

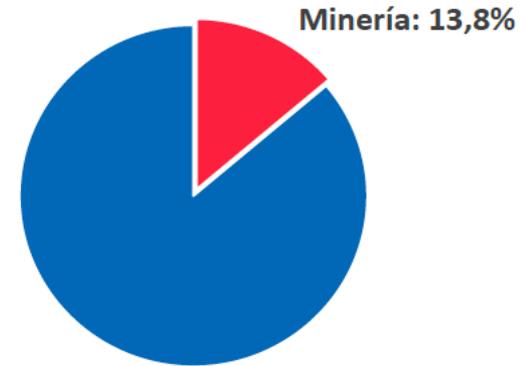
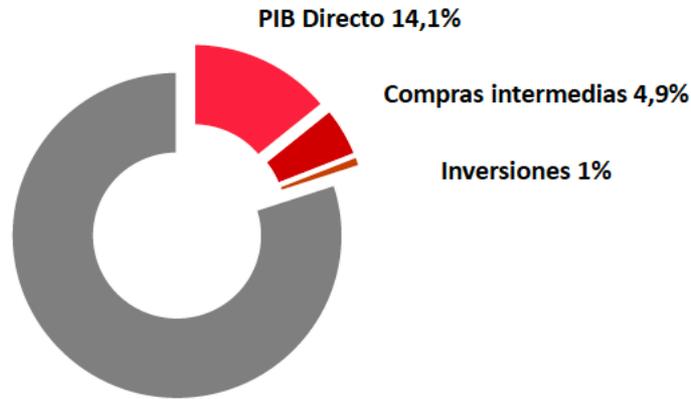
Minería del Cu en Chile

Hidrogeología Aplicada a la Minería y Medio Ambiente

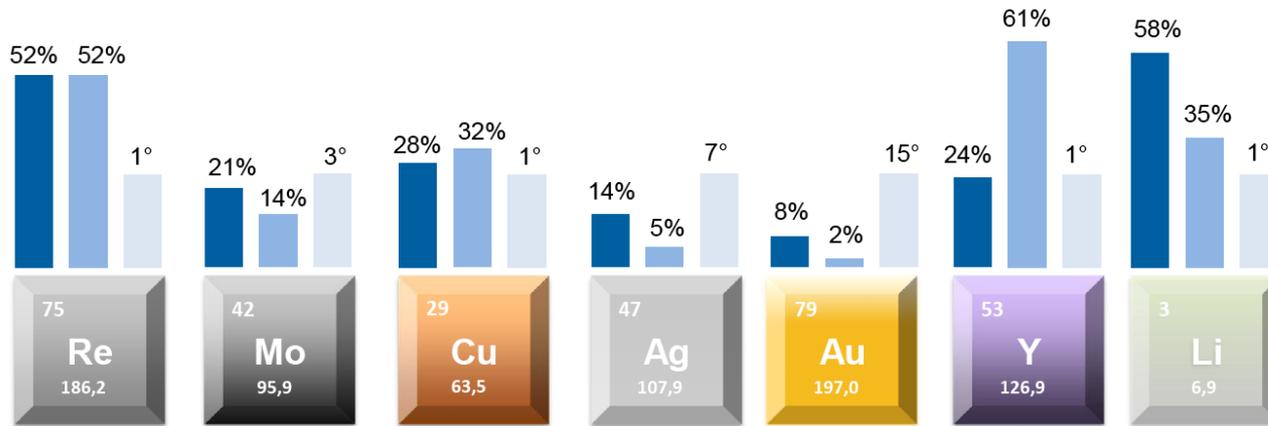
Módulo 7: Contaminación de Recursos Hídricos

Dr. Manuel A. Caraballo

Entre los años 2008 y 2015 la minería explica de manera directa e indirecta el 20% del PIB sectorial de Chile.



En los últimos 20 años, la minería en Chile ha aportado el 13,8% del presupuesto fiscal.



➤ Chile es líder mundial en producción de Cu, Re, Y y Li, ocupando al igual una posición destacada en la producción de Mo, Ag y Au.

■ % Reservas mundiales ■ % Producción mundial
 ■ Ranking mundial de producción

- Los procesos mineros requieren cantidades importantes de agua, en particular en las etapas de procesamiento.



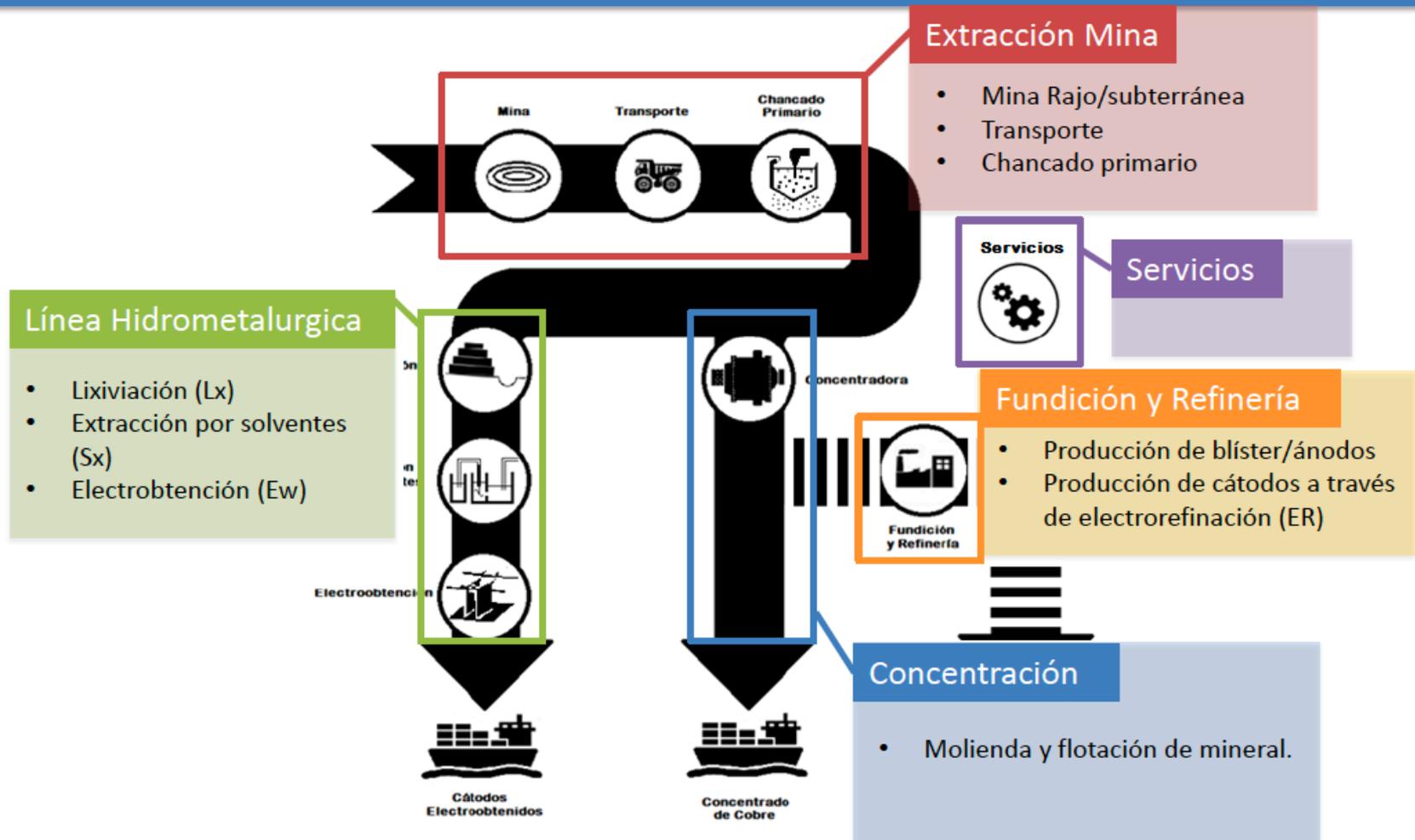
- Por otra parte, las labores mineras interceptan a menudo aguas subterráneas, modifican las condiciones de escurrimiento superficial y la permeabilidad de los terrenos.



- Además, generan grandes cantidad de residuos que generalmente quedan expuestos a una meteorización acelerada.



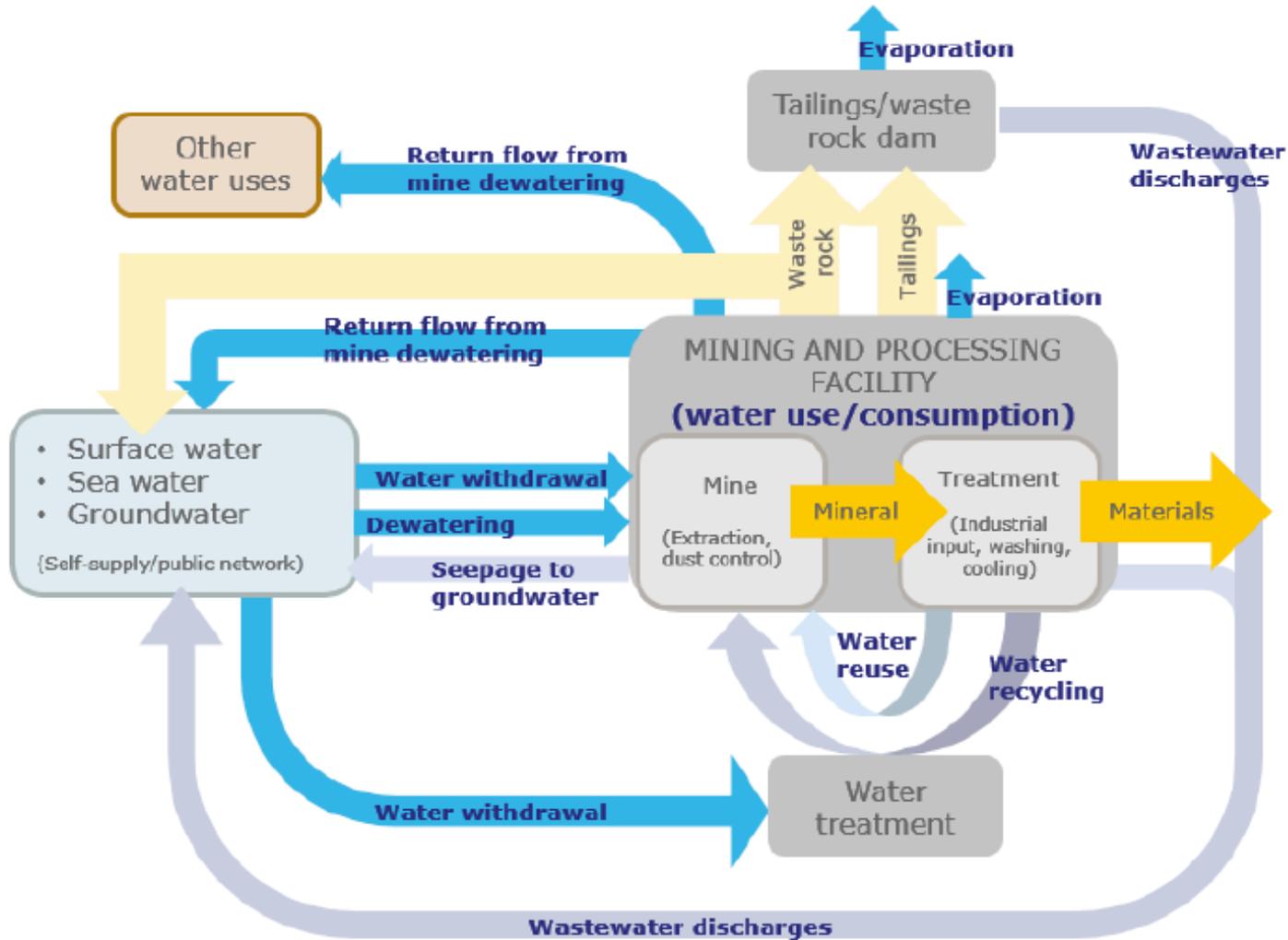
PROCESO PRODUCTIVO DE LA MINERÍA DEL COBRE



Comisión Chilena del Cobre



Figure 8: Use of water in non-energy extractive industries (source: Vidal Legaz et al. (2018))



Fuente: Vidal-Legaz, B., Torres de Matos, C., Latunussa, C., Bernhard, J.H. (2018): Non-energy, non-agriculture raw materials production: data to monitor the sector's water use and emissions to water, EUR 29424 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISSN 1831-9424v



**Extracción Mina
(subterránea o rajo)**



**Pirometalurgia
(sulfuros)**

**Hidrometalurgia
(óxidos, sulfuros baja le)**

**Concentración
(flotación)**



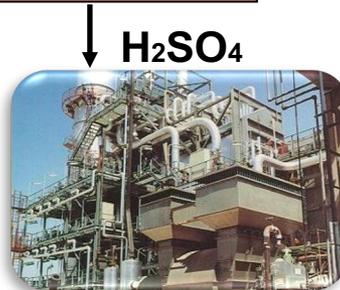
**Filtración y
Secado**



Fundición — Planta Acido

Electrorefinación

Cátodos



**Curado y
Aglomeración**

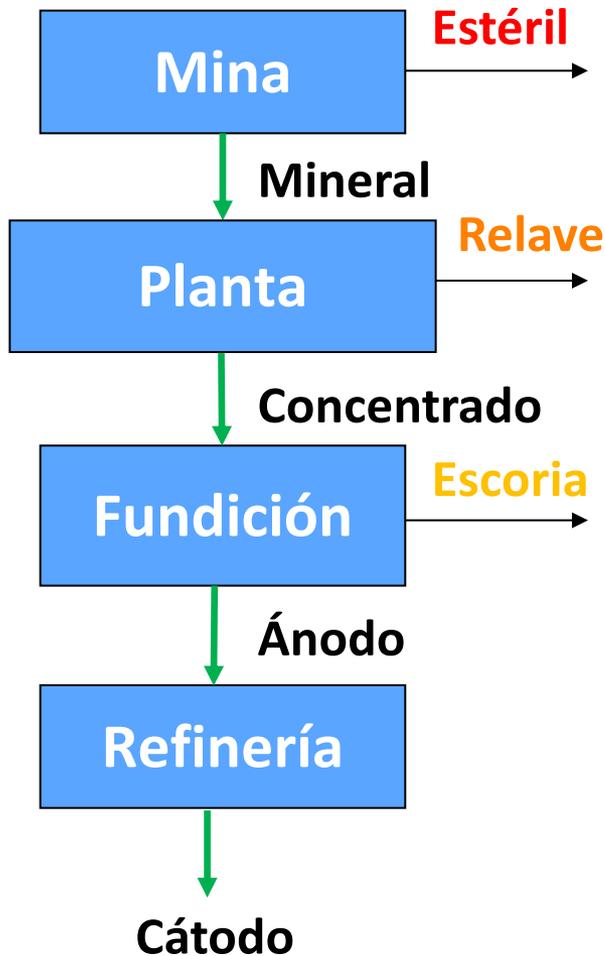


Lixiviación

SX

EW

Cátodos



Por cada tonelada de Cobre producida (flotación de sulfuros):

- Ley de Cu en mineral alrededor de 1,0% Cu
- Por 1 ton de mineral, cerca de 2 t de estériles removidos: la razón crece con la profundidad del pit
- Recuperación de entre 85 y 90% en flotación
- Composición del concentrado: 30%Cu, 30%S and 30%Fe
- En la fundición, el Fe es eliminado en la escoria ($\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$) y el S como SO_2
- SO_2 captado (entre 90 y 95%) es transformado en H_2SO_4

1 t Cu $\xrightarrow{95\% \text{ Rec. Fundicion}}$ 1,053 t Cu $\xrightarrow{90\% \text{ Rec. Flotación}}$ 1,170 t Cu $\xrightarrow{\text{Ley } 1\%}$ 117 t Mineral Extraído

Mina

Estéril

117 t x 2 = **234 t de material estéril**

Mineral

Planta

Relave

1 t Cu $\xrightarrow{95\% \text{ Rec. Fundicion}}$ 1,053 t Cu $\xrightarrow{30\% \text{ Cu en Conc.}}$ 3,5 t Concentrado

117 t - 3,5 t = **113,5 t de relaves** (peso seco)

Concentrado

Fundición

Escoria

3,5 t Conc. $\xrightarrow{30\% \text{ Fe en Conc.}}$ 1,05 t Fe $\xrightarrow{40\% \text{ Fe en Escoria}}$ **2,63 t escoria**

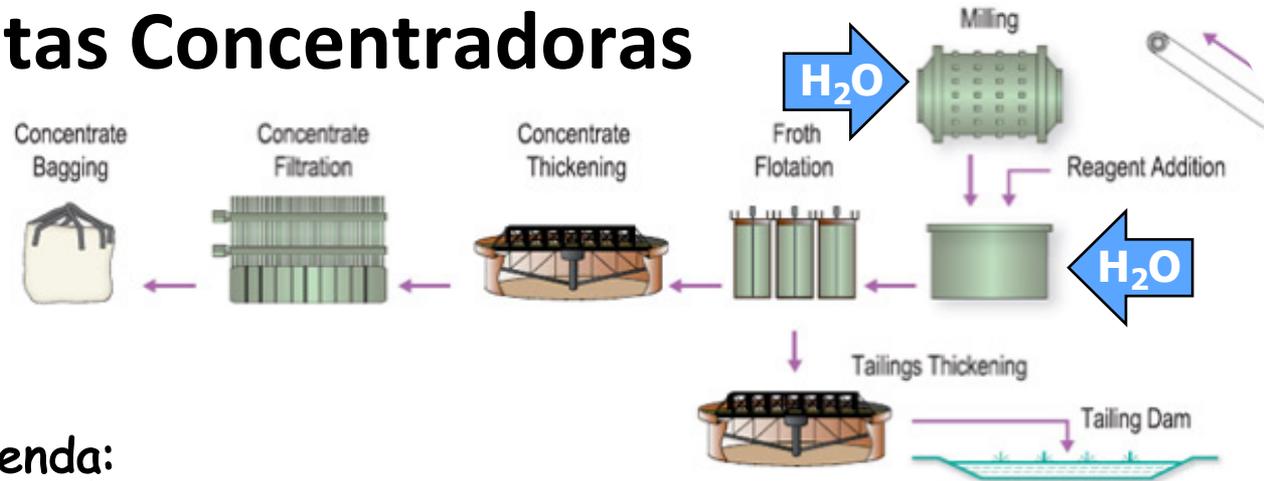
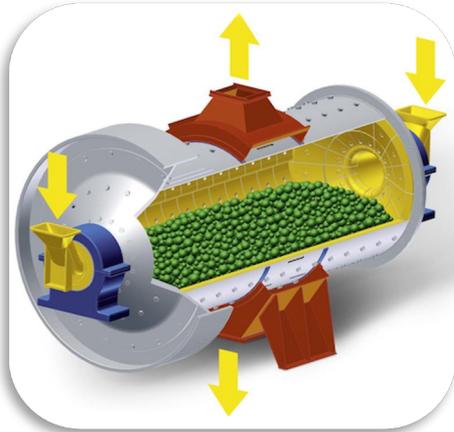
Ánodo

Refinería

Cátodo

1t de Cu = 350t de residuos minerales

Plantas Concentradoras



Molienda:

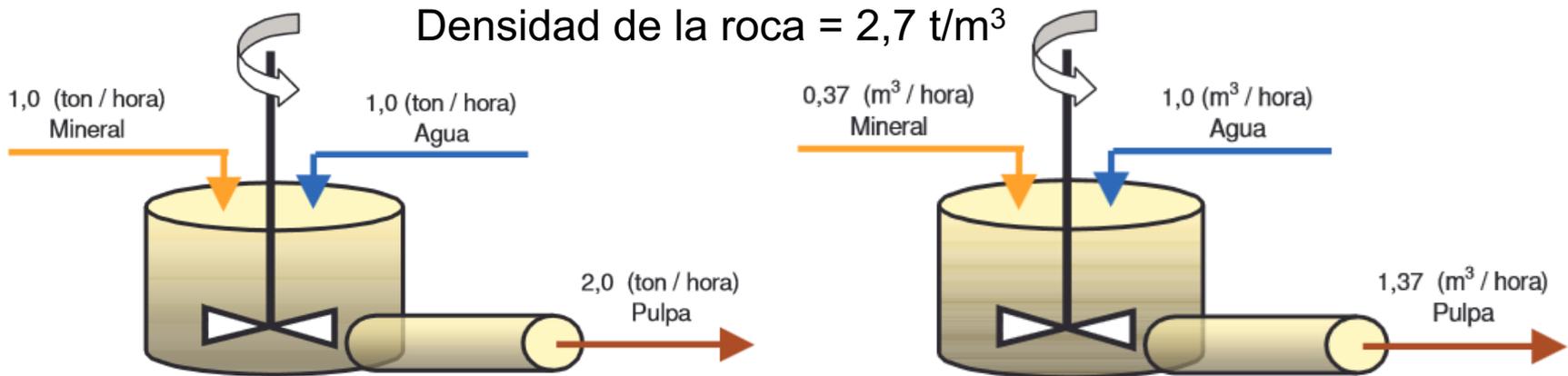
- Molinos de bolas: se trabaja con densidad de pulpa de 65 a 80% de sólidos
- Molinos SAG: 60 a 65% de sólidos
- Se requiere controlar la corrosión de bolas, barras y corazas; adición de cal

Flotación:

- Flotación rougher: 30 a 45% sólidos
- Limpieza: < 40%
- Adición de cal / control de pH / pH alcalino para deprimir la pirita



Relaves



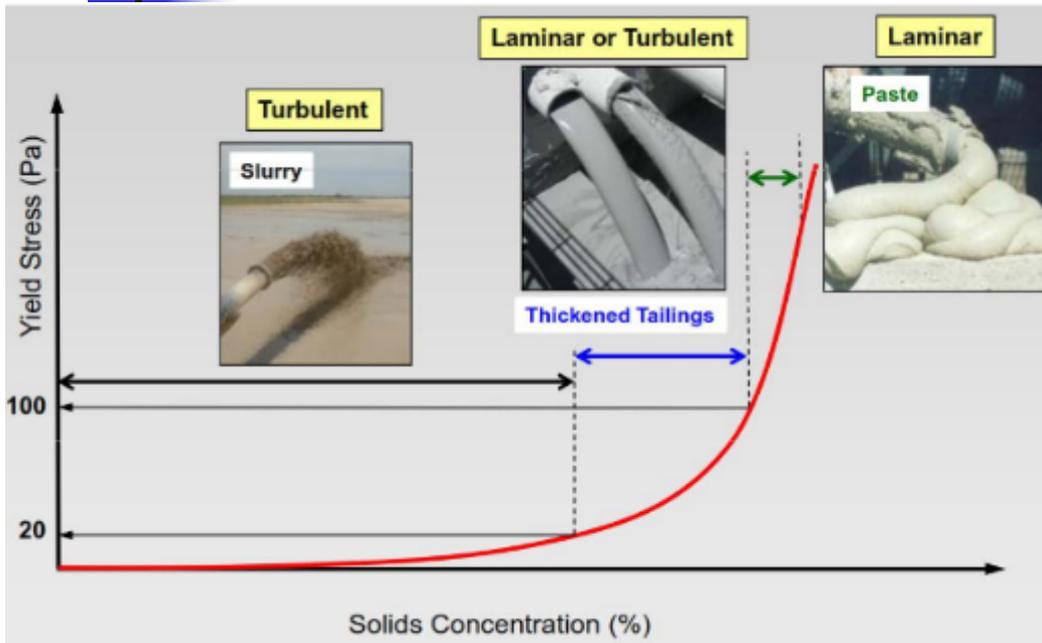
Concentración de Sólidos en Peso (CP):

$$C_p = \frac{\text{Flujo másico de mineral}}{\text{Flujo másico de pulpa}} * 100 = \frac{1}{2} * 100 = 50 \%$$

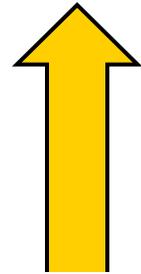
Concentración Volumétrica (CV):

$$C_v = \frac{\text{Flujo volumétrico de mineral}}{\text{Flujo volumético de pulpa}} * 100 = \frac{0,37}{1,37} * 100 = 27 \%$$

$$\text{Densidad de pulpa (DP)} = 2,0 / 1,37 = 1,46 \text{ ton/m}^3$$



**1t de Cu = 113t relave
= 29 m³ H₂O/t Cu**



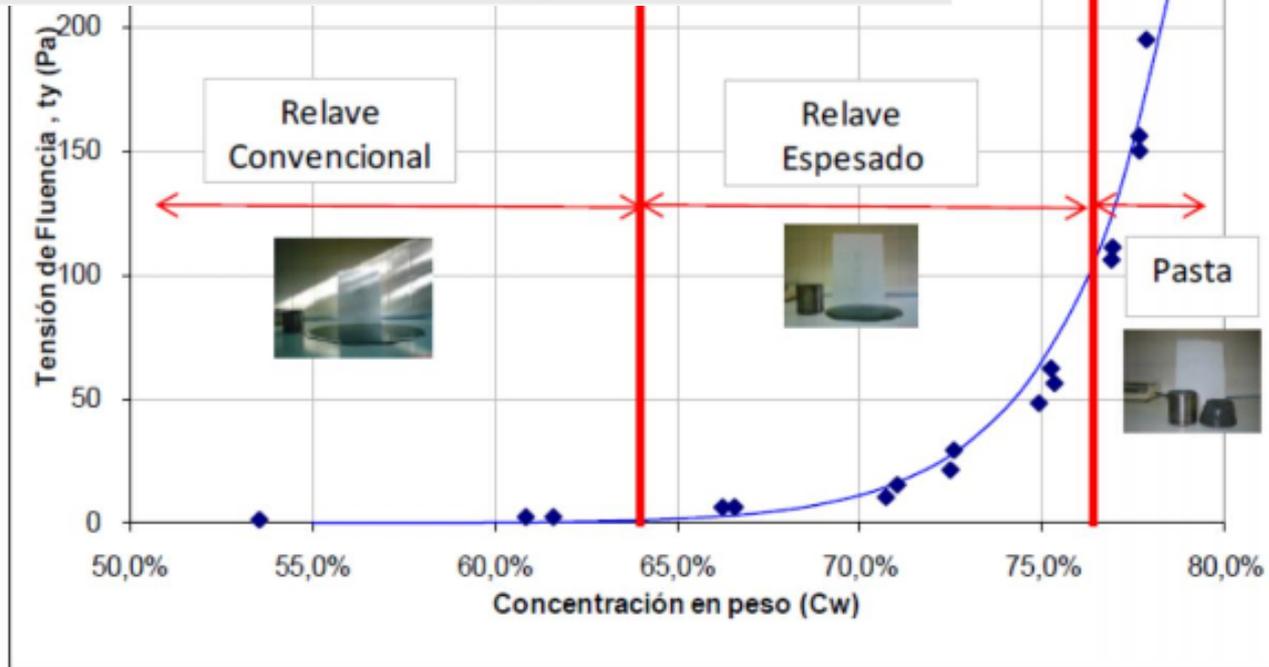
0,25 m³ H₂O



75% C_p = relación masa mineral/agua de 3/1



1 t relave



Agua en relaves

Estimación de las pérdidas (en $\text{m}^3/\text{t}_{\text{relave}}$):

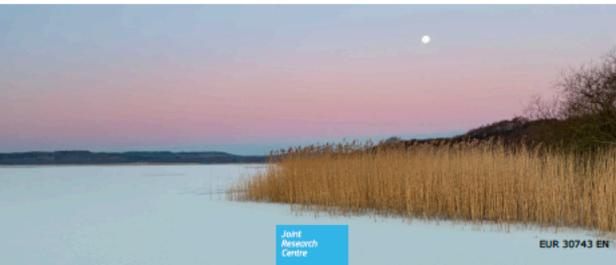
- Retención en el relave depositado: 0,18 a 0,45
- Evaporación y restauración: 0,10 a 0,30
- Infiltración no recuperada y saturación: 0,01 a 0,10

Sumando los valores extremos, el rango máximo está dado por 0,29 (mín) y 0,85 $\text{m}^3/\text{t}_{\text{rel}}$ (máx)



A review of European Union legal provisions on the environmental impact assessment of non-energy minerals extraction projects

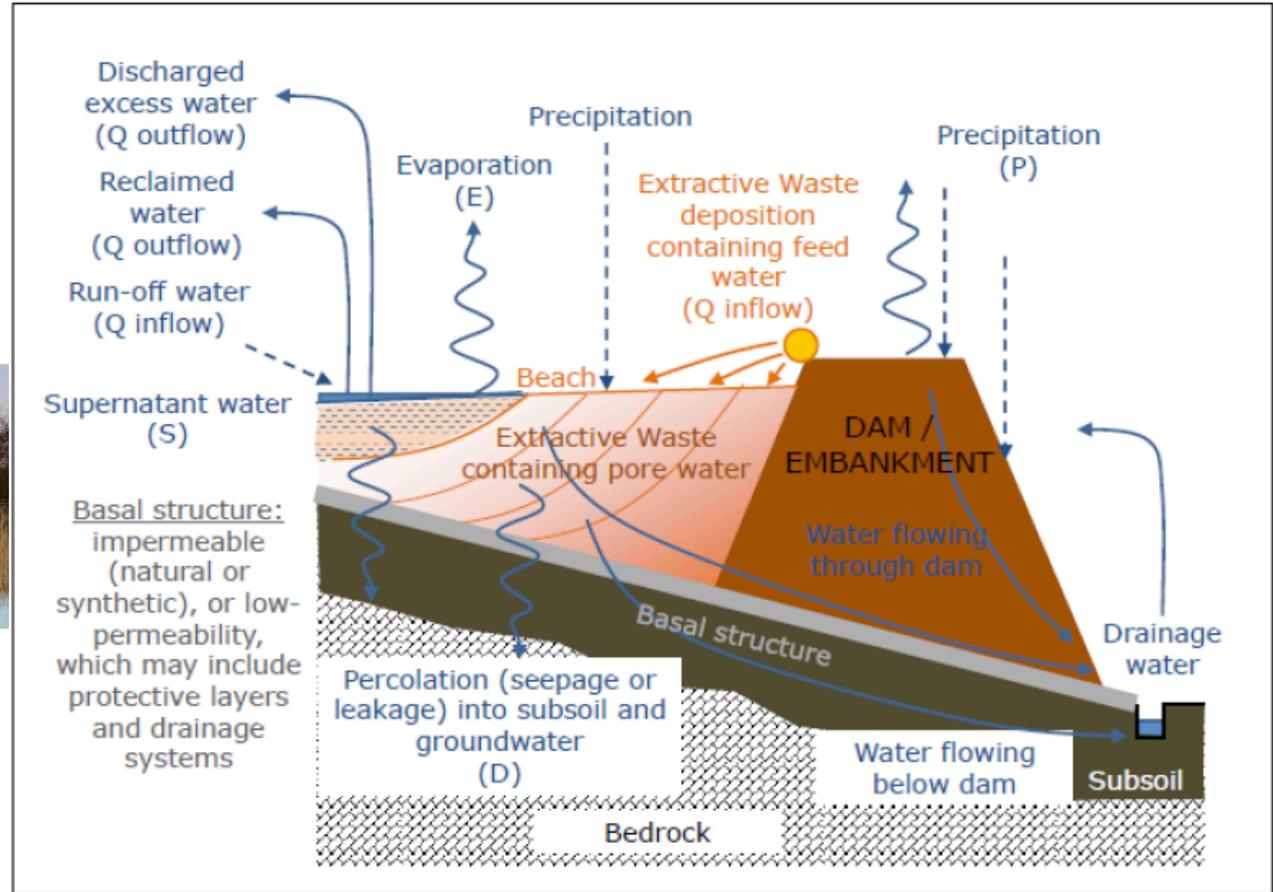
Hamor, T.; Vidal-Legaz, B.; Zampori, L.; Eynard, U.; Pennington, D. 2021



Joint Research Centre

EUR 30743 EN

Figure 9: Water balance, flow patterns at a tailings dam (source: Extractive waste BREF)



Fuente: Hamor, T., Vidal Legaz, B., Zampori, L., Eynard, U. and Pennington, D., A review of European Union legal provisions on the environmental impact assessment of non-energy minerals extraction projects, EUR 30743 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2021, ISBN 978-92-76-38988-0, doi:10.2760/705726, JRC125111.



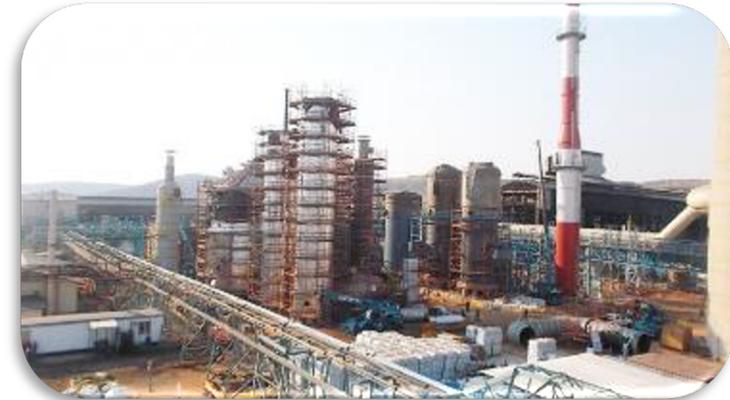
Plantas de lixiviación:

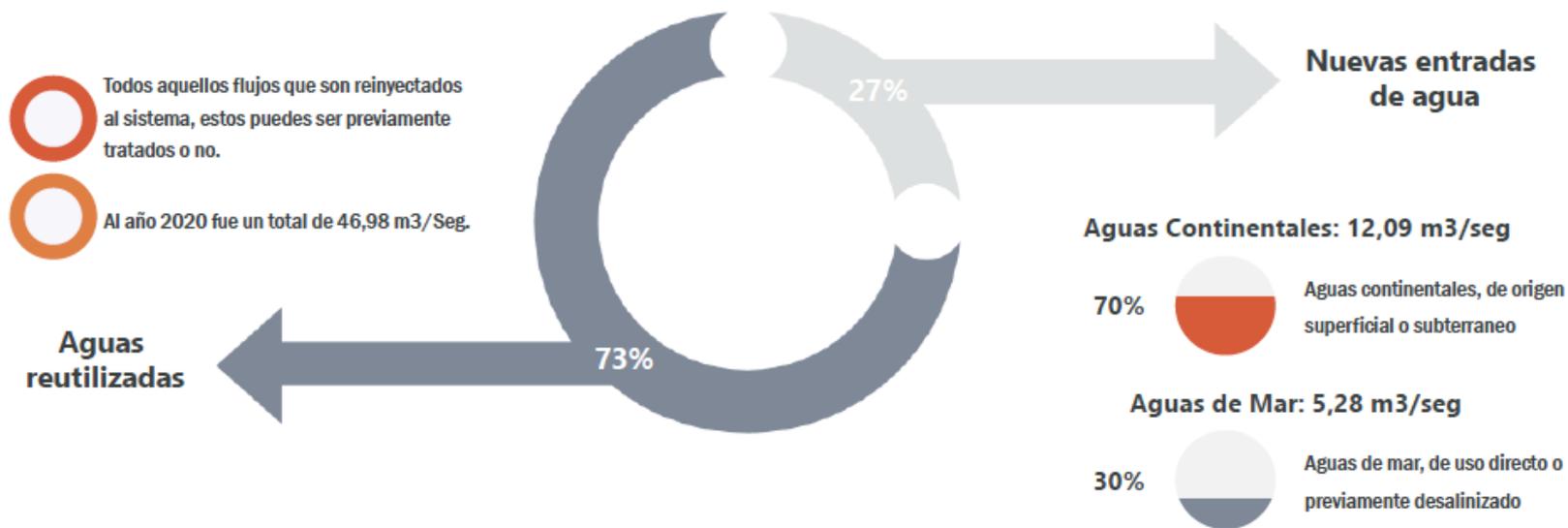
- Retención en el ripio: 0,05 a 0,16 m³/t
- Evaporación : 0,01 a 0,47 m³/t
- Infiltración no recuperada y saturación despreciable.



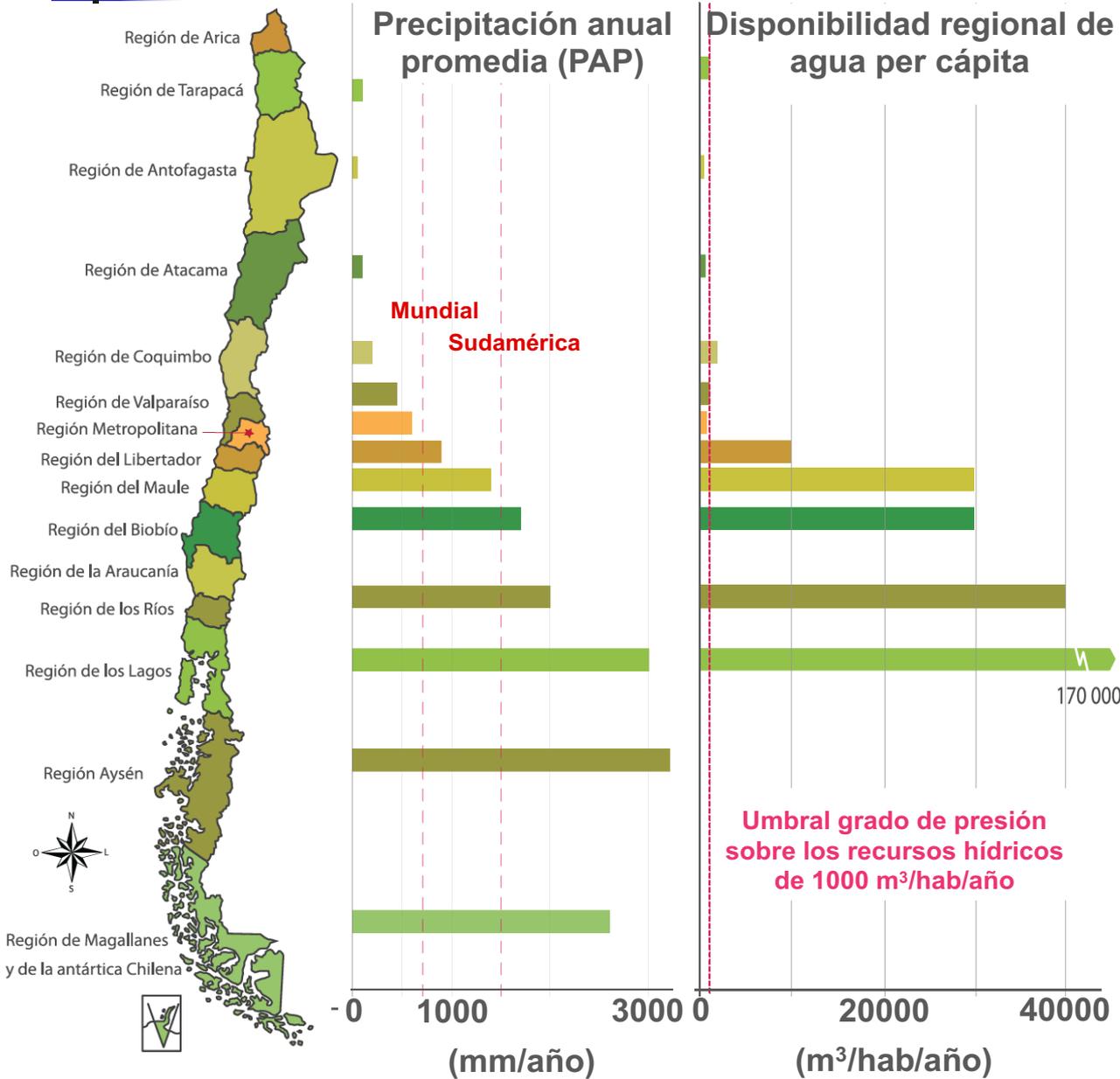
Plantas de fundición:

- Limpieza de gases.
- Enfriamiento de escoria.
- Consumo total: 2 a 3 m³ por tonelada de concentrado procesado.



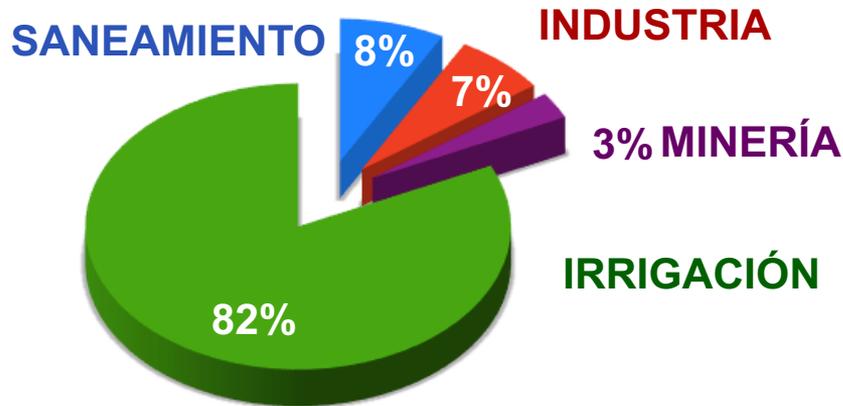


Consumo de agua en la Gran Minería del Cu (caso estudio Chile)



➤ La enorme variabilidad climática del territorio chileno queda reflejada en la heterogeneidad de la precipitación anual promedio (PAP) de las distintas regiones del país. A grandes rasgos se puede observar un aumento progresivo en la PAP desde el Norte (extremadamente seco) al Sur (altamente lluvioso) del país.

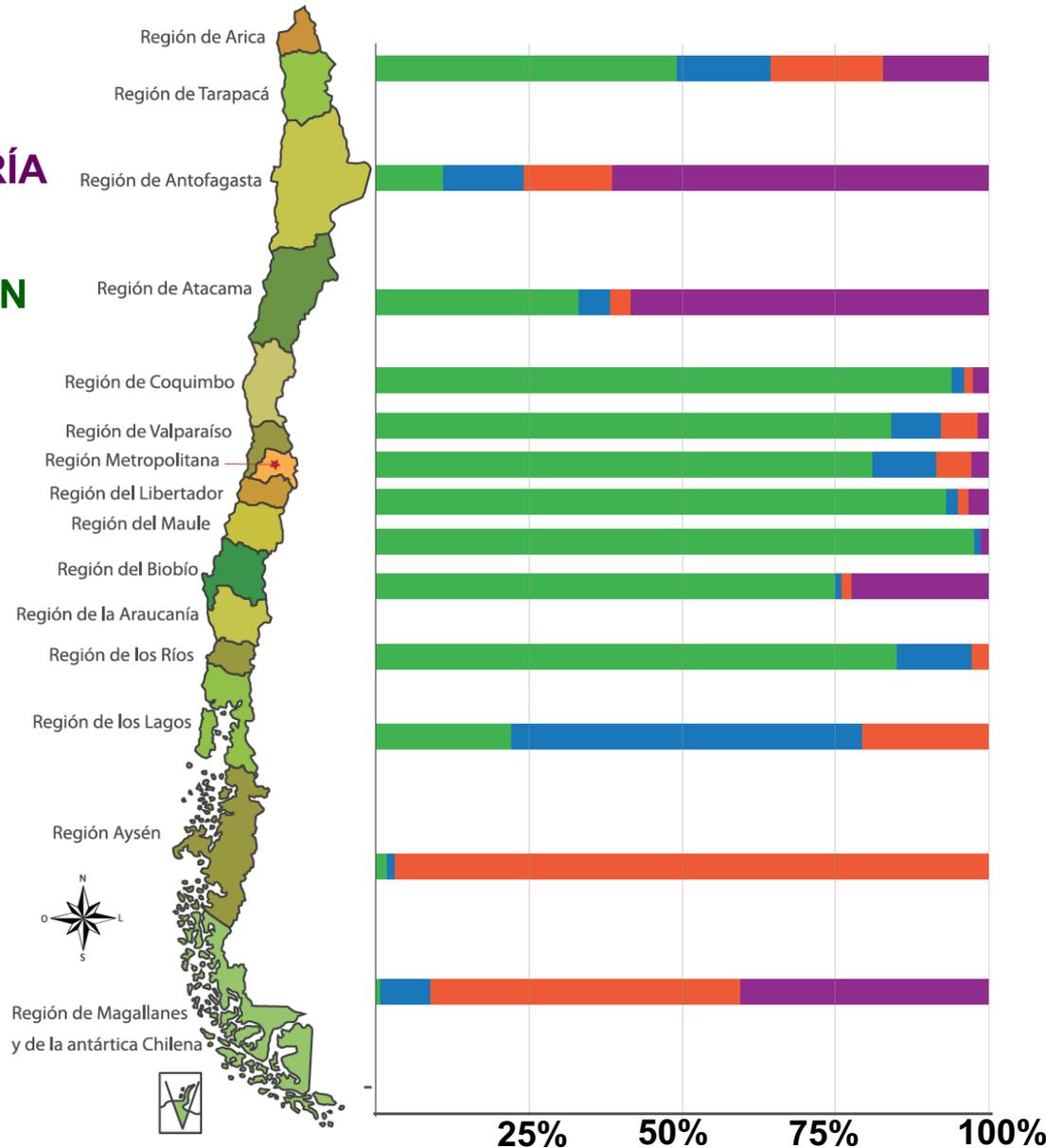
➤ La disponibilidad regional de agua per cápita ($m^3/hab/año$) de las regiones del Norte Grande, Norte Chico y Centro del país se encuentran por debajo de los $1000 m^3/hab/año$.



Atlas del Agua, DGA 2016 (pág. 125)

➤ El uso consuntivo global del agua en Chile está liderado ampliamente por la agricultura (82%), seguido por la industria (7%), la minería (3%) y finalmente el agua potable (8%).

➤ Sin embargo, el patrón de consumo de agua varía fuertemente en las diferentes regiones de Chile; destacando las regiones de Antofagasta y Atacama donde la minería utiliza un 75% y 60% de los derechos consuntivos de agua, respectivamente



HUELLA HÍDRICA AZUL



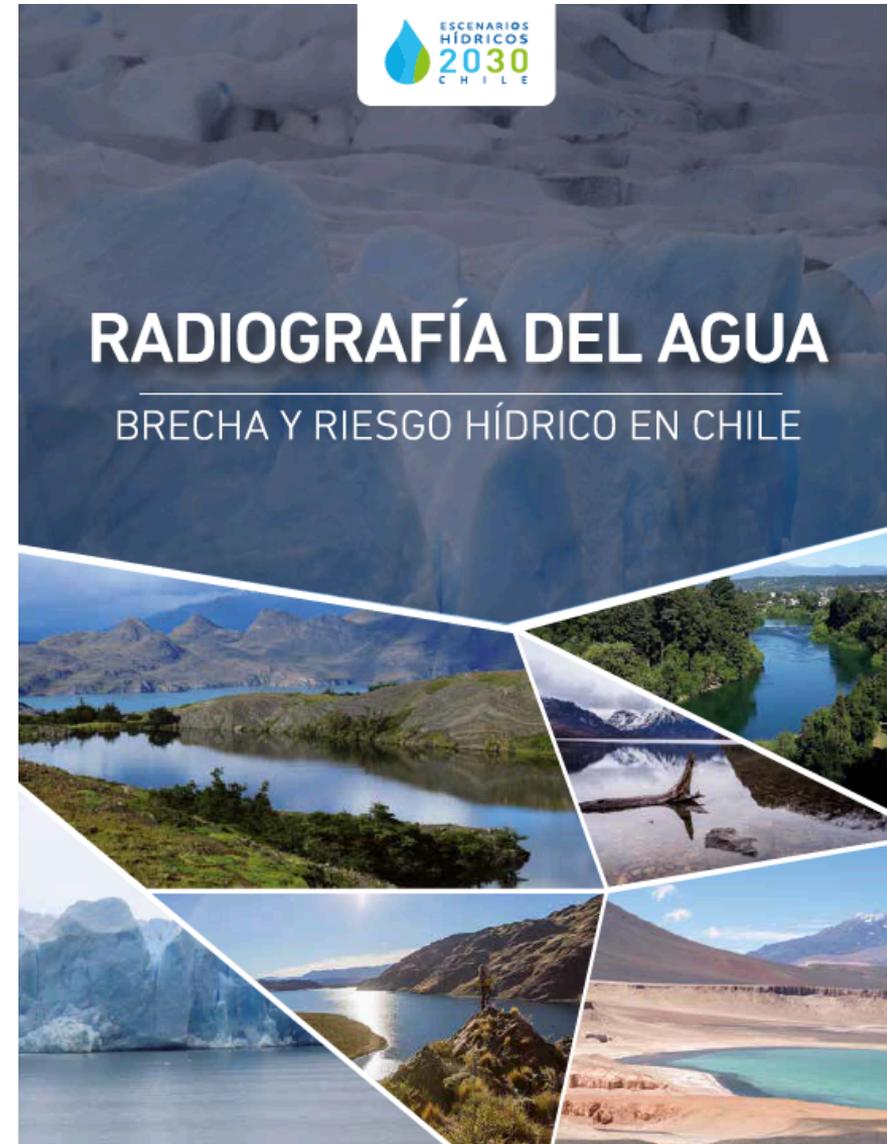
La HH azul se refiere al volumen de agua fresca extraída de fuentes superficiales y/o subterráneas por parte de los diferentes usuarios, que no retorna al ambiente de donde se extrajo. Este “no retorno” puede ocurrir por:

- 1) Evaporación o evapotranspiración de agua.
- 2) Incorporación de agua en el producto.
- 3) Agua que no retorna a la misma cuenca de extracción o que se descarga al mar.
- 4) Agua que retorna a la cuenca en un periodo de tiempo distinto al que se extrajo.

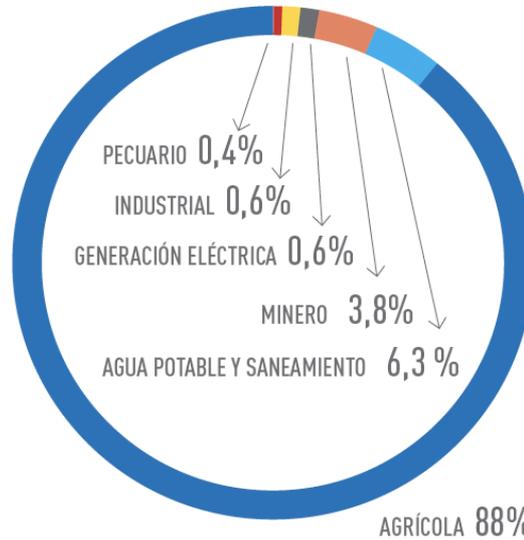
HUELLA HÍDRICA VERDE



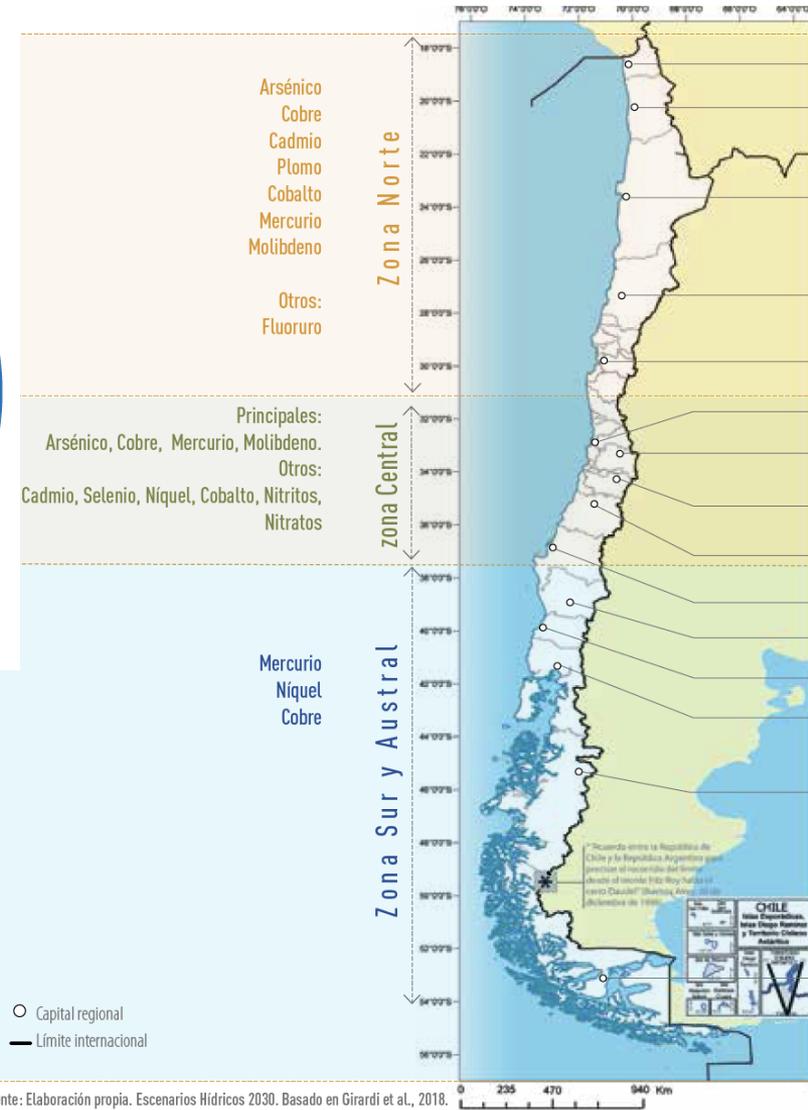
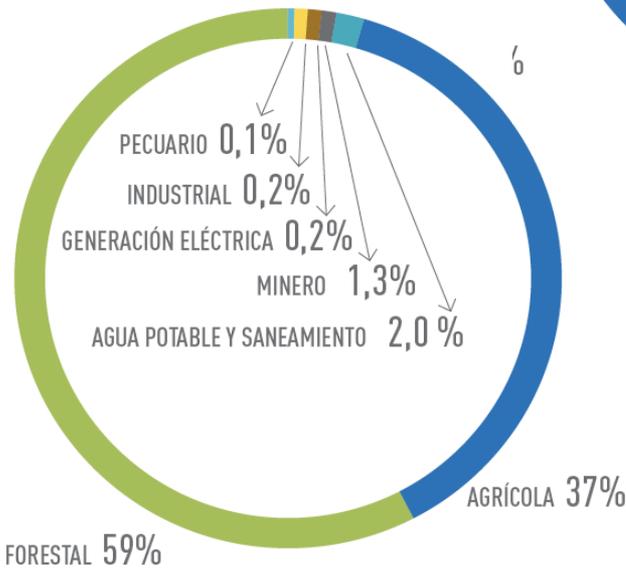
La HH verde se refiere al volumen de agua lluvia utilizada por los sectores que aprovechan esta fuente para riego, principalmente el agrícola y forestal. Esta agua queda temporalmente almacenada en la parte superficial del suelo, la que se puede evaporar, evapotranspirar o incorporar en la vegetación.



DISTRIBUCIÓN DEL CONSUMO DE AGUA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA (HH AZUL)



DISTRIBUCIÓN DEL CONSUMO TOTAL DE AGUA A NIVEL NACIONAL (HH AZUL + HH VERDE)



GESTIÓN E INSTITUCIONALIDAD DEL AGUA

Mecanismos financieros

SWAP de fuentes de abastecimiento de agua

Objetivo que aborda



Gestión

Sector de aplicación



Industria

Agricultura

Minería

Agua Potable y saneamiento

Medio Ambiente

Tipo de solución



Gestión

Escala



Costera

Descripción

Son acuerdos de orden comercial, basados en el intercambio o trueque de dos o más fuentes de suministro de agua, las que son distintas entre sí, pudiendo estar en lugares diferentes, o bien, de origen distinto (agua generada usando técnicas tecnológicas o agua natural), cuyo objetivo es lograr reducir los costos de inversión y operación para el abastecimiento de aguas. Es así como una actividad que se realiza en la zona cordillerana puede intercambiar el agua con una actividad que se desarrolla en la zona costera, a través de la cesión de derechos de agua u otros acuerdos.

Un SWAP puede traer beneficios en ahorro de inversiones y costos de operación para las partes involucradas, sin embargo, también puede generar externalidades negativas si no se considera el entorno ambiental y social dentro de los acuerdos bilaterales.

Beneficios

El intercambio de aguas puede generar beneficios para ambas partes, si el acuerdo es negociado estratégicamente, considerando el entorno social y ambiental involucrado.

Condiciones técnicas de operación

Se requiere de un diseño previo, donde ambas partes acuerdan los usos del agua y los beneficios para los involucrados.

Casos de Aplicación

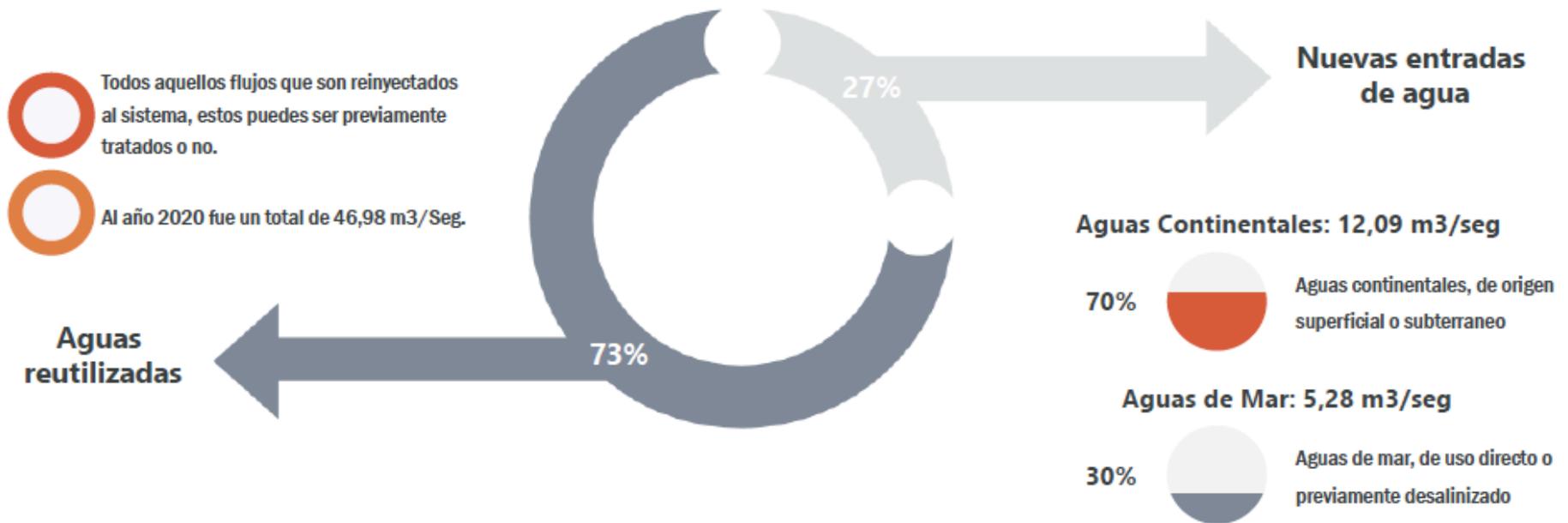
Atacama, Chile. SWAP de aguas desaladas y servidas tratadas entre Candelaria y Aguas Chañar, gatilladas por medidas ambientales comprometidas en la Resolución de Calificación Ambiental (RCA) del Proyecto Candelaria 2030. En este caso, la minera usa las aguas tratadas para sus procesos y, a cambio, la minera entrega agua desalada a la empresa sanitaria para el abastecimiento del consumo humano.

Referencias y mayor información

Resolución de Calificación Ambiental (RCA) N° 133, del 23 de julio del 2015, emitida por la Comisión de Evaluación en la Región de Atacama, que califica ambientalmente el proyecto "Candelaria 2030 -Continuidad Operacional". Disponible en URL: http://seia.sea.gob.cl/archivos/2015/07/23/RCA_Candelaria_2030_22.07.2015.pdf



CONSUMO DE AGUA EN LA MINERÍA DEL COBRE 2020 (m³/s)



Fuente: Dirección de Estudios y Políticas Públicas, Cochilco, 2022.
<https://www.cochilco.cl/Paginas/Presentaciones/Presentaciones.aspx>

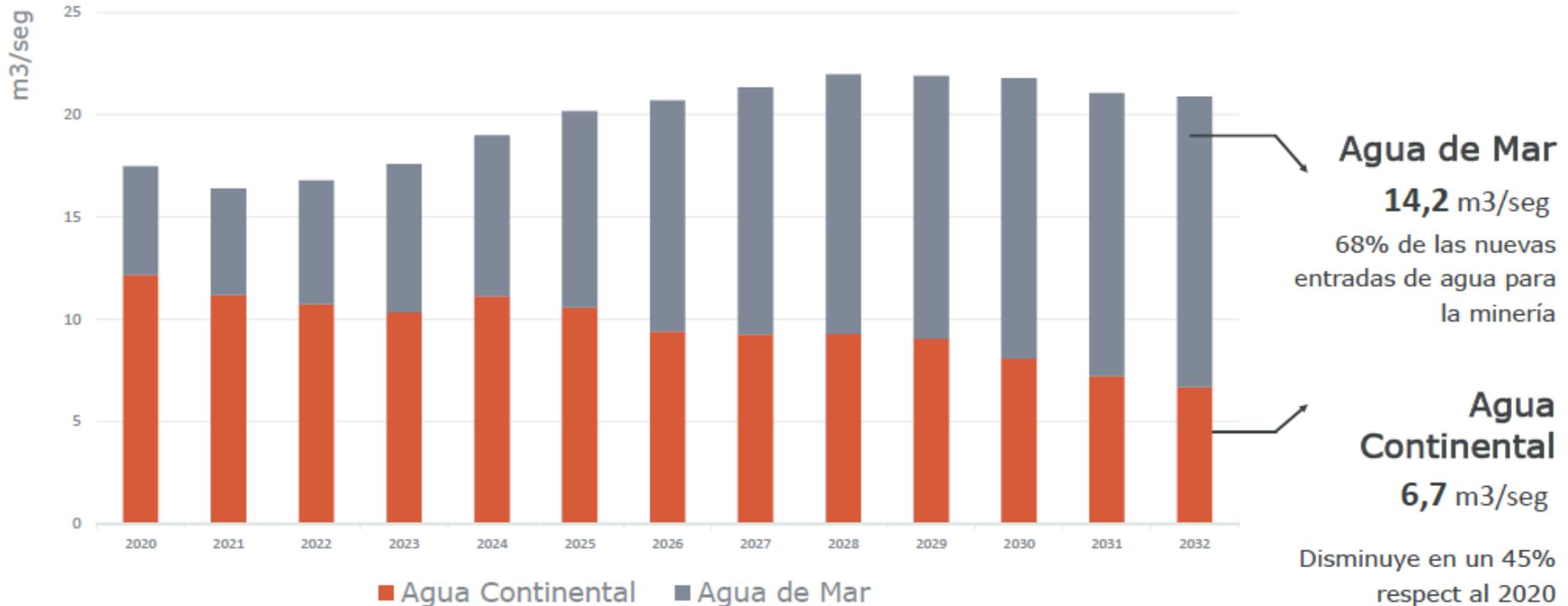
CONSUMO DE AGUA CONTINENTAL POR PROCESO MINERO 2012-2017 (m³/s)



- El consumo total de agua fresca por parte de la minería (13,26 m³/s en 2017) se debe en un 67% a la generación de concentrado mineral, seguido de lejos (14%) por la hidrometalurgia y otros usos (19% incluye: fundción y refinería, riego de caminos, agua en campamento y servicios auxiliares).

Proyección de agua a nivel nacional

Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2021-2032 (m3/Seg)



Fuente: Camila Montes, Dirección de Estudios y Políticas Públicas, Cochilco, 2022.
<https://www.cochilco.cl/Paginas/Presentaciones/Presentaciones.aspx>

Proyección de agua por región



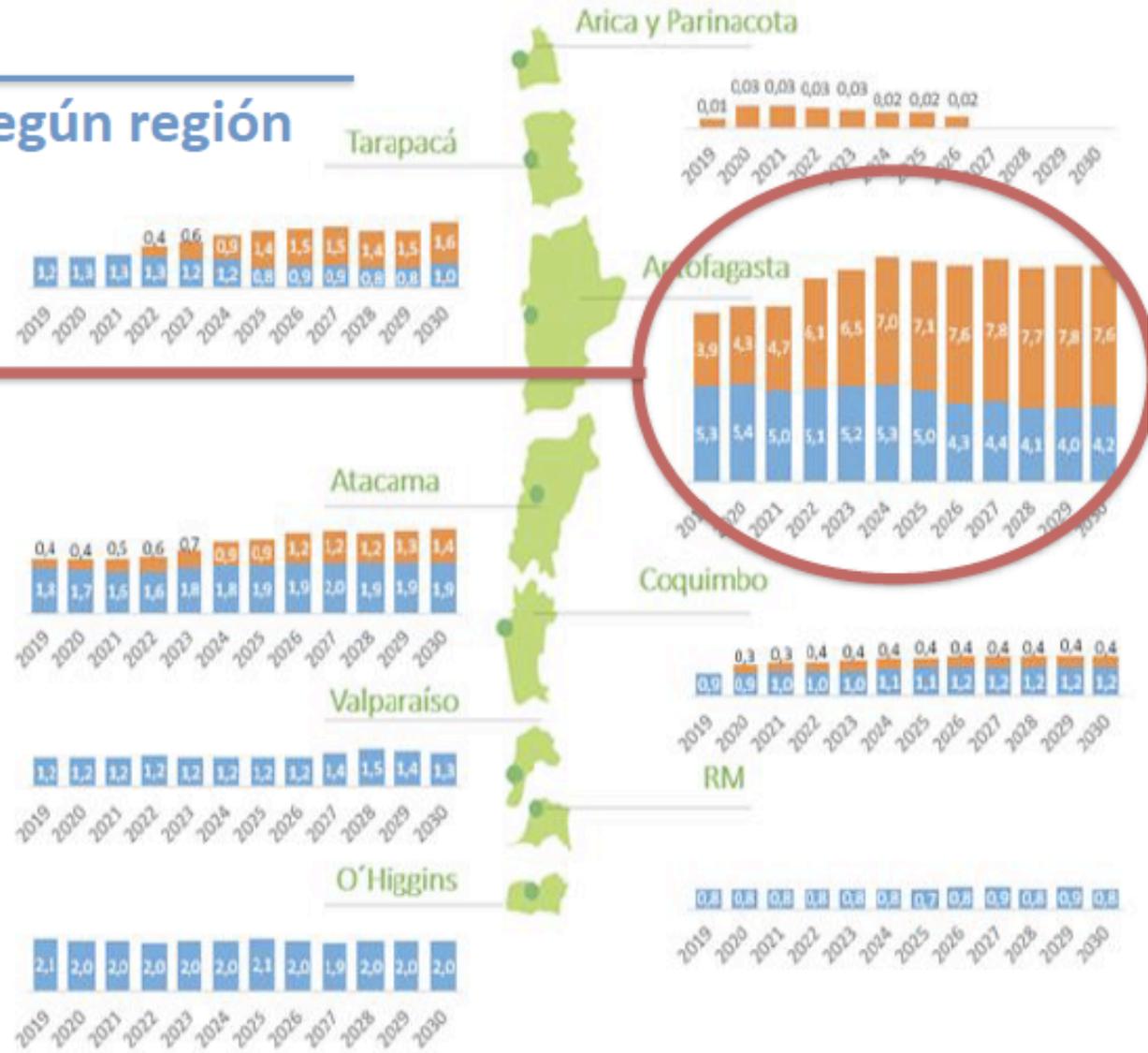
Antofagasta es la región que mayor consume agua de mar y se espera un comportamiento similar para la próxima década, seguido de las regiones de Atacama, Tarapacá y Coquimbo.

Fuente: Camila Montes, Dirección de Estudios y Políticas Públicas, Cochilco, 2022.
<https://www.cochilco.cl/Paginas/Presentaciones/Presentaciones.aspx>

Resultados:

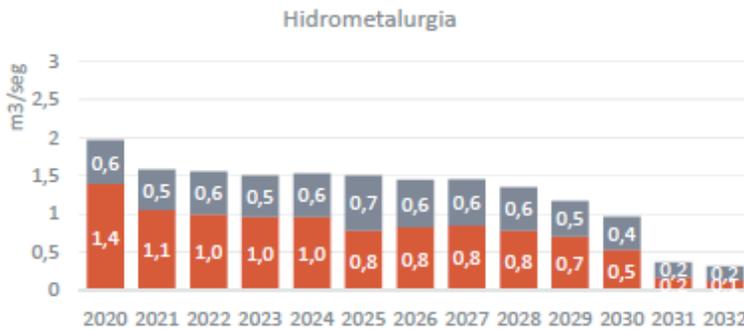
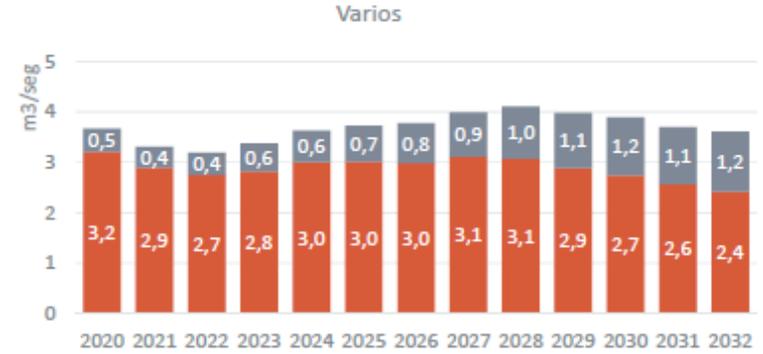
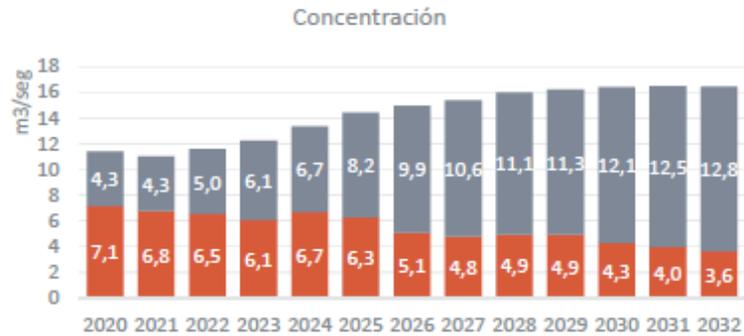
Consumo de agua según región

Antofagasta representa el 50% de la producción de cobre al 2030, mientras que representa 34% del consumo de agua continental y un 69% del consumo de agua de mar.



Fuente: Camila Montes, Analistas de Estudios y Políticas Públicas, Cochilco, Enero 2020

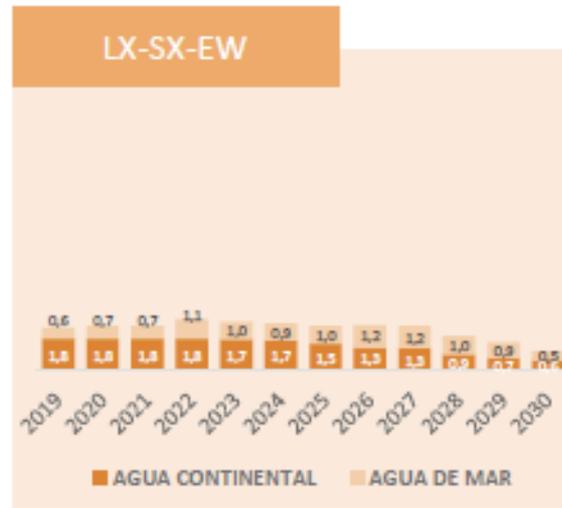
Proyección de agua por proceso



■ Agua de Mar ■ Agua Continental

Fuente: Camila Montes, Dirección de Estudios y Políticas Públicas, Cochilco, 2022.
<https://www.cochilco.cl/Paginas/Presentaciones/Presentaciones.aspx>

Consumo de agua según tipo de proceso



“Los concentrados demandan (y demandarán) la mayor parte del agua en la minería del cobre, debido al aumento de producción de concentrados por el natural agotamiento de los recursos oxidados, así como por el intensivo consumo de agua que se genera en la concentradora ”

Fuente: Camila Montes, Analistas de Estudios y Políticas Públicas, Cochilco, 2019