

gesti^onare

Fuentes hídricas para sostener el crecimiento de Chile

Disponibilidad de aguas, demanda potencial y disposición a pago

Orlando Acosta Lancellotti

Webinar Asociación Chilena de Derecho de Aguas
24 de agosto de 2023

Preparándote para los desafíos hídricos del futuro



Crecimiento económico de un país y demanda de agua: ¡relación directa!



29.000 USD

4.500 USD



¿Cuánta agua consume Chile actualmente?

el Chile de los 29.000 USD per cápita (PPC)

Aproximadamente 350 m³/s (11.000 hm³/año)

Para comprender la cifra (1):

Chile : 11.000 hm³/año

España : 32.000 hm³/año

California : 51.000 hm³/año



¿De qué fuentes obtenemos ese caudal?

Fuentes superficiales:	~70%
Fuentes subterráneas:	~28%
Tecnología del agua (desalación/depuración):	~2%



Estimación del uso de agua subterránea en países seleccionados y porcentaje respecto del uso total de agua

Estado	Caudal (m ³ /s)	% del total
California	748	46%
Arabia Saudí	665	85%
Brasil	558	--
España	221	22%
Egipto	152	7%
Libia	136	95%
Chile	104	28%

Fuente: Acosta (2021). Revisión del concepto de sustentabilidad de la explotación de aguas subterráneas en el contexto normativo chileno.



FMI PIB per cápita ...

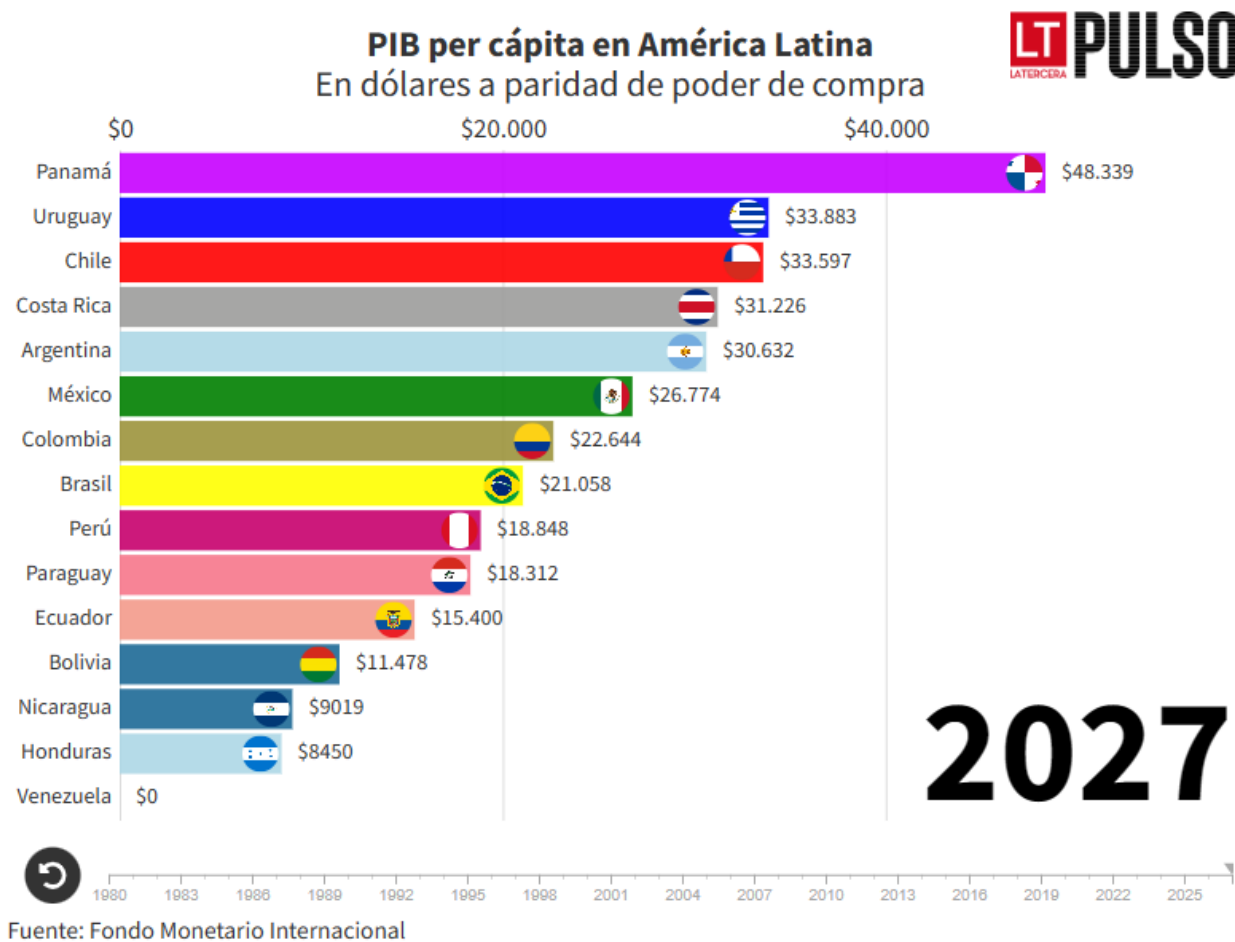
FMI: PIB per cápita de Chile llegará a US\$30 mil en 2024,

Según el organismo internacional, el país cerrará 2023 con un PIB per cápita en dólares corrientes a paridad de poder de compra de US\$29.613 y el próximo año superará la barrera de los US\$30 mil, meta que ha sobrepasado solo uno de cada 3 países en el mundo. A nivel global, liderará por primera vez Irlanda. De todas formas, en el cálculo a precios constantes -ajustado por inflación- el PIB per cápita de Chile mostraría su primera caída desde 2020.



Bandera Bicentenario

En 2027 el PIB pc alcanzará 34.000 USD y 40.000 en la próxima década



¿Cuánta agua adicional necesitará Chile en la próxima década? el Chile de 40.000 USD per cápita (PPC)

En 2035, el Chile de 21 millones de habitantes, PIB de 460 mil MMUSD, PIB pc de 40.000 USD, necesitará al menos: **50 m³/s adicionales de agua dulce**

¿De dónde la obtendremos?



¿De las fuentes actuales?:



difícilmente desde el río Maipo al norte

Cuenca	Oferta hídrica (85% P.E.) (L/s/km ²)
Lluta	≤ 1
San José	
Salado	
Copiapó	
Huasco	
Elqui	
Limarí	
Choapa	
Petorca	
La Ligua	5 - 10
Aconcagua	
Maipo	
Rapel	15
Maule	
Biobío	>25

Fuente: Gestionare Consultores; adaptado de DIRPLAN-INH (2016)

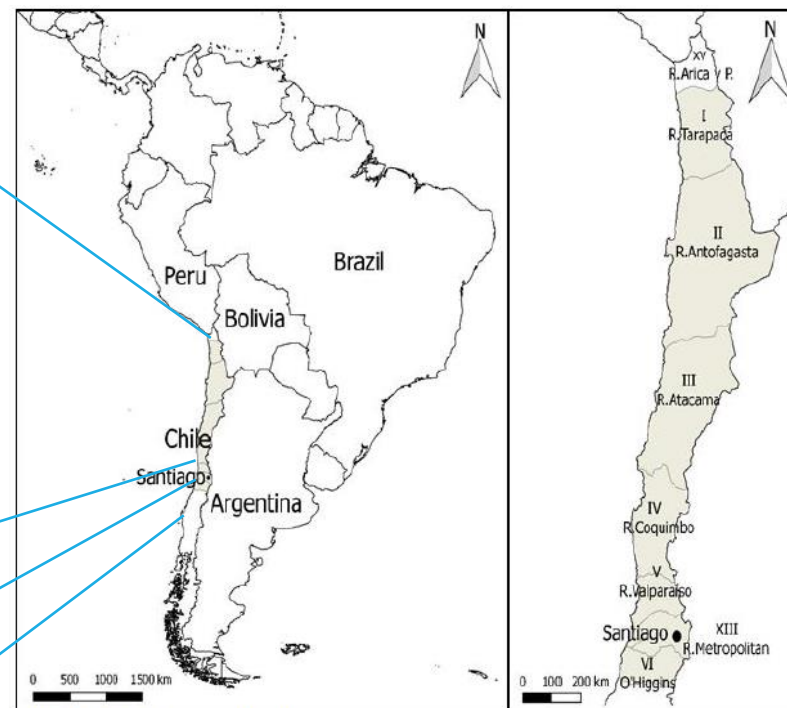


Fig. 12.4. Locations of Chile's mining regions

Fuente: Acosta, 2018. Water and Mining. In Water Policy in Chile. Editor Guillermo Donoso.



En la mitad norte de Chile la cuencas “funcionan” en años normales (50%) pero entran en “falla” cuando sobrevienen años secos (85%)

Balance hídrico de algunas cuencas de Chile¹

Cuenca	Balance Hídrico (85% - 50%)	Situación hídrica
Lluta	-0,3 0,20	Déficit intermitente
San José	-1,08 -0,55	Déficit estructural
Salado	-0,23 0,17	Déficit estructural
Copiapó	-1,12 0,75	Déficit estructural
Huasco	-1,78 1,34	Déficit estructural
Elqui	1,34 6,13	Superávit
Limarí	-5,23 0,29	Déficit estructural
Choapa	0,83 8,98	Superávit
Petorca	-1,79 0,83	Déficit estructural
La Ligua	-3,44 0,26	Déficit estructural
Aconcagua	-2,25 16,85	Déficit intermitente
Maipo	-41,46 16,11	Déficit intermitente
Rapel	107,74 182,24	Superávit absoluto
Maule	123,60 356,30	Superávit absoluto
Biobío	158,70 522,70	Superávit absoluto

Fuente: INH-DIRPLAN, 2016.

¹: la demanda considerada en el balance hídrico incluye el caudal ecológico

La mitad norte de Chile es naturalmente (semi-)desértica con una disponibilidad hídrica natural inestable en el LP. Esto constituye en una limitante para el desarrollo del enorme potencial agrícola y minero de esos territorios

Alternativas para aumentar la disponibilidad de agua al 2035

→ Gestión optimizada de la escorrentía superficial y subterránea de la cuenca:

(i) embalses y, (ii) recarga de acuíferos utilizando el propio cauce del río y la red de canales existente.

→ Incrementar la eficiencia de conducción y utilización del agua:

(i) control de pérdidas de conducción (agricultura; sanitarias), (ii) regulación intrapredial y, (iii) sistemas de riego eficientes

→ Incrementar el uso de agua proveniente de tecnología del agua

(i) reúso del agua trabajada (servida) y (ii) desalación de agua de mar.

→ Trasvase de agua desde cuencas excedentarias (p.e. ríos Valdivia, Maule, Biobío, Toltén)

Nótese que en general implican: -Inversiones públicas y privadas importantes -Aprobación social y política -Un agua a mayor costo (¿quién paga la cuenta?)



Potencial de las alternativas para aumentar la disponibilidad hídrica al 2035

<u>Alternativas</u>		<u>Caudal adicional (2035)</u> <i>(Idealización optimista en plazos de desarrollo)</i>	
Desalación de agua de mar	→	~10 m ³ /s	Caudal +
Incrementar el reúso del aguas servidas	→	~20 m ³ /s	
Embalses	→	~25 m ³ /s	
Incrementar la eficiencia de riego	→	~30 m ³ /s	
Trasvase de agua desde nodos de cuencas medias	→	~100 m ³ /s	
Trasvase de agua desde nodos de desembocadura	→	~1000 m ³ /s	

Nota: Acosta O., 2019. "Evaluación de Proyecto de una Carretera Hídrica Nacional – Fase 1: disponibilidad de aguas, demanda potencial y disposición a pago", en XXI Jornadas de Derecho y Gestión de Aguas Seguridad Hídrica para Chile, Santiago, 5 de septiembre de 2019. Cifras referenciales expresadas como caudal medio anual. El caudal de desalación supone construir cuatro plantas desaladoras de 2,5 m³/s como la más grande de Sudamérica en diez años. El caudal de reúso supone reutilizar el 100% del agua de los emisarios y un 33% del agua servida que se vierte en cauces. El caudal de embalses supone construir la totalidad de los 26 embalses del actual plan de embalses y se obtuvo como $V_{total} \times 0,75 \times 0,3$ (75% ocupación interanual de LP; 30% de desembalse anual). El caudal de eficiencia supone aumentar un 5% la eficiencia de riego de todo el sector agrícola nacional. Los caudales de trasvase se concluyen del estudio de U. Chile-CORFO.

¿Todos los sectores de la economía pueden pagar el costo de estas alternativas?

NO!



Ejemplo del costo unitario de agua desalinizada a diferentes alturas geográficas

Costo del m³ agua desalinizada en diferentes escenarios (cifras referenciales)

Proyecto	OPEX ¹ (USD/m ³)	CAPEX+OPEX ¹ (USD/m ³)
Costero a 0 m de altura	0,7	1,1
30 km al interior a 150 m de altura	0,8	1,3
100 km al interior a 500 m de altura	1,3	2,2
150 km al interior a 1000 m de altura	1,7	2,9

Fuente: Gestionare Consultores. Elaboración propia.

¹: incluye desalación e impulsión.



Aproximación al costo del agua desalada para el sector agrícola

Costo anual agua desalada por hectárea (cifras referenciales)

Agua subterránea¹

Proyecto	OPEX (USD/ha)	CAPEX+OPEX (USD/ha)	OPEX (USD/ha)	CAPEX+OPEX (USD/ha)
Uva de mesa (Copiapó)	17.000	29.000	1.000	4.000
Paltos (La Calera)	9.500	16.000	1.200	4.800
Tomate (La Calera)	5.000	8.000	600	2.400
Tomate (Tamarugal-Pica)	10.000	17.000	600	2.400

Fuente: Gestionare Consultores. Elaboración propia.

¹: Opex 0,1 USD/m³; Opex+Capex 0,4 USD/m³. Eugenio Celedón, 2013. Una Política Hídrica a Largo Plazo. Seminario Internacional ALHSUD Y CIDERH.



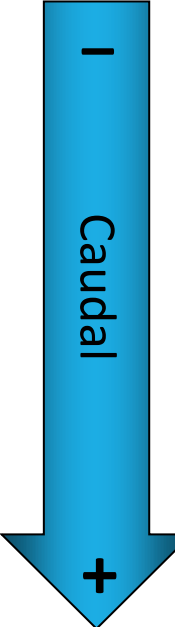
Disposición a pagar por el agua por sector productivo

Disposición a pagar por el agua por sector productivo (USD/m³)

Sector	Disposición a pagar	Capacidad máxima de pago
Minería - Industrial	0,40 – 3,00	--
Sanitario	0,40 – 0,85	--
Agricultura	0,10 – 0,35	0,20 (0,05 – 0,36)



Chile debe disponer de un caudal adicional de 50 m³/s para ser capaz de sostener por lo menos el crecimiento tendencial de aquí al año 2035

<u>Alternativas</u>		<u>Caudal adicional (2035)</u> <i>(Idealización optimista en plazos de desarrollo)</i>	
Desalación de agua de mar	→	~10 m ³ /s	
Incrementar el reúso del aguas servidas	→	~20 m ³ /s	
Embalses	→	~25 m ³ /s	
Incrementar la eficiencia de riego	→	~30 m ³ /s	
Trasvase de agua desde nodos de cuencas medias	→	~100 m ³ /s	
Trasvase de agua desde nodos de desembocadura	→	~1000 m ³ /s	

Nota: Acosta O., 2019. "Evaluación de Proyecto de una Carretera Hídrica Nacional – Fase 1: disponibilidad de aguas, demanda potencial y disposición a pago", en XXI Jornadas de Derecho y Gestión de Aguas Seguridad Hídrica para Chile, Santiago, 5 de septiembre de 2019. Cifras referenciales expresadas como caudal medio anual. El caudal de desalación supone construir cuatro plantas desaladoras de 2,5 m³/s como la más grande de Sudamérica en diez años. El caudal de reúso supone reutilizar el 100% del agua de los emisarios y un 33% del agua servida que se vierte en cauces. El caudal de embalses supone construir la totalidad de los 26 embalses del actual plan de embalses y se obtuvo como $V_{total} \times 0,75 \times 0,3$ (75% ocupación interanual de LP; 30% de desembalse anual). El caudal de eficiencia supone aumentar un 5% la eficiencia de riego de todo el sector agrícola nacional. Los caudales de trasvase se concluyen del estudio de U. Chile-CORFO.

gesti^onare

Anexo

Preparándote para los desafíos hídricos del futuro



“Evaluación de Proyecto de un Carretera Hídrica Nacional - Fase 1: Inventario de la Oferta y Demanda de Agua a lo Largo de la Geografía Chilena”

(Caracterización Detallada de la Disponibilidad Hídrica, Demanda Potencial, y Disposición a Pago por el Agua)

Estudio con carácter de bien público financiado por CORFO (junio 2019)

Estudio elaborado por el Laboratorio de Análisis Territorial (LAT) en asociación con el Advanced Mining Technology Center (AMTC) de la Universidad de Chile, en el contexto del Programa de Fomento “**Programa Hídrico para la Competitividad Meso-Región Norte Chico**”, financiado por CORFO.

Laboratorio de Análisis Territorial (LAT)

Andrés de la Fuente D. (Jefe de Proyecto)
Karla Astorga V. (Coordinadora de Proyecto)

Hilda Moya J.
José Miguel Valdés N.
Katherinne Silva U.
Cristián Escobar A.
Matías Roa C.
Felipe Abellá S.
Nicolás Magner P.

Advanced Mining Technology Center (AMTC)

Miguel Lagos Z.
Dimitri Dionizis R.
Francisco Jara Á.
Felipe Saavedra M.

Contraparte Técnica (CORFO)

Orlando Acosta L. (Director Programa)
Lino Lizarde L. (Coordinador Programa)



UNIVERSIDAD DE CHILE
Facultad de Ciencias Agronómicas
Departamento de Ciencias Ambientales y
Recursos Naturales Renovables



Organismos colaboradores:



Objetivos del estudio

1. Realizar un inventario de la oferta hídrica excedentaria en el sur de Chile.
 - a) Entre la Región de O'Higgins y la Región de Los Lagos.
 - b) Oferta jurídica, y oferta efectiva.
 - c) Agrupada en **nodos** cabecera, nodos cuenca media, y nodos desembocadura (**nodos de captación**).

2. Realizar un inventario de la demanda potencial máxima de agua en el norte al 2050.
 - a) Entre la Región de Arica y Parinacota, y la Región de Valparaíso.
 - b) De todos los sectores usuarios.
 - c) Agrupada racionalmente en **nodos** de demanda claramente identificados (**nodos de entrega**).

3. Determinar las disposición a pago por el agua en la zona norte.
 - a) Desagregada por sector usuario y por **nodo**.

Oferta hídrica

Cuencas seleccionadas para el análisis detallado⁽¹⁾: Maule, Biobío, Imperial, Toltén, Valdivia, Bueno



a) Nodos de cabecera:

No existirían excedentes hídricos, ni físicos ni jurídicos en el conjunto de las cuencas.

a) Nodos cuenca media:

Oferta hídrica total del conjunto de las cuencas excedentarias sería de naturaleza discontinua.

Caudal seguro medio 375 m³/s durante 4 meses invernales, los que serían aportados principalmente por el río Valdivia y Maule, en menor medida por el Imperial. Los ríos Biobío, Toltén y Bueno, no presentarían oferta excedentaria permanente.

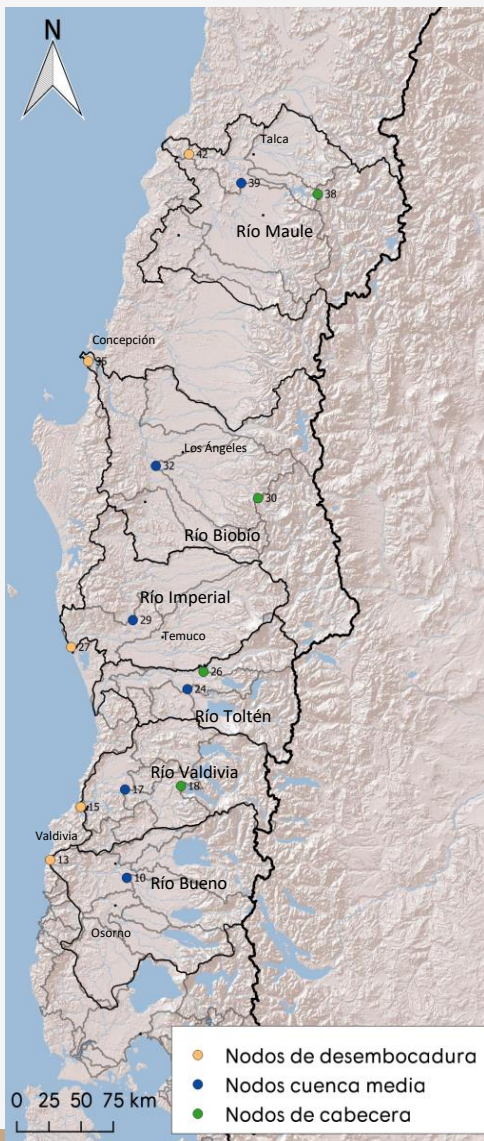
Oferta total integrada en los nodos de las secciones medias para dos probabilidades de excedencia en las cuencas excedentarias (m³/s)

Oferta	Tipo	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Permanente (P.E. 85%)	De hecho	0	0	0	0	50	350	500	400	250	50	0	0
	Jurídica	0	0	0	0	0	350	550	450	250	0	0	0
Eventual (P.E. 50%)	De hecho	0	0	0	0	250	1300	1450	1100	700	200	100	50
	Jurídica	0	0	0	0	150	750	550	400	200	100	50	0

(Nota): se asume como valor referencial el menor valor de ambas ofertas permanentes dadas las incertidumbres asociadas en su estimación.

(1): Las cuencas Rapel, Mataquito, e Itata fueron descartadas por ausencia de oferta excedentaria. Las cuencas Maullín, Puelo, Yelcho fueron descartadas por falta de registros hidrológicos históricos.

Cuencas seleccionadas para el análisis detallado⁽¹⁾: Maule, Biobío, Imperial, Toltén, Valdivia, Bueno



c) Nodos de desembocadura:

Oferta hídrica total del conjunto de las cuencas excedentarias sería de naturaleza continua, intra e interanualmente

Caudal seguro promedio del período seco (ene a abr) $>240 \text{ m}^3/\text{s}$ y de $2200 \text{ m}^3/\text{s}$ de mayo a diciembre, los que serían aportados principalmente por los ríos Biobío, Toltén y Maule.

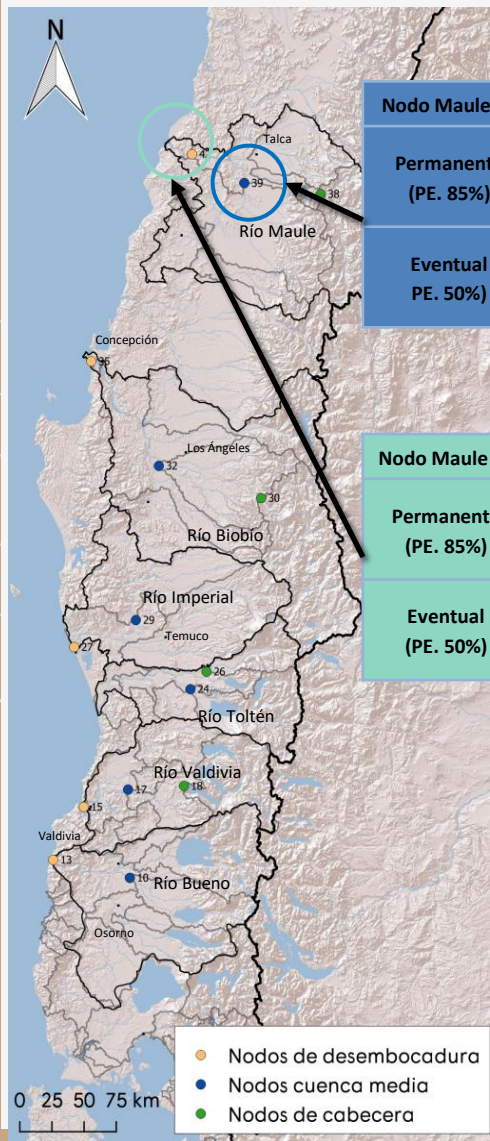
Oferta total integrada en los nodos de desembocadura para dos probabilidades de excedencia en las cuencas excedentarias (m^3/s)

Oferta	Tipo	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Permanente (P.E. 85%)	De hecho	450	350	400	550	1100	3050	3550	3450	2850	1650	1150	650
	Jurídica	350	200	150	250	1000	3350	4050	3650	2750	1450	1050	650
Eventual (P.E. 50%)	De hecho	650	500	400	900	2150	4350	4250	3600	3100	2350	1650	1150
	Jurídica	350	300	250	550	1650	3700	2500	2150	1500	1200	850	800

(Nota): se asumen como valor referencial el menor valor de ambas ofertas dadas las incertidumbres asociadas en su estimación.

(1): Las cuencas Rapel, Mataquito, e Itata fueron descartadas por ausencia de oferta excedentaria. Las cuencas Maullín, Puelo, Yelcho fueron descartadas por falta de registros hidrológicos históricos.

Cuencas seleccionadas para el análisis detallado⁽¹⁾: Maule, Biobío, Imperial, Toltén, Valdivia, Bueno



Nodo Maule 39	Escenario	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Permanente (PE. 85%)	De hecho	0	0	0	0	20	40	170	100	60	10	0	0
	Jurídica	0	0	0	0	0	50	230	160	45	0	0	0
Eventual (PE. 50%)	De hecho	0	0	0	0	70	340	460	340	220	40	20	0
	Jurídica	0	0	0	0	0	300	190	160	40	0	0	0

Nodo Maule 42	Escenario	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Permanente (PE. 85%)	De hecho	30	20	50	100	160	210	240	170	230	150	100	60
	Jurídica	0	0	0	0	0	140	450	270	160	120	25	30
Eventual (PE. 50%)	De hecho	110	70	10	160	300	450	680	520	470	310	250	180
	Jurídica	20	0	0	0	220	750	520	430	240	70	170	170

(P.E. 85%)	Jurídica	350	200	150	250	1000	3350	4050	3650	2750	1450	1050	650
Eventual (P.E. 50%)	De hecho	650	500	400	900	2150	4350	4250	3600	3100	2350	1650	1150
	Jurídica	350	300	250	550	1650	3700	2500	2150	1500	1200	850	800

(Nota): se asumen como valor referencial el menor valor de ambas ofertas dadas las incertidumbres asociadas en su estimación.

(1): Las cuencas Rapel, Mataquito, e Itata fueron descartadas por ausencia de oferta excedentaria. Las cuencas Maullín, Puelo, Yelcho fueron descartadas por falta de registros hidrológicos históricos.

ería de naturaleza continua, intra e
 200 m³/s de mayo a diciembre, los
 que serían aportados principalmente por los ríos Biobío, Toltén y Maule.
 presencia en las cuencas excedentarias (m³/s)

	ago	sep	oct	nov	dic
	3450	2850	1650	1150	650

Estimación referencial de precios de venta volumétrica del agua excedentaria

En una primera aproximación se obtuvieron precios “referenciales” de venta de volúmenes derivándolos desde el costo oportunidad del agua actualmente utilizada con fines agrícolas en las cuencas excedentarias, los cuales se ubicaron en el rango 0,04 – 0,14 USD/m³.

Debe considerarse que estos valores referenciales son aplicables a caudales que estén efectivamente siendo utilizados o que tengan una posibilidad cierta de ser utilizados en agricultura en las cuencas excedentarias.

De lo contrario, cabría esperar que los precios de venta *spot* sean significativamente más bajos que los valores señalados anteriormente, tal vez hasta un orden de magnitud inferiores **(0,004 – 0,014 USD/m³)** en el caso de aguas sin costo de oportunidad plausible en el mediano plazo, aunque esta última apreciación es meramente estimativa (este párrafo corresponde a una opinión personal de O. Acosta).

Demanda hídrica

Estimación de la demanda potencial máxima de agua al 2050 (sectores minero, industrial, sanitario y agrícola)

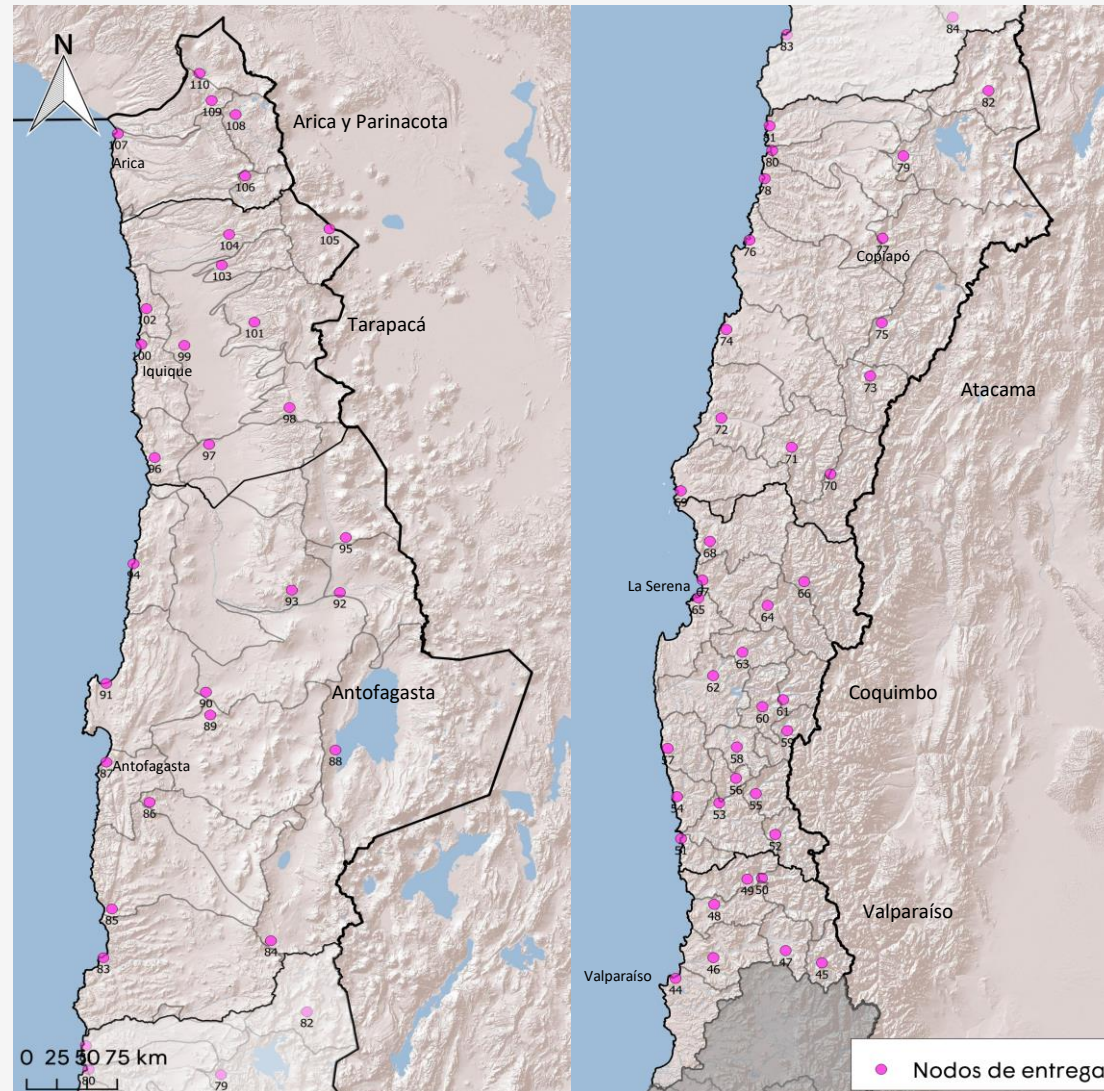
- El sector agrícola sería con diferencia el principal usuario en términos de volumen
- Se tendrían entre 370 mil y 880 mil nuevas hectáreas (comentario O. Acosta: cifras altas; se sugiere revisarlas)

Superficie agrícola actual bajo riego al año 2015 y proyectada al año 2050 en los escenarios de crecimiento conservador y optimista de la matriz frutícola seleccionada.

Región	Superficie (ha)		
	Actual (2015)	Adicionada al 2050	
		Conservador	Optimista
Arica y Parinacota	5.223	40.070	57.095
Tarapacá	1.023	4.106	26.842
Antofagasta	1.835	9.920	48.543
Atacama	14.426	95.939	403.756
Coquimbo	56.251	48.838	169.196
Valparaíso	79.261	167.273	173.537
Total	158.018	366.148	878.968

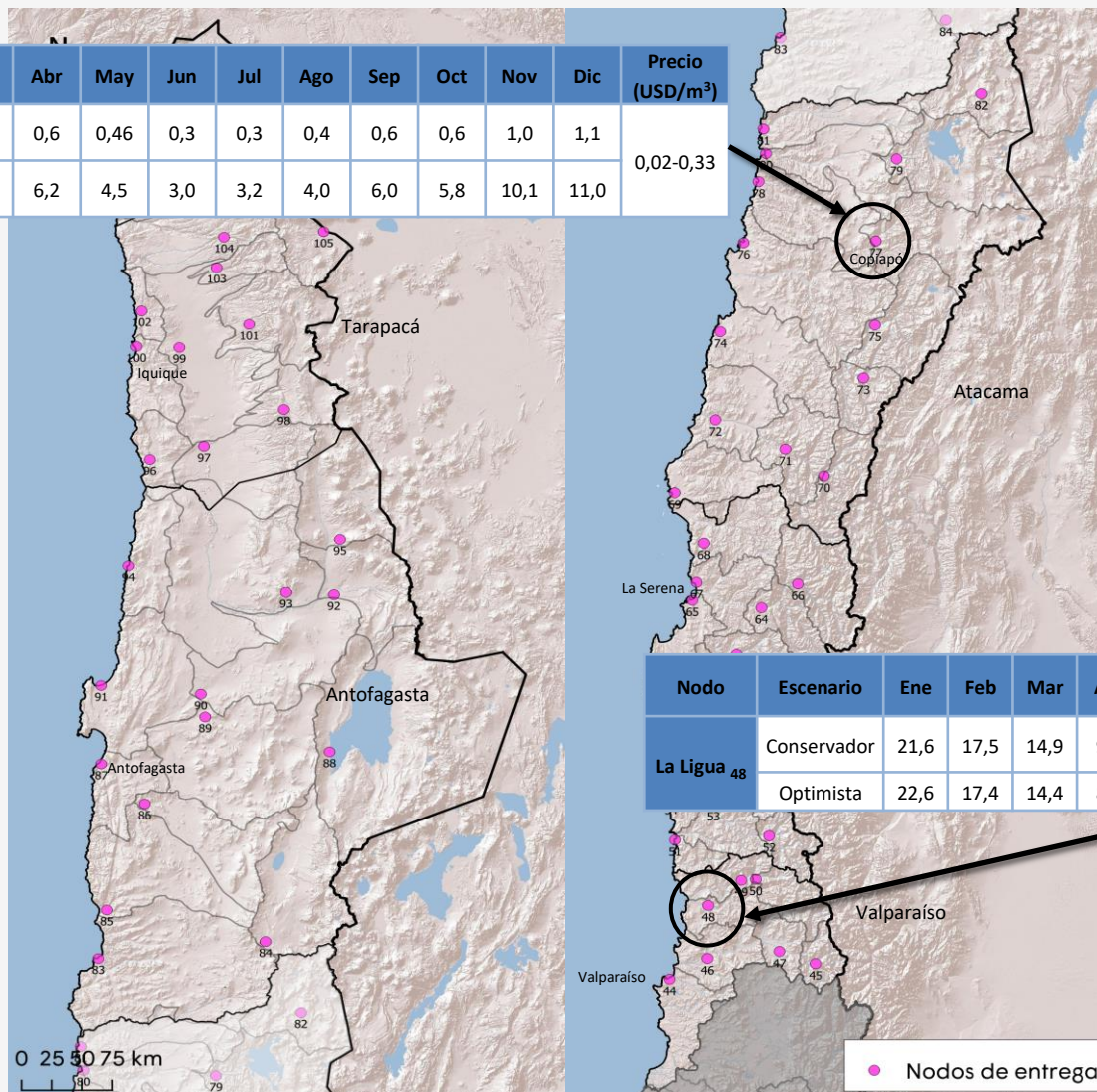
El sector agrícola representa la mayor parte de la demanda potencial (90% verano, 60% invierno)

Potenciales **nodos de entrega** en zona centro-norte



Potenciales nodos de entrega en zona centro-norte

Nodo	Escenario	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Precio (USD/m ³)
Copiapó 77	Conservador	1,1	0,9	0,9	0,6	0,46	0,3	0,3	0,4	0,6	0,6	1,0	1,1	0,02-0,33
	Optimista	10,7	9,0	8,4	6,2	4,5	3,0	3,2	4,0	6,0	5,8	10,1	11,0	



Nodo	Escenario	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Precio (USD/m ³)
La Ligua 48	Conservador	21,6	17,5	14,9	9,6	4,1	0,3	0,3	3,4	8,6	8,8	19,3	22,2	0,06-0,42
	Optimista	22,6	17,4	14,4	8,9	3,3	0,3	0,3	2,7	8,0	8,9	19,5	23,4	

Estimación de la demanda potencial máxima de agua al 2050 (sectores minero, industrial, sanitario y agrícola)

Demanda potencial total máxima en el norte de Chile al 2050

- Escenario conservador: caudales mensuales en invierno del orden de 70 m³/s y en verano cercanos a 370 m³/s.
- Escenario optimista las demandas mensuales invierno de 130 m³/s y en verano de 680 m³/s

Demanda potencial total máxima de agua a escala mensual proyectada al año 2050 en la zona norte impulsada por la entrada en operación de nuevas fuentes hídricas sin limitaciones de acceso (m³/s).

Escenario	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Conservador	365	297	256	172	102	69	69	97	165	175	325	375
Optimista	669	541	474	320	192	130	132	190	301	319	592	688



gesti^onare