONTROL EN EL SISTEMA MAULE ALTO

Lugar	Latitud sur	Longitud oeste	Observaciones	Régimen
Alto Claro	35° 38' 03"	70° 56' 44"	Define la subcuenca de cabecera del río Claro.	Nival
Afluente Invernada	35° 42' 23"	70° 44' 06"	Define la subcuenca aportante de la laguna La Invernada.	Nival
Puelche en junta con Maule	35° 49' 48"	70° 43' 00"	Define la cuenca de cabecera del río Puelche.	Nival
Afluente Maule	36° 02' 33"	70° 32' 35"	Define subcuenca aportante de la laguna del Maule.	Nival
Melado alto	36° 21' 50"	70° 53' 43"	Define la subcuenca aportante al Melado bajo.	Nival
Melado bajo	35° 53' 03"	71° 01' 08"	Define la subcuenca aportante al embalse Melado.	Nivopluvial
Armerillo	35° 42' 36"	71° 06' 59"	Subcuenca intermedia entre Puelche en junta con Maule y el punto de salida del sistema.	Pluvial

Fuente: Elaboración propia.

MAPA A5.5
SUBCUENCAS ADOPTADAS PARA EL SISTEMA MAULE ALTO



Fuente: Elaboración propia.

Para cada una de las bandas de elevación de las subcuencas es necesario hacer una transposición de la estadística meteorológica base. Para el caso de la precipitación existen dos alternativas para hacerla:

- i) utilizar gradientes sobre la base del promedio histórico de las precipitaciones anuales totales; y
- ii) utilizar gradientes sobre la base de las precipitaciones promedio mensuales históricas.

El uso de una u otra alternativa dependerá de la disponibilidad de información observada, pues en el caso del sistema Maule, la transformación de caudales observados en precipitación efectiva puede introducir un error que no permitiría emplear gradientes mensuales. Una descripción detallada de ambas metodologías se presenta en el análisis “Disponibilidad futura de los recursos hídricos en Chile frente a escenarios de cambio climático”, realizado por Ximena Vargas (en prensa). La metodología de transposición se elige en función de los resultados del modelo hidrológico calibrado.

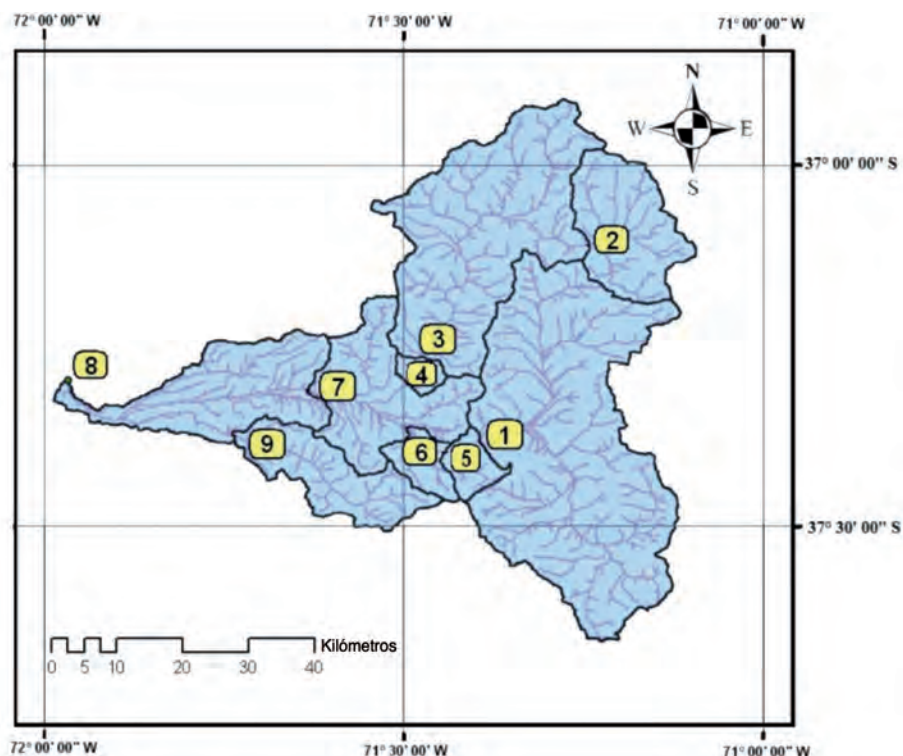
En el caso de la temperatura, la disponibilidad de información en la zona alta de cada sistema estudiado es limitada. Existen pocas estaciones en la cuenca del Maule y ninguna en la cuenca del Laja. Frente a este hecho, es necesario desarrollar metodologías adecuadas para extrapolar la información medida a grandes extensiones de terreno.

CUADRO A5.8
PUNTOS DE CONTROL EN SISTEMA LAJA

Nº	Punto	Latitud sur	Longitud oeste	Observaciones
1	Afluente al Laja	37° 22' 55"	71° 23' 41"	Define la cuenca que aporta sus aguas al lago Laja.
2	Alto Polcura	37° 06' 33"	71° 14' 30"	Ubicado en la extracción hacia el lago Laja.
3	Polcura antes del Toro	37° 16' 16"	71° 27' 45"	Define la cuenca intermedia entre la extracción del Alto Polcura y la descarga de la central El Toro.
4	Polcura antes de la bocatoma Antuco	37° 18' 09"	71° 29' 38"	Define la cuenca intermedia entre el punto tres y la bocatoma a central Antuco.
5	Laja antes de bocatoma Abanico	37° 23' 49"	71° 26' 31"	Define el aporte intermedio entre la salida del lago y la bocatoma Abanico.
6	Laja antes de bocatoma Antuco	37° 21' 47"	71° 29' 46"	Define la cuenca intermedia entre el punto cuatro y la bocatoma a central Antuco.
7	Laja intermedia	37° 18' 46"	71° 38' 04"	Cuenca intermedia entre el punto seis y las bocatomas de riego de los canales Zañartu, Collao y Mirihue.
8	Laja final	37° 17' 53"	71° 58' 07"	Define la cuenca del tramo final del río, antes de la bocatoma Tucapel.
9	Rucue	37° 22' 30"	71° 44' 15"	Define la cuenca del río Rucue antes de la bocatoma a la central Rucue.

Fuente: Elaboración propia.

MAPA A5.6
SUBCUENCAS DEL SISTEMA LAJA



Fuente: Elaboración propia.

La metodología usada en este estudio es la siguiente:

- i) definir gradientes de variación mensual de temperaturas, relacionando los promedios históricos mensuales en las estaciones disponibles con la altitud en la que se encuentran ubicadas las estaciones; y
- ii) sobre la base de los promedios mensuales históricos de una estación base, calcular un factor de conversión mensual entre dicha estación de referencia y los resultados de temperatura mensual obtenidos mediante el método de los gradientes definidos en el punto *i*. Esto permitiría reflejar las diferencias de amplitud térmica estacional entre la estación base y las bandas calculadas. Esta posibilidad no es definitiva y será evaluada mediante la modelación hidrológica que se llevará a cabo.

Los resultados obtenidos indican una adecuada relación entre la altitud de las estaciones y sus promedios mensuales históricos, en ambos sistemas.

Calibración de parámetros del modelo

El cuadro A5.9 muestra los parámetros que son necesarios calibrar para cada subcuenca del modelo hidrológico WEAP, que corresponden a variables conceptuales que determinan el proceso de precipitación-escurrimiento. Estas variables son estimadas, en principio, por información recopilada para la zona de estudio. Posteriormente son calibradas para obtener simulaciones acordes a las observaciones de los puntos de control.

En el caso del sistema Maule Alto, se han calibrado las principales subcuencas aportantes al sistema que corresponden al río Las Garzas y Claro, al afluente laguna La Invernada, al afluente laguna del Maule y al afluente embalse Melado. De acuerdo con lo que se presenta en el cuadro A5.10 el grado de ajuste de estas calibraciones según el criterio de Nash-Sutcliffe es satisfactorio. A modo de ejemplo, se presenta en los gráficos A5.2 y A5.3 el ajuste a nivel de medios mensuales y medios anuales de la subcuenca Río Garzas y Claro, indicando en general pequeñas diferencias porcentuales, salvo en algunos años donde el modelo subestima los máximos observados.

CUADRO A5.9
PARÁMETROS A CALIBRAR EN MODELO HIDROLÓGICO WEAP

Parámetros de calibración	Tipo
Melting Point	Clima
Freezing Point	Clima
Initial Snow	Clima
Wind	Clima
Kc	Suelo
Soil Water Capacity	Suelo
Deep Water Capacity	Suelo
Runoff Resistance Factor	Suelo
Root Zone Conductivity	Suelo
Deep Conductivity	Suelo
Preferred Flow Direction	Suelo
Initial Z1	Suelo
Initial Z2	Suelo

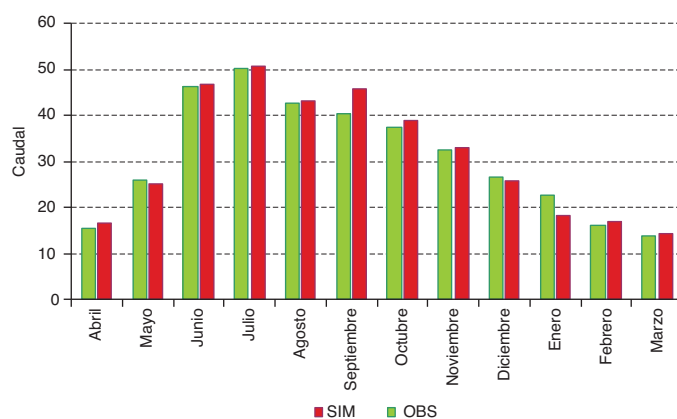
Fuente: Elaboración propia.

CUADRO A5.10
GRADO DE AJUSTE EN CALIBRACIÓN DEL SISTEMA MAULE ALTO

Subcuenca	Nash-Sutcliffe
Estero las Garzas y río Claro	0,69
Afluente laguna La Invernada	0,82
Afluente laguna del Maule	0,58
Afluente embalse Melado	0,75

Fuente: Elaboración propia.

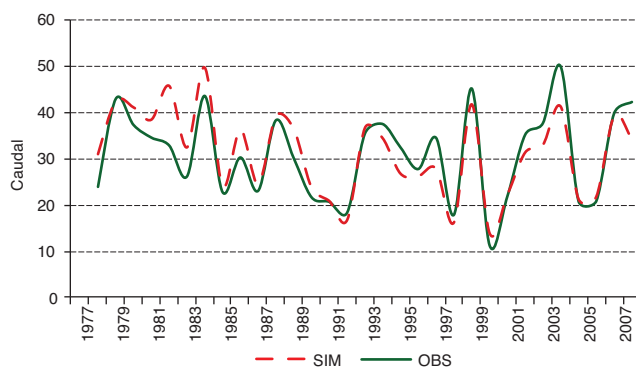
GRÁFICO A5.2
CALIBRACIÓN DE PROMEDIOS MENSUALES HISTÓRICOS^a
(En metros cúbicos por segundo)



Fuente: Elaboración propia.

^a En verde lo observado en las Garzas y Claro y en rojo lo simulado.

GRÁFICO A5.3
CALIBRACIÓN DE MEDIOS ANUALES^a
(En metros cúbicos por segundo)



Fuente: Elaboración propia.

^a En verde lo observado en las Garzas y Claro y en rojo lo simulado.

En el caso del sistema Laja se calibraron dos subcuencas: caudal afluente a la laguna Laja y Laja en punto de salida. En el caso de la segunda calibración es importante recalcar que fue necesario incorporar extracciones de riego intermedias, que corresponden a los canales Mirrihue, Zañartu, Collao, Laja Sur y en los últimos años Laja-Diguillín. Al igual que en el caso del Maule Alto se ha logrado una adecuada calibración en este sistema tal como se puede apreciar en el cuadro A5.11 y en los gráficos A5.4 y A5.5 que muestran como ejemplo caudales promedio mensual y anual para el caudal de afluente a la laguna Laja.

CUADRO A5.11
GRADO DE AJUSTE EN CALIBRACIÓN DEL SISTEMA LAJA

Subcuenca	Nash-Sutcliffe
Afluente laguna Laja	0,67
Laja en punto de salida	0,78

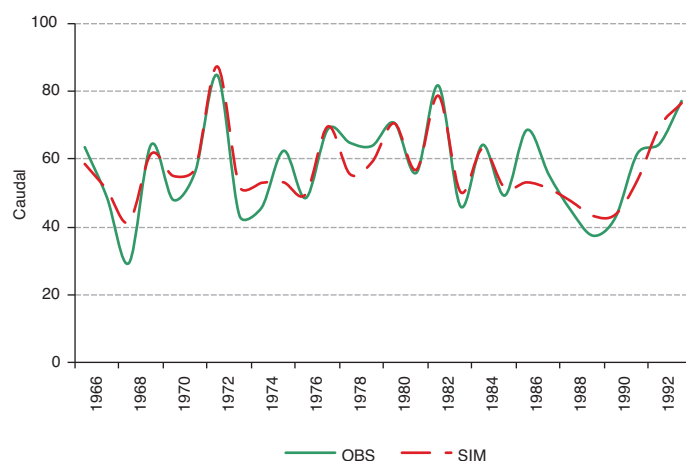
Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO A5.4
COMPARACIÓN DE VARIACIÓN ESTACIONAL DEL PERÍODO DE CALIBRACIÓN CON
LOS CAUDALES OBSERVADOS DEL AFLUENTE A LA LAGUNA LAJA, 1966-1994
(En metros cúbicos por segundo)



Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO A5.5
COMPARACIÓN DE CAUDALES MEDIOS ANUALES DEL PERÍODO DE CALIBRACIÓN
CON LOS CAUDALES OBSERVADOS DEL AFLUENTE A LA LAGUNA LAJA, 1966-1994
(En metros cúbicos por segundo)



Fuente: Elaboración propia.

Generación de escenarios climatológicos

Los escenarios climatológicos futuros en las cuencas del Maule Alto y Laja fueron producidos utilizando una metodología de *downscaling* de los resultados del modelo de cambio global HadCM3-A2 y B2. Esta metodología se describe en los apéndices IIa, IIb y IIc.

b) Relación hidrología-generación

La energía generada en cada central del SIC depende de decisiones dinámicas que son tomadas por el conjunto de los operadores del sistema, representados en el Centro de Despacho Económico de Carga del Sistema Interconectado Central (CDEC-SIC). Si bien los criterios generales de operación son conocidos, en el sentido de que las centrales hidroeléctricas tienen prioridad por sobre las térmicas para entregar energía al sistema, y que de estas, las centrales de pasada tendrían preeminencia sobre las centrales de embalse, el despacho de energía de cada sistema hidroeléctrico al SIC se decide sobre la base de un modelo de operación en que las variables de estado son la energía esperada disponible en cada unidad generadora del SIC. Así, la energía despachada de cada unidad es función del potencial de generación esperado en todos los subsistemas del SIC. Dicho potencial de generación, para el sistema completo, es función de la disponibilidad de recursos hídricos y de la configuración presente y futura (potencia instalada, combustible) de las fuentes térmicas del sistema. La simulación acoplada de todas las unidades del SIC en escenarios futuros no solo depende de las proyecciones climáticas, sino de las proyecciones de demanda y planes de expansión de capacidad instalada de fuentes hidroeléctricas y térmicas.

Dicha simulación acoplada escapa a los alcances de este estudio, por lo que en el desarrollo de este trabajo se supondrá que los criterios de despacho actuales se mantendrán constantes en el futuro, y que estos criterios de despacho son representables mediante relaciones estadísticas entre la energía generada en cada central y variables hidrológicas naturales. Por variables hidrológicas naturales se entiende aquéllas que no son función de decisiones de operación de los generadores eléctricos, es decir, incluyen caudales pasantes en cuencas de cabecera y no incluyen niveles de embalse en cuerpos de agua con obras de entrega.

La dependencia de la generación hidroeléctrica respecto de la variabilidad hidrológica es un hecho. La escala de tiempo de dicha interdependencia varía desde lo instantáneo, en el caso de las centrales de pasada, hasta la interanualidad, en el caso de los grandes embalses.

Establecer una relación directa entre la generación hidroeléctrica y el caudal utilizable es, sin embargo, una tarea sujeta a incertidumbre. Por una parte, la información que relaciona las energías generadas con los caudales empleados, en un período suficientemente largo, no se encuentra disponible. Se trata de información estratégica para las empresas. Por otra parte, la industria energética es extremadamente dinámica, en especial en las últimas dos décadas, debido sobre todo al fuerte crecimiento del país. La evaluación y puesta en marcha de proyectos posee agendas claramente definidas para varios años hacia el futuro, lo que no restringe la entrada de nuevos proyectos y la salida de otros, ya sea por variaciones en el mercado de la electricidad o por nuevas consideraciones surgidas con posterioridad al desarrollo de planes de expansión de capacidad instalada.

A continuación se describe brevemente la manera en que se relacionará la disponibilidad de recursos hídricos con la generación eléctrica de Chile⁵. El supuesto principal consiste en que existe una estrecha relación entre la generación hidroeléctrica y los caudales disponibles en las cabeceras de las cuencas Maule Alto y Laja. Además, es posible determinar una relación entre el SIC-H (solo la componente hidroeléctrica del SIC) y los sistemas Maule Alto y Laja que permitiría, *ceteris paribus*, extrapolar el impacto local sobre los sistemas a todo el SIC-H. Esto último, sin embargo, se evaluará una vez obtenidos los resultados. Esta parte de la metodología de análisis presenta limitaciones, al no considerar dentro de la modelación física de las cuencas la operación de los sistemas hidroeléctricos (que sí se ha hecho desde el punto de vista hidrológico). Se ha tenido que recurrir a relaciones estadísticas que permitan relacionar la hidrología con la generación. Los cambios hidrológicos, asociados al aumento de temperatura y disminución de precipitación, que se proyectan para las cuencas hidroeléctricas, podrían incidir fuertemente en la manera en que se operan estos sistemas, en especial si se toman en cuenta las necesidades de otros usuarios en la cuenca (regantes). Para poder llevar a cabo ese tipo de análisis es importante en ese caso incluir no solo los aspectos físicos, sino también los aspectos operacionales de los sistemas en estudio. Ese tipo de análisis se tendrá que realizar en una oportunidad posterior.

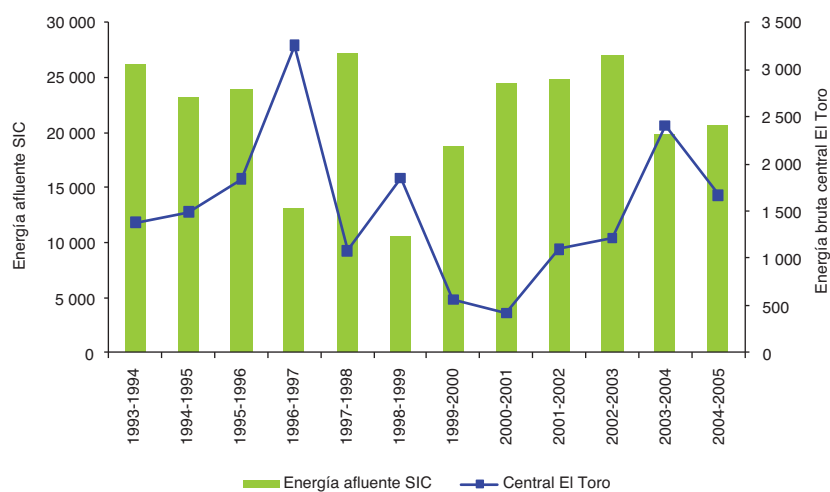
Sistema Maule Alto

Basados en la información de energía afluente al SIC que proviene de la Comisión Nacional de Energía (CNE, 2009) y la información de generación bruta mensual extraída de los anuarios de estadísticas de operación del CDEC-SIC (2009), se establece la relación entre la generación bruta del Maule Alto y la energía bruta total afluente al Sistema Interconectado Central (SIC), del cual forman parte las centrales ubicadas en la cuenca. Dicha interdependencia se indica en el gráfico A5.6, que muestra la energía total anual generada en el SIC (barras) y la energía generada en el sistema Maule Alto (línea).

El sistema Maule Alto aporta una fracción de la energía total generada por el SIC, pero existe una clara correspondencia entre lo global y lo local. Esto se explica por la fuerte dependencia del sistema Maule Alto a la variabilidad hidrológica instantánea, producto del predominio de las centrales de pasada respecto de las centrales de regulación mediante embalses. Esto se ve reflejado en la correlación a nivel mensual, en los promedios mensuales históricos, y la correlación anual, en la producción bruta total anual del período disponible (1993-2007). Los gráficos A5.7 y A5.8 indican las relaciones respectivas obtenidas. Los caudales considerados en todos los casos son: afluente a laguna del Maule, afluente a laguna La Invernada, afluente a embalse Melado, afluente a río Claro en San Carlos y efluente del estero Las Garzas.

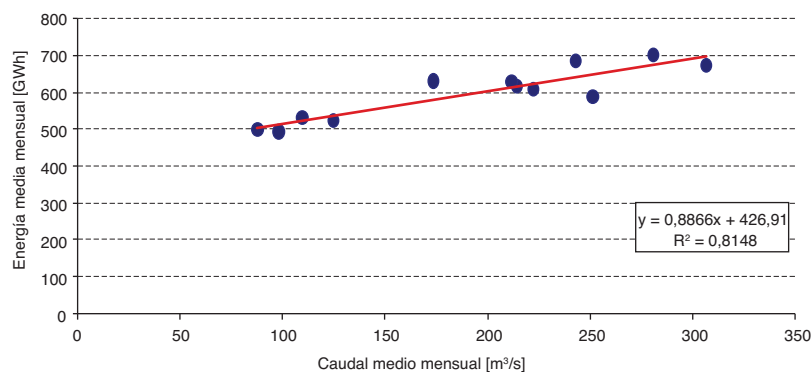
⁵ Mayores detalles de esta relación se pueden consultar en el “Análisis de la vulnerabilidad del sector hidroeléctrico en Chile frente a escenarios futuros de cambio climático” (McPhee, en prensa).

GRÁFICO A5.6
RELACIÓN ENTRE ENERGÍA BRUTA GENERADA EN LA ZONA DE ESTUDIO
Y LA ENERGÍA BRUTA AFLUENTE AL SIC-H, 1993-2005
(En GWh)



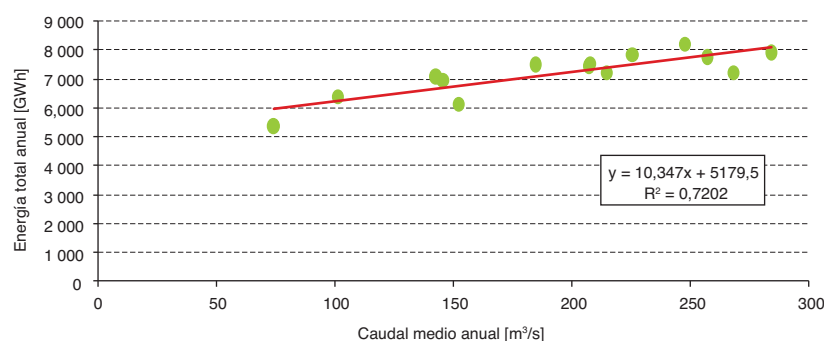
Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO A5.7
RELACIÓN ENTRE EL CAUDAL MEDIO MENSUAL PROMEDIO HISTÓRICO
AFLUENTE AL SISTEMA MAULE ALTO Y LA ENERGÍA MEDIA MENSUAL
PROMEDIO HISTÓRICO PRODUCIDA EN LA ZONA
(En GWh)



Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO A5.8
RELACIÓN ENTRE EL CAUDAL MEDIO ANUAL EFLUENTE DEL SISTEMA MAULE
ALTO Y LA ENERGÍA TOTAL ANUAL PRODUCIDA EN LA ZONA
(En GWh)



Fuente: Elaboración propia.

No obstante lo anterior, se ha determinado que existe una relación no lineal entre los períodos concurrentes de caudales afluentes al sistema Maule Alto y la energía generada mensualmente por dicho sistema. En el gráfico A5.9 se indica dicha relación, que se evaluará junto con aquella establecida en el gráfico A5.10.

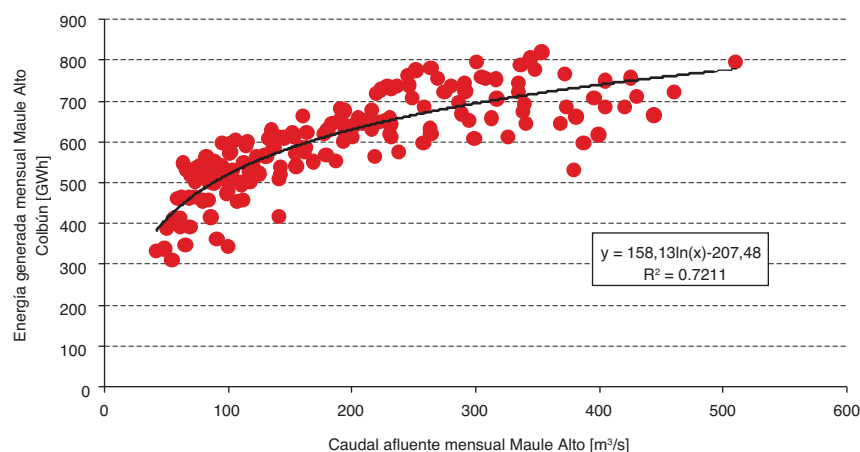
Mediante la simulación hidrológica de las cuencas de cabecera señaladas anteriormente, será posible determinar el caudal afluente futuro al sistema Maule Alto. A su vez, las relaciones estimadas entre caudal y energía, indicadas en los gráficos anteriores, serán las herramientas que permitirán unir el comportamiento físico climático del sistema con su producción hidroeléctrica.

El indicador para definir el impacto futuro del cambio climático sobre la producción hidroeléctrica en el sistema se basará, en primera instancia, en la curva de duración de la energía media mensual producida por la suma de las centrales hidroeléctricas Cipreses, Isla, Curillínque, Loma Alta y Pehuenche. Esta curva se obtuvo ajustando la mejor curva de distribución de probabilidades (Log-Pearson).

Utilizando las probabilidades de excedencia del 75%, 85% y 95% como criterios de estrés, se identificará la frecuencia de fallas o de déficit de producción en el presente y futuro, con lo que será posible identificar cambios en el patrón de producción hidroeléctrica futura del sistema Maule Alto.

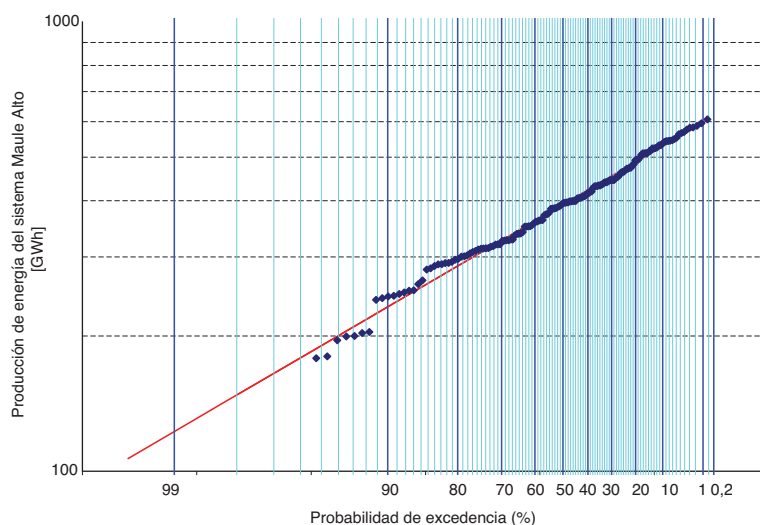
Una segunda alternativa en evaluación considera como indicador un valor de referencia sobre la base de la energía total anual producida en el sistema. De esta forma, se podrá estudiar cómo afecta el cambio climático a la producción anual total futura del sistema.

GRÁFICO A5.9
RELACIÓN ENTRE EL CAUDAL MEDIO MENSUAL AFLUENTE AL SISTEMA MAULE ALTO Y LA ENERGÍA MEDIA MENSUAL PRODUCIDA EN LA ZONA, 1993-2007
 (En GWh)



Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO A5.10
ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA EN EL SISTEMA MAULE ALTO, DISTRIBUCIÓN LOG-PEARSON
 (En GWh)



Fuente: Elaboración propia.

Sistema Laja

El sistema Laja es el único sistema de generación hidroeléctrica del país con capacidad de regulación interanual de caudales. Es decir, dado el gran volumen de la laguna (más de 7.000 millones de m³), es posible operar el sistema acumulando aguas en años normales y húmedos para utilizarla durante años secos, sin incurrir en vertimientos excesivos –en contraste, los embalses del sistema Maule poseen limitada capacidad de regulación y solo logran acumular aguas entre estaciones de un

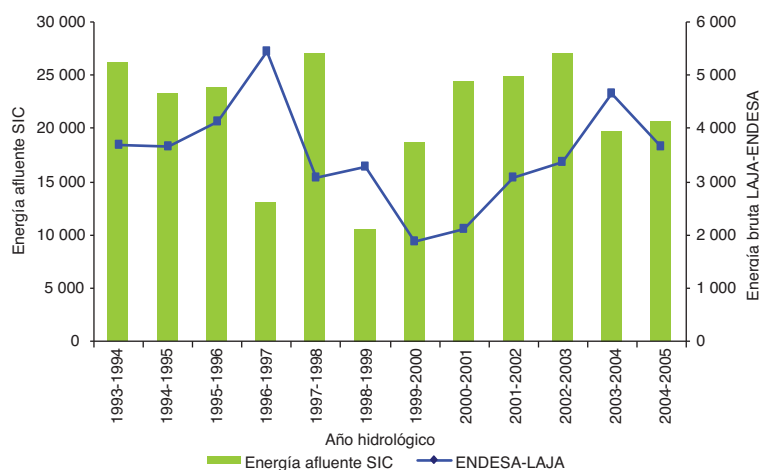
mismo año—. Por consiguiente, históricamente el sistema Laja presenta patrones de generación distintos a los del resto de los sistemas hidroeléctricos del SIC y muestra un desfase respecto de la hidrología, lo que se traduce en que en años húmedos el Laja tiende a generar menos que el resto de las centrales hídricas (para acumular recursos), y en años secos la laguna apoya al SIC, mientras el resto de las centrales funcionan a menor capacidad.

La potencia instalada total del sistema Laja es de 1.146 MW, convirtiéndose en uno de los más importantes del país a nivel individual. En este sentido, la capacidad de almacenamiento de la laguna Laja permite que la generación del sistema vaya en una correlación inversa a la generación del SIC, poniendo de manifiesto el rol regulador de la cuenca. Como se observa en el gráfico A5.11, en años secos, cuando el SIC tiene sus mínimos de generación, el Sistema Laja tiene sus máximos, y viceversa. Esta correlación inversa se aprecia mejor estacionalmente, ya que los máximos de generación del sistema Laja se producen en la época estival, cuando el SIC tiene su mínima producción hidroeléctrica. En el gráfico A5.12 se incluye la producción del sistema Maule Alto, que sí se correlaciona de manera relevante con el SIC, indicando con claridad la contraestacionalidad del sistema Laja.

El procedimiento descrito para el sistema Maule Alto es igualmente válido en este sistema, pues la información disponible es de similares características. Es decir, por medio de una relación entre el caudal afluente en las cabeceras y la energía producida en el sistema Laja se podrá determinar el impacto futuro del cambio climático. Metodológicamente, la única diferencia radica en que se explorarán relaciones que expresen el efecto regulador de la Laguna. Así, si para el sistema Maule Alto la generación de energía de un año cualquiera tiene directa relación con el caudal medio anual afluente, para el sistema Laja se buscarán relaciones estadísticas que incorporen caudales de uno, dos y hasta tres años de desfase. Los coeficientes de regresión de dichos caudales podrán ser positivos o negativos.

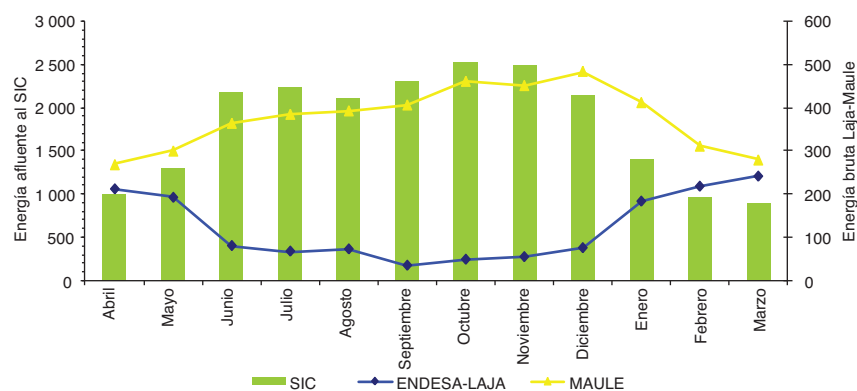
En el gráfico A5.13 se muestra la simulación de un modelo polinómico ajustado en función de tres variables: afluente natural a la laguna Laja, captación del Alto Polcura y caudal en la hoyá intermedia. El gráfico A5.14 indica el grado de ajuste de dicho modelo polinómico a los caudales observados.

GRÁFICO A5.11
RELACIÓN ENTRE LA GENERACIÓN ANUAL DEL SISTEMA LAJA
Y LA ENERGÍA BRUTA TOTAL AFLUENTE AL SIC
(En GWh)



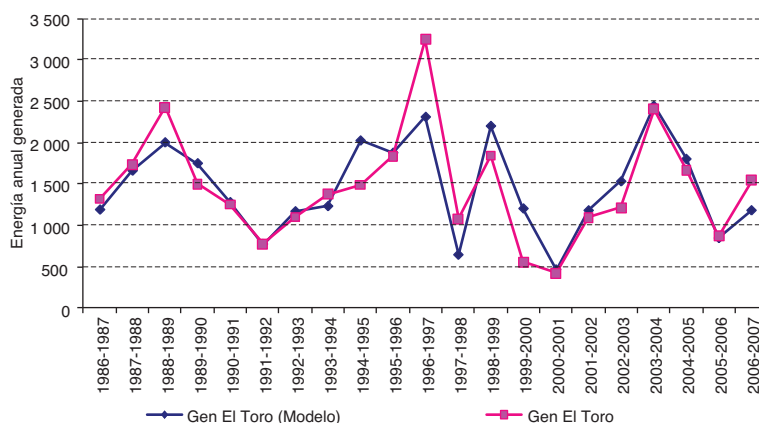
Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO A5.12
RELACIÓN ESTACIONAL DEL SISTEMA LAJA Y MAULE ALTO RESPECTO
DE LA ENERGÍA BRUTA TOTAL AFLUENTE AL SIC
(En GWh)



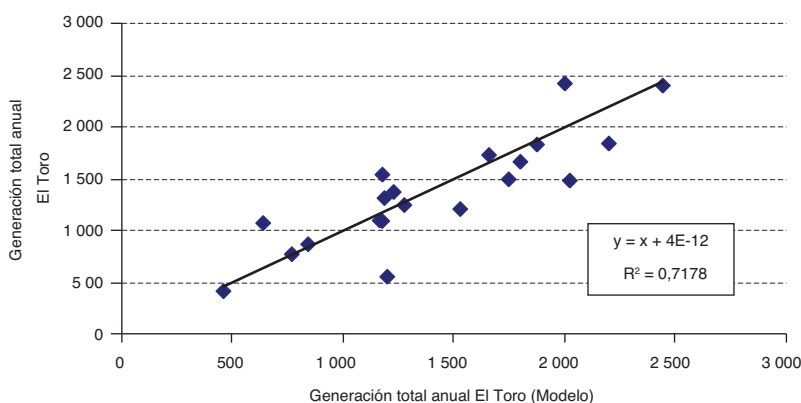
Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO A5.13
SIMULACIÓN DEL CAUDAL TURBINADO EN LA CENTRAL EL TORO, 1985-2008
(En GWh)



Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO A5.14
CORRELACIÓN OBTENIDA ENTRE LOS CAUDALES SIMULADOS Y TURBINADOS
POR LA CENTRAL EL TORO
(En GWh)



Fuente: Elaboración propia.

3. Resultados

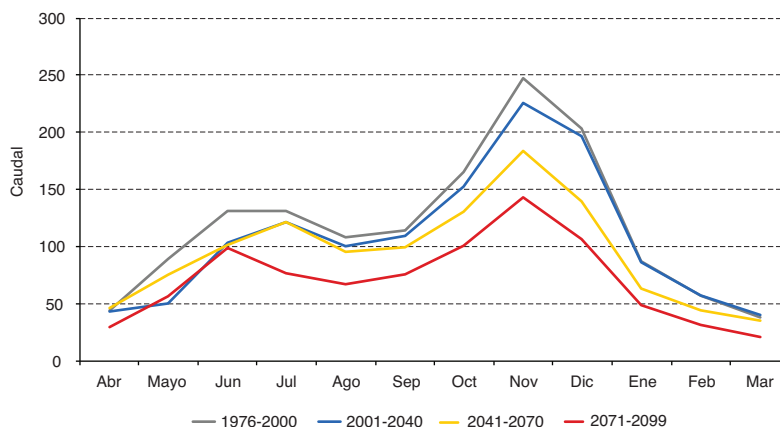
a) Escenarios climatológicos e hidrológicos

Los modelos calibrados de los sistemas Maule Alto y Laja fueron utilizados para simular una serie de caudales mensuales para el período futuro⁶. El escenario futuro considerado en estos resultados corresponde al escenario HadCM3-A2. En el gráfico A5.15 se presentan los cambios hidrológicos proyectados para la subcuenca afluente embalse Melado en el sistema Maule Alto para el escenario A2 y el gráfico A5.16 presenta los resultados para la subcuenca afluente a laguna Laja en el sistema Laja (véanse mayores detalles en el apéndice III).

Se presenta la comparación de los caudales promedio mensual entre el período de referencia (1976-2000) y tres ventanas futuras: definidas por los períodos 2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100. De acuerdo con los resultados se puede apreciar una progresiva disminución de caudales que llega a valores en torno al 40% de reducción hacia finales del siglo XXI. Respecto de la relación entre precipitación y caudal, desde un comienzo se observa que la reducción de caudal es más pronunciada que en la precipitación. Las causas pueden ser múltiples, pero se debe prestar especial atención a la disminución de las reservas acuíferas y al aumento de la evaporación y demanda evapotranspirativa, por lo que se recomienda analizar estas interacciones en estudios posteriores. Además, se sugiere el análisis de la variación futura de las coberturas nivales, como otro factor relevante. En ambos casos se observa un cambio importante en la estacionalidad (creció el aporte relativo de los caudales de invierno por sobre los caudales de verano) lo que se explica por el aumento de temperaturas. Este cambio no es evidente en otras subcuencas analizadas (véase el apéndice III).

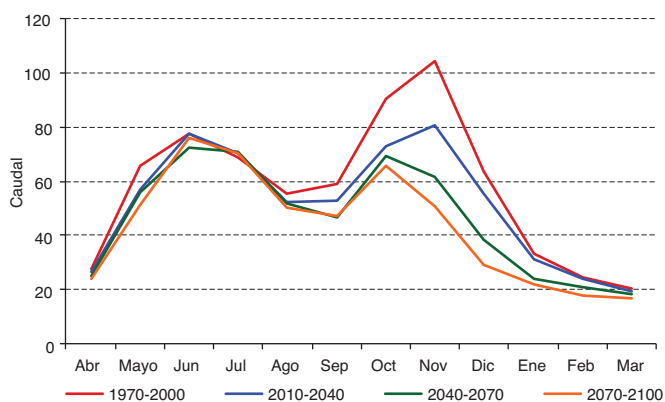
⁶ Esta simulación se realizó después de la validación de la reducción de escala de condiciones climáticas, producidas para el período histórico, para que originaran caudales que estuvieran correctamente relacionados con los caudales observados.

GRÁFICO A5.15
CONDICIONES HIDROLÓGICAS FUTURAS EN SUBCUENCA AFLUENTE A EMBALSE
MELADO DEL SISTEMA MAULE ALTO DE ACUERDO CON EL ESCENARIO
HadCM3-A2, CAUDAL HISTÓRICO OBSERVADO, 1976-2000
(En metros cúbicos por segundo)



Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO A5.16
CONDICIONES HIDROLÓGICAS FUTURAS EN SUBCUENCA AFLUENTE LAGUNA
LAJA DE ACUERDO CON EL ESCENARIO HadCM3-A2 Y CAUDAL HISTÓRICO
OBSERVADO, 1970-2000
(En metros cúbicos por segundo)



Fuente: Elaboración propia.

b) Escenarios de generación hidroeléctrica

Los cambios en las condiciones hidrológicas presentados con anterioridad tienen como consecuencia una reducción en la generación hidroeléctrica en condiciones promedio. En el cuadro A5.12 se pueden apreciar dichos cambios para el sistema Maule Alto-Colbún⁷ y en el cuadro A5.13 se presentan los cambios para la central El Toro (ubicada a la salida de la laguna Laja) y en el cuadro A5.14 las centrales ubicadas en la hoya intermedia del sistema Laja. Se puede observar que en todos

⁷ La relación entre generación y caudales en el sistema Maule incluye la generación del embalse Colbún.

CUADRO A5.12
COMPARACIÓN DE ENERGÍA ANUAL GENERADA EN PERÍODOS FUTUROS,
SISTEMA MAULE ALTO-COLBÚN

Período	Generación promedio anual (GWh)	Variación (%)	Desviación (GWh)	Máximo (GW)	Mínimo (GWh)
1976-2000	7 281,5	0	622,4	8 361,2	6 357,0
2010-2040	7 044,5	-3,3	433,6	7 982,1	6 219,4
2040-2070	6 819,7	-6,3	317,6	7 621,1	6 397,3
2070-2100	6 479,8	-11,0	316,7	7 080,9	5 960,3

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO A5.13
COMPARACIÓN DE ENERGÍA ANUAL GENERADA EN PERÍODOS FUTUROS,
CENTRAL EL TORO

Período	Generación promedio anual (GWh)	Variación (%)	Desviación (GWh)	Máximo (GWh)	Mínimo (GWh)
1972-2000	1 508,4	0	395,1	2 714,5	909,8
2010-2039	1 487,2	-1,4	317,3	2 177,7	811,4
2040-2069	1 395,6	-7,5	273,8	2 065,3	793,4
2070-2099	1 362,1	-9,7	276,0	1 874,9	739,9

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO A5.14
GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA HISTÓRICA Y FUTURA, ESCENARIO A2,
EN LA HOYA INTERMEDIA DEL SISTEMA LAJA

Período	Generación promedio anual (GWh)	Variación (porcentajes)
1972-2000	3 000	-
2010-2040	2 727	-9
2041-2070	2 460	-18
2071-2099	2 379	-21

Fuente: Elaboración propia.

los casos existe una disminución en la generación de hidroelectricidad. Sin embargo, excepto en el caso de la hoya intermedia del sistema Laja, los cambios porcentuales en generación son menores que los cambios porcentuales en caudal. Esto se puede deber a varias razones: una está asociada a la capacidad de regulación del sistema Maule Alto y de la laguna Laja, que evita que se propaguen de manera proporcional los cambios en caudal y la otra está asociada a lo último, es quizás el hecho de que las centrales históricamente no son capaces de generar con los caudales mayores (tienen un tope en la capacidad de generación) y, por lo tanto, la reducción de la disponibilidad hidrológica, en parte, no afecta la generación que históricamente tampoco existía.

c) Extrapolación a otras cuencas con desarrollo hidroeléctrico

Con el fin de obtener una estimación del impacto de escenarios de cambio climático sobre el potencial de generación hidroeléctrica en el SIC, dada su configuración actual, se estudió la generación histórica en todas las centrales hidroeléctricas del sistema y se la relacionó con las proyecciones de energía ya desarrolladas para las cuencas del Maule y Laja. Asimismo, se elaboró una relación específica caudal *versus* energía para la cuenca del río Maipo, dado que en dicho caso se calcularon caudales futuros como parte del estudio de variabilidad hidrológica. Las centrales hidroeléctricas incluidas en el análisis se agruparon por cuencas hidrográficas (véanse el cuadro A5.15 y el mapa A5.7). Los resultados que se presentan no consideran aún las diferencias que existen en las proyecciones de precipitación para cada una de las cuencas consideradas. Estos cambios relativos serán tomados en cuenta en la versión final de la estimación de los impactos en generación.

CUADRO A5.15
CENTRALES HIDROELÉCTRICAS SIC INCLUIDAS EN EXTENSIÓN DE RESULTADOS

Central	Cuenca	Central	Cuenca
Aconcagua	Aconcagua	El Toro	Laja
Chacabucuito	Aconcagua	Quilleco	Laja
Hornitos	Aconcagua	Rucue	Laja
Los Quilos	Aconcagua	Alfalfal	Maipo
Sauce Andes	Aconcagua	Florida	Maipo
Mampil	Biobío	Maitenes	Maipo
Palmucho	Biobío	Queltehues	Maipo
Pangue	Biobío	Volcán	Maipo
Peuchén	Biobío	Chiburgo	Maule
Ralco	Biobío	Cipreses	Maule
Coya	Cachapoal-Teno	Colbún	Maule
Rapel	Cachapoal-Teno	Curillinque	Maule
Sauzal	Cachapoal-Teno	Isla	Maule
Sauzalito	Cachapoal-Teno	Lircay	Maule
Pullinque	Panguipulli	Loma Alta	Maule
Capullo	Puyehue	Machicura	Maule
Pilmaiquén	Puyehue	Ojos de Agua	Maule
Abanico	Laja	Pehuenche	Maule
Antuco	Laja	San Ignacio	Maule

Fuente: Elaboración propia.

A partir del valor de energía anual generada, obtenido de la página web de la CNE, y de los datos del caudal observado fue posible construir relaciones estadísticas entre las variables de interés. Estas relaciones se indican a continuación:

$$EACN = 0,88 \cdot EMPO - 655$$

$$EMPO = 356 \cdot \ln(QMPO)$$

$$ECPL = 2,17 \cdot EMPO - 2010$$

$$EBB = 1,2 \cdot EMLE - 5226$$

$$EOS = 0,0423 \cdot EMLE + 142,9$$

MAPA A5.7**UBICACIÓN DE CUENCAS CONSIDERADAS EN TRABAJO DE EXTRAPOLACIÓN**

Fuente: Elaboración propia.

Donde EACN = energía anual centrales Aconcagua (GWh); EMPO = energía anual centrales Maipo (GWh); QMPO = caudal medio anual Maipo en San Alfonso (m^3/s); ECPL = energía anual centrales Cachapoal (GWh); EMLE = energía anual centrales Maule (GWh); EBB = energía anual centrales Alto Biobío a partir de 2004; EOS = energía anual centrales Panguipulli y Puyehue (GWh).

En el caso de la cuenca del río Maipo, se contó con caudales y energías históricas, así como proyecciones de caudal futuro desarrolladas en este estudio. Las mejores relaciones para Aconcagua y Cachapoal resultaron ser con la energía generada en Maipo, lo que no debe sorprender si se considera que las centrales existentes en estos sistemas son, al igual que en el Maipo, principalmente de pasada. En el caso de la cuenca del Biobío, el mejor ajuste resultó ser aquel con la energía generada en el sistema Maule. Es necesario puntualizar que solo se contó con cinco años de estadísticas de generación para el sistema Biobío en su configuración actual, esto es, a partir de la puesta en marcha de la central Ralco.

Utilizando las relaciones arriba indicadas y combinándolas con las variaciones de caudal en las cuencas del Maipo, Maule y Laja presentadas en el estudio de vulnerabilidad hidrológica, se obtienen las proyecciones de generación que se muestran en el cuadro A5.16. Las variaciones en el potencial de generación hidroeléctrica para todo el SIC en su configuración actual van desde un 11% en el período cercano hasta un 22% en el período futuro lejano. Esta variación está en línea con los cambios porcentuales estimados para la variable caudal, obtenidos en el estudio de vulnerabilidad hidrológica. Entre las cuencas individuales, la del río Biobío aparece como la más sensible, pero este resultado debe ser tomado con cautela debido a la escasa información histórica disponible y a posibles diferencias entre el régimen hidrológico del alto Biobío y el de la cuenca alta del río Maule. Por otra parte, la cuenca del río Maipo presenta pequeñas variaciones porcentuales, que resultan de una curva E *versus* Q (E: energía; Q: caudal) relativamente plana en el rango del caudal observado.

Para evaluar los impactos finales asociados a la reducción en generación hidroeléctrica, se ha asumido que asociado a esta baja en generación existe un aumento en generación termoeléctrica –con el combustible más barato, es decir, carbón– para compensar las pérdidas. Este es un supuesto razonable si consideramos que históricamente existe una correlación negativa entre la generación hidroeléctrica y termoeléctrica en el país tal como lo muestra el gráfico A5.17. Bajo estos supuestos se tiene, por una parte, una proyección futura de un incremento en los costos de operación y, por otra, un aumento en las emisiones de GEI asociado a la operación de las centrales termoeléctricas.

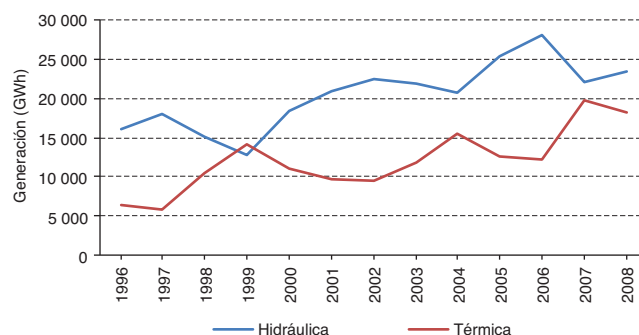
Se puede apreciar en el cuadro A5.17 que los impactos esperados en el sector hidroeléctrico son significativos incluso en el primer período de análisis. Como se verá con posterioridad, el nivel de emisiones de GEI asociado al primer período corresponderían, por ejemplo, a casi un 3% de las emisiones totales del sector energía en el año 2008. Si se consideran los impactos económicos se estima que el impacto asociado al primer período de análisis equivaldría a aproximadamente un 3% del aporte que tiene el sector electricidad, gas y agua al PIB nacional.

CUADRO A5.16
PROYECCIONES DE VARIACIÓN DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN
HIDROELÉCTRICO DEL SIC-ESCENARIOS A2 Y R2
(Valores en GWh)

	Aconcagua	Maipo	Cachapoal	Biobío	Maule	Laja	Otras sur	Total
Período referencia	1996-2008	1996-2008	1996-2008	2004-2008	1976-2008	1973-2000	1996-2008	NA
Energía anual base	756	1 584	1 555	4 798	7 282	4 508	455	20 938
Escenario A2, variaciones porcentuales								
	Aconcagua	Maipo	Cachapoal	Biobío	Maule	Laja	Otras sur	Total
2011-2040	-4%	-1%	-10%	-33%	-3%	-7%	-3%	-11%
2041-2070	-17%	-8%	-26%	-38%	-6%	-14%	-5%	-17%
2071-2099	-18%	-9%	-27%	-47%	-11%	-17%	-8%	-22%
Escenario B2, variaciones porcentuales								
	Aconcagua	Maipo	Cachapoal	Biobío	Maule	Laja	Otras sur	Total
2011-2040	-12%	-3%	-2%	-32%	-3%	-4%	-3%	-10%
2041-2070	-16%	-8%	-16%	-32%	-6%	-11%	-4%	-14%
2071-2099	-10%	-9%	-9%	-40%	-8%	-12%	-6%	-16%

Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO A5.17
COMPARACIÓN HISTÓRICA ENTRE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA Y
TERMOELÉCTRICA EN EL SIC
(En GWh)



Fuente: Sobre la base de datos de la Comisión Nacional de Energía (CNE) [en línea] www.cne.cl/, 2009.

CUADRO A5.17
CHILE: IMPACTOS ASOCIADOS AL CAMBIO CLIMÁTICO, ESCENARIOS A2 Y B2,
EN LA GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA

Período	Generación hidroeléctrica		Impactos asociados a aumento por generación termoeléctrica		
	GWh	Delta (porcentaje)	Reemplazo de generación (GWh) ^a	Emisión de GEI (tCO ₂ e/año)	Costo económico (millones de dólares/año)
1976-2000	20 938				
Escenario A2					
2011-2040	18 129	-13%	2 809	2 626 488	101
2041-2070	17 653	-16%	3 285	3 071 434	118
2071-2099	16 686	-20%	4 252	3 975 979	153
Escenario B2					
2011-2040	18 779	-10%	2 159	2 018 665	78
2041-2070	17 934	-14%	3 004	2 808 740	108
2071-2099	17 539	-16%	3 399	3 178 065	122

Fuente: Elaboración propia.

^a Equivale a la diferencia entre generación hidroeléctrica base y generación en escenario futuro.

Nota: Se presentan cambios en la generación hidroeléctrica, impactos económicos y emisión de GEI.

Bibliografía

- CNE (Comisión Nacional de Energía) (2009), base de datos de CNE [en línea] www.cne.cl/.
- CDEC-SIC (Centro de Despacho Económico de Carga-Sistema Interconectado Central) (2009), base de datos de CDEC-SIC [en línea] www.cdec-sic.cl/.
- ENDESA (Empresa Nacional de Electricidad S. A.) (1986), “Aprovechamiento hidroeléctrico del río Laja”, Endesa.
- Purkey, D. y otros (2008), “Robust analysis of future climate change impacts on water for agriculture and other sectors: a case study in the Sacramento Valley”, *Climatic Change*, vol. 87, N° 1.
- Vargas, Ximena (2012), “Disponibilidad futura de los recursos hídricos en Chile frente a escenarios de cambio climático” (en prensa).
- McPhee, James (2012). “Análisis de la vulnerabilidad del sector hidroeléctrico en Chile frente a escenarios futuros de cambio climático”.
- Vicuña, S., R. Garreaud y J. McPhee (2011), “Climate change impacts on the hydrology of a snowmelt driven basin in semiarid Chile”, *Climatic Change*, vol. 105, N° 3-4, abril.

Apéndice VI⁸

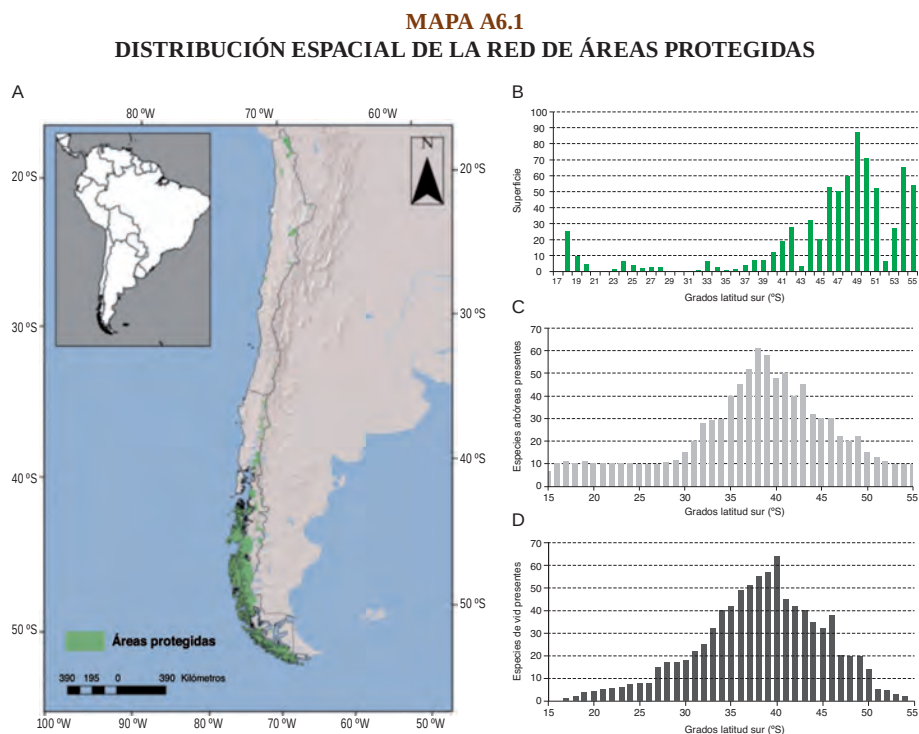
Impactos en la biodiversidad

A. Introducción

El Gobierno de Chile ha hecho inversiones sustanciales con el interés de asegurar la integridad de su patrimonio en biodiversidad. Esto se ve reflejado en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas que, junto con iniciativas privadas y áreas de conservación consagradas en convenios internacionales (sitios RAMSAR), ha llegado a cubrir alrededor de un 20% de la superficie continental del país (véase el mapa A6.1), con un incremento marcado a partir de la década del setenta (Pauchard y Villarroel, 2002). Sin embargo, aun cuando este porcentaje nos sitúa como país en una situación de avanzada y por sobre los umbrales (10% a 12%) consagrados en convenios y acuerdos en foros internacionales sobre áreas protegidas, la distribución de este porcentaje está fuertemente sesgada a los extremos norte y sur del territorio, lo que hace presumir que no provee una adecuada cobertura de la biodiversidad presente en nuestro país. La escasa cobertura del sistema de áreas protegidas de Chile queda de manifiesto en un estudio reciente llevado a cabo por Tognelli, Ramírez de Arellano y Marquet (2008) que señala la ineficiencia de la Red de Áreas Protegidas (RAP) del país, ya que una alta proporción de especies (13% de un total de 653 especies de aves, reptiles, anfibios y mamíferos) no se encuentran representadas en ella (especies Gap). Este problema, que afecta a los sistemas de áreas protegidas a nivel global (Rodrigues y otros, 2004), refleja que los criterios imperantes en su designación tienen usualmente más que ver con valores estéticos, disponibilidad de tierra fiscal, minimización de conflictos con usos alternativos y costos de oportunidad, que con una planificación estratégica para la conservación (Margules y Pressey 2000). En el caso de Chile, Tognelli, Ramírez de Arellano y Marquet (2008) señalan que transformar la actual RAP para que sea eficiente, implicaría agregar nuevas áreas protegidas y llegar a un 51,6% del territorio nacional. Si quisiéramos implementar una RAP óptima, sin considerar mejorar lo que tenemos, o sea *de novo*, solo se requeriría el 33% del territorio.

Dentro del país, los ecosistemas mediterráneos ubicados entre las latitudes 31 °S-36,30 °S (Di Castri, 1973) y los correspondientes a la ecorregión valdiviana, 35° S-48 °S, (Luebert y Plischoff, 2006) de los ecosistemas de bosques templados, son en Chile los que contienen mayor biodiversidad y los reconocidos internacionalmente como un *hotspot* de biodiversidad (Myers y otros, 2000; Arroyo y otros, 2004; 2006). No obstante, y paradójicamente, son los menos protegidos a nivel nacional, con menos de un 5% de su superficie en la RAP (Arroyo y Cavieres 1997; Armesto y otros, 1998, Marquet y otros, 2004; Tognelli, Ramírez de Arellano y Marquet, 2008), véase el mapa A6.1b. De particular relevancia es la zona de ecotono o transición de los ecosistemas mediterráneos a los de bosques templados (de los 35 °S a 45 °S). Como se puede ver en los paneles C y D del mapa, es la que posee mayor diversidad de especies de árboles, plantas epífitas y enredaderas y otros grupos de vertebrados e invertebrados (Armesto y otros, 1998; Samaniego y Marquet, 2009), en especial en la zona de los bosques costeros (Smith-Ramírez, 2004; Smith-Ramírez, Armesto y Valdovinos, 2005; Smith-Ramírez y otros, 2007), que alberga gran cantidad de especies endémicas debido a su condición de refugio glacial pleistoceno (Villagrán y otros, 1998). Sin embargo, el impacto de las actividades humanas en los ecosistemas mediterráneos y de bosque templado ha sido severo. Como consecuencia, los hábitats de muchos organismos han sido fragmentados y degradados, reduciendo la densidad y conectividad

⁸ La información y cálculos que respaldan los resultados de este apéndice estarán disponibles para los lectores que lo soliciten a la DDSAH-CEPAL.



Fuente: Elaboración propia excepto C y D, tomado de J. J. Armesto y otros, “From the holocene to the anthropocene: A historical framework for land cover change in Southwestern South America in the past 15000 years”, *Land Use Policy*, 27, 148-160, 2009.

Nota: A: proporción de cada banda latitudinal cubierta por la RAP; B: proporción del total de especies de árboles; C: proporción del total de especies de enredaderas y plantas epífitas; D: presencia en cada banda latitudinal.

de sus poblaciones y afectando los procesos de migración y reproducción y, por tanto, su persistencia en el tiempo. La continuidad de los paisajes boscosos de la depresión intermedia de Chile, el área que separa las cordilleras de la costa y de los Andes, se ha visto seriamente afectada debido a la expansión de los asentamientos humanos y al avance de las fronteras ganadera y agrícola, principalmente a partir del siglo XVIII. La situación actual a lo largo de la depresión intermedia, entre el Maule y Puerto Montt, muestra una predominancia de praderas ganaderas y plantaciones de especies exóticas (Lara y Veblen 1993; Neira, Verscheure y Revenga, 2002; Wilson y otros, 2005), además de una concentración de caminos y centros urbanos, con una escasa y dispersa representación de hábitats de bosques nativos con alta probabilidad de ser degradados o de desaparecer debido a las actividades humanas (Wilson y otros, 2005; Echeverría y otros, 2006; Echeverría y otros, 2008). Los remanentes boscosos mejor conservados –incluyendo parques y reservas públicas y privadas– se encuentran en las cimas costeras y en los faldeos andinos y corresponden a fragmentos de hábitat separados por una matriz de hábitats transformados por usos humanos.

En este escenario, una evaluación de los impactos del cambio climático sobre la biodiversidad en Chile debe considerar la interacción de, por una parte, una RAP ineficiente y, por otra, un paisaje altamente transformado por usos humanos, lo que sin duda afectará la capacidad de adaptación de las especies a los cambios en el clima, tales como migraciones o movimientos de sus rangos de distribución geográficas hacia el sur y hacia zonas de mayor altura, buscando aminorar los cambios anticipados en las temperaturas, tal como ha sido descrito para el hemisferio norte (Parmesan, 2006; Lenoir y otros, 2008).

Sin duda que la baja representatividad de la actual RAP y su ineficiente cobertura de los elementos de la biodiversidad (especies y ecosistemas) es causa de preocupación considerando el cambio

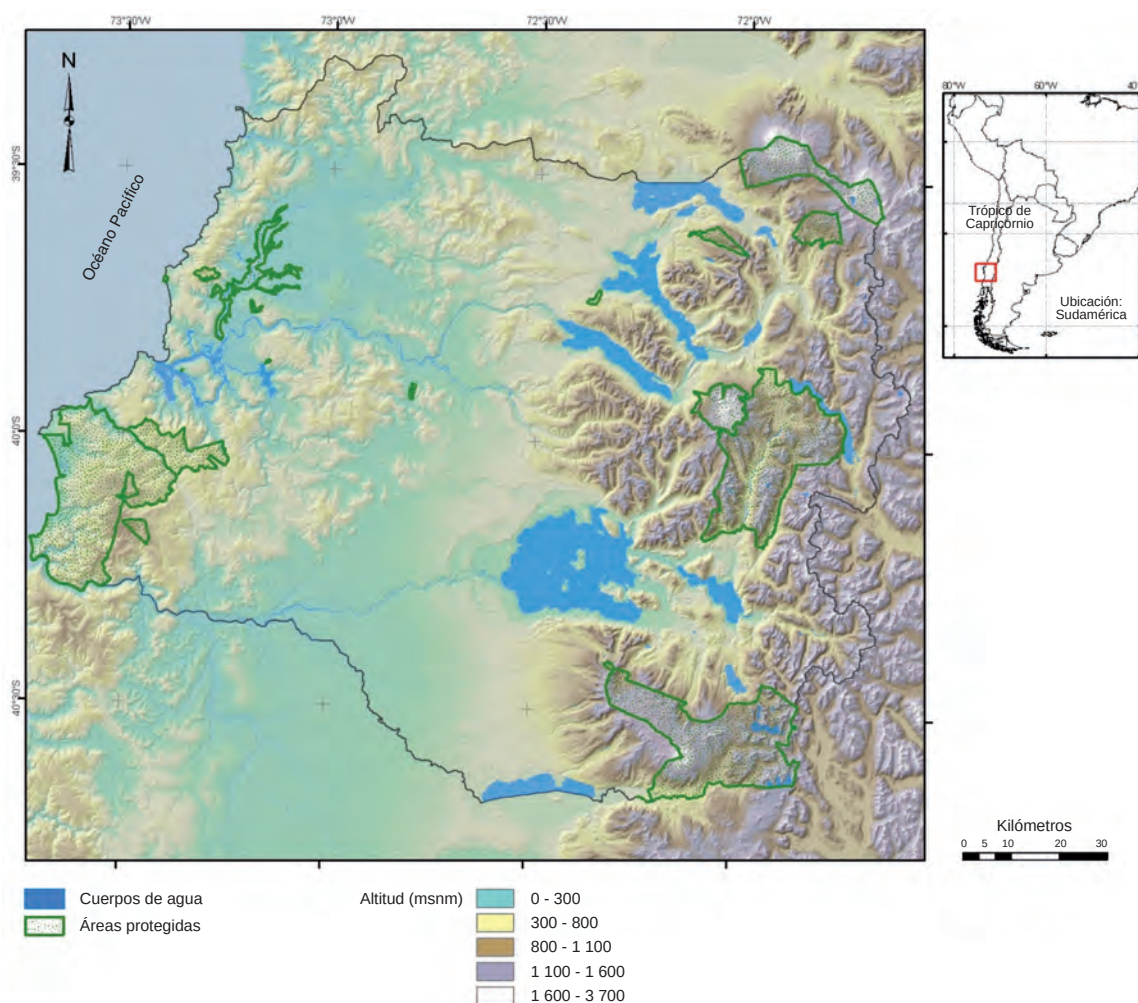
climático (IPCC, 2007) y los incrementos sostenidos en el uso de la tierra y otros cambios globales como consecuencia de las actividades humanas a niveles tanto locales (Wilson y otros, 2005; Echeverría y otros, 2006) como planetarios (Sala y otros, 2000). En este contexto la situación de la biodiversidad chilena y los servicios ecosistémicos que provee –creación de suelo, fijación de carbono, purificación de agua, contención de enfermedades, polinización y circulación de nutrientes– requieren urgente preocupación.

En esta sección nos abocaremos a evaluar los efectos del cambio climático sobre la biodiversidad y a sugerir las acciones que deberíamos tomar para asegurarla y el costo monetario asociado. Para esto se propone:

- i) analizar la respuesta de especies de plantas y animales al cambio climático usando modelos de distribución geográfica, en un contexto espacialmente explícito y considerando los escenarios de cambio climático generados por el modelo PRECIS-HaCM3; y
- ii) llevar a cabo un análisis regional –región de Los Ríos dentro de la ecorregión valdiviana (véase el mapa A6.2)– del costo que significaría establecer un sistema de áreas protegidas

MAPA A6.2

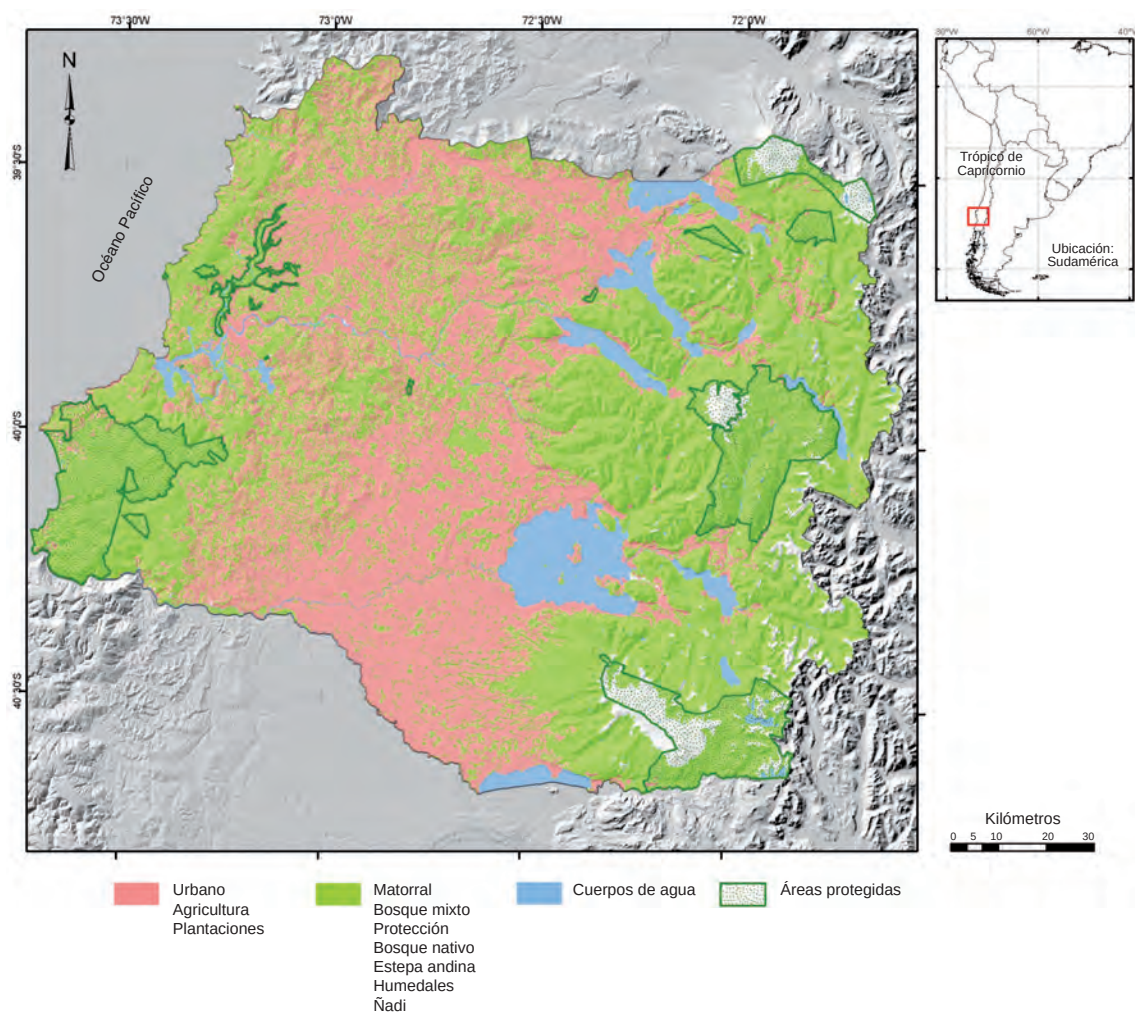
ÁREA DE ESTUDIO EN LA REGIÓN DE LOS RÍOS, INDICANDO LA PRESENCIA DE LA RAP ACTUALMENTE PRESENTE



Fuente: Elaboración propia.

resistente al cambio climático, considerando los usos del territorio por parte del hombre (véase el mapa A6.3).

MAPA A6.3
USO DE LA TIERRA EN EL ÁREA DE ESTUDIO



Fuente: Elaboración propia.

B. Metodología

1. Modelación de la respuesta de las especies de flora y fauna al cambio climático en Chile

El análisis del impacto del cambio climático sobre la biodiversidad, contempla la selección de una muestra de especies que cuenten con información adecuada para generar modelos de distribución espacial en función del clima y proyectarlos al período 2070-2100, usando las predicciones emanadas del modelo PRECIS-HadCM3.

a) Especies evaluadas

Por medio de un análisis de literatura y colecciones de museos y herbarios (véase la sección B. de resultados) se compiló una base de datos de las localidades donde distintas especies de flora y fauna han sido colectadas u observadas. Este proceso identificó suficientes datos para generar modelos de distribución para un total de 160 especies de árboles, arbustos y vertebrados en Chile.

Registros de ocurrencia

Con el fin de obtener información acerca de la ocurrencia de especies de vertebrados, se realizó una búsqueda exhaustiva de reportes de ocurrencia de especies en la literatura especializada. Esta información fue complementada con los listados de especies presentes en distintos parques y reservas nacionales, disponibles en los planes de manejo realizados por la CONAF. En el caso de árboles y arbustos, se obtuvieron además datos georreferenciados de especímenes del herbario de la Universidad de Concepción. Para roedores se incluyó información proveniente de registros de colectas en poder de investigadores (Drs. Eduardo Palma y Pablo A. Marquet). En el caso de reptiles y anfibios se consultó la colección disponible en el Museo Nacional de Historia Natural, registrando las localidades descritas para las distintas especies. Por otra parte, se consultaron las bases de datos de colecciones de museo disponibles en la base de datos de la Infraestructura Mundial de Información en Biodiversidad (Global Biodiversity Information Facility, GBIF). Esto permitió obtener sobre 15.000 registros de especímenes de museo provenientes del GBIF. En total, se obtuvieron más de 20.000 registros de ocurrencias para más de 200 especies.

Una vez obtenidos los registros de especímenes u ocurrencias, se procedió a consolidar la información en una base de datos, a fin de garantizar su integridad y validez. Luego, se procedió a corroborar la integridad de los registros presentes en ella. Esto se hizo en dos etapas:

- i) georreferenciación de las localidades. En aquellos casos en que las localidades indicadas por la base de datos no presentaban coordenadas de latitud y longitud, se procedió a georreferenciar los datos mediante consultas directas a distintos mapas y gacetas de localidades geográficas. Aquellos registros para los que no se indicó localidad fueron excluidos de la base de datos; y
- ii) revisión de la sinonimia para los taxa presentes en la base de datos. Se procedió a examinar la taxonomía de las especies registradas, corrigiendo asignaciones erróneas de acuerdo con las últimas clasificaciones zoológicas. En el caso de reptiles y anfibios, se siguió la clasificación propuesta en Vidal y Labra (2008), mientras que para mamíferos, se siguieron las propuestas de Eisenberg y Redford (1999) e Iriarte (2008). Todos aquellos registros para los que no se pudo esclarecer la sinonimia de las especies no fueron considerados y se excluyeron de la base de datos.

Este procedimiento nos permitió contar con un total de 21.704 observaciones u ocurrencias georreferenciadas para 215 especies de vertebrados (37 anfibios, 78 reptiles y 100 mamíferos). En el caso de árboles y arbustos, se obtuvo un total de 7.357 ocurrencias georreferenciadas para 108 especies. Una vez validada, la base de datos fue examinada para identificar aquellas especies que cuentan con un número adecuado de localidades para hacer el modelamiento de distribución. Esto nos permitió identificar un total de 133 especies de vertebrados que cuentan con diez registros o más (24 anfibios, 44 reptiles y 63 mamíferos). En el caso de árboles y arbustos, se obtuvo un total de 99 especies que cuentan con diez o más registros. Finalmente, se dejaron en el análisis aquellas especies para las cuales los modelos de distribución fueron adecuados en relación con las distribuciones actualmente conocidas y en función de su grado de soporte estadístico. El resultado final fue de 160 especies.

b) Modelos de distribución

Usando la información de localidades donde las distintas especies poseen presencias confirmadas y los valores de las variables ambientales asociadas, se procedió a generar un mapa de la distribución actual de cada especie utilizando el método de máxima entropía, MaxEnt (Phillips y otros, 2005; Phillips y Dudík, 2008). Este consiste en producir la distribución menos sesgada de probabilidad de presencia de cada especie, esto es, la que maximiza la entropía, sujeta a la restricción de que la esperanza de los valores predichos de las variables ambientales asociadas a las presencias sean iguales a la esperanza de los valores observados. La validación de los modelos se realizó usando un 50% de las presencias como un *set* de entrenamiento y el resto para su validación. La exactitud del modelo se evaluó y comparó utilizando el AUC o área bajo la curva ROC (Receiver Operating Characteristic), que corresponde a un gráfico de la sensibilidad o verdaderos positivos *versus* falsos positivos de un esquema o modelo de clasificación binario para distintos umbrales de discriminación. En este caso el modelo corresponde a la predicción de MaxEnt, respecto de la presencia o ausencia (variable binaria) de las distintas especies. El modelo fue inicialmente utilizado para predecir la distribución actual de las especies, a escala de 5 km, basado en las localidades de presencia disponibles en función de las variables ambientales de temperatura (°C, máxima, mínima y promedio), tasa de precipitación (mm/s, máxima, mínima y total), altura, pendiente y orientación. En segunda instancia se usó el mismo modelo para evaluar la distribución futura de las especies considerando las predicciones del modelo PRECIS-HadCM3 para 2070-2100.

Con el fin de desarrollar el modelamiento de distribución de especies y proyectar el cambio esperado frente a distintos escenarios de cambio climático, se procedió a utilizar la información generada por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile mediante el modelo PRECIS. Los datos disponibles se encuentran a una resolución de 25 km. Sin embargo, esta no es necesariamente la escala más adecuada para hacer el modelo de distribución de especies, pues resulta en una pérdida de información, ya que es muy probable que la mayoría de las localidades estudiadas se superpongan en celdas de 25 x 25 km. Una solución a este problema es la interpolación estadística de las capas generadas por el PRECIS. Cabe señalar que las capas ambientales que genera el modelo PRECIS son producto de un modelo dinámico altamente dimensional, de manera que la zona de estudio, en este caso el Cono Sur, se ubique en el ecuador de un globo imaginario. A fin de minimizar errores de proyección, se utilizaron los datos generados por el PRECIS en su grilla nativa. Las capas fueron proyectadas a un datum WSG 1984, utilizando las funciones disponibles en Matlab (V.7, Mapping toolbox) para luego ser interpoladas a una resolución de 30' (~ 1km). En el caso de la temperatura relativa, se hizo una interpolación asumiendo una relación lineal con la elevación (Rolland, 2003; Kim, Beresford y Henshall, 2008) y una tasa constante de enfriamiento adiabático. Para la precipitación, las capas ambientales fueron interpoladas utilizando ArcGis (módulo *Spline Interpolation*). De esta forma, se obtuvieron valores climáticos medios en los períodos base (1960-1990) y para ambos escenarios futuros (A2 y B2, 2070-2100).

c) Evaluación de la respuesta de las especies ante el cambio climático

Para esta evaluación seguimos lo propuesto por Thuiller, Lavorel y Araújo (2005) y cuantificamos: i) el número de celdas o píxeles originalmente ocupados por la especie que retuvieron su ocupación; ii) el número de píxeles nuevos (ganados); iii) el número de píxeles donde las especies se extinguen (perdidos); iv) el cambio en área total de ocupación, bajo los supuestos de limitación por dispersión y dispersión ilimitada; y v) el número de especies en diferentes cuantiles de cambio señalados anteriormente (i a iii).

2. Escenario regional

a) Especies evaluadas

Por medio de un análisis de literatura y colecciones de museos y herbarios (véase la metodología para el análisis a nivel nacional en el capítulo III), se compiló una base de datos de las localidades donde distintas especies de flora y fauna han sido colectadas u observadas. Este proceso produjo suficientes datos para generar modelos de distribución para un total de 69 especies de árboles y 25 especies de vertebrados que habitan la región de Los Ríos (véase el mapa A6.2).

b) Datos ambientales

Los modelos de distribución de especies fueron calculados usando datos climáticos generados por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, en el “Estudio de variabilidad climática en Chile para el siglo XXI” encargado por la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). Los datos corresponden a coberturas climáticas interpoladas para Chile continental. Las variables climáticas seleccionadas fueron: temperatura máxima ($T_{\max}$, °C), temperatura mínima ($T_{\min}$, °C), temperatura promedio (T_{mean} , °C), y tasa de precipitación máxima ($\text{Prec}_{\max}$, mm/s), mínima ($\text{Prec}_{\min}$, mm/s) y media anual ($\text{Prec}_{\text{mean}}$, mm/s). La resolución espacial de estos datos (0,25 por 0,25 grados de latitud) fue reducida usando *splines* cúbicos, a 1 x 1 km. Para el caso de la temperatura, la reducción de escala consideró una tasa de lapso de 6,49 °C por cada 1.000 metros de variación altitudinal. Sumado a estas variables ambientales, se incorporaron otras relacionadas con la topografía. Estas incluyeron elevación, pendiente y exposición, junto con un índice de convergencia topográfica, ICT (Beven y Kirkby, 1979). Este índice estima el potencial del suelo de almacenar humedad sobre la base de la convergencia topográfica de la cuenca, asumiendo que aquellos puntos con una alta convergencia topográfica deberían acumular más agua. Las capas topográficas se derivaron a partir de un modelo de elevación digital a una escala de 30' (GTOPO30). En el caso de la flora arbórea y de especies de roedores subterráneos, se consideró además una capa ambiental indicando los tipos de suelo dominante (FAO, 2003).

c) Modelamiento de la distribución

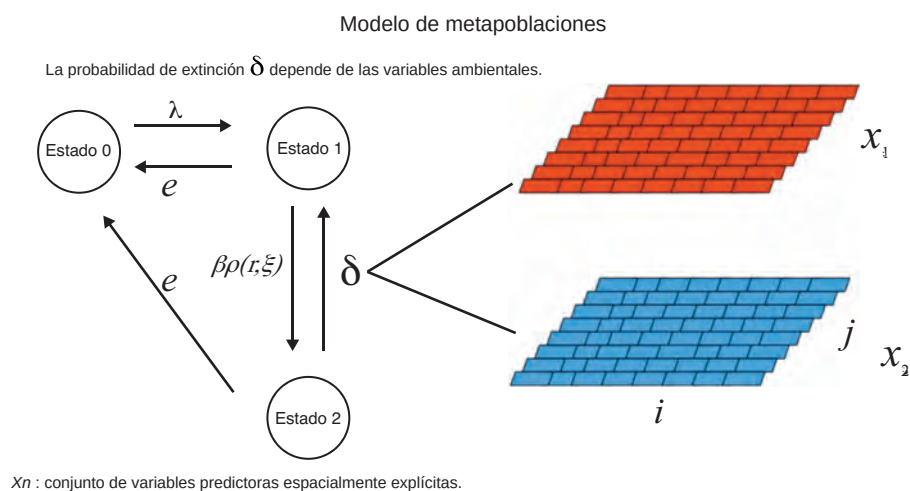
Usando la información de localidades donde las distintas especies poseen presencias confirmadas y los valores de las variables ambientales asociadas, se procedió a generar un mapa de la distribución actual de cada especie utilizando el método de máxima entropía, MaxEnt (Phillips y otros, 2005; Phillips y Dudík, 2008) tal como se describió para el nivel nacional. El modelo será inicialmente utilizado para predecir la distribución actual de las especies sobre la base de las localidades de presencia disponibles en función de las variables ambientales ($T_{\max}$, $T_{\min}$, T_{mean} , $\text{Prec}_{\max}$, $\text{Prec}_{\min}$, $\text{Prec}_{\text{mean}}$, elevación, pendiente, exposición, temperatura crítica inferior [TCI] y tipo de suelo). En segunda instancia se utilizó el mismo modelo para evaluar la distribución futura de las especies, considerando las predicciones del modelo PRECIS-HadCM3 para 2100. Esta aproximación tiene la limitación de que provee solo fotos instantáneas de la distribución actual y la futura, pero ignora las dinámicas que conecta ambos escenarios. Para evaluar el efecto de la dinámica y establecer las áreas importantes que permiten la adaptación de las especies consideradas en la zona de estudio se utilizó un modelamiento dinámico de la distribución.

d) Modelo dinámico

La estrategia de modelación se basa en la implementación del modelo metapoblacional estocástico propuesto por Keymer y otros (2000). El modelo considera un *lattice* o grilla bidimensional regular con límites absorbentes, donde a cada instante de tiempo una celda r en la grilla puede estar en

uno de los estados posibles $S=\{0,1\}$ (véase el diagrama A6.1). El estado 0 representa una celda o sitio, donde la especie no está presente, en tanto que 1 corresponde a la presencia. En este modelo el estado de cada celda o sitio es dinámico y cambia en función de los procesos de colonización (transición $0 \rightarrow 1$) o extinción (transición $1 \rightarrow 0$). El proceso de colonización se modela de la siguiente manera: cuando una celda r esta disponible para ser colonizada ($S = 0$), la colonización tomará lugar con probabilidad directamente proporcional al número de celdas ocupadas ($S = 1$) en su vecindad, o sea $\beta\rho(r, \xi)$ donde β corresponde a la probabilidad de colonización potencial y $\rho(r, \xi)$ corresponde a la proporción de celdas ocupadas en la vecindad asociada a la posición r . De manera similar, una especie en una celda o sitio ocupado ($S = 1$) se extinguirá en dicho sitio con una probabilidad δ . En nuestro modelo δ varía en función de las características climáticas asociadas a cada celda en la grilla y es inversamente proporcional a la probabilidad de encontrar la especie presente en esa celda, valor que fuera estimado con MaxEnt. Por lo tanto, para cada especie modelada, la probabilidad de extinción de una población en un sitio variará temporalmente en función de los cambios ambientales. Para evaluar este cambio en las distintas celdas analizadas, utilizamos una interpolación anual del modelo PRECIS-HadCM3, de los años 1990 a 2070 (véase la metodología más adelante). El modelo dinámico empieza con el mapa de ocupación actual derivado del uso de MaxEnt, que evoluciona de acuerdo con la dinámica de colonización y extinción dependiente de los cambios en el clima. La metodología para obtener series de datos climáticos interpolados para el análisis dinámico se presenta en los apéndices IIa, IIb y IIc.

DIAGRAMA A6.1 ESQUEMA DEL MODELO DINÁMICO DE NICHU USADO EN LAS SIMULACIONES



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Los elementos del paisaje (celdas) pueden estar en uno de tres estados posibles: 0 = hábitat no habitable, 1 = hábitat habitable, y 2 = hábitat habitado o colonizado por una especie. En el modelo, la colonización es función de las características del ambiente representado como una serie de variables (X_n) espacialmente explícitas.

Valoración económica

La valoración económica de los impactos del cambio climático en la biodiversidad en Chile se realiza estimando los costos asociados a la creación de una Red de Áreas Protegidas (RAP) que sea robusta al cambio climático, esto es, que minimice el riesgo de extinción de las especies y permita su adaptación al cambio climático de una manera similar a lo que se esperaría si no hubiera uso humano del paisaje. Determinaremos los costos totales de conservación involucrados en la adquisición

y restauración de las áreas no protegidas que nuestro modelo identifica como importantes para la adaptación de las especies al cambio climático.

Dado que las propiedades en la región de los Ríos carecen de valores de propiedad explícitos, usaremos la aproximación del valor neto presente para estimar los valores de las propiedades y el costo de postergar actividades agroforestales siguiendo lo propuesto por Naidoo y Adamowicz (2006). Esta estrategia permite considerar los costos de oportunidad del uso actual o su conversión a un uso más redituable, como *proxy* del valor de mercado de la propiedad.

Usando coberturas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) disponibles para la región (véase el mapa A6.3), identificamos cuatro grandes categorías de uso de suelo: zonas de cultivo, plantaciones forestales, matorral y bosque. Los costos de conservación de cada categoría serán estimados en el cuadro A6.1, donde se identifican los costos de oportunidad, conversión y restauración.

CUADRO A6.1
CATEGORÍAS DE USO DE SUELO USADAS EN LA VALORACIÓN ECONÓMICA
Y COSTOS ASOCIADOS

Categoría de uso de la tierra	Valor		Costo de restauración
	Costo de oportunidad	Costo de conversión	
Zona de cultivo	Trigo	-	Zona de cultivo ➔ bosque
Plantación	Eucalyptus	-	Plantación ➔ bosque
Matorral	Trigo	Matorral ➔ zona de cultivo	Matorral ➔ bosque
Bosque	Manejo del bosque nativo	-	Ninguno

Fuente: Elaboración propia.

Valor = costo de oportunidad – costo de conversión.

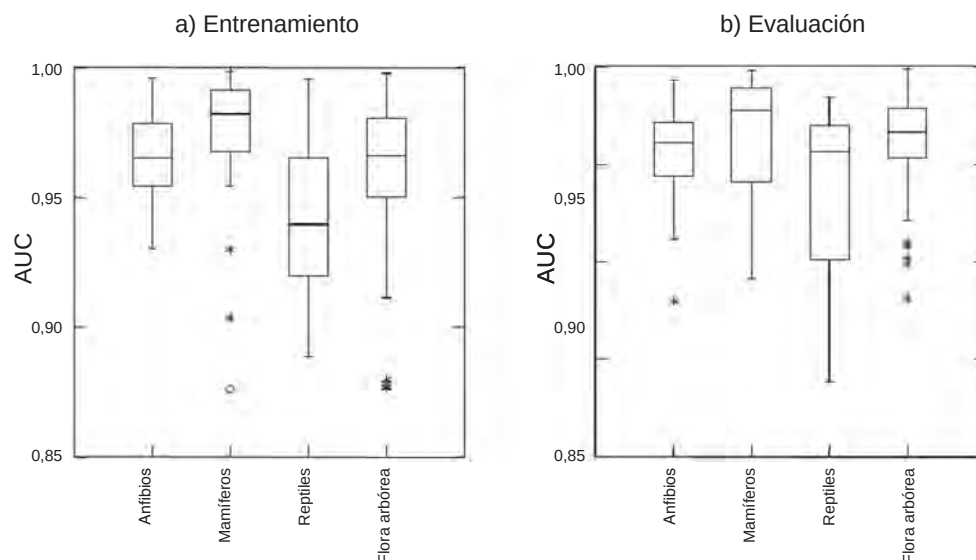
Costo de conservación = valor + costo de restauración.

C. Resultados

1. Modelación de la respuesta de las especies de flora y fauna al cambio climático en Chile

La selección de especies con un número adecuado de registros de presencia permitió contar con un total de 160 especies para las que se realizó la modelación de la respuesta potencial frente al cambio climático en Chile. En total se modelaron 16 especies de anfibios, 16 especies de reptiles, 36 especies de mamíferos y 92 especies de árboles y arbustos. Los modelos ajustados para describir la distribución actual de estas especies se caracterizaron por un muy buen desempeño estadístico, presentando en general valores de área bajo la curva (*area under curve*, AUC) superiores a 0,9 para los subconjuntos de prueba. En el caso de las observaciones de evaluación, los valores de AUC observados eran todos mayores a 0,8, valor considerado como indicador de un buen ajuste, mientras que para el subconjunto de evaluación, solo 8 especies presentaron valores de 0,7 a 0,8, valores que en general son considerados como indicadores de un desempeño aceptable del modelo a ajustar (Swets, 1988). Al examinar los grupos de especies, se destaca el buen desempeño en general de los modelos, particularmente para anfibios, mamíferos y flora arbórea, observándose los valores más bajos de AUC en algunas especies de reptiles (véase el gráfico A6.1). El grado de ajuste de los modelos de nicho obtenidos es muy bueno en la mayoría de los casos, lo que permitió realizar estimaciones del cambio potencial en el hábitat idóneo para las 160 especies estudiadas.

GRÁFICO A6.1
BOX-PLOT MOSTRANDO LA VARIACIÓN OBSERVADA EN EL ÁREA
BAJO LA CURVA OPERADOR-RECEPTOR (AUC)

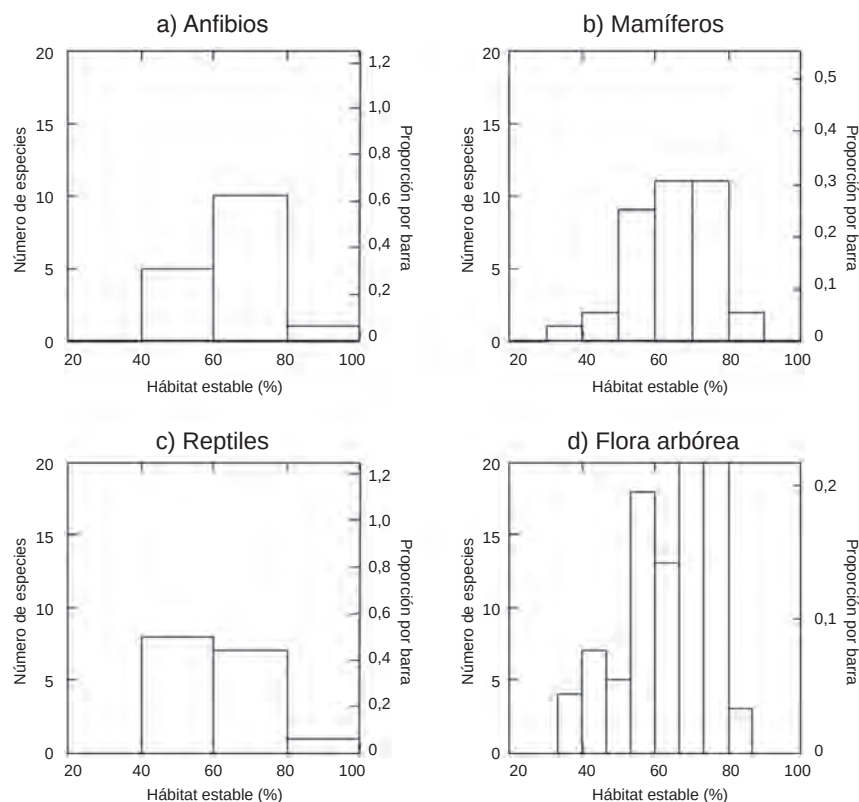


Fuente: Elaboración propia.

Nota: Se muestran los datos obtenidos para el subconjunto de datos de entrenamiento (a) y de evaluación (b). Aquellos datos extremos se señalan mediante asteriscos y en caso de que correspondan a un valor mínimo, se ilustra con un círculo abierto. Nótese que en los subconjuntos de prueba, todas las especies presentaron un AUC mayor a 0,8, mientras que para los subconjuntos de evaluación, solo 8 especies presentaron valores de AUC de 0,7 a 0,8, rango de valores considerado aceptable (Swets, 1988).

Al igual que en estudios realizados en la biota de otros países, las consecuencias esperadas del cambio climático en Chile dependen de manera importante de los supuestos que se asuman respecto de las capacidades de dispersión o migración a gran escala de las especies estudiadas. Dado que determinar la factibilidad de dispersión a esta escala excede con mucho los objetivos del presente trabajo, se consideraron dos escenarios extremos de respuesta: uno que presupone limitaciones de dispersión, donde el rango de distribución futuro corresponde al hábitat estable, es decir, aquel que mantiene una alta probabilidad de ser ocupado. En el segundo escenario de dispersión, las especies son capaces de colonizar de manera exitosa todo el hábitat idóneo nuevo disponible producto del cambio climático, donde sea que ocurra. En el contexto de estos escenarios, el conjunto de celdas o píxeles estables corresponde al área del rango geográfico que se espera sea ocupada si las especies no son capaces de migrar hacia nuevas zonas de hábitat idóneo. Por el contrario, si las especies pueden migrar hacia estos nuevos hábitats, entonces el rango geográfico esperado para cada especie será la suma del área de hábitat estable y área de hábitat idóneo ganado o nuevo. Los resultados obtenidos predicen que en promedio un 85% del hábitat idóneo disponible actualmente para las especies se mantendría sin cambios en el escenario B2. A su vez, bajo el escenario A2, se espera que en promedio el 77% del hábitat idóneo disponible actualmente para las especies se mantenga sin cambios. La pérdida de hábitat idóneo es en promedio de un 15% a un 23% para los escenarios B2 y A2 respectivamente. Estos cambios, sugieren que en el escenario con limitación extrema a la dispersión, las especies retienen de un 85% a un 77% del rango actual en promedio –dependiendo del escenario climático considerado–, pudiendo llegar a perder como máximo un 48% y un 70% de su hábitat estable bajo los escenarios B2 y A2 respectivamente, lo que correspondería a una igual reducción de su rango de distribución en Chile en un escenario con limitación a la dispersión. Por el contrario, si se asume que las especies sí son

GRÁFICO A6.2
DISTRIBUCIÓN DEL PORCENTAJE DE HÁBITAT QUE PERMANECE ESTABLE
(SIN CAMBIOS EN LA OCUPACIÓN) EN EL ESCENARIO B2



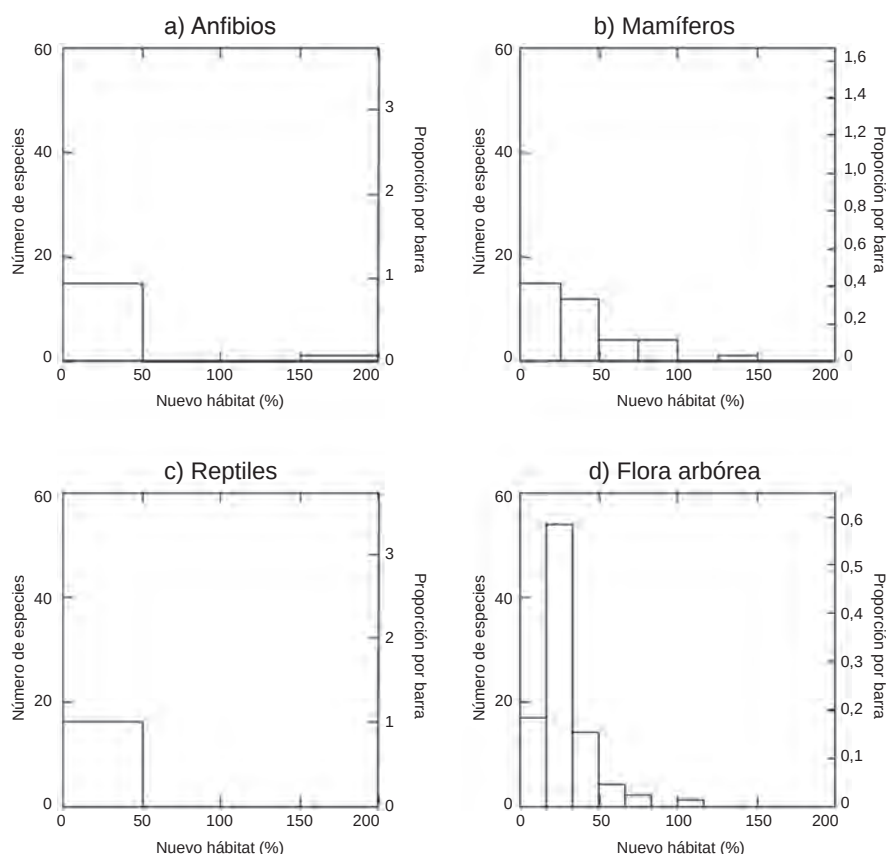
Fuente: Elaboración propia.

capaces de desplazarse y colonizar exitosamente los nuevos hábitats, entonces las pérdidas esperadas se contraponen a las expectativas de expansión de rango, que oscilan en un 25% y un 38% en promedio bajo los escenarios B2 y A2 respectivamente. En general, este patrón se mantiene en los diferentes grupos taxonómicos estudiados, con cierta tendencia a mayores pérdidas de hábitat bajo el escenario A2 (véanse los gráficos A6.3 a A6.9).

Los escenarios de cambio asumiendo dispersión limitada o cambio con dispersión sin restricciones difieren de manera importante. El primer caso (restricción por dispersión) se caracteriza por disminuciones significativas en el rango geográfico de las especies estudiadas (véase el gráfico A6.9). En caso de asumir capacidad ilimitada de dispersión dentro del intervalo de tiempo estudiado, estas pérdidas son balanceadas por la expansión potencial del hábitat, llevando en algunos casos a aumentos potenciales en el hábitat disponible ocupado por algunas especies. Estas tendencias se mantienen en la mayoría de los grupos estudiados, sin observar diferencias notorias (véase el mapa A6.4).

Cuando se examinan los cambios esperados para aquellas especies clasificadas actualmente en alguna categoría especial de conservación, se observa que para árboles y arbustos, bajo el escenario más severo –escenario A2, sin dispersión–, el 59% de las especies enfrentan reducciones de más del 20% de su rango geográfico. En el escenario B2 con limitaciones en dispersión, solo el 35% de las especies de árboles y arbustos reducen su rango en más del 20%. El mismo análisis se hizo para especies animales, en especial mamíferos. Las pérdidas más severas se evidencian en los escenarios que consideran limitación por dispersión, observándose que de un 44% a un 67% de las especies reducen

GRÁFICO A6.3
DISTRIBUCIÓN DEL PORCENTAJE DE HÁBITAT GANADO
(CELDA CON AUMENTO EN OCUPACIÓN) EN EL ESCENARIO B2

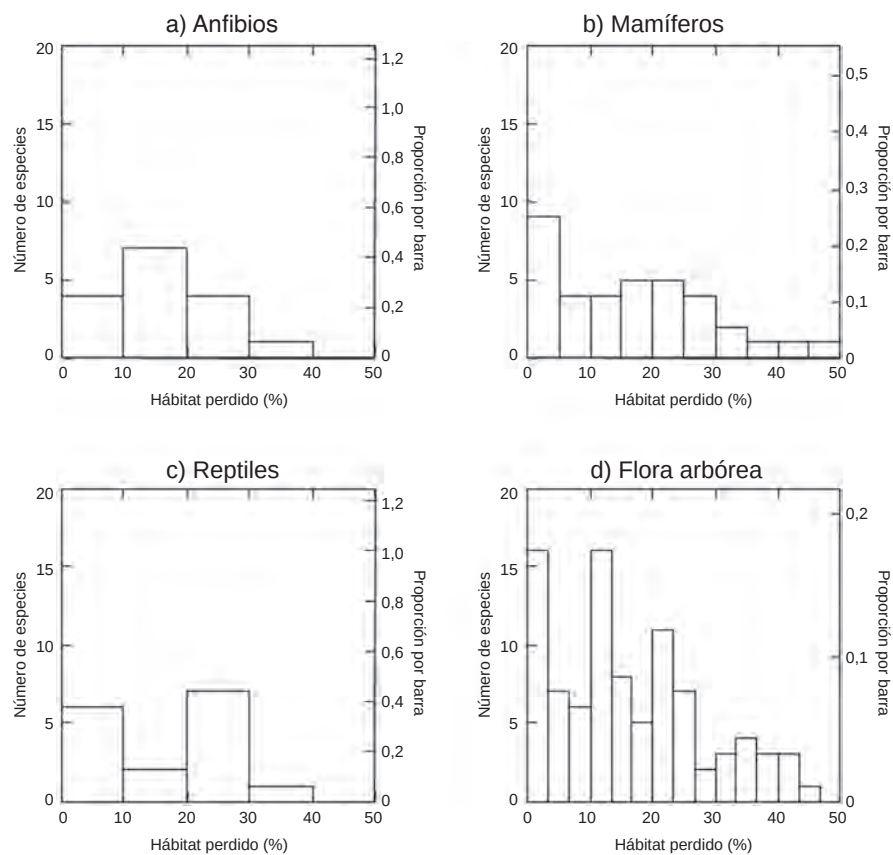


Fuente: Elaboración propia.

su rango en más de un 20%. En particular, cabe destacar que para dos especies en peligro –el pitao (*Pitavia punctata*) y el huemul (*Hipocamelus bisulcus*)– se esperan reducciones importantes en el rango geográfico, incluso en un escenario con dispersión ilimitada (un 37% en el escenario A2 y un 23% en el B2), sugiriendo que son particularmente vulnerables a los efectos del cambio climático. En las demás especies, al considerar un escenario con dispersión ilimitada, se esperan expansiones de rango (76% de las especies y plantas y 55% de animales), o reducciones de un 89% a un 99%.

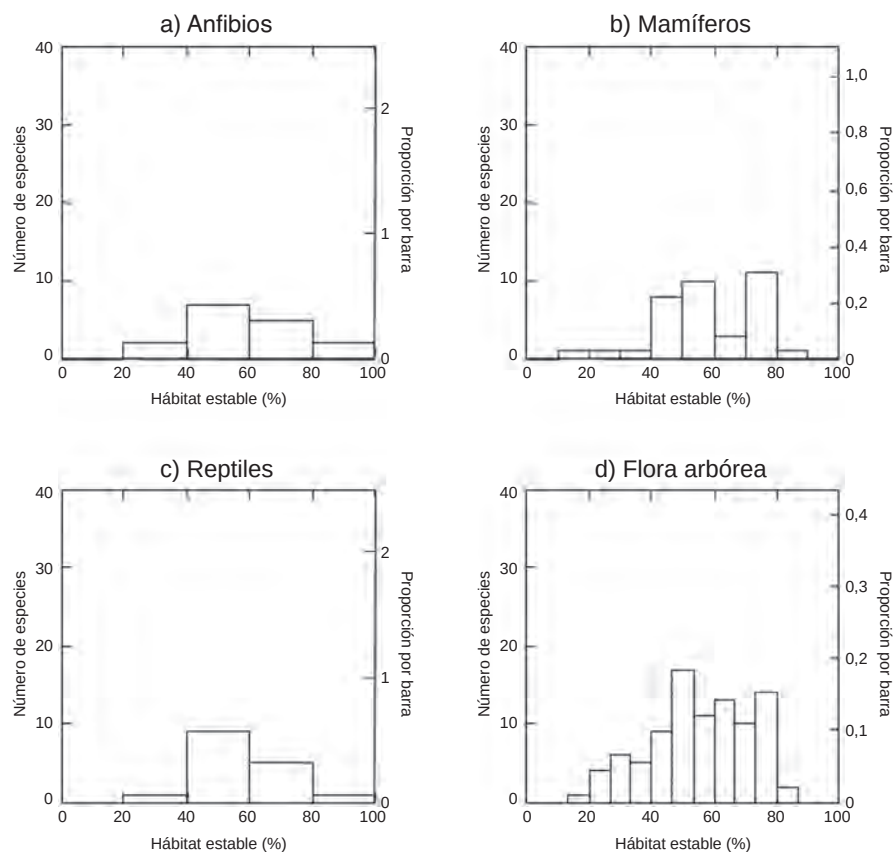
En términos de los efectos espaciales de estos cambios, se pudo apreciar que, en la mayoría de los casos, la tendencia fue a un desplazamiento del hábitat idóneo hacia el sur y hacia sitios de mayor elevación. Esto puede ejemplificarse examinando la distribución de hábitat idóneo para dos especies: *Rhinoderma darwinii* y *Myrceugenia parvifolia* (véanse los mapas A6.4 y A6.5). En ambas especies se puede apreciar cómo la proyección del hábitat idóneo presenta desplazamientos hacia el sur en general, con pérdida de hábitat a lo largo de sectores bajos de la depresión intermedia, lo que ha sido descrito en muchos otros sistemas como la tendencia a desplazarse hacia los polos y hacia las cumbres de los sistemas montañosos. Si bien el análisis realizado no contempla ni incluye de manera explícita la matriz de uso humano del suelo, es muy posible que estas restricciones al rango geográfico de las especies estudiadas se vea agravado por el grado de intervención y fragmentación del paisaje, producto de la utilización humana del suelo. Esto será analizado en el escenario regional.

GRÁFICO A6.4
DISTRIBUCIÓN DEL PORCENTAJE DE HÁBITAT PERDIDO EN EL ESCENARIO B2



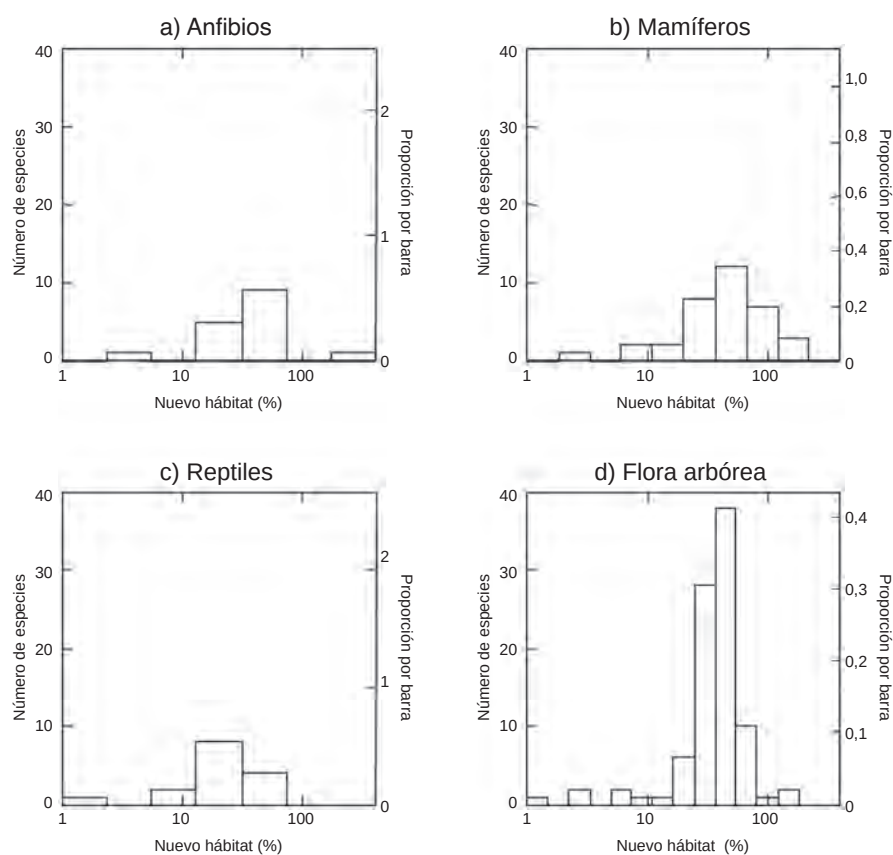
Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO A6.5
DISTRIBUCIÓN DEL PORCENTAJE DE HÁBITAT QUE PERMANECE ESTABLE
(SIN CAMBIOS EN LA OCUPACIÓN) EN EL ESCENARIO A2



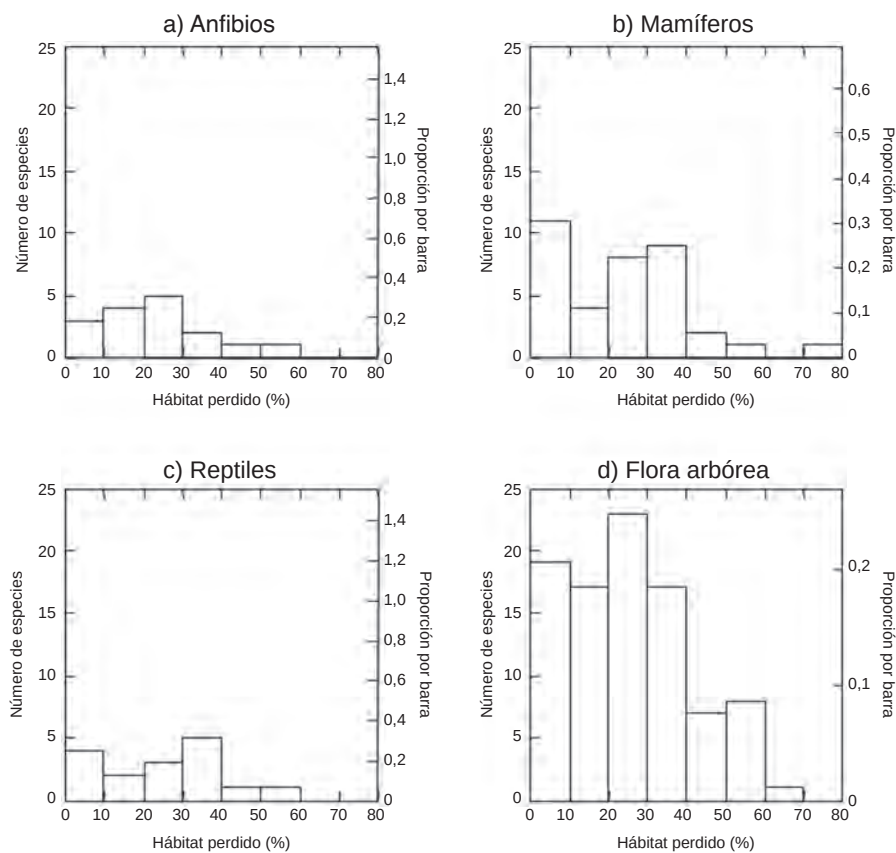
Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO A6.6
DISTRIBUCIÓN DEL PORCENTAJE DE HÁBITAT GANADO
(CELDA CON AUMENTO EN OCUPACIÓN) EN EL ESCENARIO A2



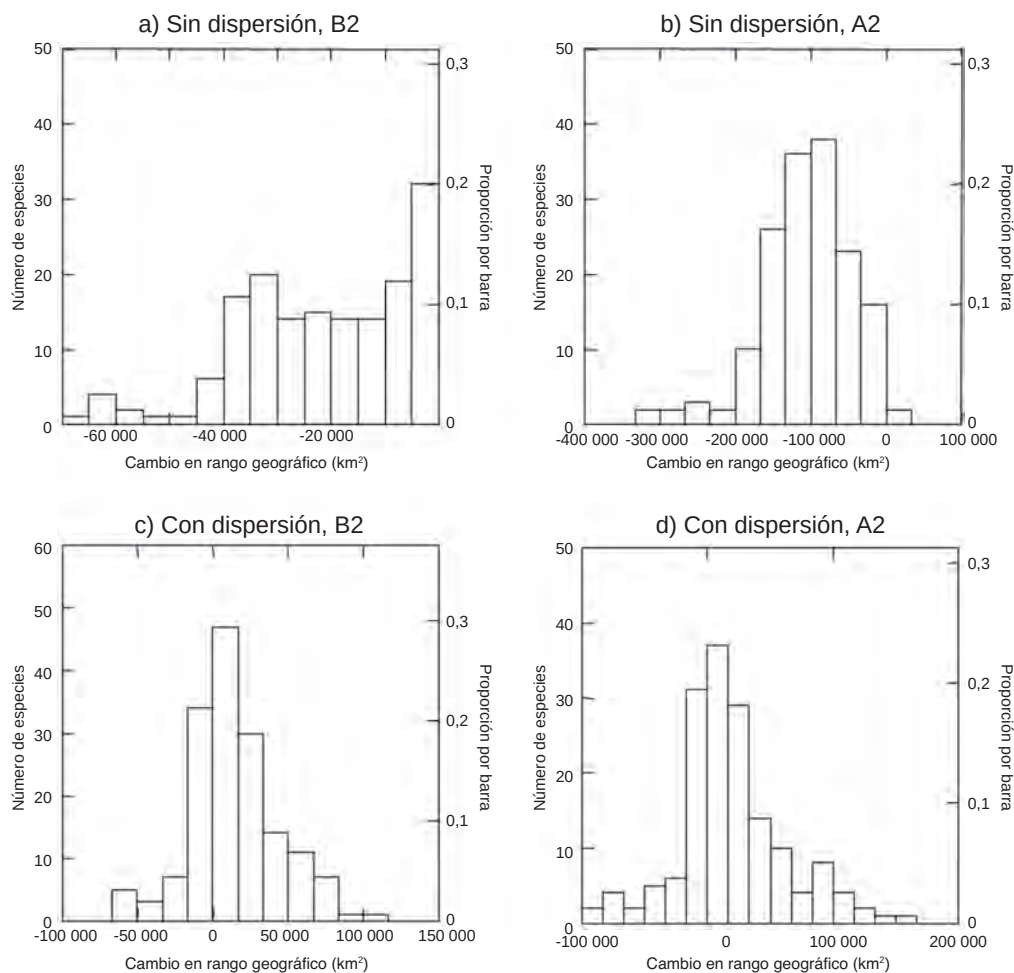
Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO A6.7
DISTRIBUCIÓN DEL PORCENTAJE DE HÁBITAT PERDIDO EN EL ESCENARIO A2



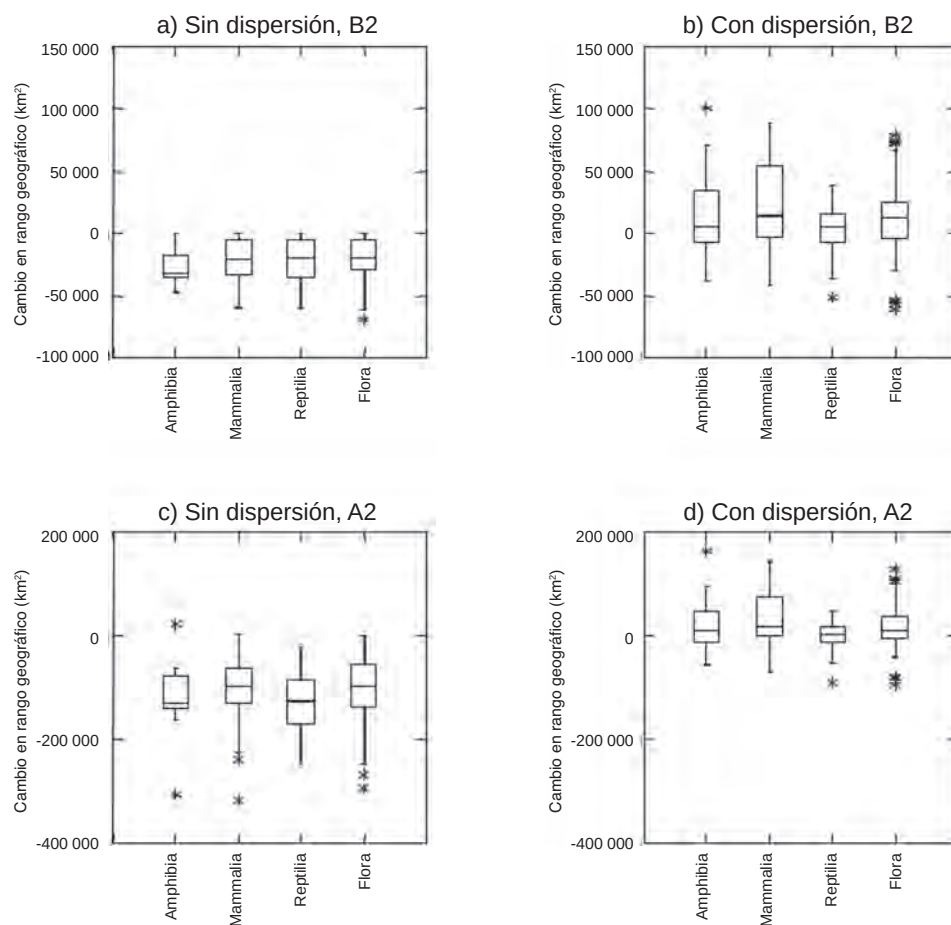
Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO A6.8
DISTRIBUCIÓN DE LOS CAMBIOS ESPERADOS EN LA DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA
PARA 160 ESPECIES DE VERTEBRADOS Y PLANTAS TERRESTRES



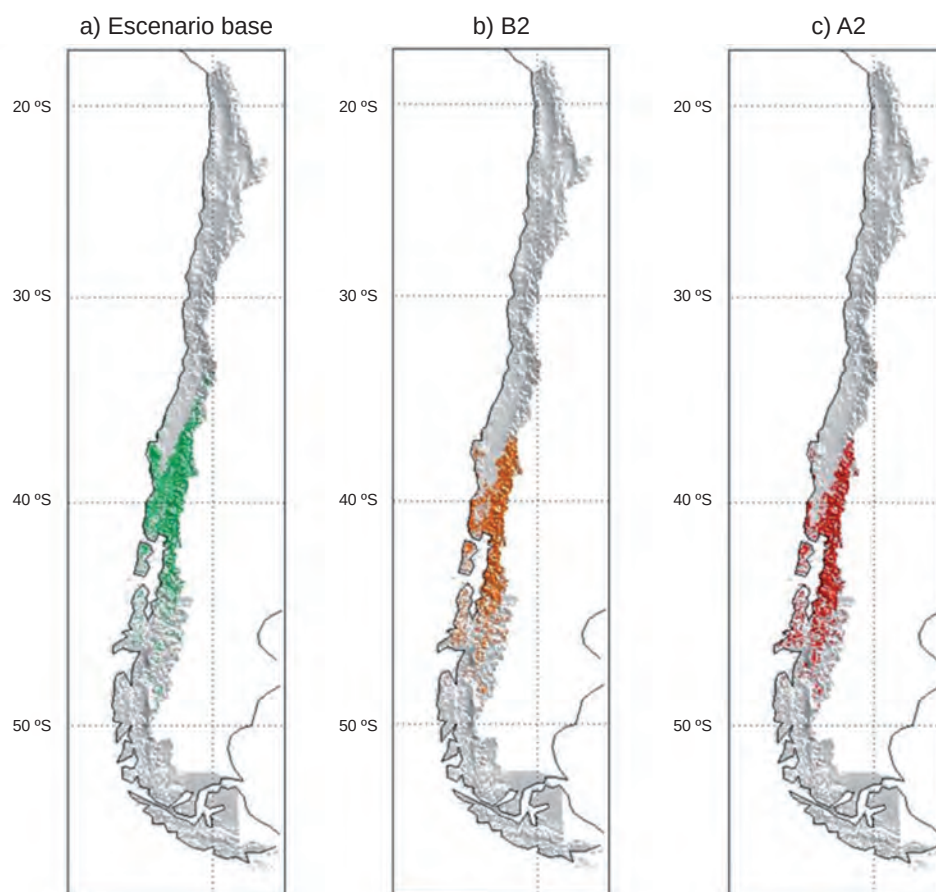
Fuente: Elaboración propia.

Nota: Se ilustra la variación en el área de hábitat idóneo disponible, predicha para los escenarios B2 y A2, asumiendo el resultado sin y con dispersión ilimitada.

GRÁFICO A6.9**BOX-PLOT DE LA VARIACIÓN OBSERVADA EN LOS CAMBIOS ESPERADOS
EN LA DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA PARA 160 ESPECIES DE VERTEBRADOS
Y PLANTAS TERRESTRES**

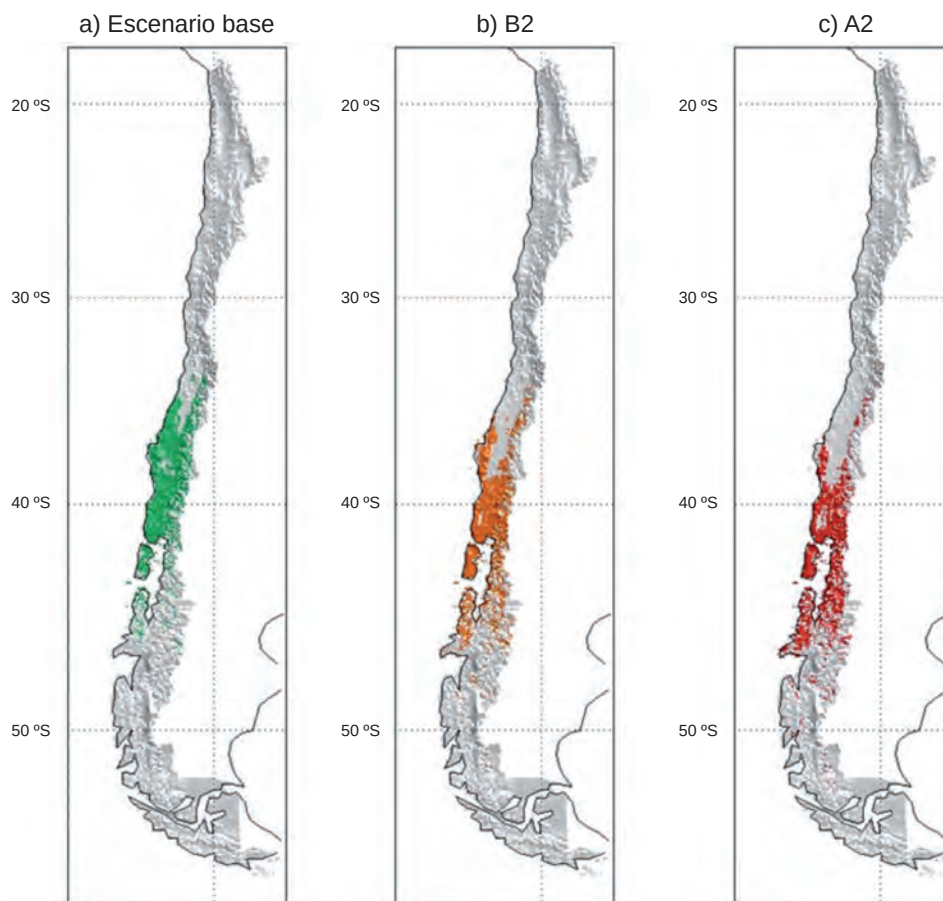
Fuente: Elaboración propia.

Nota: Se ilustra la variación en el área de hábitat idóneo disponible predicha para los escenarios B2 y A2, asumiendo el resultado sin y con dispersión ilimitada considerando los datos agrupados para anfibios, reptiles, mamíferos y flora arbórea.

MAPA A6.4**DISTRIBUCIÓN DE HÁBITAT POTENCIAL PARA *RHINODERMA DARWINII***

Fuente: Elaboración propia.

MAPA A6.5
DISTRIBUCIÓN DE HÁBITAT POTENCIAL PARA *MYRCEUGENIA PARVIFOLIA*



Fuente: Elaboración propia.

2. Escenario regional

El escenario regional nos provee de una muestra del tipo de complejidades y conflictos a tener en cuenta cuando se evalúan los efectos del cambio climático sobre la biodiversidad, además nos provee de un estándar de evaluación de los costos asociados para asegurar la biodiversidad, lo que implica minimizar la extinción de las especies producto de la actividades humanas que impiden su adaptación al cambio climático.

Respecto de las especies utilizadas en este análisis, en general, los modelos resultantes del proceso de entrenamiento poseen valores de AUC altos y alejados de 0,5, que equivale a un clasificador aleatorio, es decir, predecir la presencia de la especie en forma aleatoria. Lo mismo se verifica para el caso del subconjunto usado poniendo a prueba el modelo, salvo por dos especies (*Lepidothamnus fonkii* y *Loxodontomys micropus*), no obstante, todos los modelos ajustados fueron significativos.

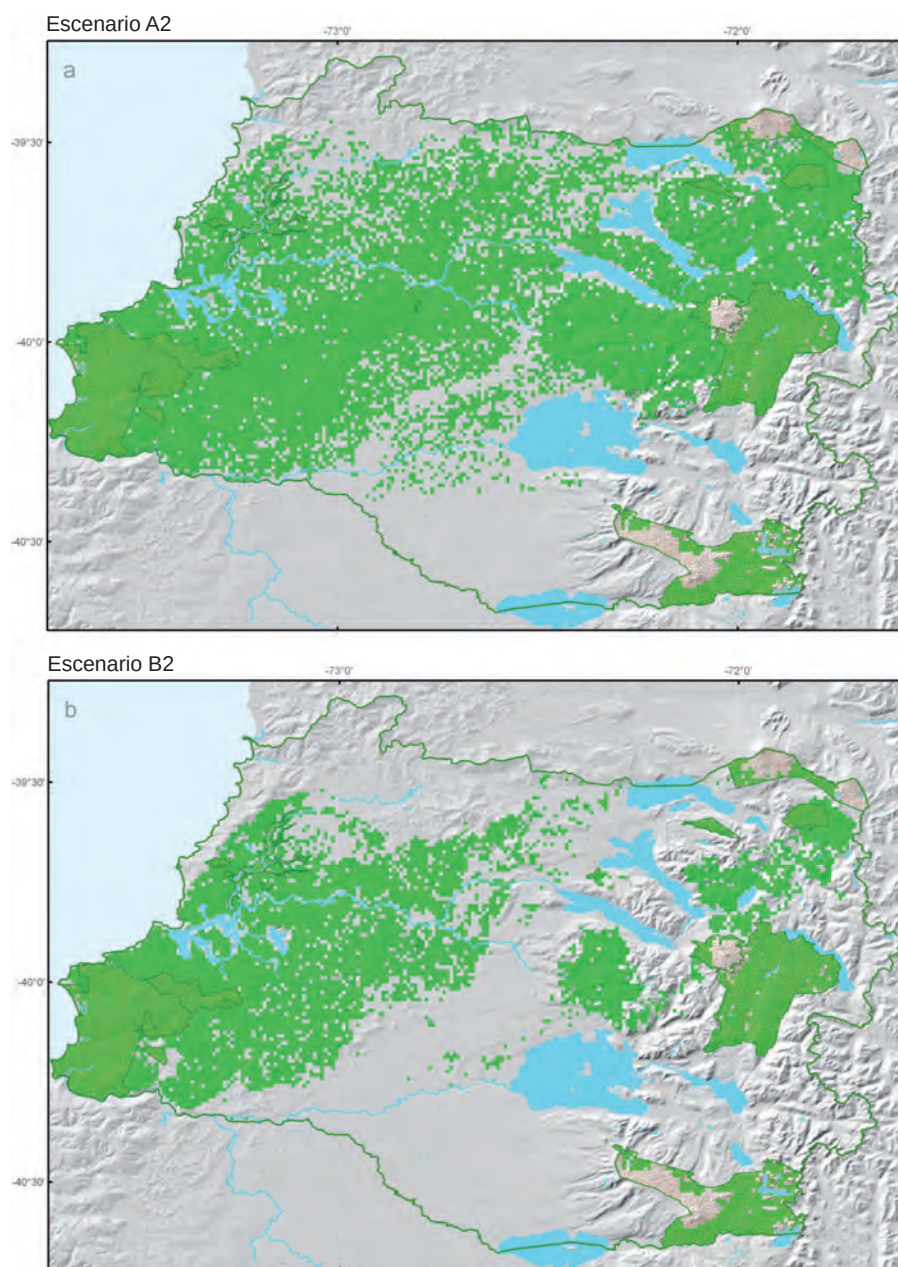
Según los resultados de la modelación estática, comúnmente desarrollada para evaluar el cambio en la distribución de las especies en respuesta al cambio climático, la gran mayoría de las especies de vertebrados reduciría su rango en el área de estudio y cinco especies desaparecerían de la zona y una especie (*Hippocamelus bisulcus*) desaparecería por completo. Algo similar se observa para el caso de las especies de árboles: cinco especies desaparecerían del área de estudio. El modelo también predice incrementos en la distribución de algunas especies.

De acuerdo con los resultados de la modelación dinámica de la respuesta de las especies ante el cambio climático bajo el escenario B2 en el área de estudio, se observa que, en general, para este escenario una especie de planta y tres de vertebrados tendrían decrecimientos en su distribución >80% cuando se considera el impacto del uso humano del territorio lo que las colocaría en peligro crítico. Para este escenario, la adición de áreas protegidas (véase el mapa A6.6) logra incrementar la ocupación de estas especies, pero en solo dos casos el incremento permite que la reducción en distribución sea menor o igual al 80%. Además de estas especies, otras nueve presentan decrecimientos iguales o mayores al 80% en ambos escenarios (con y sin considerar el uso humano del territorio).

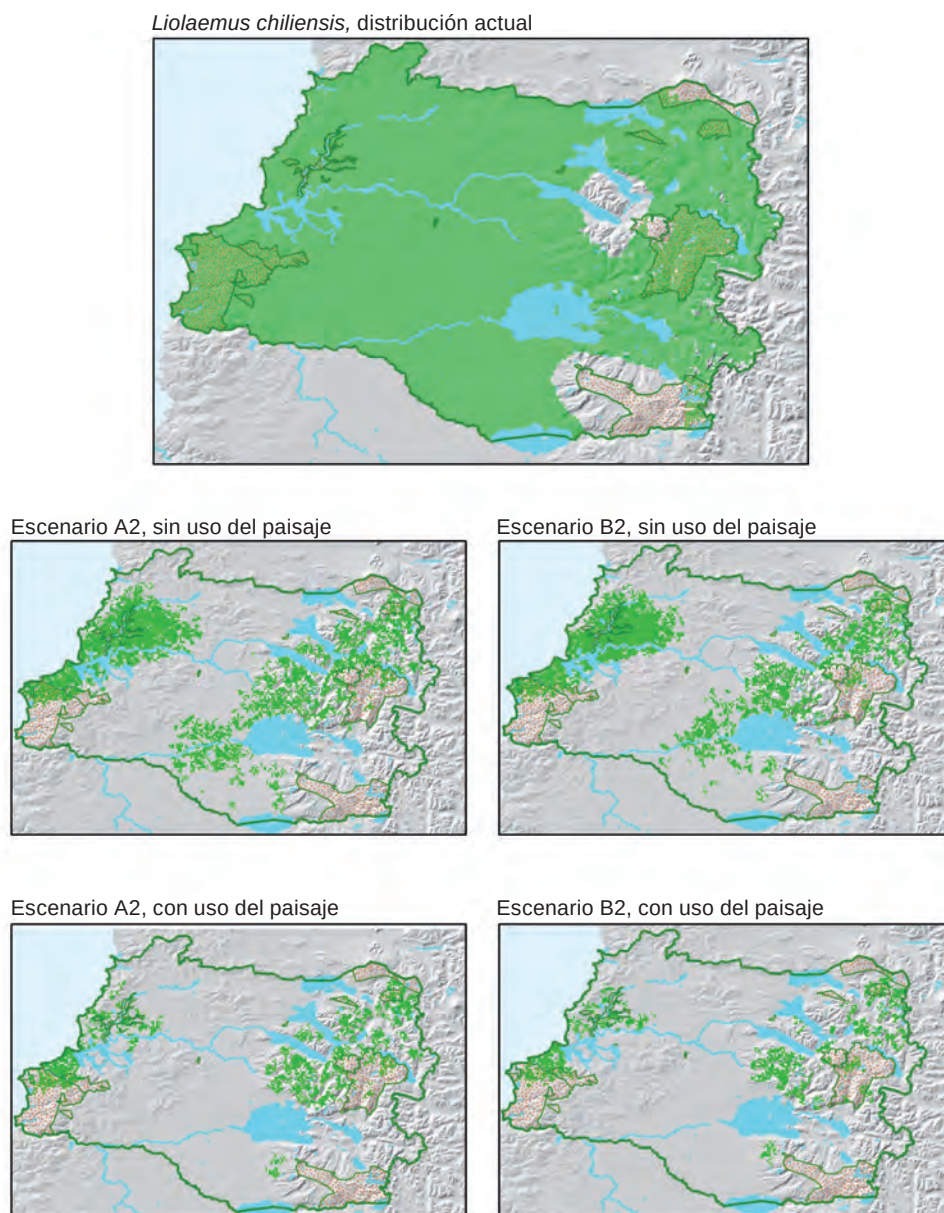
Según los resultados de la modelación dinámica de la respuesta de las especies ante el cambio climático en el escenario A2 en el área de estudio, se observa que, en general, para este escenario la distribución de 11 especies de planta y 6 de vertebrados decrecerían >80%, cuando se considera el impacto del uso humano del territorio lo que las pondría en peligro crítico. Para este escenario, la adición de áreas protegidas logra incrementar la ocupación de estas especies, pero en solo 11 de los casos este incremento permite que la reducción en distribución sea menor o igual al 80%. Además de estas especies, otras nueve presentan decrecimientos iguales o mayores al 80% en ambos escenarios (con y sin considerar el uso humano del territorio). Un ejemplo corresponde a *Liolaemus chiliensis* (véase el mapa A6.7).

La valoración económica de los escenarios de protección (véase el mapa A6.6) que permitirían aminorar el efecto de la existencia de una matriz de usos humanos, que impide la adecuada adaptación de las especies al cambio climático, arroja que el costo a incurrir en la adquisición de tierras que refuercen el actual sistema de áreas protegidas en la zona es de 2.555.181.679 de dólares en el escenario A2 y 1.247.910.268 de dólares en el escenario B2. Más allá de lo abultado de las cifras, es necesario señalar que los costos de no instaurar acciones de mitigación (A2) se duplican en relación con un escenario donde las emisiones han sido mitigadas (B2).

MAPA A6.6
DISTRIBUCIÓN DE ÁREAS PROTEGIDAS NECESARIAS PARA ASEGURAR LA
BIODIVERSIDAD EN EL ÁREA DE ESTUDIO EN LOS ESCENARIOS A2 Y B2
Y CONSIDERANDO EL USO HUMANO DEL TERRITORIO



Fuente: Elaboración propia.

MAPA A6.7**EJEMPLO DE LA RESPUESTA DE LA ESPECIE DE REPTIL *LIOLAEMUS CHILIENSIS*
USANDO EL MODELO DE NICHO DINÁMICO PARA LOS ESCENARIOS A2 Y B2,
CON O SIN USO DEL PAISAJE POR PARTE DEL HOMBRE**

Fuente: Elaboración propia.

D. Discusión y conclusiones

Se observa a nivel nacional que en el peor de los escenarios las especies podrían llegar a perder entre un 48% y un 70% de su hábitat estable, lo que correspondería a una igual reducción de su rango de distribución en Chile en un escenario con limitación a la dispersión. No obstante lo anterior, en el escenario sin limitación a la dispersión la mayoría de las especies tienden a adaptarse a los cambios en el clima, incrementando sus rangos de distribución. Sin embargo, existen especies con problemas de conservación que, sin importar el escenario, se verán afectadas adversamente como el huemul, en tanto otras como la araucaria solo se verán afectadas negativamente en un escenario con limitación a la dispersión, reduciendo su rango de un 28% (B2) a un 36% (A2). En general, este análisis, al no incluir el componente de uso de suelo humano, tiende a subestimar la reducción en el rango geográfico de las especies. En este contexto, cobra relevancia el análisis a nivel regional.

Una de las principales conclusiones del análisis regional es que los escenarios modelados, usando una aproximación que no considera el uso del suelo por parte del hombre, tienden a subestimar el impacto del cambio climático sobre la biodiversidad. Cuando estos se incluyen, en general las especies observan grandes decrecimientos en su distribución, que pueden llegar a más de un 80%. El costo de revertir estos efectos puede alcanzar varios miles de millones de dólares y tiende a ser menor en un escenario de mitigación.

El presente estudio provee de una referencia sobre los posibles efectos del cambio climático sobre la biodiversidad. Sin embargo, debe ser complementado con los efectos sobre las funciones que esta biodiversidad sustenta en el seno de los ecosistemas en que está inserta. Sin lugar a dudas, este es un aspecto clave por cuanto son las funciones de los ecosistemas las que se verán afectadas y las que a su vez afectarán con mayor fuerza el desarrollo económico y la calidad de vida de la población.

Bibliografía

- Armesto, J. J. y otros (2009), "From the Holocene to the Anthropocene: A historical framework for land cover change in southwestern South America in the past 15000 years", *Land Use Policy*, 27, 148-160.
- ____ (1998), "Conservation targets in South American temperate forests", *Science*, vol. 282, N° 5392.
- Arroyo, M. T. K. y L. Cavieres (1997), "The Mediterranean type-climate flora of central Chile: What do we know and how can we assure its protection?", *Noticiero de Biología*, vol. 5, N° 2.
- Arroyo, M. T. K. y otros (2006), "El *hotspot* chileno, prioridad mundial para la conservación", P. Saball y otros (eds.), *Biodiversidad de Chile. Patrimonio y desafíos*, Santiago de Chile, Comisión Nacional del Medio Ambiente.
- ____ (2004), "Chilean winter rainfall-Valdivian forest", *Hotspots revisited*, R. Mittermeier y otros (eds.), México, Cemex.
- Beven, K. J. y M. J. Kirkby (1979), "A physically-based variable contributing area model of basin hydrology", *Hydrological Sciences Bulletin*, vol. 24, N°1.
- Box, G. E. P., G. M. Jenkins y G. C. Reinsel (1994), *Time Series Analysis: Forecasting & Control*, Prentice-Hall.
- Bliss, N. B. y L. M. Olsen (1996), "Development of a 30-arc-second digital elevation model of South America", *Pecora Thirteen, Human Interactions with the Environment-Perspectives from Space, Sioux Falls* [en línea] <http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/README.html>, South Dakota.
- Chatfield, C. (1978), "The Holt-Winters forecasting procedure", *Applied Statistics*, vol. 27, N° 3.
- Conejo, A. J. y otros (2005), "Day-ahead electricity price forecasting using the wavelet transform and ARIMA models", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, N° 2.
- Di Castri, F. (1973), "Climatographical comparisons between Chile and the Western Coast of North America", *Mediterranean Type Ecosystems*, F. di Castri y H. A. Mooney (eds.), Nueva York, Springer Verlag.

- Echeverría, C. y otros (2008), “Spatially explicit models to analyze forest loss and fragmentation between 1976 and 2020 in southern Chile”, *Ecological Modelling*, vol. 212, N° 3-4.
- (2006), “Rapid deforestation and fragmentation of Chilean Temperate Forests”, *Biological Conservation*, vol. 130, N° 4.
- Eisenberg, J. y K. Redford (1999), *Mammals of the Neotropics, vol 2. The Southern Cone: Chile, Argentina, Uruguay, Paraguay*, Chicago, University of Chicago Press.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) (2003), “Digital Soil Map of the World and Derived Soil Properties”, Rev. 1. *FAO Land and Water Digital Media Series*, N° 1.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007), “Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change”, M. L. Parry y otros (eds.), Cambridge University Press, Reino Unido.
- Iriarte A. (2008), *Mamíferos de Chile*, Barcelona, Lynx Edicions.
- Keymer, J. E. y otros (2000), “Extinction thresholds and metapopulation persistence in dynamics landscapes”, *American Naturalist*, vol. 156, N° 5.
- Kim, K. S., R. M. Beresford y W. R. Henshall (2008), “Spatial interpolation of daily humidity using natural neighbours over mountain areas in south eastern Australia”, *New Zealand Plant Protection*, 61.
- Lara, A. y T. Veblen (1993), “Forest plantations in Chile: a successful model?”, *Afforestation: Policies, Planning and Progress*, A. Mather (ed.), Londres, Belhaven Press.
- Lenoir, J. y otros (2008), “A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century”, *Science*, vol. 320, N° 5884.
- Luebert, F. y P. Plischoff (2006), *Sinopsis bioclimática y vegetal de Chile*, Editorial Universitaria, Santiago.
- Margules, C. R. y R. L. Pressey (2000), “Systematic conservation planning”, *Nature*, vol. 405, N° 6783.
- Marquet, P. A. y otros (2004), “How well are Mediterranean ecosystems protected in Chile? Insights from gaps in the conservation of Chilean vertebrates” (Procedimientos de la 10^a Conferencia MEDECOS), Rhodes/Grecia, Arianoustsou y Papanastais (eds.).
- Myers, N. y otros (2000), “Biodiversity hotspots for conservation priorities”, *Nature*, vol. 403.
- Naidoo, R. y W. L. Adamowicz (2006), “Modeling opportunity costs of conservation in transitional landscapes”, *Conservation Biology*, 20(2).
- Neira, E., H. Verscheure y C. Revenga (2002), *Chile's Frontier Forests: Conserving a Global Treasure*, World Resources Institute, Comité Nacional pro Defensa de la Fauna y Flora, Universidad Austral de Chile.
- Parmesan, C. (2006), “Ecological and evolutionary responses to recent climate change”, *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 37.
- Pauchard, A. y P. Villarroel (2002), “Protected areas in Chile: history, current status, and challenges”, *Natural Areas Journal*, vol. 22, N° 4.
- Phillips, S. J. y M. Dudík (2008), “Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation”, *Ecography*, 31.
- Philips, S. J., R. P. Anderson y R. E. Schapire. (2006), “Maximum entropy modeling of species geographic distributions”, *Ecological Modelling*, 190.
- Phillips, S. J. y otros (2005), “Maxent software for species distribution modeling” [en línea] <http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/> [fecha de consulta: 9 de diciembre de 2011].
- Rodrigues, A. S. L. y otros (2004), “Effectiveness of the global protected area network in representing species diversity”, *Nature*, 428.
- Rolland, C. (2003), “Spatial and seasonal variations of air temperature lapse rates in alpine regions”, *Journal of Climate*, 16.
- Sala, O. E. y otros (2000), “Global biodiversity scenarios for the year 2100”, *Science*, vol. 287, N° 5459.

- Samaniego, H. y P. A. Marquet (2009), “Mammal and butterfly species richness in Chile: taxonomic covariation and history”, *Revista Chilena de Historia Natural*, vol. 82, N° 1.
- Smith-Ramírez, C. (2004), “The Chilean coastal range: A vanishing Center of Biodiversity and Endemism in Southern Temperate Rain Forests”, *Biodiversity and Conservation*, 13.
- Smith-Ramírez, C., J. Armesto y C. Valdovinos (eds.) (2005), *Historia, biodiversidad y ecología de los bosques de la cordillera de la costa de Chile*, Santiago de Chile, Editorial Universitaria.
- Smith-Ramírez, C. y otros (2007), “Distribution patterns of flora and fauna in southern Chilean Coastal rain forests: Integrating Natural History and GIS”, *Biodiversity and Conservation*, vol. 16.
- Swets, J. A. (1988), “Measuring the accuracy of diagnostic systems”, *Science*, vol. 240, N° 4857.
- Thuiller, W., S. Lavorel y M. Araújo (2005), “Niche properties and geographical extent as predictors of species sensitivity to climate change”, *Global Ecology and Biogeography*, vol. 14, N° 4.
- Tognelli, M. F., P. I. Ramírez de Arellano y P. A. Marquet (2008), “How well do the existing and proposed reserve networks represent vertebrate species in Chile?”, *Diversity and Distributions*, 14.
- Vidal, M. A. y A. Labra (eds.) (2008), *Herpetología de Chile*, Santiago, Science Verlag.
- Villagrán, C. y L. F. Hinojosa (1997), “Historia de los bosques del sur de Sudamérica, II: análisis fitogeografía”, *Revista Chilena de Historia Natural*, vol. 70.
- Villagrán, C. y otros (1998), “El rol de los cambios de clima del cuaternario en la distribución actual de la vegetación de Chile central-sur”, *Bamberger Geographische Schriften*, 15.
- Wilson, K. y otros (2005), “A vulnerability analysis of the temperate forests of south central Chile”, *Biological Conservation*, vol. 122, N° 1.

Apéndice VII

Impactos en las zonas costeras

A. Introducción

En general, el nivel medio del mar cambia por variaciones del volumen total de los océanos, ocasionadas principalmente por alteraciones en la temperatura a escala global. La causa más importante que explica el aumento reciente del nivel del mar a escala global es la expansión o dilatación térmica del agua, que es responsable del 80% de la variación observada en el último siglo. Otras importantes razones son el cambio en el balance de masa de los glaciares continentales (alrededor del 15%) y fenómenos indirectos como las variaciones en la distribución media de los campos de presión atmosférica, vientos y corrientes marinas superficiales (CONAMA, 2001). Además de las variaciones del nivel del mar por efecto del cambio climático, deben señalarse los efectos de solevantamiento costero o subsidencia provocados por los procesos tectónicos, los que a pesar de actuar localmente, pueden producir efectos comparables a los causados por el nivel del mar.

El nivel del mar ha estado subiendo globalmente a una tasa promedio mundial de 1,8 mm/año (IPCC, 2007). Este ascenso y su proyecciones futuras estarían relacionados con una expansión del volumen de los océanos debido a un aumento de su temperatura y al aporte de agua fresca producto del derretimiento de nieves y hielos. Para el futuro se proyecta (modelo HadCM3) que el nivel del mar suba a valores cercanos a los 20 cm en la costa norte del país y del orden de 10 cm en la costa sur (DGF y CONAMA, 2007). Con excepción de un estudio realizado de manera específica en la costa del golfo de Arauco, no se han llevado a cabo análisis del impacto que tendrían estas alzas en las condiciones físicas (erosión de playas e inundación de zonas bajas) y en las actividades económicas de la costa del país.

En el año 2001, el Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile de la Universidad de Concepción llevó a cabo para la CONAMA el estudio “Evaluación de la vulnerabilidad de las áreas costeras a incrementos en el nivel del mar debido al cambio climático” (CONAMA, 2001). Dicho estudio se basó exclusivamente en los impactos en el golfo de Arauco en la VIII región del país. En esta zona se concentra gran parte de la población de Chile que vive en la costa. La metodología usada consideró primero una evaluación de las zonas inundables frente a un escenario de aumento del nivel del mar de un metro. Posteriormente, se hizo un análisis del valor de estas zonas para estimar el impacto económico y social que tendría asociado el escenario considerado. De acuerdo con los resultados de este trabajo, un alza de un metro en el nivel del mar en el golfo de Arauco implicaría pérdidas entre 23.000 y 54.000 millones de pesos (diciembre de 1994) poniendo en riesgo la subsistencia de las actividades de entre 1.200 y 1.800 personas (CONAMA, 2001).

Este estudio no ha sido replicado en otras zonas del país ni en otros escenarios. El presente apéndice resume los principales resultados de un trabajo que constituye una recopilación y análisis preliminar de antecedentes relativos a cambios del nivel del mar, sismicidad, *tsunamis* y variaciones del régimen de oleaje presente a lo largo de la costa, cuyo propósito es identificar tendencias y factores que deben tomarse en cuenta para analizar los efectos del cambio climático en las costas de Chile en el futuro. Para este efecto se utilizaron registros horarios de larga duración del nivel del mar en siete localidades del país, registros de oleaje de 20 años obtenidos mediante la calibración de un modelo numérico global con registros *in situ*, antecedentes sísmicos, de *tsunamis* y de otros factores que pueden ser relevantes en los efectos esperados. Estos estudios atienden a la disponibilidad de abundante información disponible de agencias locales, como del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada y del Servicio

Sismológico de Chile, además de estudios producidos por diversos centros de investigación radicados en el país. Se incluye un catastro de los principales puertos de Chile, infraestructura desarrollada por la Dirección de Obras Portuarias del Ministerio de Obras Públicas y zonas protegidas en Chile, cuyo objetivo es disponer de insumos básicos para estudios de vulnerabilidad que pudieren devenir en el marco de esta línea de investigación.

La estimación de los efectos asociados a cambios en el clima marítimo requiere del estudio detallado de agentes oceanográficos como el nivel del mar, parámetros de oleaje reinante y dominante, marea astronómica y meteorológica, fenómenos ENOS (El niño oscilación Sur), entre otros. La profundidad de las herramientas a utilizar dependerá de la cobertura y calidad de la información existente, además de la disponibilidad de herramientas apropiadas para su procesamiento y análisis. La combinación de estos agentes puede originar los siguientes efectos físicos en el borde costero:

- Inundación de las zonas costeras.
- Aumento de las planicies de inundación.
- Pérdida de territorios deltaicos.
- Desaparición de humedales.
- Erosión costera en playas y acantilados.
- Efectos en la cota de inundación en playas.
- Efectos en la forma en planta y perfil de las playas por basculamiento.
- Modificación del balance sedimentario costero.
- Efectos en la dinámica de las dunas.
- Efectos en la hidrodinámica y morfodinámica de estuarios.
- Efectos sobre el comportamiento operacional y estructural de las obras marítimas.
- Aumento del daño durante inundaciones y tormentas.
- Intrusión salina en acuíferos.
- Subida del nivel de la capa freática.

Es importante señalar que el cambio climático puede constituir un factor más en la vulnerabilidad de las costas, al interactuar en forma sinérgica con otras acciones de carácter antrópico como el emplazamiento de infraestructura en zonas bajas de alto riesgo, la extracción indiscriminada de sedimentos de los lechos fluviales, la fijación de suelo erosionable y la ocupación de campos dunares por la urbanización masiva, entre otras. En Chile, la evidencia de malas prácticas en estos términos es evidente y la predicción de los efectos del cambio climático puede ser determinante en el establecimiento de medidas de mitigación y adaptación futuras.

A continuación se presentan los resultados y conclusiones asociados a los estudios de nivel del mar, oleaje, sismicidad y *tsunamis* abordados en el presente análisis. Cabe mencionar que, en razón de los exiguos plazos disponibles para su ejecución, este estudio corresponde a una recopilación bibliográfica y la aplicación incipiente de técnicas de análisis de datos oceanográficos que debieran servir de base para estudios ulteriores de mayor profundidad.

B. Nivel de mar

La variación del nivel del mar en las estaciones mareográficas de más de 40 años en Chile no es homogénea, abarcando tasas de aumento desde +0,318 [cm/año] a descensos de -0,141 [cm/año]. En localidades como Arica y Antofagasta aparentemente ha existido una reducción, mientras que en Caldera y Talcahuano se aprecia un aumento. La serie de Valparaíso no tiene registros en varios años durante la década del setenta, lo que imposibilita concluir el tipo de variación experimentada. En Puerto Williams se aprecia una continua reducción en el nivel medio del mar durante el siglo XX, tendencia que se revierte a partir del año 2000. La estación insular de Isla de Pascua también evidencia un aumento comparativamente mayor del nivel medio del mar que las estaciones continentales.

Las tasas de variación son relativamente menores que las observadas en algunas estaciones de larga data a nivel mundial, que llegan a experimentar aumentos y descensos del orden de centímetros por año, lo que representa un orden de magnitud superior a los observados en Chile. No obstante, las variaciones son comparables a los valores medios obtenidos de estaciones del nivel del mar en diferentes cuadrantes a nivel mundial, que abarcan desde aumentos de +0,59 [cm/año] a descensos de -0,57 [cm/año]. En los gráficos A7.1 y A7.2 se presenta la serie de tiempo de nivel del mar para Arica que muestra un aumento de +0,14 [cm/año], y Talcahuano que, presenta un descenso de -0,14 [cm/año].

Lamentablemente existe deficiencia en los registros existentes en las latitudes polares, sectores ubicados lejos de costas y en el hemisferio sur, como el caso de Chile, debido a la escasa cobertura espacial y temporal de las estaciones de medición del nivel del mar. A nivel global, el nivel del mar está aumentando, no obstante en sectores de confluencia de placas y donde hay rebote viscoelástico posglacial (Alaska, Escandinavia, Escocia y Canadá) puede estar descendiendo. En el Pacífico central, el nivel permanece aproximadamente constante.

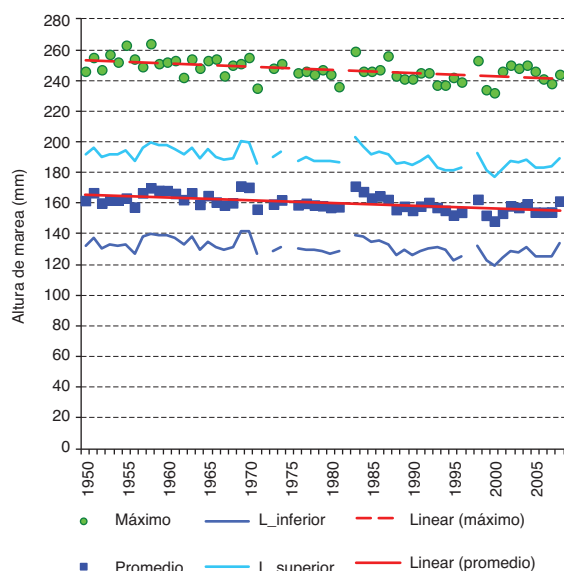
Aunque el comportamiento principal del nivel medio del mar en las costas de Chile pareciera no tener grandes fluctuaciones en el tiempo, se encontró evidencia de cambios cíclicos asociados a fenómenos ENOS, con años Niño, donde el nivel del mar puede alcanzar aumentos de hasta 30 [cm] sobre la tendencia, y años Niña con disminuciones del mismo orden. Estos ciclos de gran escala y escala temporal del orden de años, generan anomalías en la presión atmosférica y patrones de temperatura que redundan en fluctuaciones severas que pueden ser significativamente superiores al efecto de largo plazo asociado al cambio climático. Por cierto, las eventuales alzas del nivel del mar en el largo plazo, no parecen ser relevantes en la mayor parte de la costa chilena por tratarse de una zona sísmica activa sujeta a grandes deformaciones corticales y por los fenómenos climáticos de medio plazo que son de mayor relevancia.

C. Oleaje

El estudio se focalizó en la estadística de oleaje reinante, o de mayor frecuencia, sin considerar la estadística de temporales. Para los cuatro parámetros de resumen estudiados se observó un cambio de comportamiento de la distribución anual de probabilidad de excedencia entre los años iniciales (1985-1994) y los recientes (1995-2006). Las variaciones encontradas sugieren, en general, un incremento de la altura de ola en los últimos años, acompañado de períodos más altos y con direcciones cada vez más hacia el sur. El incremento en los períodos y alturas implican un aumento aún más importante en los valores de potencia del oleaje.

En la potencia del oleaje se observó un incremento en la probabilidad de excedencia anual de eventos de magnitud superior al promedio, que llega cerca de un 25%. Se observó un aumento promedio de 0,4 [Kw/año] y variaciones interanuales y estacionales significativas. La potencia del oleaje aumenta progresivamente con la latitud. Por otra parte, el aumento en la potencia del oleaje redundará en mayores costos de instalación, mantención y reposiciones imprevistas.

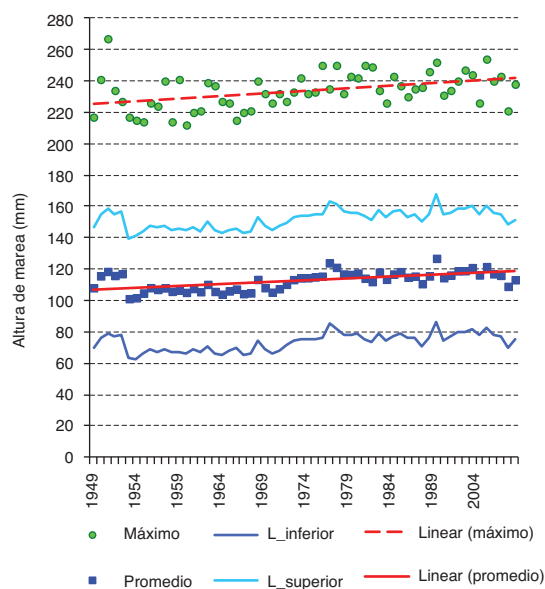
GRÁFICO A7.1
VARIACIÓN TEMPORAL DEL PROMEDIO ANUAL DEL NIVEL DEL MAR EN ARICA
 (En milímetros)



Fuente: Elaboración propia.

Nota: No se consideran efectos de mareas.

GRÁFICO A7.2
VARIACIÓN TEMPORAL DEL PROMEDIO ANUAL DEL NIVEL DEL MAR EN TALCAHUANO
 (En milímetros)



Fuente: Elaboración propia.

Nota: No se consideran efectos de mareas.

D. Sismicidad y *tsunamis*

El estudio se focalizó en la recopilación bibliográfica de los principales terremotos y *tsunamis* ocurridos en Chile desde la existencia de registros históricos. Cabe mencionar la heterogeneidad de la información disponible y la escasez de datos relacionados con las deformaciones corticales producidas por los terremotos y la extensión de las zonas de inundación por los devastadores *tsunamis*. No obstante lo anterior, las magnitudes asociadas a los sollevamientos o subsidencias costeras son considerablemente superiores en el largo plazo que las variaciones en el nivel del mar evidenciadas en los mareógrafos chilenos y, por ende, debieran ser materia de estudio. A modo de ejemplo se presentan dos series de fotografías que demuestran el impacto que tienen los sismos en la posición relativa del mar y la tierra. Ambos ejemplos corresponden al terremoto de Valdivia de 1960.

FOTOGRAFÍA A7.1

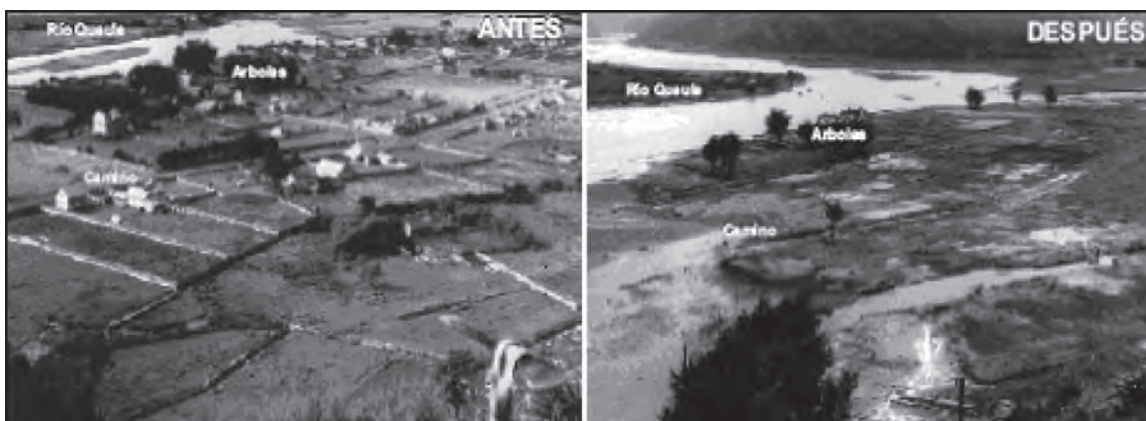
INUNDACIÓN EN EL SECTOR MERCADO MUNICIPAL DE VALDIVIA EN 1960 Y FOTO ACTUAL



Fuente: Elaboración propia con colaboración de Gonzalo Soto.

FOTOGRAFÍA A7.2

SUBSIDENCIA EXPERIMENTADA EN EL RÍO QUEULE DEBIDO AL TERREMOTO DE 1960



Fuente: Comte, registro personal, 2009.

E. Infraestructura

Se llevó a cabo una recopilación preliminar de antecedentes relativos al uso del borde costero, con énfasis en el desarrollo marítimo portuario del país y en la identificación de zonas de interés ambiental. Para ello, se consultó la base de datos disponible en la Dirección de Obras Portuarias (DOP) del Ministerio de Obras Públicas, Servicio Nacional de Pesca (SERNAPESCA), estadísticas de Transporte Marítimo de la Subsecretaría de Transportes del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, además de la Corporación Nacional Forestal (CONAF). Esta información permite visualizar el grado de ocupación del borde costero y cuantificar el número de personas, actividades o patrimonio ambiental directamente relacionados con los sitios catastrados.

El aumento del nivel del mar y el recrudescimiento de las condiciones del oleaje que podrían presentarse como consecuencia del fenómeno de calentamiento global, podrían impactar negativamente en el nivel de operación de estas obras y en la biodiversidad o riqueza ambiental de las zonas protegidas con consecuencias importantes en la economía nacional. El catastro presentado puede servir de punto de partida para el análisis de riesgo y las consecuencias económicas asociadas a eventuales alteraciones en el clima marítimo por efecto del cambio climático.

F. Futuros estudios

Se sugiere continuar la investigación haciendo un análisis espectral de datos del nivel del mar que dé cuenta de los cambios de frecuencia que puede estar experimentando, desde una escala de tiempo de horas hasta escalas de tiempo interanuales, para detectar fluctuaciones en los efectos estacionales y de gran escala temporal. Se recomienda asimismo analizar las posibles variaciones en el comportamiento atribuibles a los cambios de instrumento, efectos de los sismos y otros factores similares. Para estimar la vulnerabilidad futura de las costas, se recomienda llevar a cabo una extrapolación a medio plazo (del orden de décadas), considerando tendencia, efecto estacional y fenómenos ENOS.

Se sugiere continuar la investigación analizando estadísticas de oleaje de mayor longitud, provenientes de modelos globales de 40 o más años a lo largo de la costa de Chile, que dé cuenta de los cambios que puede estar experimentando el oleaje, desde una escala de tiempo de horas hasta escalas de tiempo interanuales, para detectar fluctuaciones en los efectos estacionales y de gran escala temporal. Para efectos de estimar la vulnerabilidad futura de las costas, se recomienda hacer una extrapolación a medio plazo (del orden de décadas), considerando tendencia, efecto estacional y fenómenos ENOS. Se recomienda asimismo analizar eventos extremos y simular la propagación de oleajes en aguas someras, de modo de facilitar la futura evaluación de los riesgos asociados y modificaciones en el clima del oleaje en las costas de Chile.

Además, se debe continuar la investigación estudiando las señales de mareógrafos antes, durante y después de los movimientos sísmicos, para identificar alteraciones en el nivel de referencia altimétrico de medición del nivel del mar. El establecimiento de futuros escenarios conservadores de deformación cortical para la zona sur, central y norte puede resultar satisfactoria gracias a la uniformidad relativa de los eventos entre barreras comunes. Se sugiere asimismo obtener información de eventuales cambios en el régimen de propagación de marea y oleaje por efecto de los movimientos sísmicos. Otra línea de estudio corresponde al de los principales *tsunamis* ocurridos en las costas chilenas, con particular énfasis en la determinación de las zonas de inundación.

Se recomienda complementar los resultados y conclusiones presentados en este informe con el estudio de efectos del cambio climático en las costas de Chile, que será desarrollado por el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria y la Universidad de Cantabria en el marco de esta convocatoria.

Bibliografía

- Comte, D. (2009), “Valdivia 1960”, Curso Terremotos: Usos y Abusos [Powerpoint] Chile, Universidad de Chile.
- CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente) (2001), “Análisis de vulnerabilidad y adaptación en zonas costeras y recursos pesqueros”, efectuado por el Centro EULA de la Universidad de Concepción, bajo el Proyecto GEF “Capacitación de Chile para cumplir sus compromisos con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático”.
- DGF y CONAMA (Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile y Comisión Nacional del Medio Ambiente) (2007), “Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI” [en línea] <http://www.dgf.uchile.cl/PRECIS> [fecha de consulta: 15 de diciembre de 2011].
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007), “Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change”, M. L. Parry y otros (eds.), Cambridge University Press, Reino Unido.

Apéndice VIII

Cobeneficios de las medidas de mitigación

A. Introducción

Chile es un país que presenta problemas de contaminación ambiental en casi todas sus grandes urbes y también en las zonas rurales del valle longitudinal. Como las fuentes de gases de efecto invernadero (GEI) y de contaminantes locales y regionales son muchas veces las mismas, la mitigación de emisiones de GEI ofrece la oportunidad de reducir simultáneamente las emisiones de contaminantes, produciendo una mejora en la calidad ambiental local y regional. Estos cobeneficios han sido reconocidos ampliamente en la literatura y en los dos últimos reportes del Grupo de Trabajo III del IPCC.

En este estudio se analizan los cobeneficios asociados a cada escenario de mitigación presentado en el cuadro VI.4 (Evolución de emisiones de GEI en el sector energético en los cinco escenarios de mitigación). Como la relación entre GEI y contaminantes locales dañinos para salud (HDP), depende de medidas específicas, el análisis se hace a nivel de medidas y luego se agregan a nivel de escenarios. El cuadro A8.1 muestra el tipo de medidas que se agregan para cada escenario.

La evaluación de reducción de emisiones a nivel de medidas se hace utilizando dos niveles de penetración (normal y máximo), logrando distintos niveles de reducción de emisiones de GEI. El nivel de penetración real que se podría lograr va a tener directa relación con el instrumento que se utilice para la implementación de cada una de las medidas.

CUADRO A8.1
MEDIDAS DE MITIGACIÓN SEGÚN ESCENARIOS

Escenario de mitigación	Medidas
M1	Eficiencia energética en industria Eficiencia energética en CPR
M2	Eficiencia energética en industria Eficiencia energética en CPR Introducción de mayor capacidad instalada de ERNC e hidroeléctricas
MT1	Cambio en partición modal Renovación del parque de vehículos Mejoras tecnológicas en vehículos
MT2	Introducción de biocombustibles

Fuente: Elaboración propia.

B. Metodología

El análisis de cobeneficios consiste en las siguientes etapas:

- i) estimación de la reducción de emisiones de precursores de contaminantes locales:
 - Identificación de distintos tipos de medidas.
 - Caracterización de medidas a nivel sectorial;
- ii) estimación del impacto de la reducción de emisiones en las concentraciones ambientales de contaminantes locales; y
- iii) valorización de la reducción de concentraciones ambientales.

A continuación se describe la metodología utilizada para abordar la estimación de cobeneficios en el presente estudio.

1. Reducción de nivel de emisiones

El cálculo de los cambios en emisiones se basa en el uso de factores de emisión, que relacionan el nivel de actividad con las emisiones. Básicamente, el método de factores de emisión calcula las emisiones de un contaminante j para la actividad A desde un nivel de actividad y un factor de emisión:

$$Em_j^A = Nact^A \cdot FE_j^A \quad (1)$$

Donde:

$E = m_j^A$ es la emisión del contaminante j para la actividad A

$Nact^A$ es el nivel de actividad para la actividad A

FE_j^A es el factor de emisión del contaminante j para la actividad A

GEI: Para el caso de las emisiones de GEI, el factor de emisión estará dado principalmente por el tipo de combustible a utilizar en la actividad A .

HPD: Existen varios HDP, y el factor de emisión estará dado por el tipo de combustible a utilizar y por la tecnología que satisface el respectivo servicio o demanda. Para facilitar el análisis, surge la necesidad de construir un indicador que contenga las emisiones de los distintos HDP en un solo valor equivalente. Para mayores detalles véase el anexo A de este apéndice.

a) Tipología de medidas de mitigación

La estimación de emisiones de GEI y HDP difiere principalmente en que para GEI las emisiones estarán casi totalmente relacionadas con el combustible utilizado, mientras que para HDP los factores de emisión estarán relacionados con el combustible y la tecnología utilizada. Algunas medidas implican un cambio en el nivel de actividad (por ejemplo, eficiencia energética), mientras que en otras el nivel de actividad se mantiene constante y lo que cambia son los factores de emisión, y los cambios tecnológicos

entran dentro de esta categoría. A continuación se establece la relación entre los cambios en emisiones de HDP y GEI para ambos casos.

Medidas que afectan el nivel de actividad

Son medidas en las que las reducciones de GEI se producen por disminución en la demanda de energía o del servicio. Con esto, el cambio en las emisiones para cada tipo de contaminante se puede cuantificar de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$\Delta Em_{GEI}^A = \Delta Nact^A \cdot FE_{GEI}^A \quad (2)$$

$$\Delta Em_{HDP}^A = \Delta Nact^A \cdot FE_{HDP}^A \quad (3)$$

Donde ΔEm_j^A es el cambio en emisión del contaminante j debido al cambio en el nivel de actividad A .

Si los factores de emisión FE_j^A son todos positivos, una reducción en el nivel de actividad tendiente a reducir los GEI reducirá también los contaminantes locales. Se puede estimar un factor que relacione el cambio en las emisiones de los dos tipos de contaminantes según se muestra en esta ecuación:

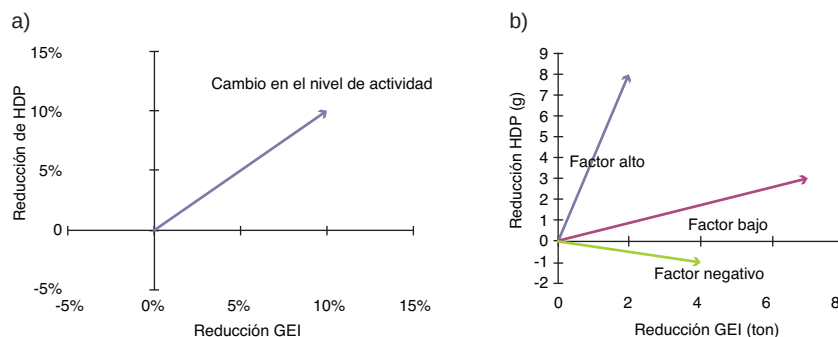
$$factor_{\frac{HDP}{GEI}}^A = \frac{\Delta Em_{HDP}^A}{\Delta Em_{GEI}^A} = \frac{FE_{HDP}^A}{FE_{GEI}^A} \left[\frac{grHDP}{grCO2} \right] \quad (4)$$

Con lo anterior, el cambio en las emisiones de HDP puede ser estimado mediante el producto entre $factor_{\frac{HDP}{GEI}}^A$ y las reducciones de GEI, según la siguiente ecuación:

$$\Delta Em_{HDP}^A = factor_{\frac{HDP}{GEI}}^A \cdot \Delta Em_{GEI}^A \quad (5)$$

Como se puede apreciar, los factores de emisión se mantienen fijos y lo que varía, produciendo el cambio en la emisión de HDP, es el nivel de actividad. Un ejemplo de esto es la mejora en aislación térmica de viviendas que produce un menor requerimiento de energía y, por ende, un menor nivel de actividad utilizando la misma tecnología. El gráfico A8.1 ilustra las reducciones a nivel porcentual, donde se supone una reducción del 10% en el nivel de actividad. En el panel a) se muestran las reducciones porcentuales, que son iguales independiente de la relación entre GEI y HDP. Por otra parte, en el panel b) se muestra que considerando magnitudes sí incide dicha relación.

GRÁFICO A8.1
RELACIÓN ENTRE REDUCCIONES PORCENTUALES (A) Y TOTALES (B)
DE EMISIONES DE HDP Y GEI POR CAMBIO EN NIVEL DE ACTIVIDAD



Fuente: Elaboración propia.

Medidas que afectan los factores de emisión

En estas medidas las reducciones de GEI se producen por cambios en las tecnologías usadas. El consumo o nivel de actividad se mantiene constante y lo que varía son los factores de emisión, tanto para GEI como para HDP. Las siguientes ecuaciones cuantifican los cambios en el nivel de emisiones:

$$\Delta Em_{GEI}^A = Nact^A \cdot \Delta FE_{GEI}^A \quad (6)$$

$$\Delta Em_{HDP}^A = Nact^A \cdot \Delta FE_{HDP}^A \quad (7)$$

Para este caso, la relación entre los cambios en la emisión de los dos tipos de contaminantes ($factor_{\frac{HDP}{GEI}}^A$) corresponde a la razón de los cambios en los factores de emisión para HDP y GEI, como muestra la siguiente ecuación:

$$factor_{\frac{HDP}{GEI}}^A = \frac{\Delta Em_{HDP}^A}{\Delta Em_{GEI}^A} = \frac{\Delta FE_{HDP}^A}{\Delta FE_{GEI}^A} \left[\frac{grHDP}{grCO2} \right] \quad (8)$$

El cambio del factor de emisión para GEI y HDP viene dado por:

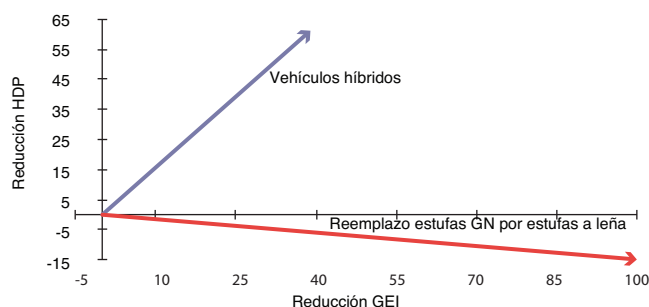
$$\Delta FE_i^A = FE_i^{ConMedida} - FE_i^{Base} \quad (9)$$

Al igual que en el caso anterior, los cobeneficios pueden ser estimados mediante el producto entre $factor_{\frac{HDP}{GEI}}^A$ y las reducciones de GEI:

$$Red_{HDP}^A = factor_{\frac{HDP}{GEI}}^A \cdot Red_{GEI}^A \quad (10)$$

Cuando los factores de emisión con medida sean menores a los factores de emisión base, tanto para GEI como para HDP, se obtendrán cobeneficios positivos. De no ser así, existirán cobeneficios negativos. El gráfico A8.2 muestra dos ejemplos de medidas de cambio de tecnología. La introducción de vehículos híbridos en lugar de vehículos convencionales supone cobeneficios positivos, mientras que el reemplazo de estufas a gas por estufas a leña implica un aumento en las emisiones locales, es decir, cobeneficios negativos. En ambos casos, el nivel de actividad se asume constante (kilómetros recorridos y calor entregado respectivamente), en una primera aproximación.

GRÁFICO A8.2
RELACIÓN ENTRE REDUCCIÓN DE EMISIONES DE HDP Y GEI
POR CAMBIO TECNOLÓGICO
(En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia.

b) Caracterización de medidas a nivel sectorial

Las medidas incluidas en los distintos escenarios de mitigación (véase el cuadro A8.1) pueden clasificarse según las categorías descritas en el punto anterior. Es decir, hay medidas que suponen una disminución en el nivel de actividad, medidas que implican un cambio en el factor de emisión y medidas que se abordan mediante los dos enfoques. A continuación se caracterizarán las medidas de los distintos sectores.

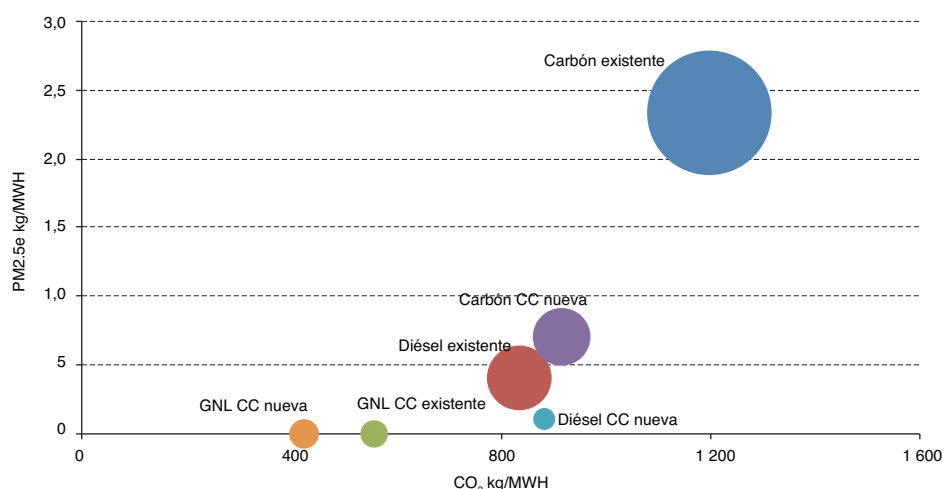
Sector eléctrico

El sector de generación eléctrica se verá afectado por la incorporación de medidas que impactan, tanto la demanda como la oferta, y la reducción de emisiones tendrá relación directa con las centrales que se desplacen debido a la introducción de una nueva tecnología o disminuyan su generación como resultado de la disminución de la demanda. En el gráfico A8.3 es posible apreciar la emisión por electricidad generada (MWh), tanto para GEI como para contaminantes locales para centrales generadoras termoeléctricas a carbón, diésel y gas natural.

Es interesante notar en el gráfico A8.3, que la mayor participación en generación térmica la tienen las centrales a carbón, que es la tecnología más contaminante en términos globales (GEI) y locales (HDP). Por otra parte, las centrales GNL (existentes y nuevas) y las centrales a diésel nuevas tienen bajas emisiones de HDP en comparación con las centrales carboníferas. Más adelante, se presentan los factores de emisión para las centrales carboníferas existentes y nuevas del Sistema Interconectado del Norte Grande (SING) y el Sistema Interconectado Central (SIC).

A continuación se describen las medidas de reducción de demanda y cambio de oferta eléctrica.

GRÁFICO A8.3
EMISIÓN DE GEI Y HDP PARA CENTRALES TERMOELÉCTRICAS



Fuente: Elaboración propia sobre la base de L. A. Cifuentes y +MG (2010), *Análisis técnico-económico de la aplicación de una norma de emisión para termoeléctricas*.

Nota: El tamaño de la burbuja indica la participación en generación anual proyectada a partir del año 2010.

Reducción de la demanda y medidas de eficiencia energética

Estas medidas producirán una reducción en el consumo eléctrico, lo que influirá en la cantidad de energía que se generará.

La reducción de demanda por electricidad se producirá a nivel de sistema eléctrico (SING y SIC). En el presente estudio, se consideró que la disminución de demanda impactará en las centrales carboneras existentes. Para la evaluación de medidas de reducción de demanda eléctrica en el escenario M1 y M2 se asumió que esta se produce de manera proporcional a la generación eléctrica proyectada para cada central existente en cada sistema eléctrico y, por ende, se modeló una reducción en emisión de contaminantes en todas las localidades donde existen centrales térmicas a carbón.

Oferta y reducción de la intensidad de carbono

La instalación de nuevas tecnologías de energías renovables no convencionales (ERNC) evitará la entrada de una central a carbón nueva, que es considerada como tecnología de expansión de la línea de base de generación eléctrica.

Este cambio en el nivel de emisiones se asignará a las localidades afectadas, de acuerdo con las plantas que se dejen de construir por la modificación del plan de obras de la CNE. Debido a la limitación de elegir la central térmica que deja de construirse, para la evaluación del impacto en oferta eléctrica en el escenario M2 se modeló una reducción de generación eléctrica de parte de las nuevas centrales a carbón, de manera proporcional a su aporte a la generación para el sistema eléctrico.

Transporte

Renovación del parque vehicular

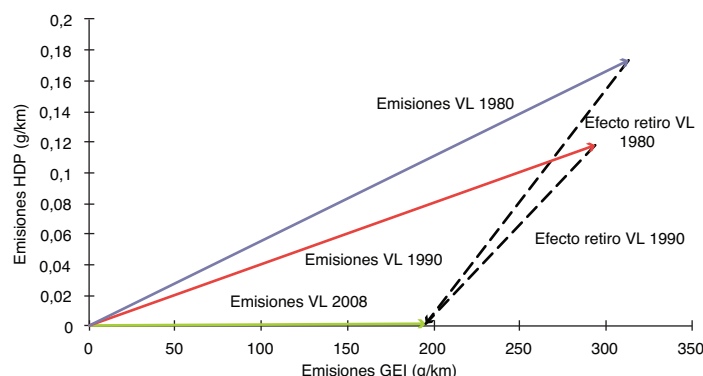
La renovación del parque vehicular corresponde al segundo tipo de medidas, ya que el nivel de actividad (kilómetros recorridos al año) se mantiene constante, suponiendo que con la salida de un

vehículo antiguo se produce la entrada de uno nuevo y, por lo tanto, el cambio en el nivel de emisiones viene dado por la diferencia entre los factores de emisión de los vehículos.

El impacto del retiro de vehículos en el nivel de contaminantes locales emitidos varía considerablemente dependiendo de la antigüedad del vehículo. En el gráfico A8.4 se comparan las emisiones promedio de vehículos livianos (VL) de 1980, 1990 y 2008, pudiéndose apreciar la diferencia del efecto entre retirar vehículos de distinta antigüedad. Se observa que el nivel de emisiones de GEI es mayor para un vehículo antiguo, pero está en el mismo nivel de magnitud que el nuevo. En cambio, se aprecia que la emisión de contaminantes locales es cerca de 100 y 150 veces mayor para los vehículos de 1990 y 1980 comparándolo con uno nuevo, por lo que el efecto del recambio resulta muy significativo.

De este análisis se puede desprender que si la política a implementar apunta a la reducción de GEI la consideración de la antigüedad del vehículo tiene más importancia al momento de hacer un análisis integrado que incorpore la reducción de HDP.

GRÁFICO A8.4
RETIRO DE UN VEHÍCULO LIVIANO (VL) VIEJO VERSUS NUEVO
(En g/km)



Fuente: Elaboración propia sobre la base de DICTUC, “Análisis y evaluación del impacto económico y social del plan de descontaminación de la Región Metropolitana”, Santiago de Chile, 2008.

Mejoras tecnológicas

Las medidas de mejoras tecnológicas implican cambios en los factores de emisión, por lo que el análisis se aborda mediante la segunda metodología presentada. Entre estas medidas se encuentran la introducción de vehículos híbridos, eléctricos o híbridos *plug-in*, en lugar de un vehículo convencional. A continuación, en el gráfico A8.5 se muestra la relación de las emisiones de GEI y HDP para vehículos convencionales y vehículos híbridos.

Introducción de biocombustibles

Se cuenta con medidas que suponen el uso de biocombustibles en el sector del transporte terrestre. Dependiendo del tipo de biocombustible, biodiésel o bioetanol, el impacto en contaminantes locales difiere. En general, se utilizan mezclas de biocombustibles, biodiésel con diésel y bioetanol con gasolina. El nivel de mezcla afecta la reducción de emisiones de GEI y las emisiones de contaminantes locales. Por ejemplo, en el gráfico A8.6 se muestra el caso del biodiésel y cómo cambian los niveles de emisión locales de acuerdo con el porcentaje de biodiésel en la mezcla. Se observa que mientras

menos diésel haya en la mezcla, los niveles de material particulado (MP), monóxido de carbono (CO) y hidrocarburos (HC) bajan, mientras que el nivel de óxidos de nitrógeno (NO_x) aumenta.

Por otra parte, se tiene que para el bioetanol al 20% (E20), no existen diferencias significativas en las emisiones de NO_x con respecto a la gasolina común, mientras que HC y CO disminuyen un 13% y un 16% en promedio respectivamente (NREL, 2009). Se debe considerar que la gasolina no emite MP directamente. El rendimiento del vehículo disminuye en un 7,7% promedio, por lo que se produce un aumento del consumo de combustible. El cuadro A8.2 muestra un resumen de los efectos para ambos tipos de combustibles a una mezcla del 20%. En el gráfico A8.7 se aprecia el impacto de introducir biodiésel y bioetanol al 20%.

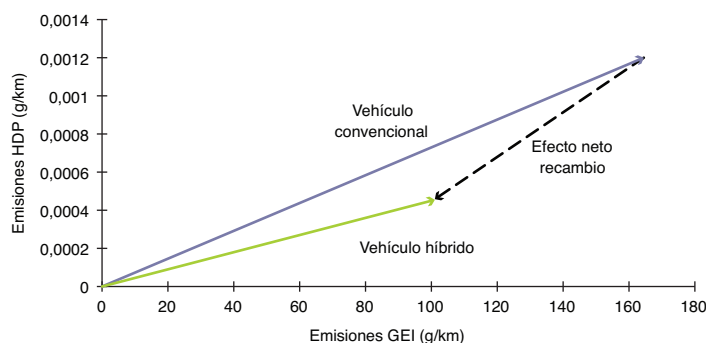
Para la evaluación del escenario MT2, se utilizará una mezcla del 20% tanto para biodiésel como para etanol/gasolina.

CUADRO A8.2
EFFECTOS DEL BIOCOMBUSTIBLE CON RESPECTO A COMBUSTIBLE SIN MEZCLA

	Biodiésel 20%	Bioetanol 20%
Cambio rendimiento	-1,5%	-7,7%
Cambio emisiones GEI	-18,8%	-13,3%
Cambio emisiones HDP	-1,9%	-29%

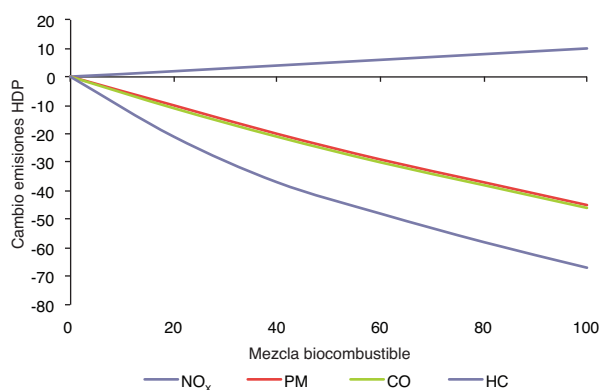
Fuente: Elaborado sobre la base de Environmental Protection Agency (EPA), “A comprehensive analysis of biodiesel impacts on exhaust emissions”, *Draft Technical Report*, 2002; y de National Renewable Energy Laboratory (NREL), “Effects of intermediate ethanol blends on legacy vehicles and small non-road engines, Report 1-Updated”, 2009.

GRÁFICO A8.5
**EMISIÓN DE GEI Y HDP PARA VEHÍCULOS CONVENCIONALES
E HÍBRIDOS COMPARABLES**
(En g/km)



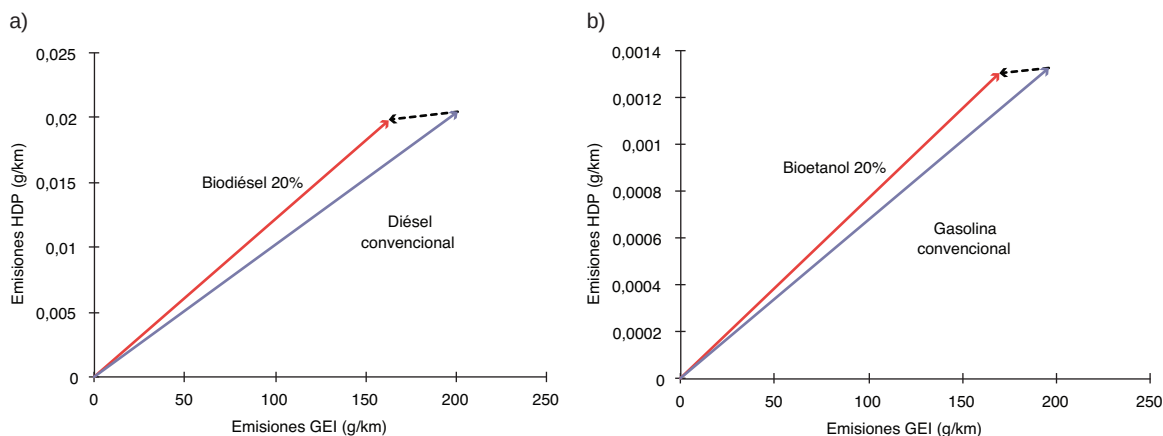
Fuente: Elaboración propia sobre la base de VCA Offices, “VCA Car fuel data” [en línea] <http://www.vcacarfueldata.org.uk/>, 2000-2010.

GRÁFICO A8.6
CAMBIO EN EL NIVEL DE EMISIONES LOCALES PARA
DISTINTA PUREZA DE BIODIÉSEL
(En porcentajes)



Fuente: Environmental Protection Agency (EPA), “A comprehensive analysis of biodiesel impacts on exhaust emissions”, *Draft Technical*

GRÁFICO A8.7
EMISIÓN DE CONTAMINANTES HDP Y GEI PARA BIODIÉSEL (A) Y BIOETANOL (B)
VERSUS COMBUSTIBLES CONVENCIONALES
(En g/km)



Fuente: Elaboración propia sobre la base de Environmental Protection Agency (EPA), “A comprehensive analysis of biodiesel impacts on exhaust emissions”, *Draft Technical Report*, 2002; y de National Renewable Energy Laboratory (NREL), “Effects of intermediate ethanol blends on legacy vehicles and small non-road engines, Report 1-Updated”, 2009.

Cambio en partición modal

Las medidas de esta índole suponen que cierta cantidad de usuarios se traspasan desde el transporte particular hacia el público. Se asume que el nivel de actividad (kilómetro recorrido por pasajero) se mantiene constante y, por lo tanto, lo que cambia son los factores de emisión (entre movilizarse en transporte público y privado). El cuadro A8.3 compara las emisiones para cada caso y el gráfico A8.8 lo ilustra.

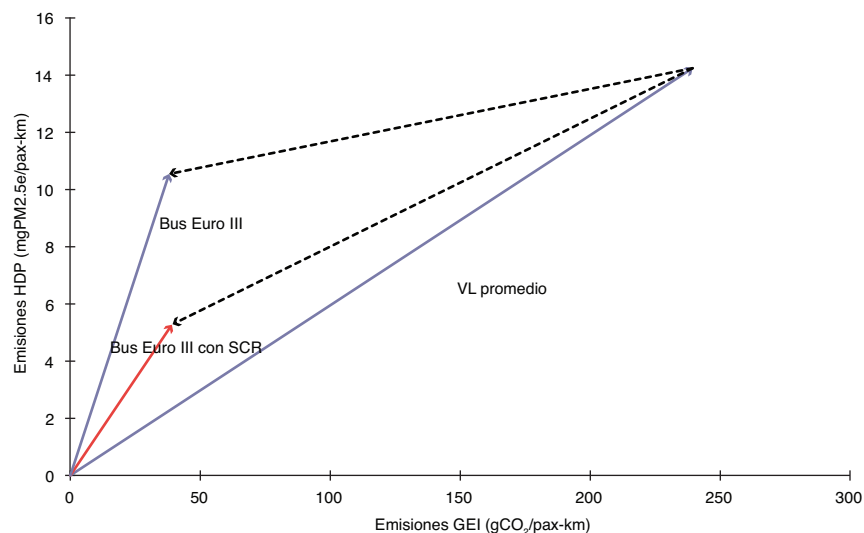
Es interesante notar que cuando una persona pasa del automóvil al bus público, se logra una reducción por pax-km de aproximadamente un 85% en las emisiones de GEI, sin importar si se tiene filtro o no. La gran diferencia se aprecia en la reducción de HDP, donde la reducción cuando se cambia a un bus sin filtro es de un 26%, mientras que cuando se cambia a un bus con filtro alcanza a un 63%, es decir, más del doble.

CUADRO A8.3
EMISIONES DEL TRANSPORTE PRIVADO VERSUS EL TRANSPORTE PÚBLICO

	Unidad	Auto privado	Bus Euro III sin filtro	Bus Euro III con SCR
Combustible		Gasolina	Diésel	Diésel
Tasa ocupación promedio	pax/vehículo	1,3	30	30
Emisión GEI	grCO ₂ /km	311,3	1,152	1,175
Emisión GEI unitaria	gCO ₂ /pax-km	239,5	38,4	39,2
Emisión PM2.5e	mgPM2.5e/km	18,5	315,2	158,4
Emisión PM2.5e unitaria	mgPM2.5e/pax-km	14	10,5	5,3

Fuente: Tasas de ocupación sobre la base de DICTUC, “Análisis técnico-económico de la aplicación de la revisión de norma de emisión para motores de buses de locomoción colectiva de la ciudad de Santiago”, 2009; y factores de emisión sobre la base de datos de vehículos del INE 2008.

GRÁFICO A8.8
EMISIONES UNITARIAS DEL TRANSPORTE PRIVADO VERSUS EL TRANSPORTE PÚBLICO



Fuente: Tasas de ocupación sobre la base de DICTUC, “Análisis técnico-económico de la aplicación de la revisión de norma de emisión para motores de buses de locomoción colectiva de la ciudad de Santiago”, 2009; y factores de emisión sobre la base de datos de vehículos del INE, 2008.

Industria

Eficiencia energética en industria

Dentro de las medidas de eficiencia energética en la industria existen algunas que implican una reducción de la demanda por energía, electricidad o combustible, entregando el mismo servicio.

Recambio motores eléctricos

El recambio de motores eléctricos convencionales por motores eficientes produce una disminución en el consumo eléctrico, y este impacto será evaluado de acuerdo con lo explicado anteriormente para el sector eléctrico en su apartado de reducción de la demanda eléctrica.

Cogeneración

La medida de cogeneración requiere de un análisis más complejo. Dicha medida consiste en instalar sistemas de cogeneración en la industria, aprovechando parte del calor que normalmente es disipado en el ambiente para generar electricidad. Al usar cogeneración la energía necesaria para llevar a cabo los procesos de la industria disminuye. Esta disminución proviene de un aumento del consumo de combustible primario, que va acompañado de una baja en el consumo de electricidad de la red. El efecto neto es una reducción de la energía total consumida por la industria y de las emisiones de GEI. El cambio en las emisiones de HDP se produce al reemplazar parte del consumo eléctrico por generación local. El efecto neto en las emisiones de HDP dependerá de los factores de emisión locales y de la generación eléctrica desplazada.

Sector comercial, público y residencial

Eficiencia energética en CPR

Existen medidas de eficiencia energética en CPR que implican un cambio en el nivel de actividad como también hay otras que implican cambios en los factores de emisión. Al igual que en el caso de la industria, aquellas medidas que supongan cambios en el consumo eléctrico serán modeladas como cambio de demanda en dicho servicio y evaluadas según se explica anteriormente para el sector eléctrico en su apartado de reducción de la demanda eléctrica. Dentro de esta categoría se encuentra, por ejemplo, el recambio de ampolletas convencionales por CFL y LED.

Por otra parte, medidas como el reemplazo de calderas convencionales por calderas de condensación eficientes suponen un cambio tecnológico y, por lo tanto, un cambio en los factores de emisión. Esta conceptualización entiende por nivel de actividad el calor entregado, que se mantiene constante independiente de la tecnología.

2. Cambio de concentraciones ambientales de PM2.5

Para conocer el cambio de concentración ambiental de PM2.5 es necesario asignar el cambio de emisión de contaminantes a nivel geográfico. Esto se realiza utilizando distintos criterios según el tipo de medida y el sector afectado. Por ejemplo, medidas que afectan el consumo residencial se asignan según la distribución de población a nivel de ciudad o comuna. En el cuadro A8.4 se detallan los criterios utilizados para esta asignación en el presente análisis según cada medida.

Una vez conocido el cambio en la emisión de contaminantes locales a nivel geográfico, se procede a estimar el cambio en la concentración ambiental de PM2.5. Para esto se usarán modelos de *roll-back* que permiten aproximar de forma lineal el impacto de la reducción de emisiones de precursores en las concentraciones ambientales de material particulado (para mayor detalle véase el anexo A de este apéndice).

CUADRO A8.4**CRITERIO DE ASIGNACIÓN DE REDUCCIÓN DE EMISIONES A NIVEL GEOGRÁFICO**

Sector	Medida	Criterio
CPR	Medidas con emisión de GEI directa	Distribución población
CPR-industria	Medidas reducción demanda eléctrica	Participación en generación plantas a carbón existentes en sistema eléctrico
Industria	Cogeneración	Mayores ciudades con procesos de gas natural (calderas industriales)
Generación Eléctrica	ERNC-hidro	Participación en generación plantas a carbón nuevas en sistema eléctrico
Transporte	Conducción eficiente de buses	Distribución parque de buses
	Conducción eficiente de taxis y colectivos	Distribución parque de taxis y colectivos
	Taxis y colectivos híbridos	
	Chatarrización de vehículos livianos	Distribución parque de vehículos livianos
	Conducción eficiente de vehículos livianos	
	Impuesto a combustibles de vehículos livianos diésel	
	Impuesto a combustibles de vehículos livianos gasolina	
	Subvención al transporte público	
	Vehículos livianos híbridos	
	Vehículos livianos híbridos <i>plug-in</i>	
	Biodiésel	Distribución parque total de vehículos
	Bioetanol	
	Buses híbridos	Santiago
	Expansión de líneas del Metro	

Fuente: Elaboración propia.

3. Valorización de la reducción de concentraciones ambientales

La reducción de la concentración de contaminantes atmosféricos resultará en una mejora ambiental para la zona o localidad donde se realice. El cuadro A8.5 resume algunos de los impactos del cambio en el nivel de concentraciones de contaminantes atmosféricos, que además se traducen en beneficios económicos para el país.

Para valorizar la mejora de calidad ambiental, nos centraremos en el impacto más importante, la reducción de impactos en la salud pública, que resultan de la reducción de exposición de la población a material particulado.

CUADRO A8.5**TIPOS DE BENEFICIOS POR MEJORA DE LA CALIDAD AMBIENTAL**

Impacto	Descripción
Salud humana	Se consideran los efectos de mortalidad prematura y de morbilidad en la población expuesta, debido a los cambios en las concentraciones ambientales extramuros.
Visibilidad	Los cambios de concentraciones tienen un impacto en la visibilidad.
Materiales	Debido a la contaminación se producen daños en superficies de materiales.
Agricultura	Mejora en la productividad por reducción de concentración de SO ₂ .

Fuente: Elaboración propia.

a) Cuantificación de casos evitados en salud

Estudios nacionales e internacionales han asociado consistentemente el material particulado fino (PM2.5) con impactos sobre la salud humana. Cientos de estudios epidemiológicos han mostrado efectos en poblaciones diversas y en diferentes grupos de edad. Una revisión exhaustiva se encuentra en el documento de criterios de la USEPA (EPA, 2004), y en otros estudios más recientes (NRC, 2004; AIRNET, 2005).

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

Las funciones se obtienen, en su mayoría, de estudios epidemiológicos de series de tiempo, de cohorte, o de sección transversal. La mayoría de las funciones C-R son del tipo riesgo relativo, estiman el cambio en efectos relativo a una situación considerada como base, generalmente, la tasa de incidencia del efecto observada en la población de análisis. El cambio en el efecto que una población determinada experimenta, producto de la variación del nivel de concentración de un contaminante queda dada como:

$$\Delta E_{ij}^k = F(Pop_j^k, IR_{ij}, \beta_{ij}^k, \Delta C^k) \quad (11)$$

Donde:

Pop_j^k : Número de personas del grupo j que está expuesta al contaminante k .

IR_{ij} : Tasa incidencia del *endpoint*⁹ i en la población j .

β_{ij}^k : Riesgo unitario de que el *endpoint* i afecte una subpoblación j producto de un contaminante k .

ΔC^k : Cambio de concentración en el contaminante k .

En el anexo B se presenta el detalle de los impactos en la salud a considerar, junto con el grupo de edad afectado y la referencia de la función concentración-respuesta.

b) Valoración de beneficios en salud

La valoración económica de los efectos en la salud puede ser estimada con medidas del costo que incluyen el tratamiento de la enfermedad y la pérdida de productividad por días no trabajados, método COI (*Cost of illness*) o con medidas de la disposición a pagar de los individuos por disminuir riesgos a su salud, que incluyen los niveles valorizados por el método COI más la pérdida de bienestar que implica estar enfermo, WTP (*Willingness to pay*).

Esto se explica en mayor detalle en el anexo C de este apéndice.

⁹ En la literatura los efectos a la salud estudiados son llamados *endpoints*. Los *endpoints* relacionados con la contaminación atmosférica pueden ser clasificados en cuatro categorías: muerte prematura; acciones médicas, como hospitalizaciones; enfermedades propiamente tales; y restricción de actividad (incluyendo días perdidos de trabajo). Pueden ser también clasificados según la naturaleza de sus efectos, en crónicos y agudos; y según sus causas de acuerdo con “The International Classification of Diseases 10th Revision ICD-10”.

C. Análisis y resultados

De acuerdo con el marco metodológico presentado anteriormente, se realizó un análisis de las medidas de mitigación de GEI. Esto permite cuantificar la reducción de contaminantes locales (HDP) a nivel de medidas. Una vez obtenidos los cobeneficios unitarios en cuanto a las medidas, se procede a asignar estas reducciones a nivel geográfico, utilizando distintos criterios para su distribución. Finalmente, es posible agregar estos resultados a nivel de zonas geográficas.

Lo anterior permite hacer un análisis muy interesante con respecto a la distribución que tienen los cobeneficios por la aplicación de medidas de mitigación de GEI. Estos pueden estar distribuidos a nivel sectorial o geográfico.

En una última instancia, es posible cuantificar el valor presente de los cobeneficios en el período de análisis 2010-2030, aplicados a los escenarios de reducción de GEI evaluados en el presente estudio.

1. Cobeneficios unitarios a nivel de medidas

En el cuadro A8.6 es posible apreciar la relación que existe entre las emisiones de contaminantes locales (HDP) y contaminantes globales (GEI) para aquellas medidas analizadas en las que se produce una reducción directa de emisiones, y que la localidad afectada por dichas emisiones es aquella donde se aplica la medida.

CUADRO A8.6
REDUCCIÓN DE EMISIONES DIRECTAS DE CONTAMINANTES LOCALES
POR TONELADA DE CO₂ REDUCIDA

Medida	PM2.5	SO _x	NO _x	CO	COV	NH ₃
	(gramo/tCO ₂)					
Calderas de condensación, duchas eficientes, colectores solares	13,9	0,6	450	91,6	36,1	2,3
Cogeneración	10,1	0,1	218			
Buses híbridos	303	13,6	3 199	4 029		
Carga en ferrocarril	278	13,4	4 405	1 554		
Chatarrización de camiones	278	13,4	4 405	1 554		
Chatarrización de vehículos livianos	515	8,3	43 296	484 338	25 951	
Conducción eficiente de buses	117	14,0	4 090	990		
Conducción eficiente de taxis y colectivos		11,2	130	2 608		
Conducción eficiente de vehículos livianos	41,8	9,6	1 638	20 744		
Expansión de líneas del Metro	41,8	10,0	1 637	20 745		
Impuesto a combustibles de vehículos livianos a gasolina		9,7	1 586	22 815		
Impuesto a combustibles de vehículos livianos diésel	400	13,5	2 080	2 681		
Incentivo de cambio modal a transporte público	29,5	9,2	1 776			
Taxis y colectivos híbridos		11,6	221			
Vehículos livianos híbridos		18,9	299			
Vehículos livianos híbridos <i>plug-in</i>		18,0	177			
Biodiésel al 20%	214	13,4	-221	1 567		
Bioetanol al 20%		9,7		20 586		

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Para las medidas “Cogeneración”, “Expansión de líneas del Metro” y “Vehículos híbridos *plug-in*” hay además un cambio en el consumo de electricidad, que varía las emisiones en el lugar de generación eléctrica, situación que no se ve reflejada en el cuadro.

En el caso de la aislación térmica, es necesario realizar un análisis a nivel regional, debido a que el comportamiento en el consumo de energía para calefacción varía enormemente según la región analizada. En el cuadro A8.7 se presenta la relación entre emisiones de GEI y HDP para calefacción de acuerdo con la matriz de energía para cada zona térmica.

Como se mencionó anteriormente, para el caso de las medidas que producen reducción de demanda eléctrica se modeló una disminución de la generación eléctrica de centrales a carbón existentes, mientras que para las medidas que suponen un cambio en la matriz de generación (ERNC o hidro), se modeló una disminución de la generación eléctrica de centrales a carbón nuevas. Esta reducción se produce de manera proporcional a su participación en la generación para cada sistema. La reducción de emisiones se asoció a las comunas donde se ubica cada una de las centrales. Los cuadros A8.8 y A8.9 muestran la reducción de contaminantes (GEI y HDP) producida por MWh de consumo eléctrico reducido y por MWh de generación a carbón sustituido por ERNC o hidro respectivamente, para cada sistema eléctrico.

CUADRO A8.7
REDUCCIÓN DE EMISIÓN DE CONTAMINANTES LOCALES POR TONELADA DE CO₂
REDUCIDA PARA AISLACIÓN TÉRMICA

Zona térmica	Ciudad representativa	PM _{2.5}	SO _x	NO _x	CO	COV	NH ₃
(gramo/tCO ₂)							
1	Antofagasta	0,2	0,1	3,4	0,9	0,3	5
2 y 3	Valparaíso y Santiago	6,4	0,2	4,1	77,2	69,5	5,7
4	Concepción	14,7	0,4	5,2	180	162,9	6,6
5 y 6	Temuco y Puerto Montt	3 847	96,4	1 136,8	47 458,6	42 957	409,5
7	Punta Arenas	0,1	0	0,9	0,4	0,1	5

Fuente: Elaboración propia. Zonas térmicas de acuerdo con IIT y Fundación Chile (2009).

Nota: No se considera consumo de diésel y electricidad.

CUADRO A8.8
REDUCCIÓN DE EMISIONES (GEI Y HDP) POR MWh DE CONSUMO ELÉCTRICO
REDUCIDO POR SISTEMA ELÉCTRICO

Medida	Sistema eléctrico	Chimenea	Comuna	CO ₂	PM	SO ₂	NO _x
				(ton)	(gramo)		
Disminución demanda eléctrica	SIC	Laguna Verde U1	Valparaíso	55	5	76	48
		Laguna Verde U2	Valparaíso	78	7	109	68
		Ventanas U1	Puchuncaví	151	55	471	296
		Bocamina U1	Coronel	144	23	502	316
		Ventanas U2	Puchuncaví	266	98	872	548
		Guacolda U3	Huasco	368	61	1 184	640
	Total SIC			1 062	249	3 214	1 915
	SING	CELTA U2	Iquique	1 600	886	3 214	2 019
Total SING				1 600	886	3 214	2 019

Fuente: Elaboración propia sobre la base de L. A. Cifuentes y +MG (2010) *Análisis técnico-económico de la aplicación de una norma de emisión para termoeléctricas*, 2010.

Nota: Considera el supuesto de que la reducción de 1 MWh de consumo eléctrico en cada sistema eléctrico (SIC o SING) produce una reducción de emisiones en todas las chimeneas del respectivo sistema en las magnitudes presentadas en el cuadro.

CUADRO A8.9
REDUCCIÓN DE EMISIONES (GEI Y HDP) POR MWh GENERADO CON TECNOLOGÍA
ERNC O HIDRO EN CADA SISTEMA ELÉCTRICO

Medida	Sistema eléctrico	Chimenea	Comuna	CO ₂	PM	SO ₂	NO _x
				(ton)		(gramo)	
ERNC-hidro	SIC	Laguna Verde U1	Valparaíso	153	36	195	352
		Laguna Verde U2	Valparaíso	67	15	217	15
		Ventanas U1	Puchuncaví	138	24	202	230
		Bocamina U1	Coronel	113	18	171	195
		Ventanas U2	Puchuncaví	117	20	198	275
		Guacolda U3	Huasco	117	20	197	274
		Laguna Verde U1	Valparaíso	111	5	43	60
		Laguna Verde U2	Valparaíso	39	7	36	12
		Ventanas U1	Puchuncaví	37	6	35	60
		Bocamina U1	Coronel	12	1	5	7
		Ventanas U2	Puchuncaví	12	1	5	7
		Guacolda U3	Huasco	13	3	12	30
		Total SIC		929	155	1 315	1 517
	SING	Angamos U1	Mejillones	549	94	203	486
		Angamos U2	Mejillones	531	91	197	470
		Total SING		1 080	184	400	956

Fuente: Elaboración propia sobre la base de L. A. Cifuentes y +MG (2010), *Análisis técnico-económico de la aplicación de una norma de emisión para termoeléctricas*, 2010.

Nota: El reemplazo de 1 MWh de generación a carbón por generación ERNC o hidro en cada sistema eléctrico (SIC o SING), reduce las emisiones en todas las chimeneas a carbón del respectivo sistema en las magnitudes presentadas en el cuadro.

En los cuadros del anexo E se encuentra el detalle de los factores de emisión para las centrales existentes y para las nuevas, además del factor de emisión promedio para los sistemas eléctricos en cada caso. Mayor información acerca de las medidas, los factores de emisión utilizados y supuestos realizados para relacionar emisiones de HDP y GEI está disponible en el anexo D de este apéndice.

2. Cobeneficios unitarios a nivel geográfico

Los impactos en salud se producen dependiendo de la población que sea afectada. Para el caso de las medidas que tienen una emisión directa, la población afectada es aquella que produce el menor consumo de combustible o utiliza uno menos contaminante. Por otra parte, para aquellas medidas que producen una reducción en la demanda eléctrica y aquellas que cambian el parque generador (ERNC o hidro), la población afectada será aquella donde se ubican las centrales generadoras que se desplazan o reducen su generación base. Para poder analizar el impacto de las reducciones en localidades específicas, es necesario asignar estas reducciones según el criterio que se presenta en el cuadro A8.10.

Luego de la asignación a nivel de localidades, es posible estimar el cobeneficio a nivel de medida, valores que se presentan en el cuadro A8.10. Estos valores son un promedio del período 2010-2030. Las medidas fueron evaluadas en escenarios de penetración normal y máximo (a lo largo del informe se muestran los números para el escenario máximo). Por lo demás, también se evalúan dos escenarios de valoración ([bajo – alto]) para los efectos de la contaminación. Es interesante notar

el gran impacto que tienen las medidas de transporte terrestre, debido a que se implementan en localidades donde hay mucha población y, por lo tanto, se produce un mayor impacto en la salud.

En el cuadro A8.10 se muestra el cobeneficio promedio en el período 2010-2030 a nivel de localidades. Los cobeneficios son mayores en los grandes centros poblados: Gran Valparaíso, Gran Santiago, Gran Concepción y Gran Temuco. En el norte, hay altos cobeneficios en Iquique por la existencia de centrales de generación eléctrica. Como se explicó anteriormente, Chile es un país que presenta problemas de contaminación ambiental en casi todas sus grandes urbes, y esto hace posible que la implementación de una medida que reduzca la emisión de GEI en aquellas urbes pueda lograr una mejora importante en términos de calidad ambiental.

Otra manera de presentar los resultados es agregados por zona geográfica. La definición de las zonas se muestra en el anexo F. En el gráfico A8.9 se muestran estos resultados, donde es claro el impacto en las zonas con mayor población. En el caso del norte grande, el impacto es principalmente por la reducción de generación en las centrales eléctricas de la zona. En el caso de la zona austral, el impacto es menor debido a la baja población existente en la zona en comparación con el resto del país, además del alto consumo de gas natural, que hace que el potencial de reducción de emisiones locales sea más bajo.

CUADRO A8.10
COBENEFICIOS A NIVEL DE MEDIDAS, PROMEDIO 2010-2030
(En dólares/tCO₂e reducida)

Sector	Medida	Escenario de valoración
		Bajo-alto
CPR	Aislación de viviendas	[3,3 - 18,2]
	Calderas de condensación	[4,9 - 27]
	Coletores solares	[4,9 - 27]
	Duchas eficientes	[4,9 - 27]
	Medidas de reducción de demanda eléctrica	[6,3 - 36,2]
Generación eléctrica	ERNC – hidro	[4,1 - 37,3]
Industria	Cogeneración	[4,7 - 24,8]
	Medidas de reducción de demanda eléctrica	[9,3 - 56,8]
Transporte	Biodiésel	[38 - 208,8]
	Bioetanol	[0,1 - 0,5]
	Buses híbridos	[123,3 - 678,5]
	Chatarrización de vehículos livianos	[371,2 - 2039,5]
	Conducción eficiente de buses	[36,1 - 197,9]
	Conducción eficiente de taxis y colectivos	[0,8 - 4,5]
	Conducción eficiente de vehículos livianos	[17,9 - 98,3]
	Expansión de líneas del Metro	[43,8 - 241,6]
	Impuesto a combustibles de vehículos livianos diésel	[81,5 - 448]
	Impuesto a combustibles de vehículos livianos a gasolina	[10,5 - 57,6]
	Incentivo de cambio modal a transporte público	[16,7 - 91,9]
	Taxis y colectivos híbridos	[1,6 - 8,5]
	Vehículos livianos híbridos	[2,5 - 13,6]
	Vehículos livianos híbridos <i>plug-in</i>	[41,5 - 233,6]

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Los cobeneficios para las medidas de reducción de consumo eléctrico son distintos en el sector CPR e industrial debido a la asignación de reducciones a nivel geográfico.

CUADRO A8.11
COBENEFICIOS A NIVEL DE LOCALIDADES, PROMEDIO 2010-2030

Localidad	Dólares/tCO ₂ reducida	Localidad	Dólares/tCO ₂ reducida
Arica	[1,8 - 10,9]	San Felipe	[0,2 - 0,9]
Alto Hospicio	[0,5 - 3,2]	Gran Santiago	[23,3 - 128,1]
Pozo Almonte	[0,1 - 0,5]	Rancagua	[0,3 - 1,6]
Iquique	[24,6 - 150,1]	Requinoa	[0 - 0,1]
Antofagasta	[0,7 - 4,4]	Rengo	[0,1 - 0,4]
Taltal	[0,1 - 0,5]	San Fernando	[0,1 - 0,6]
Calama	[0,4 - 2,4]	San Vicente	[0,1 - 0,3]
Mejillones	[0,4 - 2,4]	Cauquenes	[0,1 - 0,5]
Tocopilla	[0,2 - 1,2]	Constitución	[0,4 - 2,2]
Caldera	[0,1 - 0,5]	Curicó	[0,3 - 1,7]
Chañaral	[0,1 - 0,7]	Linares	[0,2 - 1,2]
Copiapó	[0,4 - 2]	Talca	[0,6 - 3,2]
Huasco	[0,1 - 0,5]	Chillán	[0,5 - 2,6]
La Serena-Coquimbo	[1,8 - 10]	Gran Concepción	[11,6 - 64,2]
Ovalle	[0,2 - 1,2]	Arauco	[0 - 0,2]
La Calera	[0,1 - 0,7]	Codegua	[0,1 - 0,3]
Cabildo	[0 - 0,2]	Los Ángeles	[0,3 - 1,9]
Quintero	[0,1 - 0,3]	San Carlos	[0,1 - 0,4]
Gran Valparaíso	[16,3 - 80,4]	Angol	[0,1 - 0,6]
Putendo	[0 - 0,1]	Nueva Imperial	[0,9 - 5,2]
Llaillay	[0 - 0,2]	Gran Temuco	[8,3 - 47,6]
Puchuncaví	[0,3 - 1,3]	Osorno	[1,3 - 7,2]
Quillota	[0,2 - 0,9]	Puerto Montt	[1,5 - 8,1]
Catemu	[0 - 0,1]	Valdivia	[1,2 - 6,9]
Los Andes	[0,2 - 0,9]	Coyhaique	[0,1 - 0,5]
San Antonio	[0,3 - 1,5]	Punta Arenas	[0,4 - 2]

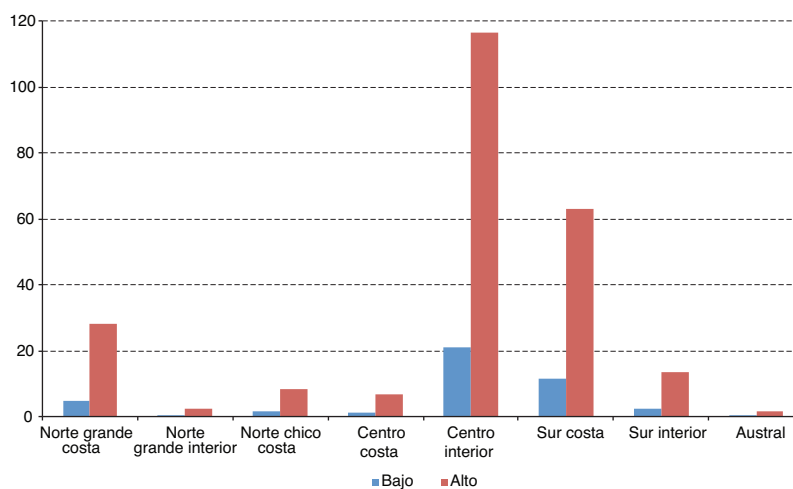
Fuente: Elaboración propia.

Nota: Se presentan los resultados para dos escenarios de valoración de beneficios [bajo-alto].

También resulta interesante analizar estos indicadores a nivel de sector, para apreciar aquél que presenta el mayor cobeneficio por tonelada reducida. En el cuadro A8.12 es posible apreciar que el mayor impacto por tonelada de CO₂e reducida lo tiene el sector del transporte, específicamente en la zona centro interior. Es el responsable de casi un 36% de las emisiones de PM2.5 para el caso de la Región Metropolitana según el inventario de emisiones para dicha ciudad (DICTUC, 2007a), y de aquí se desprende que un mejor aprovechamiento de la energía en el sector, que permita entregar el mismo servicio con un menor consumo, permitirá reducciones importantes que impactarán finalmente en la calidad de vida de la población.

Según se puede apreciar en el cuadro 4 del anexo G de este apéndice, las medidas de transporte en la zona centro interior tienen el mayor impacto (principalmente por el efecto de las medidas de la capital). Resulta significativo el aporte de la introducción de biocombustibles en la capital (específicamente biodiésel) y la instalación de capacidad de ERNC-mini hidro, donde el impacto es mayor en la zona costa sur, debido a que se evitaría el ingreso de centrales a carbón (ubicadas en Coronel) que se encuentran próximas a grandes zonas urbanas.

GRÁFICO A8.9
COBENEFICIOS LOCALES A NIVEL DE ZONA GEOGRÁFICA, PROMEDIO 2010-2030
(En dólares/tCO₂e)



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Se presentan los resultados para dos escenarios de valoración de beneficios [bajo-alto].

CUADRO A8.12
COBENEFICIOS A NIVEL DE SECTOR Y ZONA GEOGRÁFICA, PROMEDIO 2010-2030
(En dólares/tCO₂e)

Zona	CPR	Generación eléctrica	Industria	Transporte	TOTAL por zonas
Norte grande costa	[5,7 - 34,5]	[0,1 - 0,7]	[7,6 - 46,2]	[1,1 - 6,7]	[4,6 - 28,2]
Norte grande interior	[0,3 - 1,5]			[0,6 - 3,2]	[0,4 - 2,3]
Norte chico costa	[1,2 - 6,3]			[2,2 - 12,2]	[1,5 - 8,3]
Centro costa	[3,1 - 15,3]	[0,2 - 1,2]	[3,6 - 18]	[3,7 - 18,4]	[1,4 - 6,8]
Centro interior	[6,3 - 34,5]		[5,7 - 31,6]	[30,3 - 166,9]	[21,2 - 116,5]
Sur costa	[10,3 - 57,1]	[11,6 - 64,4]	[16,9 - 93,6]	[1,4 - 7,7]	[11,4 - 63,1]
Sur interior	[4,1 - 23,4]			[0,7 - 4]	[2,4 - 13,5]
Austral	[0,2 - 1,1]			[0,4 - 2,3]	[0,3 - 1,6]
Total por sectores	[5,5 - 30,5]	[5,3 - 29,4]	[7,5 - 42,6]	[21,6 - 118,8]	

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Se presentan los resultados para dos escenarios de valoración de beneficios [bajo-alto].

3. Análisis agregado según escenarios

a) Asignación de medidas a escenarios de mitigación

Para poder evaluar los cobeneficios a nivel de escenarios de mitigación del presente estudio, se asignan las medidas analizadas a cada uno de los escenarios, según el cuadro A8.13.

Para cada escenario, las reducciones de GEI provenientes del cálculo de medidas están asignadas a nivel de ciudad, situación que no sucede para las reducciones de GEI estimadas en el presente estudio. Por lo demás, la magnitud de las reducciones por ambas aproximaciones (el primero *bottom-up* y el segundo *top-down*) no necesariamente coincide. Para estimar los cobeneficios por escenario de mitigación se tomó la composición de las medidas y se amplificó para obtener la reducción total del escenario.

Una vez realizada esta asignación es posible estimar, para los niveles de reducción del presente estudio, el impacto de cada escenario de mitigación en el nivel de contaminantes locales.

b) Cobeneficios a nivel de escenarios de mitigación

En el cuadro A8.13 se muestran los cobeneficios de los distintos escenarios de mitigación en cada zona geográfica para una penetración máxima considerando un promedio en el período 2010-2030.

Se puede apreciar en el cuadro A8.13 que hay cobeneficios negativos en algunas zonas para el escenario MT1, esto se debe a que hay medidas de este escenario que producen un aumento de consumo eléctrico y, por ende, un aumento de emisiones en la zona donde se produce el aumento de generación eléctrica. Aun así, el escenario MT1 tiene los cobeneficios más altos a nivel agregado, ya que las medidas incluidas en este análisis tienen un mayor impacto en la población.

Es posible estimar además, los cobeneficios a nivel agregado, multiplicando por los cobeneficios unitarios por la reducción de GEI estimada para cada escenario de mitigación. A continuación, en el cuadro A8.14 se muestra el valor presente de los cobeneficios al año 2010 aplicando cuatro tasas de descuento del 6%, 4%, 2% y 0,5%, equivalentes a las usadas en la evaluación de impactos económicos del cambio climático en el capítulo IV.

CUADRO A8.13
COBENEFICIOS A NIVEL DE ESCENARIO Y ZONA GEOGRÁFICA,
PROMEDIO 2010-2030, ESCENARIO DE PENETRACIÓN MÁXIMA
(En dólares/tCO₂e)

Zona	M1	M2	MT1	MT2	MAX	Promedio por zonas
Norte grande costa	[6,1 - 37,3]	[5,4 - 32,9]	[-14 - -85,3]	[10,5 - 63,8]	[6,3 - 38,3]	[4,6 - 28,2]
Norte grande interior	[0,4 - 2,3]	[0,4 - 2,3]	[0,4 - 2,3]	[0,4 - 2,1]	[0,4 - 2,3]	[0,4 - 2,3]
Norte chico costa	[1,5 - 7,9]	[1,5 - 7,9]	[1,6 - 8,6]	[1,4 - 7,7]	[1,6 - 8,5]	[1,5 - 8,3]
Centro costa	[2,3 - 11,4]	[1,6 - 8,1]	[-5,5 - -27,3]	[15,8 - 78,3]	[3,6 - 17,8]	[1,4 - 6,8]
Centro interior	[20,4 - 112]	[20,4 - 112]	[22 - 121,1]	[22,5 - 123,7]	[21,5 - 118,4]	[21,2 - 116,5]
Sur costa	[11,3 - 62,7]	[11,3 - 62,8]	[7 - 38,7]	[9,3 - 51,3]	[10,6 - 58,6]	[11,4 - 63,1]
Sur interior	[2,3 - 13,1]	[2,3 - 13,1]	[2,5 - 13,9]	[2,7 - 15,3]	[2,4 - 13,7]	[2,4 - 13,5]
Austral	[0,3 - 1,6]	[0,3 - 1,6]	[0,3 - 1,7]	[0,3 - 1,5]	[0,3 - 1,7]	[0,3 - 1,6]
Promedio por escenario	[7,3 - 41,1]	[7 - 39]	[19,7 - 107,9]	[16,6 - 91,4]	[11,8 - 65,4]	

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Se presentan los resultados para dos escenarios de valoración de beneficios [bajo-alto].

CUADRO A8.14
VALOR PRESENTE COBENEFICIOS AGREGADOS SEGÚN ESCENARIO, PERÍODO
2010-2030, ESCENARIO DE PENETRACIÓN MÁXIMO
(En millones de dólares)

Escenario reducción GEI	Tasa de descuento			
	6%	4%	2%	0,5%
M1	[290 – 1 610]	[380 – 2 130]	[510 – 2 830]	[630 – 3 550]
M2	[530 – 2 930]	[710 – 3 950]	[970 – 5 400]	[1 240 – 6 870]
MT1	[610 – 3 370]	[820 – 4 480]	[1 100 – 6 030]	[1 380 – 7 590]
MT2	[500 – 2 740]	[660 – 3 600]	[870 – 4 790]	[1 090 – 5 970]
MAX	[1 640 – 9 040]	[2 180 – 12 030]	[2 940 – 16 210]	[3 710 – 20 440]

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Se presentan los resultados para dos escenarios de valoración de beneficios [bajo-alto], valor presente al año 2010.

D. Conclusiones

El análisis presentado anteriormente con respecto a los posibles cobeneficios de la aplicación de medidas que busquen reducir las emisiones de GEI en Chile muestra la importancia de realizar un análisis integrado de políticas. En concordancia con lo mencionado en “Air Pollution and Climate Change: Two sides of the same coin?” (Swedish EPA, 2009) es evidente la necesidad de una estrategia conjunta que permita atacar los desafíos relacionados con el cambio climático y la contaminación atmosférica. También existe evidencia de que los costos de abatimiento pueden reducirse significativamente al tener una estrategia de control en conjunto.

De acuerdo con el análisis presentado, al implementar medidas que permitan cumplir con los escenarios de reducción de GEI (M1, M2, MT1 y MT2), sería posible obtener beneficios monetarios según lo presentado en el cuadro A8.15, donde se muestra el valor del cobeneficio promedio en el período 2010-2030 en los distintos escenarios de reducción de GEI. Estos valores además se presentan para los rangos de escenarios de penetración (normal y máximo) y los escenarios de valoración de beneficios (bajo y alto). El mayor impacto se concentraría en las grandes urbes chilenas como lo son el Gran Valparaíso, Gran Santiago, Gran Temuco y Gran Concepción, localidades donde se verá mejorada la calidad de vida de la población.

CUADRO A8.15
COBENEFICIOS UNITARIOS SEGÚN ESCENARIO, PROMEDIO PERÍODO 2010-2030
(En dólares/tCO₂e)

Escenario Reducción GEI	Escenario de penetración de medidas	
	Normal	Máximo
M1	[6,9 - 38,8]	[7,3 - 41,1]
M2	[6,6 - 37,3]	[7 - 39]
MT1	[16,4 - 90,3]	[19,7 - 107,9]
MT2	[14,5 - 79,4]	[16,6 - 91,4]
MAX	[10,6 - 58,5]	[11,8 - 65,4]

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Se presentan los resultados para dos escenarios de valoración de beneficios [bajo-alto].

Bibliografía

- AIRNET (2005), “Air Pollution and the Risks to Human Health–Exposure Assessment”, Institute for Risk Assessment Sciences, Utrecht University, Utrecht.
- Bandivadekar, A. y otros (2008), “On the road in 2035: Reducing Transportation’s Petroleum Consumption and GHG Emissions”, Laboratory for Energy and the Environment, Cambridge, Massachusetts Institute of Technology.
- Bradley, M. J. y Associates, Inc. (2000), “Hybrid-electric drive heavy-duty vehicle testing project: Final emissions report”, Boston MA, West Virginia University.
- Cifuentes, L. A., y +MG (2010), “Análisis técnico económico de la aplicación de una norma de emisión para termoeléctricas”, llevado a cabo para la empresa AES Gener y Guacolda por la consultora MG Medioambiente/Gestión realizado por el Doctor Luis Cifuentes y otros.
- Cifuentes, L. y otros (2005), “Urban air quality and human health in Latinamerica and the Caribbean”, Washington D. C., Banco Interamericano de Desarrollo.
- DICTUC (Ingeniería DICTUC, S.A.) (2009a), “Análisis técnico-económico de la aplicación de la revisión de norma de emisión para motores de buses de locomoción colectiva de la Ciudad de Santiago”.
- _____ (2009b), “Antecedentes para el análisis general de impacto económico y social del anteproyecto de la norma de calidad primaria de PM2.5”.
- _____ (2008), “Análisis y evaluación del impacto económico y social del plan de descontaminación de la Región Metropolitana”, Santiago de Chile.
- _____ (2007a), “Actualización del inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos en la Región Metropolitana - Escenario 2010”, Santiago de Chile.
- _____ (2007b), “Evaluación de nuevas medidas de control de emisiones para el sector transporte en la Región Metropolitana”, estudio realizado para la Comisión Nacional del Medio Ambiente de la Región Metropolitana, Santiago de Chile.
- EPA (Environmental Protection Agency) (2004), “Air quality criteria for particulate matter”, Research Triangle Park, N.C., U.S. Environmental Protection Agency.
- _____ (2002), “A comprehensive analysis of biodiesel impacts on exhaust emissions”, *Draft Technical Report*.
- EPRI (Electric Power Research Institute) (2007), “Environmental Assessment of Plug-In Hybrid Electric Vehicles”, vol. 1: Nationwide Greenhouse Gas Emissions.
- EVE (Ente Vasco de la Energía) (2010), “Cogeneración. Cómo funciona” [en línea] <http://www.eve.es/web/Eficiencia-Energetica/Cogeneracion/Como-funciona.aspx>.
- IIT y Fundación Chile (2009), “Etapa 2-sistema de certificación energética de viviendas”, Instituto de Investigaciones Tecnológicas y Asistencia Técnica Universidad de Concepción y Fundación Chile.
- INE (Instituto Nacional de Estadísticas) (2008) “Anuario Parque de Vehículos en Circulación” [en línea] http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/estadisticas_economicas/transporte_y_comunicaciones/pdf/parquedevehiculos/parquevehiculos08.pdf [fecha de consulta: 15 de diciembre de 2011].
- NRC (National Research Council) (2004), *Research priorities for airborne particulate matter: IV. Continuing research progress*, The National Academies Press, Washington D. C.
- NREL (National Renewable Energy Laboratory) (2009), “Effects of Intermediate Ethanol Blends on Legacy Vehicles and Small Non-Road Engines”, Report 1 - Updated.
- Swedish EPA (Environmental Protection Agency) (2009), “Air pollution and climate change: two sides of the same coin?”, new report from the Swedish Environmental Protection Agency.
- VCA Offices (2000-2010), “VCA Car fuel data” [en línea] <http://www.vcacarfueldata.org.uk/>.
- WHO (World Health Organization) (2011), “ICD-10 The International Classification of Diseases” [en línea] <http://apps.who.int/classifications/icd10/browse/2010/en> [fecha de consulta: 15 de diciembre de 2011].

Anexo A. Relación emisión-concentración de HDP

A. Modelo *roll-back*

Los modelos *roll-back* aproximan de forma lineal el impacto de la reducción de emisiones de precursores en las concentraciones ambientales de material particulado. Estos modelos se han usado con relativa precisión en análisis anteriores. Actualmente, se dispone de datos suficientes para ajustar estos modelos en ocho ciudades chilenas. Estos modelos permiten construir los factores emisión-concentración (FEC) utilizando la siguiente ecuación:

$$FEC_p^t \left(\frac{ton}{\mu g/m^3} \right) = \left(\frac{\partial C_p^t(u g/m^3)}{\partial E_p^t(ton)} \right)^{-1} \approx \frac{E_p^t(ton)}{C_p^t(u g/m^3)} \quad (A.1)$$

Donde:

$FEC_p^t \left(\frac{ton}{\mu g/m^3} \right)$: Factor emisión-concentración para el contaminante p en el año t .

$C_p^t(u g/m^3)$: Concentración ambiental de contaminante (eventualmente secundario) que es responsable de las emisiones del contaminante p para el año t .

$E_p^t(ton)$: Emisión de contaminante p para el año t

El cuadro 1 muestra los factores de emisión-concentración para concentración de PM2.5 para algunas ciudades/localidades chilenas.

CUADRO 1
FACTORES EMISIÓN-CONCENTRACIÓN PARA VARIAS CIUDADES CHILENAS
($ton/(UGM3 \text{ PM2.5})$)

Ciudad o Localidad	PM2.5	SO _x	NO _x	PRS
Calama	2 160	86 100	866	71 700
Tocopilla	32	11 000	3 530	-
Gran Valparaíso	98	1 300	1 610	59 100
V Región	892	46 200	2 950	50 200
VI Región	919	57 500	2 700	48 000
Gran Concepción	108	7 170	2 250	6 250
Gran Temuco	125	-	-	10 100
Gran Santiago	228	4 291	6 344	21 536
Ventanas	35	16 800	824	840

Fuente: DICTUC, “Antecedentes para el análisis general de impacto económico y social del anteproyecto de la norma de calidad primaria de PM2.5”, 2009.

Nota: Toneladas de emisión anual para aumentar promedio anual de PM2.5 en 1 ug/m³.

Finalmente, el cambio en la concentración de PM2.5 para una determinada ciudad o localidad está dado por:

$$\Delta C_{PM\ 2.5}^j \left[\frac{\mu g}{m^3} \right] = \sum_p \frac{\Delta Em_p^j [ton]}{FEC_p^j \left[\frac{ton}{\mu g/m^3} \right]} \quad (A.2)$$

Donde, $\Delta Em_p^j [ton]$ representa el cambio en la emisión del contaminante p en la ciudad o localidad j , y $FEC_p^j \left[\frac{ton}{\mu g/m^3} \right]$ representa el factor de emisión-concentración para el contaminante p en la ciudad o localidad j .

B. Indicador de emisión de HDP equivalente

Se construyó un indicador que contenga las emisiones de los distintos HDP en un solo valor para una localidad determinada. Para esto, es posible estimar una emisión equivalente de PM2.5 (PM2.5e) según la siguiente ecuación:

$$\Delta Em_{PM\ 2.5}^j [ton] = \left[\sum_i \left(\frac{\Delta FEC_i^j \left[\frac{ton}{\mu g/m^3} \right]}{FEC_{PM\ 2.5}^j \left[\frac{ton}{\mu g/m^3} \right]} \right) \cdot Em_i^j [ton] \right] \quad (A.3)$$

Donde, $\Delta Em_{PM\ 2.5}^j [ton]$ representa la emisión de PM2.5 equivalente (PM2.5e) en la ciudad o localidad j , $FEC_{PM\ 2.5}^j \left[\frac{ton}{\mu g/m^3} \right]$ representa el factor de emisión-concentración para PM2.5 en la ciudad o localidad j ,

y $FEC_i^j \left[\frac{ton}{\mu g/m^3} \right]$ representa el factor de emisión-concentración para el contaminante i en la ciudad o localidad j .

Por ejemplo, utilizando los FEC del cuadro 1, el cálculo de la reducción de PM2.5e para el caso de Santiago se realiza usando la siguiente ecuación:

$$Em_{PM\ 2.5e}(tonPM2.5e) = \frac{Em_{PM2.5}(ton)}{1} + \frac{Em_{NOx}(ton)}{28} + \frac{Em_{SOx}(ton)}{19} + \frac{Em_{PRS}(ton)}{95} \quad (A.4)$$

El siguiente cuadro muestra los factores a utilizar para transformar emisiones de un HDP determinado a emisiones de PM2.5e para cada ciudad o localidad.

CUADRO 2
FACTORES PARA PASAR DE EMISIONES DE HDP A EMISIONES DE PM2.5e
(En tonHDP/tonPM2.5e)

Ciudad o localidad	PM2.5	SO _x	NO _x	PRS
Calama	1	39,9	0,4	33,2
Tocopilla	1	343,8	110,3	
Gran Valparaíso	1	13,3	16,4	603,1
V Región	1	51,8	3,3	56,3
VI Región	1	62,6	2,9	52,2
Gran Concepción	1	66,4	20,8	57,9
Gran Temuco	1			80,8
Gran Santiago	1	18,8	27,8	94,5
Ventanas	1	480,0	23,5	24,0

Fuente: Elaboración propia sobre la base de DICTUC, “Antecedentes para el análisis general de impacto económico y social del anteproyecto de la norma de calidad primaria de PM2.5”, 2009.

Anexo B. Impactos en la salud considerados

CUADRO 1
IMPACTOS EN LA SALUD CONSIDERADOS

Tipo de efecto	Nombre	Edad afectada	Grupo-edad	Fuente
Mortalidad prematura	Exp. de largo plazo	Todas	Todos	Pope y otros (2004)
Mortalidad prematura	Exp. de largo plazo cardiopulmonar	>30	Adultos	Pope y otros (2004)
Mortalidad prematura	Exp. de largo plazo cardiopulmonar	>30	Adultos mayores	Pope y otros (2004)
Mortalidad prematura	Exp. aguda	Todas	Todos	Cifuentes y otros (2000)
Admisiones hospitalarias	Asma	<65	Niños	Dockery y otros (1989)
Admisiones hospitalarias	Asma	<65	Adultos	Dockery y otros (1989)
Admisiones hospitalarias	Chronic Lung	18-64	Adultos	Schwartz y Morris (1995)
Admisiones hospitalarias	CVD	18-64	Adultos	Schwartz (1997)
Admisiones hospitalarias	Chronic Lung	65+	Adultos mayores	Whittemore y Korn (1980)
Admisiones hospitalarias	Congestive Heart Failure	65+	Adultos mayores	Metanalysis from México
Admisiones hospitalarias	CVD	65+	Adultos mayores	Schwartz y Morris (1995)
Admisiones hospitalarias	Dysrhythmia	65+	Adultos mayores	Pooled
Admisiones hospitalarias	Ischemic Heart (less Myocardial Infarctions)	65+	Adultos mayores	Pooled
Admisiones hospitalarias	Neumonía	65+	Adultos mayores	Metanalysis from Mexico
Admisiones hospitalarias	Respiratorias	65+	Adultos mayores	Pooled
Visitas sala urgencia	Causas respiratorias	Todas	Todos	Metanalysis from Mexico
Visitas sala urgencia	Asma	0-64	Niños	Schwartz (1993), Seattle
Visitas sala urgencia	Asma	0-64	Adultos	Schwartz (1993), Seattle
Visitas médicas	Niños con IRA baja	3-15	Niños	Ostro y otros (1999)
Otros	Días laborales perdidos	18-65	Adultos	Ostro y otros (1987)
Otros	Días con actividad restringida	18-65	Adultos	Ostro y otros (1987)
Otros	Días con actividad restringida menor	18-65	Adultos	Ostro y otros (1989)

Fuente: L. A. Cifuentes y +MG, *Análisis técnico-económico de la aplicación de una norma de emisión para termoeléctricas*, 2010.

Anexo C. Valoración de beneficios a la salud

La valoración económica de los efectos a la salud puede ser estimada de las siguientes maneras:

- i) con medidas del costo que incluyen el tratamiento de la enfermedad y pérdida de productividad por días no trabajados (método COI, *Cost of illness*); y
- ii) con medidas de la disposición a pagar de los individuos por disminuir riesgos a su salud, que incluyen los niveles valorizados por el método COI más la pérdida de bienestar que implica estar enfermo (WTP, *Willingness to pay*). Los impactos económicos de efectos en la salud producto de la contaminación del aire incluyen entonces tres niveles: costo de tratamiento; productividad perdida; y pérdida de bienestar.

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

Otra opción es transferir valores desde otros contextos (WTP o COI transferidos) reescalando valores unitarios obtenidos en los Estados Unidos para representar la realidad de nuestro país. Basándose en la información recabada en el estudio (Cifuentes y otros, 2005) fue posible identificar el total de efectos en salud (*endpoints*) cuantificables que es posible valorizar. El cuadro 1 muestra un resumen de efectos en salud (*endpoints*) clasificados como valorizables que serán considerados en la evaluación costo beneficio, los efectos en salud valorizables y la metodología de valoración existente para ese efecto.

A. Transferencia de valores de WTP y COI

Como se observa claramente en el cuadro 1 no es posible disponer de valores estimados en Chile para cada uno de los efectos en salud (*endpoints*) estudiados, y para algunos ni siquiera es posible disponer de valores estimados en Latinoamérica. En estos casos es necesario transferir valores desde otras ciudades o países, usando la siguiente ecuación:

$$WTP_{Chile} = WTP_{paísBase} \times \left(\frac{IPC_{Chile}}{IPC_{paísBase}} \right)^{\eta} \quad (C.1)$$

Donde IPC es el ingreso per cápita del país correspondiente y η es la elasticidad de la demanda con respecto al ingreso por salud. La hipótesis subyacente en el método de transferencia de beneficios es que las diferencias en valoración pueden ser explicadas principalmente debido a diferencias en ingresos entre ambos países. Una elasticidad de 1 significaría que los valores de WTP transferidos son proporcionales a las diferencias en ingreso, mientras que una elasticidad de 0 implicaría que la demanda por salud no depende del ingreso; por lo que los valores de WTP transferidos serían los mismos para la ciudad analizada que para la ciudad base. La información de valores COI puede ser transferida de ser necesario.

CUADRO 1
EFFECTOS EN LA SALUD VALORIZABLES RELACIONADOS CON LA
CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Efectos a la salud		Disponibilidad de valores (WTP, COI) / local (L) o transferido (T)			
Tipo de efecto (<i>endpoint</i>)	Causa específica (<i>endpoint</i>)	Todos	Niños	Adultos	Ancianos
Muerte Prematura	Todas las causas	WTP (L)			
Enfermedad	Bronquitis crónica	WTP (T)			
Acciones médicas	Admisiones hospitalarias	Enfermedad cardiovascular (ICD9 390-429)	WTP (T)		
		Asma	WTP (T)		
		Arritmia (ICD9 427)	COI		COI
		COPD (ICD 490-496)	WTP (T)		
		Causas respiratorias (ICD9 460-519)	COI		COI
		Enfermedad isquémica al corazón (ICD9 390-429)	WTP (T)		
		Neumonía (ICD9 480-487)	WTP (T)		
	Visitas a la sala de emergencia	Asma (ICD9 493)	WTP (T)		
		Causas respiratorias (ICD9 460-519)	WTP (T)		
		Neumonía (ICD9 480-486)	COI		COI
		Enfermedades respiratorias bajas-RSP	COI	WTP (T)	
		Síntomas respiratorios altos-RSP (ICD9 460, 465, 487)	COI	WTP (T)	COI
	Visitas médicas	Síntomas respiratorios bajos-RSP (ICD9 460, 465, 487)	COI		
		Enfermedades respiratorias bajas-RSP	COI		
Enfermedad	Ataques asmáticos	COI	WTP (T)	WTP (T)	
	Bronquitis aguda	WTP (T)			
Días de actividad restringida (RAD)	Días de trabajo perdido (WLD)	COI			
	Días de actividad restringida (RAD)	WTP (T)			
	Días de actividad menor restringida (MRAD)	WTP (T)			
	Días con falta de aire	WTP (T)			

Fuente: Elaborado sobre la base de L. Cifuentes y otros, “Urban air quality and human health in Latinamerica and the Caribbean”, Washington D. C., Banco Interamericano de Desarrollo, 2005.

B. Productividad perdida

Los valores para la productividad perdida son computados con el promedio de días perdidos de trabajo producto de un evento por el salario promedio diario de la ciudad. Los días de trabajo perdido son representados principalmente con el período en que el individuo se ve obligado a permanecer hospitalizado. Es probable que individuos que requieren un período de hospitalización requerirán un período de convalecencia, aumentando su productividad perdida.

C. Agregación de beneficios

Finalmente, para calcular el beneficio social de mejoras en la calidad del aire se requiere valorizar cada uno de los efectos en exceso y luego sumarlos para cada contaminante sobre la población afectada y sobre los efectos, como muestra la siguiente ecuación:

$$BS^k = \sum_{\text{efectos } i} \sum_{\text{pob } j} BS_{ij}^k = \sum_{\text{efectos } i} \sum_{\text{pob } j} (\Delta E_{ij}^k \cdot VS_{ij}) \quad (C.2)$$

En la ecuación anterior VS_{ij} corresponde al valor social del efecto i en la población j , y puede corresponder a un valor de costo de la enfermedad o disposición a pagar, según sea la disponibilidad de casos.

En la agregación de beneficios es necesario tener cuidado con no contar dos veces el valor de algunos efectos. Por ejemplo, si se dispone de los costos médicos y de la disposición a pagar por evitar una hospitalización, no es posible sumar ambos, ya que la disposición a pagar incluye el costo médico evitado. Sin perjuicio de esto, se pueden presentar los resultados desagregados lo más posible, cuidando de no sumarlos cuando no corresponda.

Anexo D. Descripción de medidas analizadas

A continuación se presenta información relevante al análisis de medidas. Se muestra una breve descripción e información acerca de los factores de emisión utilizados, además de los supuestos realizados.

A. CPR

1. Aislación de viviendas

Descripción

Consiste en mejorar la aislación térmica de viviendas construidas a partir de 2010. Las posibles mejoras se producen en muros, pisos, cielos y ventanas, siempre y cuando esta resulte rentable en términos de inversión y de disminución del gasto de combustible en calefacción.

Factores de emisión

Los factores de emisión para combustibles de uso residencial (gas licuado, gas natural, kerosene y leña) se obtienen de DICTUC (2007a). La participación del consumo de combustible para calefacción según zona térmica se obtiene de IIT y Fundación Chile (2009). No se consideró consumo de diésel ni electricidad.

Supuestos

La reducción de un x% en el consumo de energía produce esa misma reducción de GEI y HDP. En resumen, la emisión de GEI y contaminantes locales tienen una relación lineal con el consumo de energía.

2. Calderas de condensación

Descripción

A partir del año 2010 se finaliza la comercialización de calderas convencionales dando paso a la comercialización absoluta de calderas de condensación más eficientes.

Factores de emisión

Los factores de emisión para gas licuado y gas natural de uso residencial se obtienen de DICTUC (2007a). Se utilizan estos dos combustibles para agua caliente sanitaria.

Supuestos

La caldera de condensación reduce en un 30% el consumo de energía, se produce esa misma reducción de GEI y HDP. En resumen, la emisión de GEI y contaminantes locales tienen una relación lineal con el consumo de energía. Se supone además, una participación en el consumo de un 29% de gas natural y un 71% de gas licuado.

3. Duchas eficientes

Descripción

Consiste en reemplazar los cabezales de ducha existentes en las viviendas por cabezales de ducha eficientes. Para el caso de baños nuevos, se considera instalar una grifería de ducha eficiente.

Factores de emisión

Los factores de emisión para gas licuado y gas natural de uso residencial se obtienen de DICTUC (2007a). Se utilizan estos dos combustibles para la obtención de agua caliente sanitaria.

Supuestos

La reducción de un x% en el consumo de energía produce esa misma reducción de GEI y HDP. En resumen, la emisión de GEI y contaminantes locales tienen una relación lineal con el consumo de energía. Se supone además, una participación en el consumo de un 29% de gas natural y un 71% de gas licuado.

4. Colectores solares

Descripción

Instalación de colectores solares para el 35% de las nuevas viviendas que se construyan.

Factores de emisión

Los factores de emisión para gas licuado y gas natural de uso residencial se obtienen de DICTUC (2007a). Se utilizan estos dos combustibles para agua caliente sanitaria.

Supuestos

La reducción de un x% en el consumo de energía produce esa misma reducción de GEI y HDP. En resumen, la emisión de GEI y contaminantes locales tienen una relación lineal con el consumo de energía. Se supone además, una participación en el consumo de un 29% de gas natural y un 71% de gas licuado.

5. Medidas de reducción de demanda eléctrica

Descripción

Incluye varias medidas de eficiencia energética que se traducen en una disminución de la demanda eléctrica.

Las medidas consideradas son:

- Calentadores de agua eficientes.
- Refrigeración residencial eficiente.
- Lavadoras eficientes.
- Lavavajillas eficientes.
- Microondas eficientes.
- Reducción pérdidas *stand-by*.
- Refrigeración comercial eficiente.
- Secadoras eficientes.

Factores de emisión

Se utilizan los factores de emisión de Cifuentes y +MG (2010) y se aplica la metodología explicada en la sección para la reducción de demanda en el sector eléctrico.

Supuestos

Se desplaza la generación de centrales carboníferas existentes.

B. Industria

1. Cogeneración

Descripción

Instalación de sistemas de cogeneración en la industria, aprovechando parte del calor que normalmente es liberado al ambiente, para generar electricidad. Al usar cogeneración la energía necesaria para llevar a cabo los procesos de la industria disminuye. Esta disminución proviene de un aumento del consumo de combustible primario, que va acompañado de una baja en el consumo de electricidad de la red.

Factores de emisión

Para la reducción de consumo eléctrico de la red se utilizan los factores de emisión de Cifuentes y +MG (2010) y se aplica la metodología explicada en la sección para la reducción de demanda en el sector eléctrico. Para las emisiones por aumento de consumo de combustible se utilizan los factores de emisión de la central termoeléctrica a gas natural Quintero evaluada en Cifuentes y +MG (2010).

Supuestos

Se utiliza el esquema presentado en EVE (2010) para simular la cantidad de electricidad que se deja de consumir de la red eléctrica y el aumento de consumo de gas natural del proceso.

2. Medidas de reducción de demanda eléctrica

Descripción

Incluye medidas de eficiencia energética que se traducen en una disminución de la demanda eléctrica, como la introducción de motores eléctricos eficientes nuevos y el adelanto en el recambio de dichos motores.

Factores de emisión

Se utilizan los factores de emisión de Cifuentes y +MG (2010) y se aplica la metodología explicada en la sección para la reducción de demanda en el sector eléctrico.

Supuestos

Se desplaza la generación de centrales carboníferas existentes.

C. Transporte

1. Vehículos híbridos

a) Buses híbridos

Descripción

Consiste en que una proporción de los buses nuevos que cada año ingresan al parque vehicular tengan tecnología híbrida.

Factores de emisión

El cambio porcentual en las emisiones de pasar de bus convencional (NY-NovaBUS RTS Diésel Series 50) a híbrido (NY-Nova-Allison RTS Hybrid LS Diesel) obtenidos de (Bradley y Associates Inc., 2000). Esa diferencia porcentual se aplicó a un bus diésel del año 2010 según lo modelado en DICTUC (2007b).

Supuestos

El cambio de emisiones de pasar de un bus convencional a un bus híbrido en el caso chileno es proporcional a lo estimado en Bradley y Associates Inc. (2000).

b) Taxis y colectivos híbridos

Descripción

Consiste en que cierta proporción de los taxis y colectivos nuevos que cada año ingresan al parque vehicular tengan tecnología híbrida.

Factores de emisión

El cambio porcentual en las emisiones de pasar de un taxi o colectivo convencional a un taxi o colectivo híbrido se obtiene del cambio en emisiones entre un Prius híbrido de 2008 y un Auris de 2008 (emisiones obtenidas de <http://www.vcicarfueldata.org.uk/>). Esa diferencia porcentual se aplicó a un taxi y colectivo a gasolina del año 2010 basado en lo reportado en COPERT III modificado según DICTUC (2008).

Supuestos

El cambio de emisiones al pasar de un taxi o colectivo convencional a un taxi o colectivo híbrido es proporcional a pasar de un Auris a un Prius de 2008.

c) Vehículos livianos híbridos

Descripción

Consiste en que cierta proporción de los vehículos livianos que cada año ingresan al parque vehicular tengan tecnología híbrida

Factores de emisión

El cambio porcentual en las emisiones de pasar de un vehículo liviano convencional a un vehículo liviano híbrido se obtiene del cambio en emisiones entre un Prius híbrido de 2008 y un Auris de 2008 (emisiones obtenidas de <http://www.vcacarfueldata.org.uk/>). Esa diferencia porcentual se aplicó a un vehículo liviano a gasolina del año 2010 basado en lo reportado en COPERT III modificado según DICTUC (2008).

Supuestos

El cambio de emisiones de pasar de un vehículo liviano convencional a un vehículo liviano híbrido es proporcional a pasar de un Auris a un Prius de 2008.

2. Chatarrización de vehículos livianos

Descripción

Consiste en chatarrizar vehículos livianos antiguos con el objetivo de acelerar la renovación del parque. El gobierno entrega un incentivo económico equivalente al valor presente de la valorización de las emisiones.

Factores de emisión

Los factores de emisión de un vehículo liviano antiguo (año 1985) y un vehículo liviano nuevo (año 2010) según lo reportado en COPERT III modificado según DICTUC (2008).

Supuestos

Al sacar de circulación un vehículo liviano antiguo entra en circulación uno nuevo y la diferencia en emisiones es equivalente a la diferencia entre un vehículo de 1985 y uno de 2010.

3. Conducción eficiente

a) Buses

Descripción

Capacitación a los conductores de buses comerciales en mejores prácticas de manejo.

Factores de emisión

Se utilizan los factores de emisión para el promedio de un bus a diésel del año 2010 basado en lo reportado en COPERT III modificado según DICTUC (2008).

Supuestos

Un cambio en la conducción genera un cambio con elasticidad 1 en el consumo de combustible. La relación entre el cambio de emisión tanto de GEI como de HDP tiene elasticidad 1 con el ahorro de combustible.

b) Taxis y colectivos

Descripción

Capacitación a los conductores de taxis y colectivos en mejores prácticas de manejo

Factores de emisión

Se utilizan los factores de emisión promedio para taxis y colectivos del año 2010 basado en lo reportado en COPERT III modificado según DICTUC (2008).

Supuestos

Un cambio en la conducción genera un cambio con elasticidad 1 en el consumo de combustible. La relación entre el cambio de emisión tanto de GEI como de HDP tiene elasticidad 1 con el ahorro de combustible.

c) Vehículos livianos

Descripción

Capacitación a los conductores de vehículos livianos en mejores prácticas de manejo.

Factores de emisión

Se utilizan los factores de emisión promedio para vehículos livianos del año 2010 basado en lo reportado en COPERT III modificado según DICTUC (2008).

Supuestos

Un cambio en la conducción genera un cambio con elasticidad 1 en el consumo de combustible. La relación entre el cambio de emisión tanto de GEI como de HDP tiene elasticidad 1 con el ahorro de combustible.

4. Expansión de líneas del Metro

Descripción

Construcción adicional de kilómetros del Metro por sobre la línea base. Esto produciría un traspaso de viajes realizados en vehículos livianos particulares hacia la red del Metro.

Factores de emisión

Para las emisiones directas que se reducen se utilizan los factores de emisión promedio para vehículos livianos del año 2010 basado en lo reportado en COPERT III modificado según DICTUC (2008). Para las emisiones por aumento del consumo eléctrico del Metro se utilizan los factores de emisión de Cifuentes y +MG (2010) y se aplica la metodología explicada en la sección para la reducción de demanda en el sector eléctrico.

Supuestos

Se supone que la reducción directa de emisiones se produce por la opción de no comprar un vehículo nuevo al tener la opción de viajar en Metro.

5. Impuesto a combustibles de vehículos livianos

a) Gasolina

Descripción

Aplicación de un impuesto a la gasolina con el fin de desincentivar el uso de vehículos livianos a gasolina.

Factores de emisión

Se utilizan los factores de emisión promedio para vehículos livianos a gasolina del año 2010 (particulares y comerciales) basado en lo reportado en COPERT III modificado según DICTUC (2008).

Supuestos

La relación entre el cambio de emisión tanto de GEI como de HDP tiene elasticidad 1 con el ahorro de combustible.

b) Diésel

Descripción

Aplicación de un impuesto al diésel con el fin de desincentivar el uso de vehículos livianos a diésel.

Factores de emisión

Se utilizan los factores de emisión promedio para vehículos livianos a diésel del año 2010 (particulares y comerciales) basado en lo reportado en COPERT III modificado según DICTUC (2008).

Supuestos

La relación entre el cambio de emisión tanto de GEI como de HDP tiene elasticidad uno con el ahorro de combustible.

6. Incentivo cambio modal a transporte público

Descripción

Consiste en subvencionar la tarifa del transporte público en buses con el fin de incentivar a los usuarios del transporte privado a cambiarse de modo.

Factores de emisión

Se utilizan los factores de emisión promedio para vehículos livianos a gasolina y diésel del año 2010 (particulares y comerciales) y basado en lo reportado en COPERT III modificado según DICTUC (2008). Para buses se utilizan los factores de emisión para un bus Euro III con filtro SCR según DICTUC (2009a).

Supuestos

Tasa de ocupación de vehículo liviano: 1,3 personas/vehículo. Tasa de ocupación buses Euro III con SCR: 30 personas/vehículo.

7. Vehículos livianos híbridos *plug-in*

Descripción

Cierta proporción de vehículos nuevos que cada año ingresan al parque vehicular consta de tecnología híbrida *plug-in* (complementa la tecnología híbrida convencional con una batería que se carga en la red eléctrica).

Factores de emisión

Factores de emisión base Auris de 2008 VCA (2000-2010).

Cambio porcentual en ahorro de combustible: EPRI (2007); Bandivadekar y otros (2008); parte eléctrica: Cifuentes y +MG (2010).

Supuestos

La relación entre el cambio de emisión tanto de GEI como de HDP tiene elasticidad 1 con el ahorro de combustible.

8. Biocombustibles

a) Biodiésel

Descripción

Consiste en que en vez de diésel las estaciones de servicio provean biodiésel al 20% (20% biodiésel, 80% diésel).

Factores de emisión

Valores base: basado en lo reportado en COPERT III modificado según DICTUC (2008)
Cambio en FE: EPA (2002).

Supuestos

No es necesario realizar modificaciones a los vehículos para que funcionen con un biodiésel mezcla al 20%.

b) Bioetanol

Descripción

Consiste en que en vez de gasolina las estaciones de servicio provean bioetanol al 20% (20% bioetanol, 80% gasolina).

Factores de emisión

Valores base: basado en lo reportado en COPERT III modificado según DICTUC (2008)
Cambio en FE: NREL (2009).

Supuestos

No es necesario realizar modificaciones a los vehículos para que funcionen con un bioetanol mezcla al 20%.

Anexo E. Información detallada de centrales eléctricas a carbón

CUADRO 1
FACTORES DE EMISIÓN PARA CENTRALES TERMOELÉCTRICAS A
CARBÓN EXISTENTES

Sistema	Año entrada	Chimenea	Comuna	Potencia	CO ₂	PM	SO ₂	NO _x	Generación proyectada*
				(MW)	(kg/kWh)	(mg/kWh)			(MWh)
SIC	1939	Laguna Verde U1	Valparaíso	22,5	2,31	199,1	3 214,4	2 018,6	74 782
	1949	Laguna Verde U2	Valparaíso	32,2	2,31	199,1	3 214,4	2 018,6	107 022
	1964	Ventanas U1	Puchuncaví	120	1,03	376,9	3 214,4	2 018,6	463 515
	1970	Bocamina U1	Coronel	128	0,92	148,7	3 214,4	2 018,6	494 416
	1977	Ventanas U2	Puchuncaví	220	0,98	360,6	3 214,4	2 018,6	858 480
	2009	Guacolda U3	Huasco	152	1,00	165,4	3 214,4	1 737,9	1 165 080
Promedio SIC					1,06	248,7		1 915,2	
SING	1999	CELTA U2	Iquique	158	1,6	886,1	3 214,4	2 018,6	606 006
Promedio SING					1,6	886,1		2 018,6	

Fuente: L. Cifuentes y +MG, *Análisis técnico-económico de la aplicación de una norma de emisión para termoeléctricas*, 2010.

* Es la generación proyectada a partir del año 2010.

CUADRO 2
FACTORES DE EMISIÓN PARA CENTRALES TERMOELÉCTRICAS A CARBÓN NUEVAS

Sistema	Año entrada	Chimenea	Comuna	Potencia	CO ₂	PM	SO ₂	NO _x	Generación proyectada *
				(MW)	(kg/kWh)		(mg/kWh)		(MWh)
SIC	2010	Bocamina U2	Coronel	350	0,88	206,4	1 119	2 018,6	2 682 750
		Guacolda U4	Huasco	152	1,00	220,1	3 214,4	219,3	1 037 195
	2011	Ventanas U3	Puchuncaví	279	1,03	183,1	1 509,7	1 721,3	2 054 723
		Ventanas U4	Puchuncaví	279	1,03	167,7	1 565	1 785,1	1 684 906
	2012	Complejo Coronel U1	Coronel	375	0,86	144	1 449,6	2 018,6	2 096 964
	2013	Complejo Coronel U2	Coronel	375	0,86	144,2	1 449,6	2 018,6	2 090 455
	2015	Energía minera U1	Puchuncaví	350	0,88	39	345,2	476,2	1 937 068
		Maitencillo U1	Puchuncaví	139	1,02	177,9	958,7	328,91	581 146
	2017	Pan de Azúcar U1	Taltal	200	1,02	177,9	958,7	1 644,53	557 455
	2020	Energía minera U2	Puchuncaví	350	0,88	39	345,2	476,2	216 788
		Energía minera U3	Puchuncaví	350	0,88	39	345,2	476,2	216 788
		Los Robles U1	Constitución	375	0,86	177,8	800	2 000	232 273
Promedio SIC				0,93		154,7		1 516,8	
SING	2011	Angamos U1	Mejillones	270	1,08	184,2	400	955,6	1 588 745
		Angamos U2	Mejillones	270	1,08	184,2	400	955,6	1 538 052
Promedio SING				1,08		184,2		955,6	

Fuente: L. Cifuentes y +MG, *Análisis técnico-económico de la aplicación de una norma de emisión para termoeléctricas*, 2010.

*Es la generación proyectada a partir del año 2010.

Anexo F. Ciudades o comunas por zona geográfica

CUADRO 1
CLASIFICACIÓN DE CIUDADES POR ZONA

Zona	Ciudad	Zona	Ciudad
Norte grande costa	Antofagasta	Centro interior	Llaillay
	Arica		Los Andes
	Caldera		Putendo
	Chañaral		Quillota
	Huasco		Rancagua
	Iquique		Rengo
	Mejillones		Requinoa
	Taltal		San Felipe
Norte grande interior	Tocopilla		San Fernando
	Alto Hospicio		San Vicente
	Calama	Sur costa	Angol
	Copiapó		Arauco
	Pozo Almonte		Gran Concepción
	Sierra Gorda		Puerto Montt
Norte chico costa	La Serena-Coquimbo		Valdivia
	Ovalle	Sur interior	Cauquenes
Centro costa	Constitución		Chillán
	Gran Valparaíso		Curicó
	Puchuncaví		Gran Temuco
	Quintero		Linares
	San Antonio		Los Ángeles
Centro interior	Cabildo		Nueva Imperial
	Catemu		Osorno
	Codegua		San Carlos
	Gran Santiago		Talca
	La Calera	Austral	Coyhaique
			Punta Arenas

Fuente: Elaboración propia.

Anexo G. Cobeneficios a nivel de medidas y zona geográfica

CUADRO 1
COBENEFICIOS A NIVEL DE MEDIDA Y ZONA GEOGRÁFICA, PROMEDIO 2010-2030, CPR
(En dólares/tCO₂e reducida)

Medida	Norte grande costa	Norte grande interior	Norte chico costa	Centro costa	Centro interior	Sur costa	Sur interior	Austral
Aislación viviendas	[2,7 - 16,6]	[0 - 0]	[0 - 0,1]	[1,9 - 9,2]	[1,7 - 9,4]	[4,7 - 26,3]	[14,3 - 81,9]	[0 - 0]
Calderas de condensación	[0,8 - 4,8]	[0,4 - 2]	[1,6 - 8,6]	[1,4 - 6,9]	[7,9 - 43,6]	[1,7 - 9,1]	[0,4 - 2,1]	[0,3 - 1,5]
Colectores solares	[0,8 - 4,8]	[0,4 - 2]	[1,6 - 8,6]	[1,4 - 6,9]	[7,9 - 43,6]	[1,7 - 9,1]	[0,4 - 2,1]	[0,3 - 1,5]
Duchas eficientes	[0,8 - 4,8]	[0,4 - 2]	[1,6 - 8,6]	[1,4 - 6,9]	[7,9 - 43,6]	[1,7 - 9,1]	[0,4 - 2,1]	[0,3 - 1,5]
Iluminación residencial eficiente	[6,3 - 38,3]			[3,4 - 16,9]		[15,3 - 84,6]		
Calentadores eficientes	[6,3 - 38,3]			[3,4 - 16,9]		[15,3 - 84,6]		
Lavadoras eficientes	[6,3 - 38,3]			[3,4 - 16,9]		[15,3 - 84,6]		
Lavavajillas eficientes	[6,3 - 38,3]			[3,4 - 16,9]		[15,3 - 84,6]		
Microondas eficientes	[6,3 - 38,3]			[3,4 - 16,9]		[15,3 - 84,6]		
Reducción pérdidas <i>standby</i>	[6,4 - 39]			[3,5 - 17,2]		[15,5 - 86]		
Refrigeración comercial eficiente	[6,3 - 38,3]			[3,4 - 16,9]		[15,3 - 84,6]		
Refrigeración residencial eficiente	[6,3 - 38,3]			[3,4 - 16,9]		[15,3 - 84,6]		
Secadoras eficientes	[6,3 - 38,3]			[3,4 - 16,9]		[15,3 - 84,6]		
Promedio CPR	[5,7 - 34,5]	[0,3 - 1,5]	[1,2 - 6,3]	[3,1 - 15,3]	[6,3 - 34,5]	[10,3 - 57,1]	[4,1 - 23,4]	[0,2 - 1,1]

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 2
COBENEFICIOS A NIVEL DE MEDIDA Y ZONA GEOGRÁFICA, PROMEDIO 2010-2030, GENERACIÓN ELÉCTRICA
(En dólares/tCO₂e reducida)

Medida	Norte grande costa	Norte grande interior	Norte chico costa	Centro costa	Centro interior	Sur costa	Sur interior	Austral
Instalación capacidad a biomasa	[0,1 - 0,5]			[0,2 - 1,2]		[11,6 - 64,4]		
Instalación capacidad eólica	[0,1 - 0,5]			[0,2 - 1,2]		[11,6 - 64,4]		
Instalación capacidad geotérmica	[0,1 - 0,5]			[0,3 - 1,3]		[12,5 - 69,4]		
Instalación capacidad hidro embalse	[0,1 - 0,6]			[0,3 - 1,5]		[13,7 - 75,6]		
Instalación capacidad mareomotriz	[0,1 - 0,6]			[0,3 - 1,6]		[15 - 83]		
Instalación capacidad mini hidro	[0,1 - 0,5]			[0,2 - 1,2]		[11,6 - 64,4]		
Instalación capacidad solar-PV	[0,3 - 2]			[0,2 - 1,2]		[11,6 - 64,4]		
Instalación capacidad solar-Th	[0,3 - 1,9]			[0,2 - 1,2]		[11,6 - 64,4]		
Promedio generación de electricidad	[0,1 - 0,7]			[0,2 - 1,2]		[11,6 - 64,4]		

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 3
COBENEFICIOS A NIVEL DE MEDIDA Y ZONA GEOGRÁFICA, PROMEDIO 2010-2030, INDUSTRIA
(En dólares/tCO₂e reducida)

Medida	Norte grande costa	Norte grande interior	Norte chico costa	Centro costa	Centro interior	Sur costa	Sur interior	Austral
Cogeneración	[0,1 - 0,5]			[4,2 - 20,9]	[5,7 - 31,6]	[20,2 - 111,6]		
Adelanto recambio motores	[12,5 - 76,5]			[2,8 - 13,9]		[12,6 - 69,5]		
Motores nuevos eficientes	[12,8 - 78]			[3,4 - 16,9]		[15,3 - 84,6]		
Promedio industria	[7,6 - 46,2]			[3,6 - 18]	[5,7 - 31,6]	[16,9 - 93,6]		

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 4
COBENEFICIOS A NIVEL DE MEDIDA Y ZONA GEOGRÁFICA, PROMEDIO 2010-2030, TRANSPORTE
(En dólares/tCO₂e reducida)

Medida	Norte grande costa	Norte grande interior	Norte chico costa	Centro costa	Centro interior	Sur costa	Sur interior	Austral
Biodiésel	[7,4 - 45]	[0,5 - 2,8]	[-0,8 - -4,4]	[10,9 - 53,9]	[60,6 - 333,2]	[0,9 - 5]	[1 - 5,7]	[0,2 - 0,9]
Bioetanol	[0 - 0]	[0 - 0]	[0 - 0]	[0 - 0,1]	[0,2 - 0,8]	[0 - 0,1]	[0 - 0]	[0 - 0]
Buses híbridos	[0 - 0]	[0 - 0]	[0 - 0]	[0 - 0]	[123,3 - 678,5]	[0 - 0]	[0 - 0]	[0 - 0]
Chatarrización de vehículos livianos	[54,6 - 331,6]	[31,2 - 179,9]	[167,4 - 907,2]	[100,5 - 497,5]	[558,6 - 3073,2]	[157,9 - 873,8]	[35 - 190]	[28,4 - 153,9]
Conducción eficiente de buses	[6,9 - 41,8]	[3 - 17,3]	[13,7 - 74,4]	[12,5 - 61,9]	[61,8 - 339,9]	[14,6 - 80,8]	[3,6 - 19,7]	[2,3 - 12,6]
Conducción eficiente de taxis y colectivos	[0,1 - 0,7]	[0,1 - 0,5]	[0,5 - 2,5]	[0,2 - 1,2]	[1,4 - 7,5]	[0,3 - 1,8]	[0,1 - 0,6]	[0,1 - 0,5]
Conducción eficiente de vehículos livianos	[2,8 - 17]	[1,2 - 7,2]	[6,3 - 34,4]	[4,9 - 24,3]	[27,3 - 149,9]	[6,2 - 34]	[1,4 - 7,8]	[1,1 - 6]
Expansión de líneas del Metro	[0,1 - 0,5]	[0 - 0]	[0 - 0]	[3,4 - 16,9]	[29,8 - 164]	[15,3 - 84,6]	[0 - 0]	[0 - 0]
Impuesto a combustibles VL diésel	[15 - 90,5]	[2,5 - 14,7]	[8,2 - 44,7]	[23 - 114]	[128 - 704,5]	[10,4 - 57,6]	[3,6 - 19,8]	[1,9 - 10,1]
Impuesto a combustibles VL gasolina	[1,4 - 8,4]	[1,1 - 6,3]	[6,1 - 33,2]	[2,8 - 13,8]	[15,5 - 85,4]	[5,7 - 31,3]	[1,2 - 6,4]	[1 - 5,5]
Taxis y colectivos híbridos	[0,2 - 1,2]	[0,2 - 0,9]	[0,8 - 4,4]	[0,4 - 2]	[2,3 - 12,5]	[0,6 - 3,1]	[0,2 - 1]	[0,1 - 0,7]
Vehículos livianos híbridos	[0,4 - 2,3]	[0,2 - 1,3]	[1,2 - 6,6]	[0,6 - 3,1]	[3,3 - 18,1]	[1,1 - 6,1]	[0,2 - 1,2]	[0,2 - 1,1]
Vehículos livianos híbridos <i>plug-in</i>	[5,8 - 35,1]	[0,1 - 0,8]	[0,7 - 3,9]	[3,9 - 19,4]	[2 - 11,2]	[33,7 - 186,6]	[0,1 - 0,7]	[0 - 0]
Incentivo cambio modal a transporte público	[2,5 - 15,3]	[1,3 - 7,5]	[6,9 - 37,2]	[4,6 - 22,5]	[25,3 - 139,2]	[6,6 - 36,2]	[1,5 - 8,1]	[1,2 - 6,4]
Promedio transporte	[1,1 - 6,7]	[0,6 - 3,2]	[2,2 - 12,2]	[3,7 - 18,4]	[30,3 - 166,9]	[1,4 - 7,7]	[0,7 - 4]	[0,4 - 2,3]

Fuente: Elaboración propia.



La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe



MINISTRY OF FOREIGN
AFFAIRS OF DENMARK



Ministerio Federal de
Cooperación Económica
y Desarrollo

