



EVALUACIÓN INICIAL DEL IMPACTO EN AGUAS ANDINAS PRODUCTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

**PREPARADO POR EL CENTRO DE CAMBIO GLOBAL PARA AGUAS
ANDINAS EMPRESA PARTE DEL GRUPO AGUAS BARCELONA**

INFORME FINAL

11 de Enero de 2010

I. INTRODUCCION

El sector sanitario e industrial depende en forma crítica de la disponibilidad de recursos hídricos. El sector sanitario tienen como función el abastecer de agua potable (y en muchas oportunidades del sistema de alcantarillado y tratamiento de aguas servidas asociado) a la población y también a parte de las necesidades del sector industrial. El sector industrial manufacturero 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 (ej. Pozos de aguas subterráneas). En ambos casos, los cambios en la disponibilidad de recursos hídricos van a afectar las actividades de estos grupos. Pero el efecto se expresa de manera distinta.

En el caso del sector sanitario, cambios en la hidrología de sus fuentes de abastecimiento (ya sea como cambios en volúmenes en el tiempo y en la época del año), y/o en la calidad de las aguas de abastecimiento, producto por ejemplo de un aumento en los niveles de sedimentación del agua pueden afectar las operaciones en el corto y en el largo plazo. Si existe una disminución en la disponibilidad de recursos hídricos una empresa tendrá que incurrir en costos (ej. infraestructura o compra de derechos) para asegurar la satisfacción de la demanda considerando proyecciones a mediano plazo de esta. Estos costos son finalmente trasladados a los usuarios en la forma de tarifas de suministro mayores. En la Figura 1 se puede apreciar cómo para distintas ciudades en Chile ordenadas de norte a sur (de menor a mayor disponibilidad hídrica) la tarifa baja a medida que la disponibilidad de agua sube. La disponibilidad de agua para distintas regiones del país se puede apreciar en la Figura 1.

Figura 1: Rango de precios para distintas ciudades del país ordenadas de Norte a Sur (pesos m³ horario punta) (www.siss.cl)

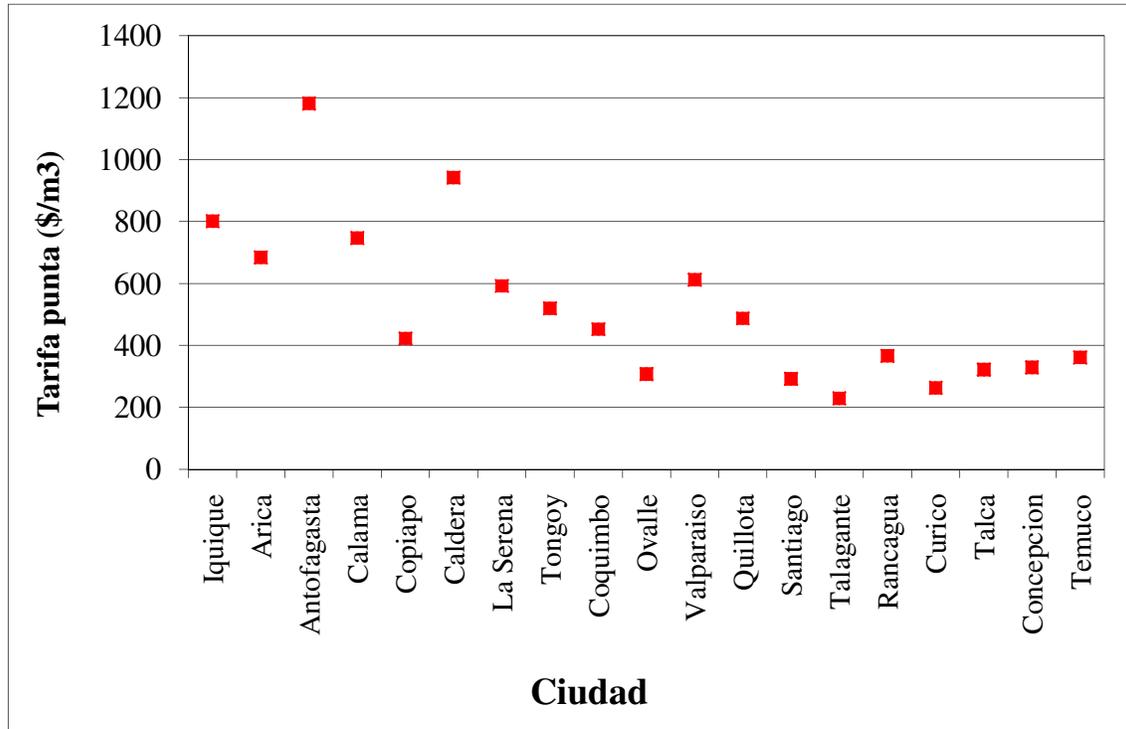
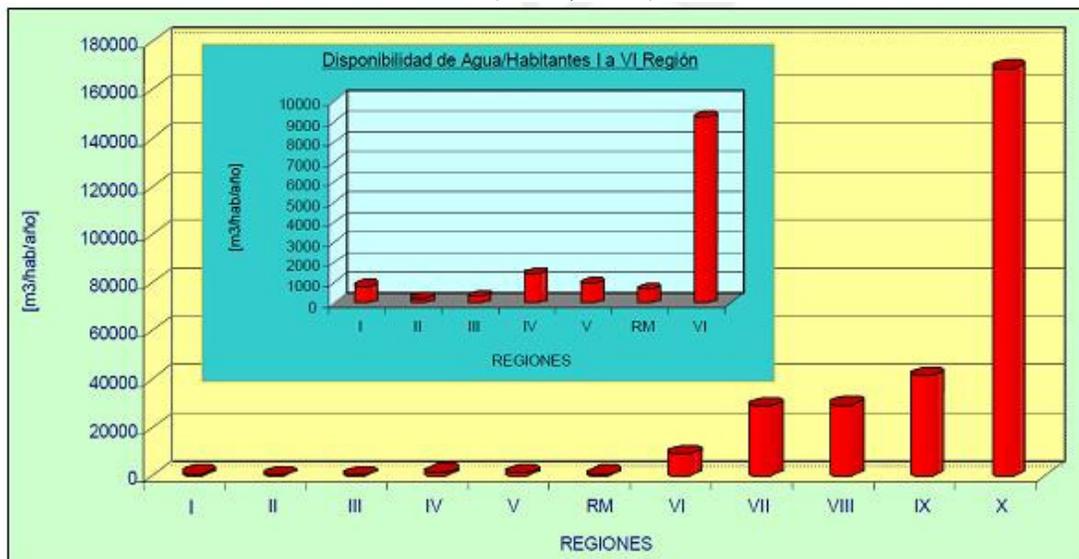


Figura 2. Disponibilidad de agua en diferentes regiones del país (en m³/hab/año) (DGA, 1999)



La disponibilidad de agua no es el único factor que incide en la tarifa de suministro pero claramente es uno de los más relevantes. Esta disponibilidad se asocia a la oferta hidrológica en una cuenca de abastecimiento pero también a la infraestructura

desarrollada para asegurar su aprovisionamiento. Es importante destacar también que finalmente un potencial aumento de tarifa asociado a un cambio climatológico e hidrológico afecta a los usuarios finales (tanto residenciales, comerciales e industriales abastecidos por empresas sanitarias) a través de una reducción de los beneficios netos obtenidos a través del consumo de agua.

La mayor concentración de habitantes y de actividades industriales en el país se presenta en la Región Metropolitana. En esta región reside (principalmente en la ciudad de Santiago) más de un 40% de la población del país y se genera poco menos del 50% del Producto Interno Bruto (PIB) del país. Es por estas razones que resulta sumamente relevante evaluar cuáles serían los potenciales impactos del cambio climático en la oferta y demanda de agua y en general en los servicios de agua potable para la Región Metropolitana.

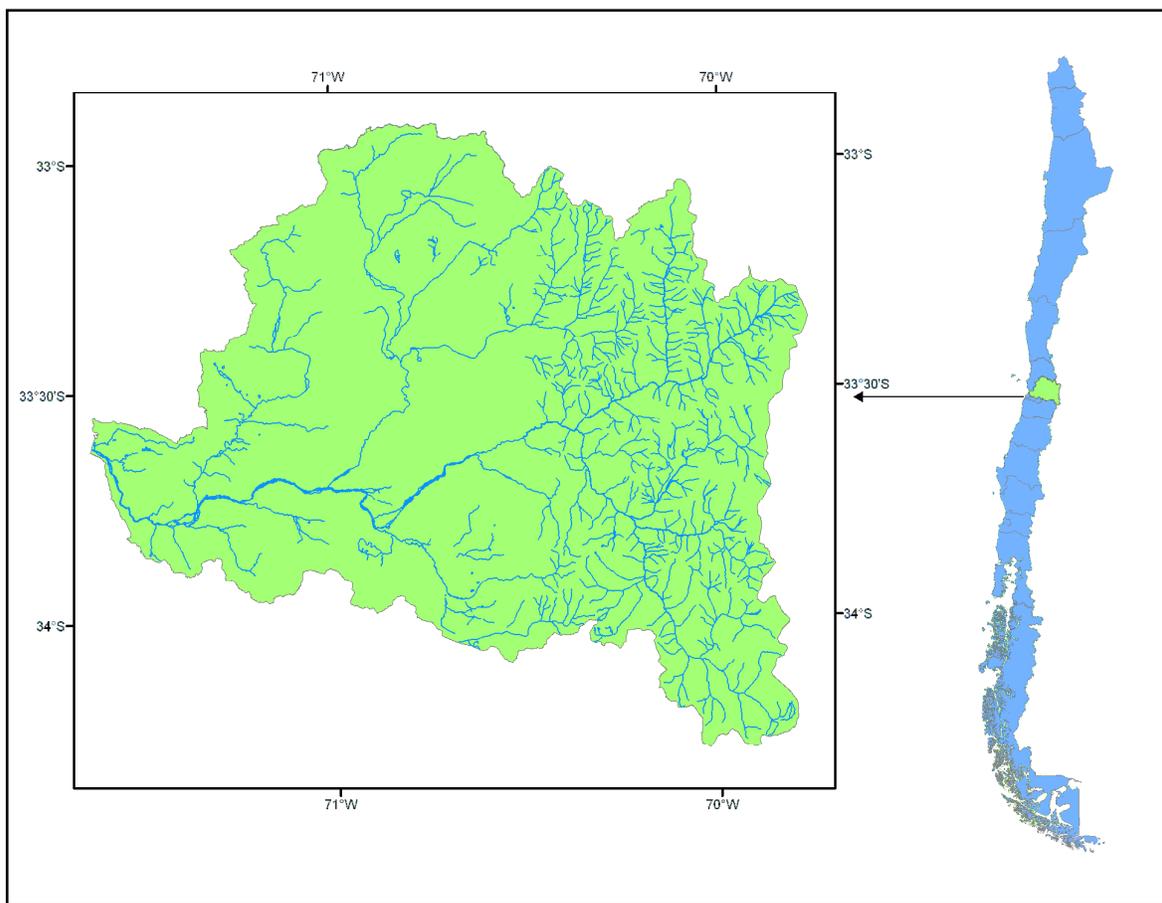
El presente documento corresponde al informe final de los resultados asociados al proyecto “Evaluación Inicial del Impacto en Aguas Andinas producto del Cambio Climático” que la empresa Aguas Andinas ha encargado al Centro de Cambio Global. En este proyecto se ha llevado a cabo una evaluación preliminar de los impactos económicos asociados al cambio climático en base a una metodología diseñada para la oportunidad y se plantean desafíos en esta materia para el futuro.

En las próximas secciones de este capítulo introductorio se presenta una descripción del caso de estudio considerado: la cuenca del Río Maipo y su relación con la Región Metropolitana y los escenarios de cambio climático para esta cuenca de acuerdo a lo que se presenta en este trabajo y en trabajos anteriores. En un segundo capítulo se describe la metodología usada partiendo con el marco conceptual entremezclada con la entrega de los diferentes resultados. Finalmente se presenta un capítulo donde se discuten las conclusiones y limitaciones del trabajo de lo que se desprenden potenciales áreas de trabajo para futuro.

1.1 Descripción caso de estudio, Cuenca del Maipo y Región Metropolitana – Aguas Andinas

La Cuenca del Río Maipo abarca gran parte de la superficie de la Región Metropolitana, y pequeñas áreas de la V y VI regiones, extendiéndose entre los paralelos 32°55' - 34°15' S y meridianos 69°55' - 71°33' O (ver **Figura 3**). El Río Maipo tiene una longitud de 250 Km, nace en las laderas del volcán Maipo a 5.623 m.s.n.m. para desembocar en el Océano Pacífico cerca de la localidad de Llolleo, en la ciudad de San Antonio (V Región). Su régimen hidrológico es de alimentación mixta, o nivo-pluvial. En sus zonas altas y medias el río Maipo es de régimen marcadamente nival, presentando un gran aumento de caudal en los meses de primavera producto de los deshielos cordilleranos. En la zona baja, el río Maipo posee un régimen pluvial, por lo cual presenta crecidas asociadas directamente con las precipitaciones. La cuenca del río drena unos 15.380 km² y su caudal promedio es de 92,3 m³/s (DGA, 2004).

Figura 3. Cuenca del Río Maipo



Esta cuenca presenta un régimen climático típicamente mediterráneo, por lo que el recurso hídrico superficial resulta de gran importancia para el desarrollo de actividades agrícolas, concentradas en las zonas de riego, que abarcan una superficie aproximada de 128.500 hectáreas. A su vez, este recurso también es utilizado para satisfacer las demandas de agua potable de una región con una alta concentración de habitantes y un gran desarrollo industrial. El Río Maipo es el principal colector de las aguas de la Región Metropolitana y concentra el 70% de la demanda actual de agua potable y cerca de un 90% de las demandas de regadío. También se han localizado en la parte alta de la cuenca importantes desarrollos hidroeléctricos que son alimentados con aguas de la Cuenca del Río Maipo (DGA, 2004).

Aguas Andinas S.A., corresponde a la principal empresa de agua potable de la cuenca, ya que es concesionaria de servicios públicos de producción y distribución de agua potable, y de recolección y disposición de aguas servidas en gran parte de la Región Metropolitana. Abastece del servicio de agua potable a una población de más de seis millones de habitantes, distribuida entre el Gran Santiago y las localidades periféricas de Buin-Maipo, Talagante, El Monte, Pomaire, Valdivia de Paine, Isla de Maipo, Curacaví, Malloco-Peñaflor, Calera de Tango, el Canelo, San Gabriel, San José de Maipo, Til Til y Padre Hurtado. El sistema de abastecimiento de agua potable es mixto, ya que se basa en fuentes superficiales en un 85% y en fuentes subterráneas el 15% restante (DGA, 2003).

1.2 Futuros escenarios climáticos en la cuenca del Río Maipo

De acuerdo a una revisión bibliográfica no se había presentado en el pasado un análisis de impactos del cambio climático en la cuenca del Río Maipo al nivel de análisis que se presenta en esta oportunidad. Estudios generales como la Primera Comunicación Nacional (CONAMA) o el Estudio de Variabilidad Climática para el Siglo XXI (DGF, 2007) esbozan impactos esperables en esta región pero no se llevan a cabo estudios específicos. El primer esfuerzo de tener escenarios de cambio climático para la cuenca del Maipo se asocia al trabajo llevado a cabo por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile para la Segunda Comunicación Nacional. Ese trabajo fue posteriormente complementado en el estudio CEPAL (2009) para tener a estas alturas un análisis de los cambios hidrológicos en la cuenca asociados a los dos escenarios utilizados en CEPAL (2009), el escenario A2 y el B2 ambos utilizando en modelo de clima global del Hadley Center. Los escenarios A2 y B2 presentados en CEPAL (2009) presentan una serie de condiciones climatológicas que pueden resumirse en los siguientes puntos (CEPAL, 2009). Ver **Figura 4** y **Figura 5**.

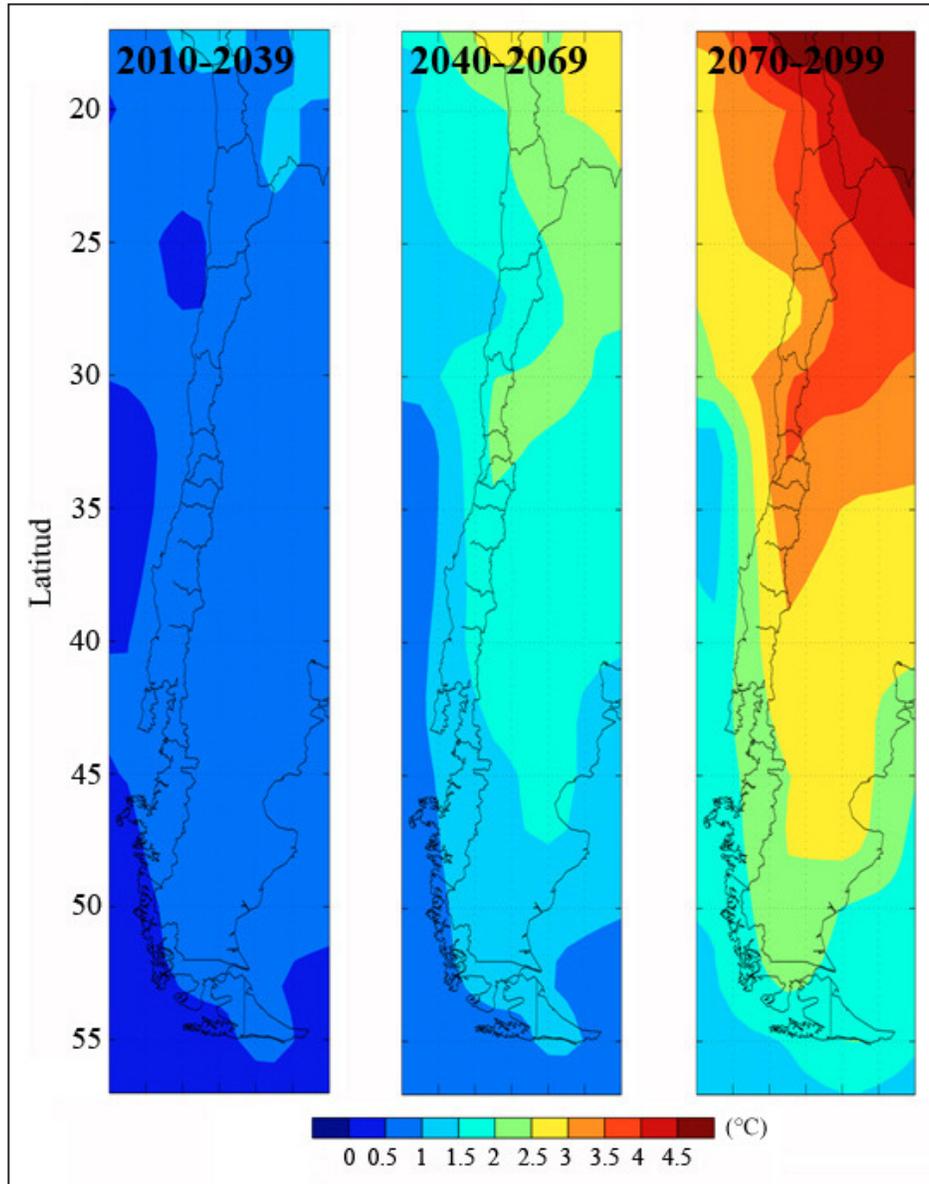
- Ambos escenarios (A2 y B2) muestran aumentos de temperatura para todo el país pero de manera más clara para la zona del altiplano. Para el período tardío, ambos escenarios pronostican aumentos de temperatura, no obstante, en el A2 se muestran los aumentos más altos, en torno a los 3-4°C, en comparación con el

escenario B2, dónde los aumentos mayores son del orden de los 2-3°C. En general, se aprecia que los aumentos de temperatura son más evidentes a medida que se alejan de la influencia del océano (ya sea en altura o alejado de la costa).

- Con respecto a las proyecciones de precipitación, se puede ver que para el período temprano se proyecta un descenso de precipitaciones en la zona altiplánica, en el norte chico y en algunas regiones aisladas en el centro sur del país. En el período intermedio, ambos escenarios proyectan aumentos de precipitación en la región de Magallanes y disminución de precipitaciones entre las regiones de Antofagasta y Los Lagos, sin embargo, los cambios son más acentuados en el escenario A2. Para el período tardío, ambos escenarios proyectan de manera similar, aumentos de precipitación en el extremo austral y el altiplano, y un mismo rango de zonas con descenso de precipitación (nuevamente, entre Antofagasta y Los Lagos). Aún así, el escenario A2 nuevamente muestra los descensos más pronunciados para esta última zona, con valores entre -30 y -40 %.

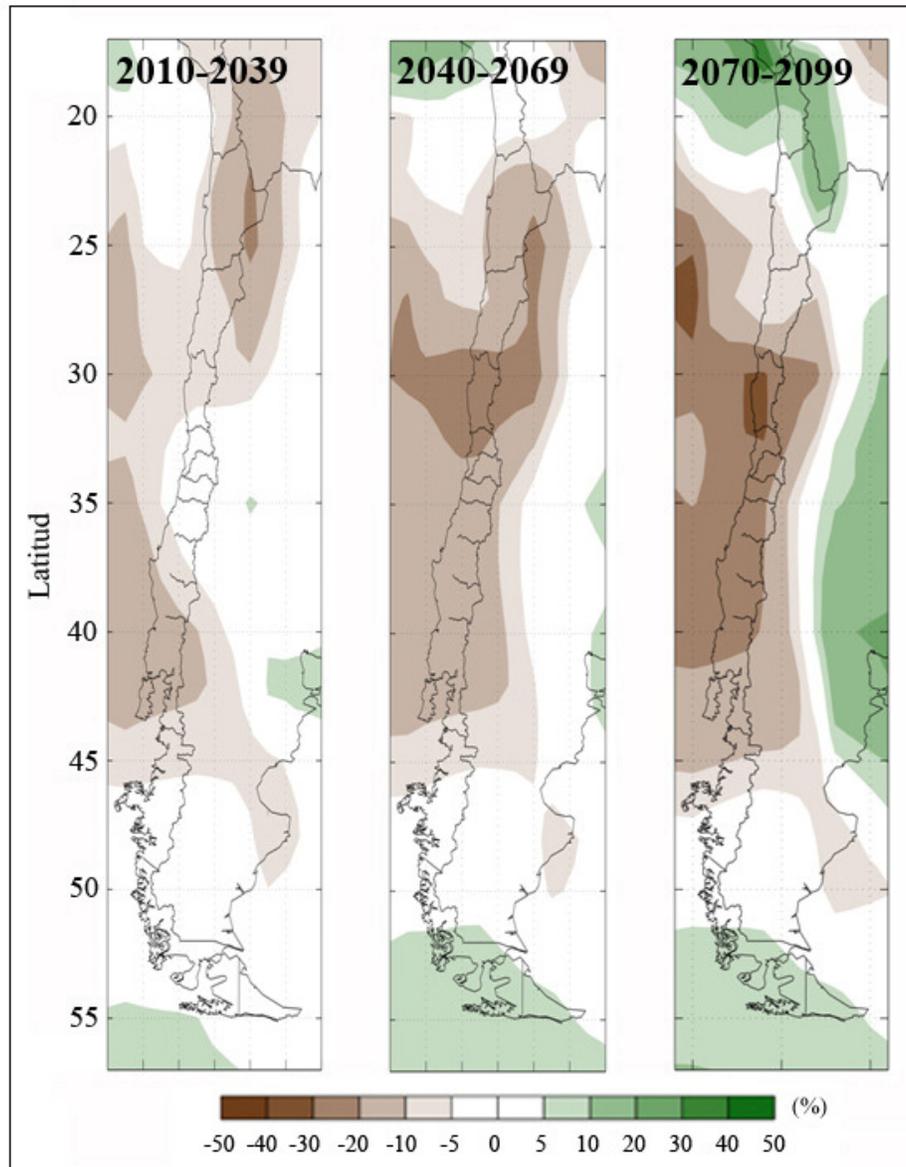
Además de la presentación de estos resultados en CEPAL (2009), se llevó a cabo en dicho estudio un análisis de incertidumbre de las proyecciones que entrega el modelo utilizado en el estudio, con el fin de comparar estas proyecciones con las de otros modelos. De acuerdo al análisis mencionado, se puede concluir que, para el caso de Chile, existe una alta probabilidad de ocurrencia de una disminución de precipitaciones entre los paralelos 30-42° S (aproximadamente entre la Región de Coquimbo y de Los Lagos), para la cual se puede esperar que la señal de cambio climático sea mayor a la variabilidad, incluso en un futuro cercano. Se pronostica, producto de lo anterior, un aumento considerable de eventos de sequía extremos en la región. En la Región de Magallanes (50-55°S), existe también una gran concordancia entre los modelos en cuanto a la proyección de un pequeño cambio positivo de precipitación para esta región (entre 5-10% 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 del país (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.

Figura 4. Proyecciones de temperatura para el escenario A2 (cambios en grados C sobre base histórica)



Fuente: CEPAL (2009)

Figura 5. Proyecciones de precipitación para el escenario A2 (cambios porcentuales sobre base histórica)



Fuente: CEPAL (2009)

Enfocándose en la Cuenca del Río Maipo los resultados entregados por los escenarios A2 y B2 son consistentes a lo que se presenta como el panorama general para el Centro-Sur del país. En la **Tabla 1** y **Tabla 2** se pueden apreciar los cambios en temperatura (diferencia con respecto a caso base) y precipitación (cambio porcentual) para tres periodos de análisis: temprano (2010-2040), intermedio (2040-2070) y tardío (2070-2100). Se aprecia que en ambos casos hay aumentos de temperatura que son más obvios hacia finales de siglo y para el escenario A2 y se ven también reducciones de precipitación que llegan a estar en torno a un 20% para el escenario A2.

Tabla 1 Cambios proyectados de temperatura para la cuenca del Río Maipo (Escenario HadCM3-A2)

Periodo	Temperatura promedio Anual Pirque (C)			
1978-2000	10.7			
Futuro	A2	A2-Hist	B2	B2-Hist
2011-2040	11.5	0.7	11.4	0.6
2041-2070	12.8	2.0	12.0	1.3
2071-2100	14.2	3.4	13.0	2.3

Tabla 2 Cambios proyectados de precipitación para la cuenca del Río Maipo (Escenario HadCM3-A2)

Periodo	Precipitación Anual San Gabriel (mm)			
1978-2000	548			
Futuro	A2	% A2/Hist	B2	% B2/Hist
2011-2040	531	97%	509	93%
2041-2070	446	81%	474	86%
2071-2100	423	77%	457	83%

Extendiendo el análisis de incertidumbre presentado en CEPAL (2009) pero para el caso específico de la cuenca del Maipo se ha llevado a cabo un segundo ejercicio. En este trabajo se ha hecho una comparación de todos los escenarios disponibles para la cuenca en dos localidades: en altura (estación San Gabriel) y en la desembocadura (estación San Antonio). Estos escenarios están compuestos de una serie de modelos de clima global diferentes (entre ellos el inglés del Hadley Center) y una serie de escenarios de emisión de gases de efecto invernadero (B1, A1b y A2 en este caso). La información se presenta en las siguientes figuras. En cada una de ellas cada punto representa un escenario que esta compuesto de un cambio porcentual en precipitación y un cambio agregado en temperatura. La información se presenta como se mencionó antes en dos estaciones pero además en dos periodos de tiempo: el temprano y el tardío. Se pueden apreciar las siguientes conclusiones de estas figuras:

- La dispersión en resultados (i.e. incertidumbre) es claramente superior para los escenarios tardíos debido a dispersión entre escenarios de emisión y entre los mismos modelos.
- Todos los escenarios indican aumento de temperatura que es más evidente a fines de siglo y para la estación en más altura.
- Se aprecia que en general (salvo excepciones) todos los escenarios proyectan una disminución en los niveles de precipitación. En un extremo estas pueden llegar a significar una reducción de un 60% en las precipitaciones anuales a finales de siglo.

Figura 6. Proyección de escenarios de cambio climático en estación San Antonio para periodo temprano y tardío.

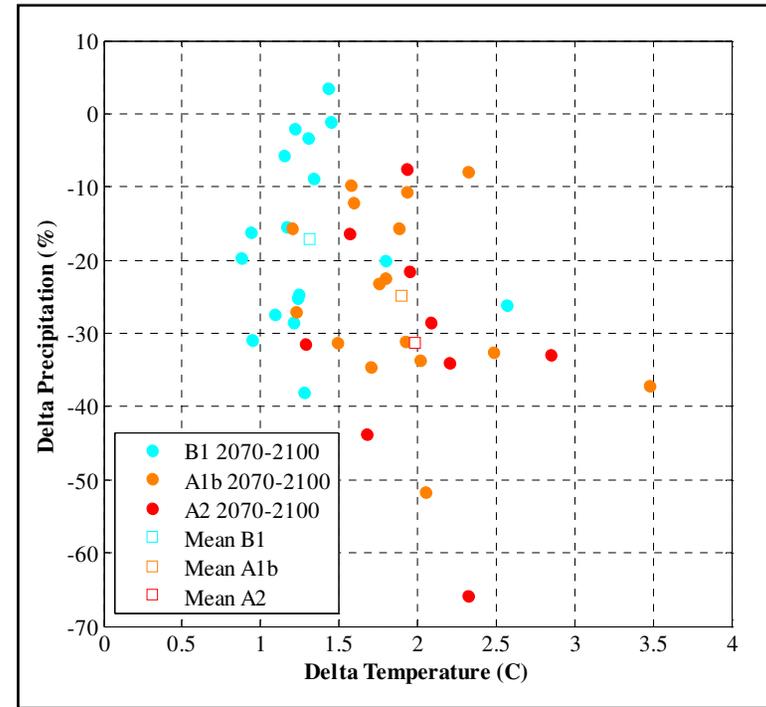
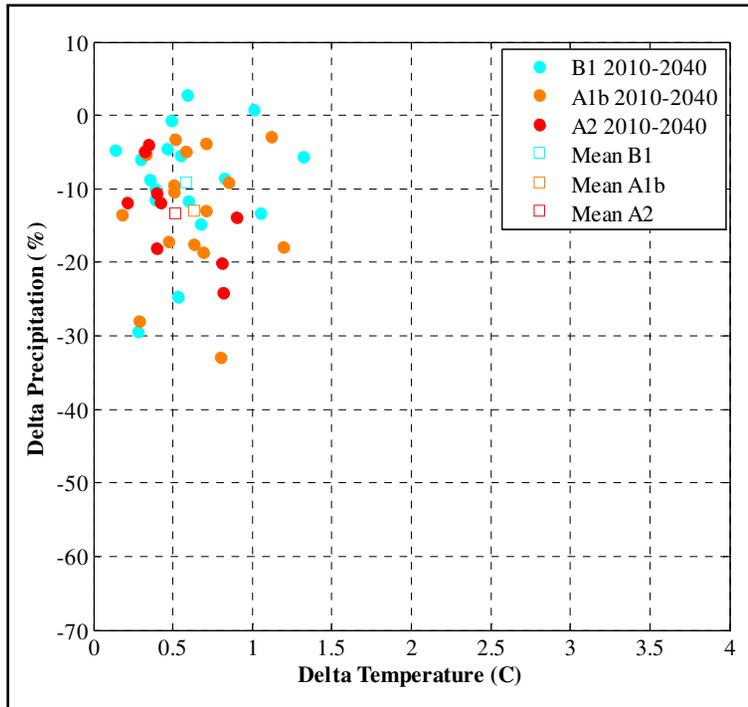
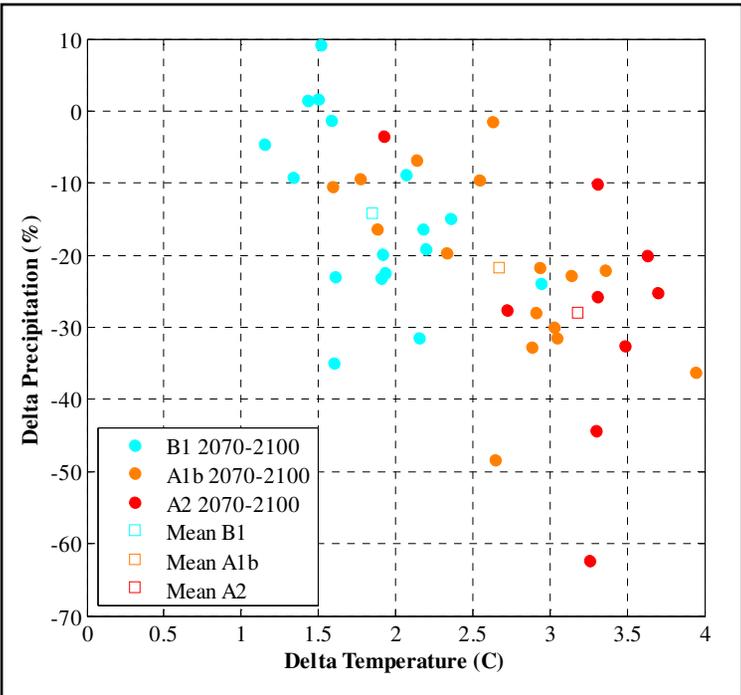
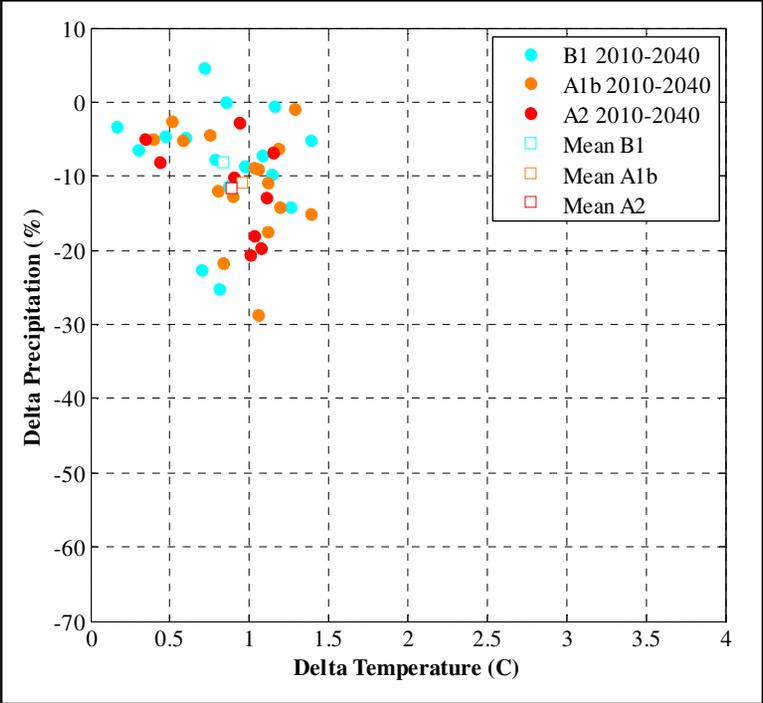


Figura 7. Proyección de escenarios de cambio climático en estación San Gabriel para periodo temprano y tardío.



II. METODOLOGÍA Y RESULTADOS:

II.1 Marco conceptual

El impacto económico de los cambios hidrológicos desde el punto de vista de las empresas sanitarias se refleja tanto en los costos de operación como en la inversión de capital de las empresas sanitarias. Es posible por ejemplo que producto de los cambios hidrológicos sea necesario invertir en la compra de derechos de agua adicionales. Para evaluar estos costos es necesario primero establecer una relación entre disponibilidad (o producción específica) de una fuente de suministro de agua con los costos de inversión y de operación de un sistema de suministro de agua potable. Una primera aproximación a esta relación se puede determinar considerando los costos de inversión y de operación de los sistemas de distribución de agua potable de distintas ciudades del país y la disponibilidad de agua de estos sistemas como se presenta en la **Figura 1** y **Figura 2**.

Por otra parte los consumidores finales podrían ver amenazada la provisión del recurso y enfrentar mayores precios como resultado de un incremento en los costos de producción (ya descritos). Estos últimos podrían aumentar tanto por el aumento en costos de tratamiento como por el costo de buscar nuevas fuentes o estar en posesión de un mayor número de derechos. En una mirada a largo plazo este impacto tiene que ser también complementado con las proyecciones que se tengan de la demanda efectiva de agua en una cuenca en particular.

Para estimar el impacto económico que tendrá el cambio climático en Aguas Andinas se plantea valorar las compras de acciones a un precio ajustado por el efecto de una menor disponibilidad hídrica. Este efecto se modela utilizando un sistema de oferta y demanda de derechos de aprovechamiento de aguas. El sistema se basa en la maximización de los beneficios netos por parte de los usuarios del agua, que se puede escribir como:

$$(1) \quad \pi(p, w, A) = \{Max pf(x, A) - w'x\},$$

donde p y w representan el precio del producto y de los factores de producción, respectivamente, x es un vector que contiene los factores de producción, A representa la cantidad de agua (o derechos de aprovechamientos de agua), la cual es fija en el corto plazo, y $f(x, A)$ es una función de producción que incluye el agua como factor. En el largo plazo, el agente económico posee una función de beneficios netos indirecta asociada a la decisión del nivel óptimo de derechos de aprovechamientos de agua:

$$(2) \quad \Pi(p, w, w_a) = Max_A \pi(p, w, A) - w_a (A - A^0)$$

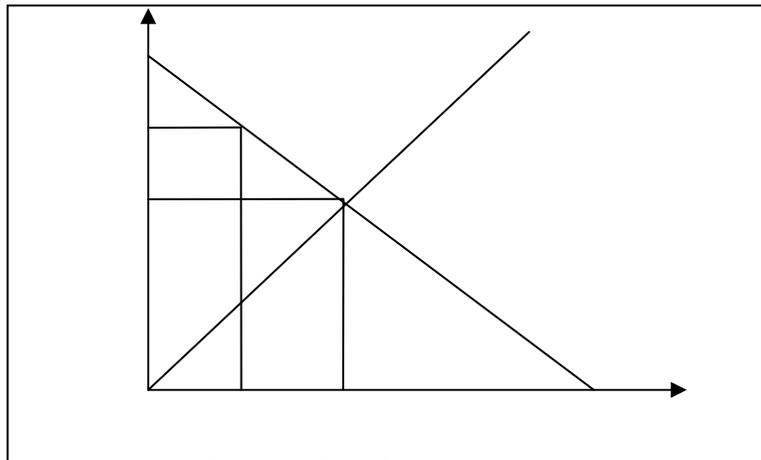
donde A^0 es la cantidad inicial de derechos de aprovechamiento de agua que posee cada agente y w_a es el precio del derecho de aprovechamiento. Aplicando el teorema de la envolvente se tiene:

$$(3) \quad -\frac{\partial \Pi}{\partial w_a} = (A^* - A^0)$$

donde A^* representa la cantidad deseada de derechos de aprovechamientos de agua. De esta manera, si $A^* < A^0$, la cantidad óptima para el agente es menor a la inicial, lo que lo hace un oferente de derechos. En el caso contrario, si $A^* > A^0$, el agente desea una mayor dotación de derechos, y por lo tanto es un demandante de ésta en el mercado. De acuerdo a las proyecciones de disponibilidad hídrica y de crecimiento poblacional, el sector sanitario que abarca la Región Metropolitana será un demandante de derechos, por lo que deberá acudir al mercado a comprar acciones para poder abastecer del recurso hídrico a la población.

En términos generales, se espera que la disponibilidad de agua disminuya ante los escenarios de cambio climático considerados, y con ello, se espera que los precios de derechos de aprovechamiento de aguas tiendan al alza. En la **Figura 8** se ejemplifica el impacto sobre el precio de dicha restricción hídrica. Producto del cambio climático, la disponibilidad del recurso caerá, por lo que se generará un nuevo equilibrio, ubicado en el punto F, donde se transará una menor cantidad de agua (q^{**}) a un precio mayor (p^{**}) que en la situación original.

Figura 8. Oferta y Demanda del recurso hídrico



Para estimar el tamaño de este efecto se requiere parametrizar las curvas de oferta y demanda. Para esto, se utiliza una estimación estructural de oferta y demanda del recurso hídrico para la primera sección del Río Maipo (Jordan (2007)¹. La especificación

¹ 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

econométrica del sistema de ecuaciones estructurales endógenas de demanda (A_t^d) y oferta (A_t^o) utilizada por Jordán (2007) se presenta a continuación:

$$(4) \quad A_t^d = \beta_0 + \beta_1 \ln(w_{at}) + \beta_2 IC_t + \beta_3 excct + \beta_4 PM_t + \sum_{i=1}^{n-1} \delta_i^d BT_{it} + \sum_{j=1}^{m-1} \gamma_j^d tc_{jt} + \varepsilon_t^d$$

$$(5) \quad A_t^o = \alpha_0 + \alpha_1 \ln(w_{at}) + \alpha_2 IV_t + \alpha_3 excvt + \alpha_4 PM_t + \sum_{i=1}^{n-1} \delta_i^o BT_{it} + \sum_{j=1}^{m-1} \gamma_j^o tv_{jt} + \varepsilon_t^o$$

donde $\ln(w_{at})$ es el logaritmo natural del precio por acción, IC_t e IV_t representan el desempeño agregado de la producción de los agentes demandante y oferente, respectivamente, $excct$ y $excvt$ es la experiencia previa del demandante y oferente en el mercado de derechos de aprovechamiento, PM_t es el precio promedio esperado por el agente en el mercado de los derechos de aprovechamiento, BT_{it} representa la i -ésima bocatoma, tc_{jt} y tv_{jt} son variables artificiales que identifican al tipo de agente demandante y oferente, respectivamente, α , β , δ y γ son parámetros y ε_t^d y ε_t^o son variables aleatorias tales que $E(\varepsilon_t^d) = E(\varepsilon_t^o) = 0 \quad \forall t$, $E(\varepsilon_t^d)^2 = \sigma^d \quad \forall t$, $E(\varepsilon_t^o)^2 = \sigma^o \quad \forall t$, $E(\varepsilon_t^d \varepsilon_s^d) = E(\varepsilon_t^o \varepsilon_s^o) = 0 \quad \forall t \neq s$, y $E(\varepsilon_t^d \varepsilon_t^o) \neq 0 \quad \forall t$.

Los resultados de la estimación estructural del modelo de Jordán (2007) se presenta en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Estimación del sistema estructural de oferta y demanda.

Variable	Demanda		Oferta	
	Coefficiente	Error Estándar	Coefficiente	Error Estándar
<i>Lnwa</i>	0,6323***	0,1014	0,3577***	0,0501
<i>Preciomóvil</i>	0,1976***	0,0444	0,3339***	0,0330
<i>AgrícolaC</i>	0,0242	0,1371	-0,5141***	0,0592
<i>SanitarioC</i>	-0,0883	0,0692	-0,8925**	0,3736
<i>InmobiliarioC</i>	-0,2563***	0,0571	-0,2533***	0,0769
<i>Otros</i>	Comprador de referencia		Vendedor de referencia	
<i>IC</i>	0,0009	0,0012	0,0060**	0,0030
<i>Expc</i>	-0,5683***	0,0511	-0,1949***	0,0592
<i>BT1</i>	-2,5656***	0,0664	-2,7023***	0,0583
<i>BT2</i>	-2,8505***	0,1226	-2,9443***	0,1233
<i>BT3</i>	-2,4183***	0,2055	-2,4109***	0,2236
<i>BT4</i>	-1,5983***	0,0827	-1,7047***	0,0854
<i>BT5</i>	0,8041***	0,1270	0,9634***	0,1360
<i>BT6</i>	-1,2737***	0,2374	-1,1677***	0,2609
<i>BT7</i>	-1,5076***	0,1503	-1,5710***	0,1628
<i>BT8</i>	-3,4291***	0,2577	-3,2668***	0,2645
<i>BT9</i>	Bocatoma de referencia		Bocatoma de referencia	
<i>Constante</i>	-1,3217***	0,3919	-0,8968**	0,4278
<i>Obs</i>	909		909	
<i>R²</i>	0,9395		0,9432	

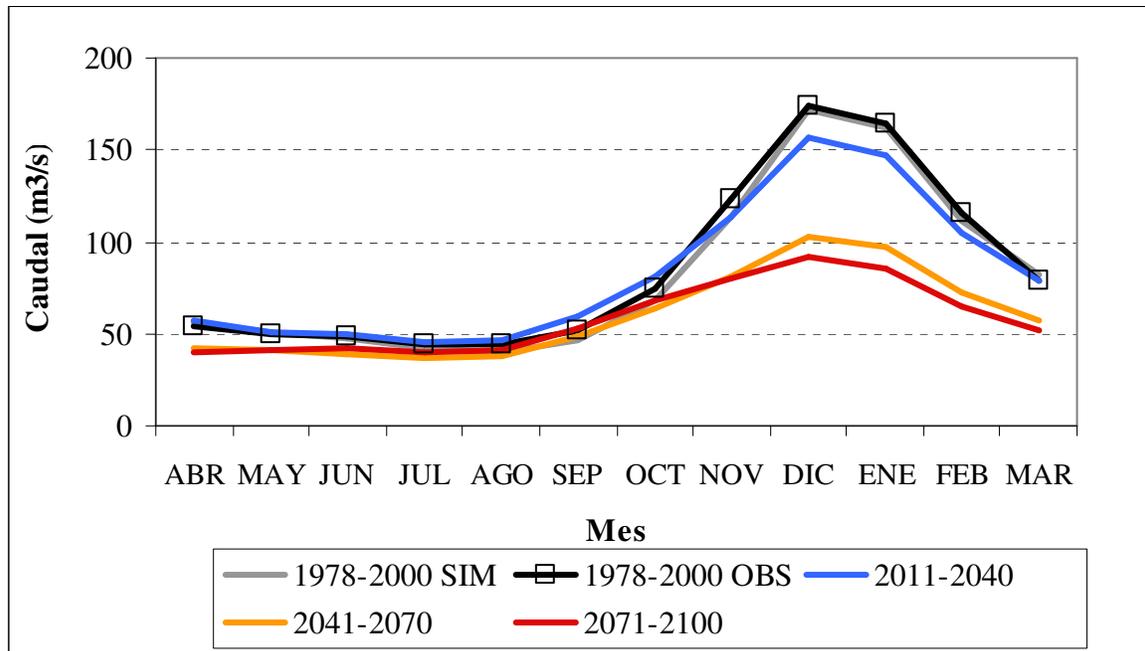
II. 2 Análisis de la Oferta Hidrológica y Disponibilidad de Recursos

Para determinar los impactos de los escenarios de cambio climático sobre el sector sanitario en la Región Metropolitana, se han considerado los resultados de la modelación hidrológica del Río Maipo en la estación San Alfonso que ha llevado a cabo departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile. Esta estación constituye un punto de control que permite la validación del modelo hidrológico WEAP empleado en el estudio y además muestra un nivel de asociación estadística muy alto con la estación La Obra, lugar donde se encuentra la bocatoma de derechos de agua para el grupo Aguas Andinas (coeficiente de correlación entre La Obra y San Alfonso mínimo de 0.81 en Agosto y máximo de 0.96 en Febrero). Para una revisión de la metodología utilizada en el desarrollo de este modelo hidrológico remitirse a Ingeniería Universidad de Chile (2009).

Los impactos del cambio climático sobre la hidrología del Maipo en la estación San Alfonso fueron evaluados para los escenarios de emisiones A2 (más severo) y B2 (moderado) según los resultados del modelo PRECIS aplicados a las simulaciones del modelo de circulación global HADCM3. En cada escenario se realizan proyecciones de cambio climático para los períodos 2010-2040; 2040-2070 y 2070-2100. Mayores antecedentes sobre los resultados climáticos, escenarios de emisiones y metodologías de simulación se pueden encontrar en el estudio sobre “Variabilidad Climática en Chile para el siglo XXI” (CONAMA/DGF, 2007).

La **Figura 9** muestra el resumen de las simulaciones realizadas, representando el caudales medio mensual de las series observadas en el período 1978-2000, los valores simulados para el mismo período, y los impactos del cambio climático proyectados en base al escenario de emisiones A2 para los períodos 2010-2040; 2040-2070 y 2070-2100.

Figura 9. Caudales medios observados y simulados en distintos períodos para la estación San Alfonso



El principal supuesto que se ha empleado en este análisis es que los cambios en la disponibilidad de agua porcentuales (o razones de cambio) estimadas a través de esta simulación hidrológica, se aplican a todos los subsistemas de abastecimiento de la empresa.

La operación y distribución de recursos hídricos para el sector sanitario ha sido diseñada con factores de seguridad bastante considerables. De esta forma, se ha fijado el caudal que tiene probabilidad de excedencia del 98% como nivel base de operación.

En consecuencia, el primer paso de este trabajo consistió en determinar el caudal mensual que representa una probabilidad de excedencia de un 98% en la estación San Alfonso y compararlo con los caudales de la misma probabilidad de excedencia en los escenarios futuros.

Para esto se procedió a ajustar una función de distribución de probabilidades log-normal

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln(x) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]$$

Los parámetros de esta distribución (μ, σ) fueron ajustados a través del método de máxima verosimilitud (Wilks, 1995) tomando para ellos la información de los caudales observados en el período 1975-2004, que es bastante cercana al período considerado como línea base en todas las simulaciones de impactos del cambio climático. Una vez obtenidos los parámetros de la distribución se estimó el caudal (q^*) cuya probabilidad de excedencia fuese de 98% ($P[Q > q^*] = 0.98$). El proceso de ajuste de la distribución log-normal y de estimación de cuantiles cuya probabilidad de excedencia sea de un 98% se repite para las proyecciones de cambio climático bajo cada escenario de emisiones. De esta forma se ha estimado el cambio de disponibilidad para el mismo nivel de seguridad de operación. Los resultados de esta etapa se presentan en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Cambios en los caudales mensuales (m^3/s) cuya probabilidad de excedencia es de 98% para Maipo en San Alfonso.

Escenario A2	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Actual	28.22	19.14	18.89	21.08	21.13	23.36	37.06	51.89	53.91	48.82	42.83	35.29
2010	32.44	30.92	30.44	26.64	23.85	25.41	30.65	39.81	55.10	59.26	47.83	39.09
2040	27.26	25.48	24.25	22.14	21.58	24.31	28.23	37.31	48.24	49.19	40.34	33.40
2070	22.52	20.12	20.30	18.56	18.42	21.96	25.83	31.56	39.37	39.68	33.86	28.59
Escenario B2	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Actual	28.22	19.14	18.89	21.08	21.13	23.36	37.06	51.89	53.91	48.82	42.83	35.29
2010	31.74	29.42	28.96	25.02	23.48	23.26	26.66	38.03	55.70	57.09	47.76	39.85
2040	26.13	22.97	22.26	21.28	21.85	23.77	25.55	33.32	46.22	49.50	40.41	33.39
2070	22.50	20.10	19.97	18.22	18.07	20.63	24.40	31.46	40.37	42.59	32.80	24.02

Luego se procedió a calcular los factores de cambio relativos de cada escenario (q^* futuro / q^* actual). Estos son los factores que se consideran como válidos para toda la Región Metropolitana y se aplican a los distintos subsistemas de abastecimiento. Los resultados se presentan en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Cambio relativo de los caudales mensuales (adimensional) de probabilidad de excedencia de 98% para Maipo en San Alfonso.

Escenario A2	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Actual	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2010	1.15	1.62	1.61	1.26	1.13	1.09	0.83	0.77	1.02	1.21	1.12	1.11
2040	0.97	1.33	1.28	1.05	1.02	1.04	0.76	0.72	0.89	1.01	0.94	0.95
2070	0.80	1.05	1.07	0.88	0.87	0.94	0.70	0.61	0.73	0.81	0.79	0.81
Escenario B2	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Actual	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2010	1.12	1.54	1.53	1.19	1.11	1.00	0.72	0.73	1.03	1.17	1.12	1.13
2040	0.93	1.20	1.18	1.01	1.03	1.02	0.69	0.64	0.86	1.01	0.94	0.95
2070	0.80	1.05	1.06	0.86	0.85	0.88	0.66	0.61	0.75	0.87	0.77	0.68

Usando la información sobre disponibilidad de agua según derechos de aprovechamiento superficiales en cada subsistema de abastecimiento, se calculó el cambio de la disponibilidad de agua futura (Caudal en base a derechos * factor de cambio relativo de caudales) en cada mes. Posteriormente, estos valores fueron contrastados con la capacidad de la infraestructura de cada subsistema de tal forma que se seleccionó el menor de ambos, reflejando las restricciones físicas que puede tener un sistema de almacenamiento, tratamiento y distribución de agua.

Finalmente los valores de cada subsistema fueron agregados, representando la disponibilidad total de agua superficial de la empresa en cada temporada de cambio climático. Los resultados se presentan en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Disponibilidad total de recursos superficiales según derechos y capacidad del grupo Aguas Andinas (l/s) Valores en rojo representan cambios negativos de disponibilidad en comparación a la situación actual.

Escenario A2	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Actual	8634	6986	6552	6889	7286	8947	11398	18440	18933	17578	14885	11516
2010	9925	11285	10561	8708	8223	9734	9426	14145	19350	21336	16624	12756
2040	8338	9298	8413	7237	7440	9310	8680	13258	16941	17709	14022	10899
2070	6890	7343	7042	6066	6351	8411	7944	11215	13826	14284	11769	9331
Escenario B2	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Actual	8634	6986	6552	6889	7286	8947	11398	18440	18933	17578	14885	11516
2010	9709	10735	10047	8177	8095	8910	8199	13516	19563	20552	16599	13004
2040	7993	8383	7723	6955	7534	9105	7858	11842	16232	17820	14046	10898
2070	6882	7334	6929	5955	6229	7902	7504	11180	14177	15332	11401	7838

Una vez analizados los abastecimientos superficiales se procedió a sumar los aportes desde aguas subterráneas (se descuentan los aportes de aguas subterráneas a localidades rurales), teniendo consideración en las reglas de operación que limitan la explotación futura de este recurso. La oferta total de recursos para Aguas Andinas se presenta en la **Tabla 7**.

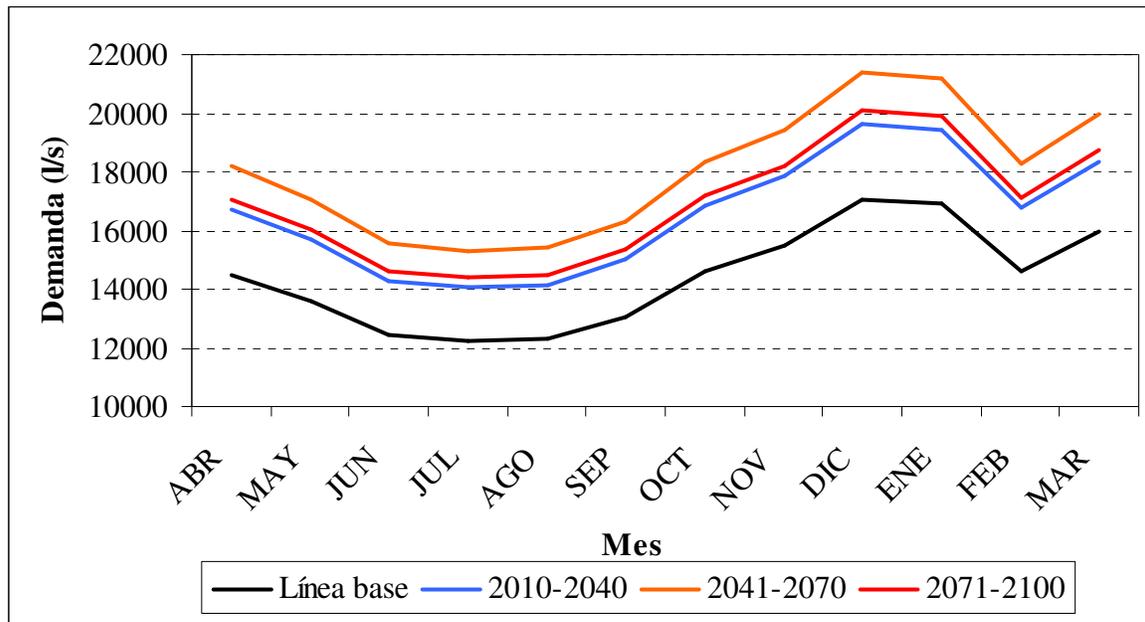
Tabla 7. Disponibilidad total de recursos hídricos del grupo Aguas Andinas (l/s).

Escenario A2	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Actual	17126	15478	15044	15381	15778	17439	19890	26932	27425	26070	23377	20008
2010	15055	16415	15692	13839	13353	14865	14557	19276	24481	26466	21754	17886
2040	12741	13700	12815	11639	11843	13713	13083	17661	21344	22112	18425	15302
2070	11293	11745	11445	10468	10753	12814	12346	15618	18229	18687	16172	13734
Escenario B2	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Actual	17126	15478	15044	15381	15778	17439	19890	26932	27425	26070	23377	20008
2010	14840	15866	15177	13308	13226	14040	13329	18646	24693	25683	21729	18135
2040	12395	12786	12126	11357	11937	13508	12261	16244	20635	22223	18448	15301
2070	11285	11736	11332	10358	10632	12304	11907	15583	18579	19735	15804	12241

II. 3 Análisis de la Demanda de Agua Potable

De acuerdo a información entregada por la empresa Aguas Andinas, se puede inferir la demanda de agua potable per capita para las zonas de abastecimiento equivalentes a la se tiene la proyección de oferta para la empresa. Adicionalmente la empresa cuenta con proyecciones de la población para la región hasta el año 2023 la cual es posible de extender con información del INE y CEPAL (ver CEPAL, 2009). Usando ambas variables es posible proyectar la demanda a nivel mensual para los periodos de interés tal como se presenta en la **Figura 10**. Cabe señalar que en este análisis no se ha considerado variaciones de la demanda de agua que estén asociadas a escenarios de cambio climático (i.e. mayor demanda por aumentos de temperatura y menor humedad relativa).

Figura 10. Variación anual de la demanda de agua para los periodos de análisis en función de las proyecciones de cambio climático.



II. 4 Análisis de la brecha entre demanda y oferta

Para una probabilidad de excedencia de 98% se consideró la brecha entre demanda y oferta proyectadas, estimándose el caudal necesario a suplir. Los resultados se presentan en la **Tabla 8**

Tabla 8. Brecha entre oferta y demanda (l/s) . Valores en rojo representan el mes con mayor déficit

Escenario A2	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Línea base	2619	1855	2633	3163	3469	4414	5259	11438	10349	9181	8798	4060
2010-2040	-1644	735	1406	-226	-815	-128	-2284	1442	4826	7026	4974	-471
2041-2070	-5446	-3378	-2743	-3678	-3587	-2616	-5258	-1762	-62	940	149	-4690
2071-2100	-5773	-4280	-3155	-3906	-3727	-2508	-4865	-2609	-1858	-1181	-978	-5027
Escenario B2	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Línea base	2619	1855	2633	3163	3469	4414	5259	11438	10349	9181	8798	4060
2010-2040	-1859	185	892	-756	-942	-953	-3511	812	5038	6243	4949	-222
2041-2070	-5791	-4292	-3433	-3960	-3494	-2820	-6080	-3179	-771	1050	173	-4692
2071-2100	-5781	-4289	-3268	-4016	-3848	-3018	-5304	-2644	-1508	-133	-1346	-6520

En la primera sección del Maipo se encuentran asignados la totalidad de los derechos permanentes de agua. Puesto que se conoce el caudal de cada mes y el número total de acciones que han sido asignadas, es posible calcular el rendimiento individual de cada acción en cada mes para la misma probabilidad de excedencia utilizada anteriormente. Los resultados se aprecian en la **Tabla 9**.

Tabla 9. Caudal disponible por acción para una probabilidad de excedencia de 98% (l/s).

Escenario A2	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Línea base	3.6	2.6	2.5	2.5	2.6	3.2	4.4	7.9	8.2	7.8	6.6	5.0
2010-2040	4.1	4.3	4.0	3.2	2.9	3.5	3.6	6.0	8.4	9.5	7.4	5.5
2041-2070	3.4	3.5	3.1	2.7	2.6	3.4	3.3	5.7	7.4	7.9	6.2	4.7
2071-2100	2.8	2.8	2.6	2.2	2.2	3.1	3.0	4.8	6.0	6.3	5.2	4.0
Escenario B2	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Línea base	3.6	2.6	2.5	2.5	2.6	3.2	4.4	7.9	8.2	7.8	6.6	5.0
2010-2040	4.0	4.1	3.8	3.0	2.9	3.2	3.1	5.8	8.5	9.1	7.4	5.6
2041-2070	3.3	3.2	2.9	2.5	2.7	3.3	3.0	5.1	7.1	7.9	6.2	4.7
2071-2100	2.8	2.8	2.6	2.2	2.2	2.9	2.9	4.8	6.2	6.8	5.1	3.4

Esta información permite calcular el número de acciones adicionales que hay que comprar en cada período (brecha entre oferta y demanda en cada mes) y también el rendimiento que tendrán dichas acciones durante en un año (número de acciones adicionales por el rendimiento mensual). Es importante destacar que la compra de acciones en un período repercute en la oferta del período siguiente. De esta forma se establece un mecanismo de adaptación dinámica. Los resultados de este análisis se presentan en la **Tabla 10**.

Tabla 10. Número de acciones adicionales mensuales por periodo que son necesarias para satisfacer la demanda proyectada.

Escenario A2	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Línea base	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2010-2040	400	0	0	71	280	36	634	0	0	0	0	85
2041-2070	945	327	237	753	728	140	951	0	0	0	0	359
2071-2100	441	0	0	172	72	0	17	0	0	0	0	0
Escenario B2	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Línea base	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2010-2040	463	0	0	253	329	295	1121	0	0	0	0	39
2041-2070	1752	1354	1187	1554	1310	854	2025	629	109	0	0	993
2071-2100	2032	1547	1260	1841	1745	1053	1850	554	245	20	266	1919

En virtud de este último resultado uno puede determinar el mes que requiere de la mayor cantidad de acciones adicionales y fijar ese como el nivel de compra que debe realizarse para estar en condiciones de hacerle frente a los escenarios de cambio climático proyectados. **Tabla 11.**

Tabla 11. Numero de acciones adicionales a comprar por período para lograr satisfacer la demanda proyectada de acuerdo a cambios hidrológicos proyectados.

Escenario A2	Déficit (m ³ /s)	Compra de Acciones
2010-2040	-2.3	634
2041-2070	-3.3	951
2071-2100	-1.3	441
Escenario B2	Déficit (m ³ /s)	Compra de Acciones
2010-2040	-3.5	1121
2041-2070	-2.7	904
2071-2100	-0.0	6

Antes de presentar la valoración económica del impacto presentado resulta interesante aislar el efecto que puedan tener los cambios hidrológicos asociados al cambio climático versus los cambios en demanda asociado al cambio en población. Para lograr esta evaluación de asignación en impactos se ha considerado un escenario alternativo donde la demanda de agua en la región se mantiene constante a los niveles actuales. De acuerdo a este escenario, la diferencia entre oferta y demanda se ve alterada así como la necesidad de compra de acciones. Ambos resultados se presentan en las **Tabla 12** y **Tabla 13**.

Tabla 12. Brecha entre oferta y demanda (l/s) considerando una demanda fija a niveles actuales. Valores en rojo representan el mes con mayor déficit

Escenario A2	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Línea base	2619	1855	2633	3163	3469	4414	5259	11438	10349	9181	8798	4060
2010-2040	548	2793	3281	1620	1044	1839	-74	3782	7405	9578	7176	1938
2041-2070	-1766	77	405	-579	-466	688	-1548	2168	4269	5223	3847	-646
2071-2100	-3214	-1878	-966	-1750	-1556	-211	-2284	124	1154	1798	1594	-2214
Escenario B2	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Línea base	2619	1855	2633	3163	3469	4414	5259	11438	10349	9181	8798	4060
2010-2040	332	2243	2766	1089	917	1015	-1301	3152	7618	8794	7151	2187
2041-2070	-2112	-837	-285	-861	-372	483	-2370	751	3560	5334	3870	-647
2071-2100	-3223	-1887	-1079	-1861	-1677	-721	-2724	89	1504	2846	1225	-3707

Tabla 13. Numero de acciones adicionales a comprar por período para lograr satisfacer la demanda actual de acuerdo a cambios hidrológicos proyectados.

Escenario A2	Déficit (m ³ /s)	Compra de Acciones
2010-2040	-0.1	21
2041-2070	-1.7	492
2071-2100	-1.8	616
Escenario B2	Déficit (m ³ /s)	Compra de Acciones
2010-2040	-1.3	361
2041-2070	-1.2	353
2071-2100	-1.2	417

II. 5 Análisis del impacto económico

Utilizando el modelo planteado en el marco conceptual, es posible estimar el nuevo precio por acción dado un escenario de restricción hídrica producto del cambio climático. Usando la función de demanda inversa mostrada en la **Tabla 3**, el precio unitario (UF/acción) predicho por el modelo y el número de acciones transadas, se estima el nuevo precio por acción producto de la disminución en la disponibilidad hídrica. Posteriormente, se estima el valor de la inversión que la empresa deberá asumir para poder suplir el déficit en acciones estimado anteriormente. En la **Tabla 14** se presentan los resultados del impacto, considerando una demanda constante (**Tabla 13**). En ella se puede ver que el monto de la inversión anual es de 1 millón de dólares al año a partir del año 2041 para el escenario A2. Para el escenario B2 el monto de esta inversión varía entre 0,6 y 0,9 millones de dólares al año, para los periodos tempranos y tardíos, respectivamente. Como se indicó anteriormente, este impacto no considera el efecto del cambio en demanda asociado al cambio en la población.

Tabla 14. Impactos asociados al cambio climático en el sector sanitario de la Región Metropolitana de Santiago considerando una demanda constante².

Escenario A2	Déficit (m ³ /s)	Compra de Acciones	Precio (US\$/Acción)	Costo (MMUS\$)	Costo (MMUS\$/año)
2010-2040	-0.1	21	52233	1	0,04
2041-2070	-1.7	492	62313	31	1,0
2071-2100	-1.8	616	67353	41	1,4
Escenario B2	Déficit (m ³ /s)	Compra de Acciones			
2010-2040	-1.3	361	52233	19	0,6
2041-2070	-1.2	353	62313	22	0,7
2071-2100	-1.2	417	67353	28	0,9

Por otra parte, en la **Tabla 15** se presenta el impacto económico del cambio climático que considera una proyección de la demanda. Se puede apreciar que, en el caso de incorporar una proyección de demanda, los costos bajo el escenario A2 son alrededor de 1 millón de dólares al año para los periodos temprano y tardío y de 2 millones para el periodo intermedio. En el caso del escenario B2, el monto anual también es cercano a los 2 millones de dólares para los periodos temprano e intermedio, pero cercano a cero para el periodo tardío. Un costo de 2 millones de dólares al año se traduce en un aumento de aproximadamente 2 dólares al año en la cuenta del agua de una familia promedio, lo que representa un incremento de 0,02 centavos de dólar por metro cúbico.

Tabla 15. Impactos asociados al cambio climático en el sector sanitario de la Región Metropolitana de Santiago considerando la demanda proyectada³.

Escenario A2	Déficit (m ³ /s)	Compra de Acciones	Precio (US\$/Acción)	Costo (MMUS\$)	Costo (MMUS\$/año)
2010-2040	-2.3	634	52233	33	1,1
2041-2070	-3.3	951	62313	59	2,0
2071-2100	-1.3	441	67353	30	1,0
Escenario B2	Déficit (m ³ /s)	Compra de Acciones			
2010-2040	-3.5	1121	52233	59	2,0
2041-2070	-2.7	904	62313	56	1,9
2071-2100	-0.0	6	67353	0	0,0

² En las estimaciones de costos se considera que el valor de la UF es de \$21.000 y que el tipo de cambio es de \$550.

³ Ver nota 3.

III. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

III.1 Conclusiones y limitaciones del trabajo

Se ha llevado a cabo en este estudio un análisis del impacto económico en el suministro de agua potable en la Región Metropolitana asociado a los cambios hidrológicos que se presentarían en la cuenca del Río Maipo producto del cambio climático. La metodología desarrollada para llevar a cabo este análisis ha asumido que el impacto económico existe cuando hay un descenso en la oferta de agua. En este caso la empresa de suministro de agua potable Aguas Andinas tiene que llevar a cabo inversiones que aseguren un correcto suministro en el futuro. En el trabajo presentado se asume que es posible determinar los cambios hidrológicos para todas las fuentes de suministro considerando los cambios en el punto de aforo de Río Maipo en San Alfonso. Por otra parte se ha asumido que las decisiones de inversión para la empresa están asociadas a compra de derechos de agua en la Primera Sección del Río Maipo.

Utilizando estos supuestos se ha demostrado en este trabajo que en el futuro se esperaría una disminución en los niveles de precipitación y aumento de temperatura lo que afectaría las condiciones hidrológicas disminuyendo los volúmenes de agua disponibles especialmente en los meses de primavera y verano. Estos cambios tendrían asociado un impacto económico producto de la compra de derechos de agua que tendría que llevar a cabo la empresa Aguas Andinas. Este costo fluctúa entre los 1 y 2 millones de dólares al año dependiendo del escenario considerado y de los supuestos utilizados en proyectar la demanda de agua hacia el futuro.

Existen, sin embargo, una serie de limitaciones inherentes a esta primera aproximación a los impactos económicos en la provisión de agua potable para la empresa. Estas limitaciones se describen a continuación.

Desde un punto de vista climatológico e hidrológico más allá de las limitaciones inherentes que presentan los modelos de circulación global y los procesos de downscaling en la generación de los escenarios climáticos futuros, el estudio se ha llevado a cabo sobre la base de algunos supuestos cuyas consecuencias deben ser evaluadas:

- En primer lugar se ha trabajado con los resultados del modelo WEAP calibrado para la cuenca del Maipo. En términos generales, el modelo presenta un buen desempeño en la reproducción de los valores medios mensuales de los caudales en la estación o punto de control. Sin embargo no hay una evaluación más profunda en lo que respecta a momentos de orden superior (varianza, asimetría, curtosis, etc). Puesto que se trabaja con un cuantil muy particular, que es el que tiene probabilidad de excedencia del 98% ($P(Q > q^*) = 0.98$), su valor depende directamente de : a) La función de densidad de probabilidades, cuya familia se ha

- asumido como invariable en el tiempo y b) de los momentos estadísticos de las muestras que son empleadas para su ajuste. Este elemento de incertidumbre explicaría ciertas singularidades observadas en las proyecciones de los impactos para el período más cercano, ya que se traslapan datos con distintos orígenes (observaciones y muestras derivadas de un modelo de simulación)
- El segundo supuesto importante corresponde al hecho que los cambios porcentuales de la oferta hidrológica observados para el caso de Maipo en San Alfonso se han considerado como representativos de toda la cuenca y han sido aplicados a las distintas fuentes de aprovisionamiento de la empresa. Esto puede resultar válido para las bocatomas desde el Maipo, pero puede resultar no del todo correcto para la hidrología del río Mapocho. El nivel de correlación entre la hidrología del Maipo y del Mapocho es menor al observado entre las distintas estaciones fluviométricas de la primera sección y, por lo tanto, hay una mayor incertidumbre en estas estimaciones.
 - Adicionalmente si bien el río Maipo es uno de los principales afluentes de la cuenca en este estudio no se ha considerado el cambio en los equilibrios de oferta y demanda que podrían ocurrir con otras fuentes tanto superficiales como subterráneas y que naturalmente podrían afectar los costos de la empresa.

Por otra parte con respecto al marco conceptual y al modelo económico utilizado es importante destacar que:

- Es probable que la compra de derechos de agua sea sólo 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 (ej. 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 de las aguas (ej. aumento en concentración de sedimentos producto del aumento en altura de la isoterma cero).
- Asimismo, si bien el modelo utilizado es adecuado para predecir cambios marginales en los niveles de precios este puede no ser suficiente para predecir cambios en la demanda en los órdenes de magnitud que se espera ocurran con el cambio climático. En este estudio no está incorporado el efecto sobre el precio de la acción el hecho de que la empresa salga al mercado a adquirir derechos. Este punto es relevante si se considera que anualmente se transan en promedio aproximadamente 100 acciones de río en la Primera Sección del Río Maipo, y considerando que la empresa deberá comprar hasta 37 acciones de río al año dependiendo del escenario y periodo, es esperable que el precio de los derechos se vea afectado por este incremento en la demanda.

Es por todas estas razones que se estima que la compra de derechos de aguas a los precios referidos en la **Tabla 14** y **Tabla 15** 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 y en el valor del agua cruda. También resulta importante de 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 es el caso del sector agrícola y los posibles problemas de gestión de los recursos que podrían surgir en el futuro producto de los cambios hidrológicos proyectados. Por último tampoco se ha considerado en el análisis el efecto que podría traer en el consumo un posible cambio en las tarifas que podrían derivarse del aumento en el costo del agua cruda. Sin embargo, con los valores estimados en este estudio no se prevé que este efecto sea significativo.

Finalmente el último grupo de limitaciones del estudio esta asociado al análisis realizado con respecto a la demanda futura de agua en la región. No se han considerado en este trabajo los potenciales efectos que tendría el cambio climático en la demanda tanto del sector residencial como también de otros usuarios del agua en la cuenca como el sector agrícola. Es previsible que frente a un aumento en la temperatura y una disminución en la precipitación aumenten las necesidades de riego (tanto para cultivos como jardines) en el futuro lo que implicaría una presión adicional sobre el uso del agua en la región. Como ejemplo de lo anterior se destaca que estudios preliminares han determinado que un escenario de cambio climático podría aumentar en hasta un 12% la demanda del sector residencial respecto del escenario sin cambio climático

III.2 Próximos estudios

De las limitaciones que presenta el trabajo realizado se desprenden una seria de potenciales proyectos de estudios a realizar en el futuro que ayudarían a tener una visión más completa de los potenciales impactos del cambio climático en la cuenca. Estos estudios pueden ser clasificados en tres grandes categorías: estudios para mejorar el conocimiento con respecto a impactos en la oferta de agua, con respecto a la demanda de agua y estudios que aborden ambos temas desde un punto de vista integral.

- Oferta de agua:
 - Glaciares

Los glaciares representan una fuente importante de aprovisionamiento de agua, particularmente en los momentos de estiaje y en años de reducción de precipitaciones. Chile ha comenzado un programa de monitoreo sistemático y creado unidades especializadas al interior de la DGA. Es necesario sin embargo, conectar la investigación en vulnerabilidad de recursos hídricos frente al cambio climático con la dinámica de los glaciares y determinar expresamente su rol dentro de la oferta hidrológica considerando escenarios de cambio global.
 - Vulnerabilidad infraestructura de almacenamiento

Es necesario estudiar cual es el potencial impacto que tendrían los cambios hidrológicos sobre la operación de las obras de infraestructura ya instaladas en

la cuenca. Los cambios en temporalidad de caudales que se proyectan podrían indicar nuevas reglas de operación para lograr optimizar la capacidad de almacenamiento y para prevenir impactos asociados a eventos de inundación. Por otra parte se podría estudiar si es necesaria la instalación de nuevas obras de infraestructura en línea dentro de los cursos hidrológicos o fuera de línea. El objetivo de estas sería prevenir situaciones de riesgo en la provisión de agua potable para eventos por ejemplo de sedimentación extrema (ver próximo punto) o por cambios en las condiciones hidrológicas promedio.

○ Sedimentos y clima

Uno de los problemas más serios que enfrenta la empresa es el aumento sostenido en los niveles de arrastre de sedimentos producto de la ocurrencia de eventos de precipitación asociados a altas temperaturas, las llamadas tormentas calidas. Cuando estos eventos ocurren sube la línea de nieves y aumenta de manera considerable la concertación de sedimentos en los puntos de toma de los sistemas de colección de agua cruda. Para paliar estos impactos se podrían considerar soluciones directas que consideren cambios con respecto a los niveles de tolerancia de los sistemas de tratamiento de agua cruda con respecto a los niveles de sedimentos. Alternativamente de manera indirecta el problema podría ser resuelto con una distribución de la capacidad de almacenamiento del agua ya tratada dentro de la cuenca aguas debajo de los sistemas de tratamiento.

○ Sedimentos y cobertura vegetal

Un área importante de estudio lo constituye la caracterización completa de la cuenca, en términos de relaciones y sinergias entre cambio climático y cambio de uso del suelo. Entender la vulnerabilidad de la cuenca no sólo desde el punto de vista de la oferta sino también de los cambios en la vegetación que implican mayor susceptibilidad a erosión y transporte de sedimentos. El efecto combinado de cambios en la cobertura vegetal y de cambios en la frecuencia de tormentas cálidas puede significar un eje importante de impacto sobre el tratamiento de aguas.

○ Análisis hidrológico mas fino, incluido acuíferos

Un punto crucial para determinar el impacto del cambio climático sobre la oferta de agua en la cuenca está en la dinámica de los acuíferos. Medidas de adaptación al cambio climático pueden significar un incremento en el uso de recursos subterráneos. Asimismo cambios en la hidrología pueden alterar los patrones de recarga y oferta. Se recomienda entonces un estudio más acabado (integral) de los impactos del cambio climático sobre el Maipo y entender los efectos de las medidas de adaptación individuales sobre la oferta de agua.

• Demanda de agua:

○ Análisis de factores relevantes: población, clima, condiciones urbanas, estrato social, costos

Por simplicidad se ha supuesto que el único agente modificador de la demanda por consumo de agua la constituye el crecimiento poblacional. Se estima que uno de los aspectos fundamentales que debiese ser incorporado es un mayor

realismo en la dinámica de la demanda de agua, permitiendo incorporar los elementos de cambios en los patrones de consumo (eficiencias en el uso de agua, densidad poblacional y ahorros por el cambio de la superficie de áreas verdes), como también capturar el efecto del cambio climático en el mayor consumo de este recurso.

○ Inclusión en modelo de proyección y relación con oferta.

Un segundo estudio interesante lo constituye la asociación entre consumo de agua y tarifas para detectar si la elasticidad precio puede ser un aliciente que induzca eficiencias en el uso del recurso y logre la adaptación al cambio climático. Este último podría ser información útil para el diseño de políticas de conservación y manejo de los recursos por parte de la población.

○ Otras demandas: agrícola, industrial, grandes parques

Resulta de gran interés comprender los potenciales conflictos entre múltiples usuarios. El estudio realizado supone que los derechos estarán disponibles. En otras palabras que existirán interesados en vender sus derechos de aprovechamiento. No obstante, el cambio climático puede afectar a todos de una manera que las decisiones de la mayoría de los agentes sean de compra y, en ese sentido, la información de precios y disponibilidad actuales sea bastante imperfecta para predecir los impactos del cambio global.

● Análisis integral de cuenca

Los efectos sinérgicos y retroalimentaciones entre los diferentes componentes de una cuenca tanto desde el punto de vista físico como humano, especialmente en un escenario de cambio global fuerzan a tener una visión integral en el análisis de estos impactos. Es por ello que se propone al largo plazo el desarrollo de modelos integrales de cuenca. Este modelo debe contener los componentes esenciales del ciclo hidrológico incluido aspectos tan relevantes en esta cuenca como los procesos de acumulación y derretimiento de nieves o glaciares, o de interacción con acuíferos. Pero también debe ser capaz de representar el componente humano con las respectivas demandas dinámicas y la operación de obras de infraestructura existentes o proyectadas.

BIBLIOGRAFIA

CEPAL (2009). “La economía del Cambio Climático en Chile. Síntesis.” 88 pp.

DGA (2003). “Diagnóstico y Clasificación de los Cursos de Agua según objetivo de Calidad, Cuenca del Río Maipo”. 117 pp.

DGA (2004). “Evaluación de los Recursos Hídricos Superficiales en la Cuenca del Río Maipo, Informe Técnico”. 203 pp.

DGF-CONAMA (2007). “Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI”

Ingeniería Universidad de Chile (2009), “Análisis de vulnerabilidad de los recursos hídricos de Chile frente a escenarios de cambio climático”. En: Análisis de Vulnerabilidad del Sector Silvoagropecuario, Recursos Hídricos y Edáficos de Chile Frente a Escenarios de Cambio Climático. Segunda Comunicación Nacional 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 Magister en Economía Agraria. Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile. 44 pp.

Wilks (1995). “Statistical Methods in the Atmospheric Sciences: An Introduction”. Academic Press, 467 pp.