

PROYECTO VICUÑA · VERSIÓN AMPLIADA · OCTUBRE DE 2026

Desalinización del río Blanco y La Palca para mejorar la calidad del agua de Iglesia, Jáchal y Huaco

Alternativa al suministro de agua desde el Pacífico: balances de masa, costos e impacto socioeconómico

Prof. Ing. Luis F. Jiménez

Profesor Emérito y Director del Instituto del Agua

Facultad de Ciencias Químicas y Tecnológicas · Universidad Católica de Cuyo

RESUMEN

Qué propone el documento y qué resultado central obtiene

5 m³/s

caudal tratado por ósmosis inversa

1,4 g/l

salinidad de la mezcla final

160–179 M USD

costo anual del sistema (por año)

1,0–1,1 USD/m³

costo por m³ desalinizado

34.142 hab.

población de Iglesia y Jáchal

3 % a 15 %

del costo cubierto por beneficios agrícolas

Se justifica como solución integrada (agua de proceso, calidad de riego y bebida, licencia social), con financiamiento y gobernanza compartidos, y no como obra de riego aislada.

ANTECEDENTES: EL SISTEMA CUESTA DEL VIENTO

Por qué la calidad del agua es el cuello de botella

Una práctica ancestral que funciona

Rotación de leguminosas, frutales y hortalizas, y riegos en exceso que lavan las sales hacia capas profundas.

Con límites claros

Restringe la matriz de cultivos y exige volúmenes adicionales de agua.

Obra incompleta

El diseño suponía ampliar la superficie y construir drenaje público; el drenaje no se ejecutó.

12.000 ha

con derecho de riego

≈ 3.500 ha

regadas hoy

HIDROLOGÍA E HIDROQUÍMICA DE LOS AFLUENTES

Tabla 1. Datos de partida del balance

Parámetro	Río Blanco	Río La Palca	Observación
Caudal medio (m³/s)	3	6	Suman 9 m³/s en el río Jáchal (284 hm³/año)
Sales totales (g/l)	3,5	2,5	Dato de partida del balance
Boro (mg/l)	3,9	a medir	Derivado por balance: 3,3 mg/l si el Jáchal tiene 3,5 mg/l
Sales del Jáchal (g/l)	—	—	Referencia 2,5 g/l; balance de los datos: 2,83 g/l

Boro La Palca = $(9 \times 3,5 - 3 \times 3,9) / 6 = 3,3 \text{ mg/l}$

Con los datos de partida el Jáchal tendría 2,83 g/l de sales (no 2,5), o bien La Palca tendría 2,0 g/l. Se recomienda profundizar con la serie hidroquímica completa por afluente.

Fuente: estudio de factibilidad del Instituto del Agua y cálculos del autor.

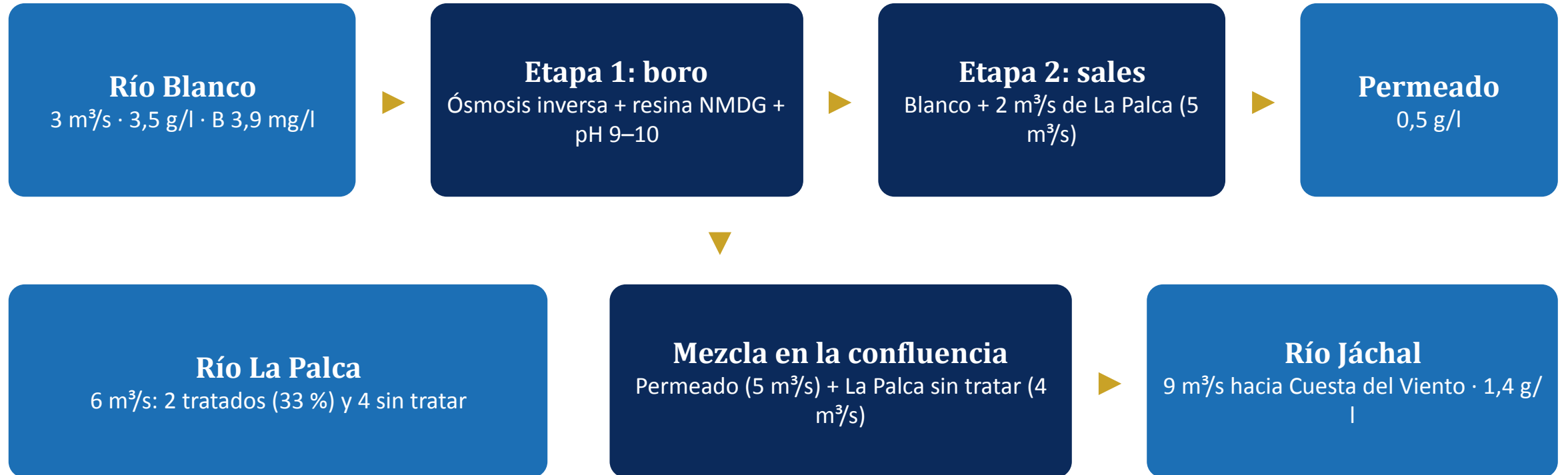
LA ALTERNATIVA: DOS CAMINOS PARA EL MISMO PROYECTO

Misma tecnología (ósmosis inversa), distinta fuente de agua

Pacífico (propuesta del proyecto)		Afluentes del Jáchal (esta propuesta)	
Caudal	1,2 m³/s	Caudal tratado	5 m³/s
Salinidad	≈ 35 g/l	Salinidad máxima	3,5 g/l
Destino	Yacimiento a 4.230 m s. n. m.	Planta	Junta de la Palca

ESQUEMA DE TRATAMIENTO

Dos etapas y mezcla con el caudal no tratado de La Palca



Operación en una o dos etapas de membranas según la variación de la concentración en cada ciclo hidrológico (cambio climático).

ETAPA 1: REDUCCIÓN DEL BORO DEL RÍO BLANCO

Del 3,9 mg/l a 0,5–0,7 mg/l

3,9 → 0,5–0,7

mg/l de boro en el río Blanco

82–87 %

rechazo global requerido

60–70 %

rechazo sin ajuste de pH, una pasada

- Tecnología: ósmosis inversa pulida con lecho de resina selectiva N-metil-D-glucamina (NMDG).
- Segunda pasada con pH entre 9 y 10, que convierte el ácido bórico en borato iónico, mejor rechazado.
- Con ajuste de pH el rechazo podría llegar al 80 % o más.
- Falta incluir la dosificación de la base y la neutralización o remineralización del permeado en el balance de reactivos y de costos.

BALANCE DE MASAS: SALES

Caudal tratado, salinidad de la mezcla y sal removida

$$Q_t = Q_B + (Q_P - Q_{Px}) = 3 + 2 = 5 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$X_t = (5 \times 0,5 + 4 \times 2,5) / 9 = 1,39 \text{ g/l}$$

$$M_{\text{sal}} = 5 \text{ m}^3/\text{s} \times (3,1 - 0,5) \text{ g/l} = 13 \text{ kg/s}$$

$\approx 1,4 \text{ g/l}$

mezcla final ($\approx 2,2 \text{ dS/m}$)

1.123 t/día

sal removida ($\approx 410.000 \text{ t/año}$)

1,17 g/l

si La Palca tuviera $2,0 \text{ g/l}$

BALANCE DE MASAS: BORO

El boro de la mezcla depende del boro de La Palca

$$B_{mezcla} = (5 \times B_{permeado} + 4 \times B_{Palca}) / 9$$

1.011 kg/día

boro que ingresa con el río Blanco

881 kg/día

boro extraído (829 si el permeado es 0,7 mg/l)

1,74–1,86 mg/l

boro de la mezcla (La Palca = 3,3 mg/l)

- Es una reducción muy significativa respecto de los 3,5 mg/l actuales del río Jáchal.
- Para llegar a 0,5 mg/l en toda la mezcla hay que tratar mayor caudal de La Palca (variante D) o confirmar con mediciones que su boro es menor.
- Medir el boro de La Palca es el aspecto clave para definir el caudal a tratar.

RECUPERACIÓN Y RECHAZO: LA SALMUERA

Tabla 2. Efecto de la recuperación de la planta (alimentación 5 m³/s)

Recuperación	Permeado (m³/s)	Salmuera (m³/s)	Salmuera (g/l)	Caudal Jáchal (m³/s)	Sales Jáchal (g/l)
75 %	3,75	1,25	10,9	7,75	1,53
80 %	4,00	1,00	13,5	8,00	1,50
85 %	4,25	0,75	17,8	8,25	1,47
90 %	4,50	0,50	26,5	8,50	1,44

- Con 80 %: unos 31,5 hm³/año de salmuera y 426.000 t de sales por año.
- Para 5 m³/s de permeado con 80 % haría falta alimentar 6,25 m³/s.
- El caudal hacia Cuesta del Viento baja de 9 a 8 m³/s (–11 %).
- Evaporar 31,5 hm³/año exigiría estanques de unas 1.750 ha (valor ilustrativo, con evaporación neta de 1,8 m/año).

Cálculo del autor con los datos de la Tabla 1.

VARIANTES SEGÚN EL CAUDAL DE LA PALCA TRATADO

Tabla 3. Frontera de decisión entre calidad y costo

Variante	La Palca tratado (m³/s)	Permeado (m³/s)	Sales Jáchal (g/l)	Boro Jáchal (mg/l)	Salmuera (m³/s)	Costo etapa 2 (M USD/año)
A. Solo río Blanco	0	2,4	1,57	2,5	0,6	40
B. Blanco + 33 % de La Palca (propuesta)	2	4,0	1,25	1,9	1,0	67
C. Blanco + 67 % de La Palca	4	5,6	0,89	1,2	1,4	94
D. Todo el caudal	6	7,2	0,50	0,5	1,8	121

- Supuestos: 80 % de recuperación, 0,5 mg/l de boro en el permeado, La Palca con 2,0 g/l y 3,3 mg/l.
- Parámetros de costo: 1.200 USD por m³/día, operación de 0,30 USD/m³, 25 años y 5 %.
- La variante A o una puesta en marcha por módulos pueden optimizar el diseño.

ENERGÍA

Partir de agua con 3,5 g/l y no con 35 g/l

Jáchal (agua salobre)		Pacífico (agua de mar)	
Desalinización	1,5–2,0 kWh/m³	Desalinización	3,0–3,5 kWh/m³
Potencia (5 m ³ /s)	27–36 MW	Elevación 4.230 m	≈ 14,4 kWh/m³
Consumo anual	≈ 237 GWh/año	Total	17,4–17,9 kWh/m³
Costo de energía	0,15–0,20 USD/m³	Costo de energía	1,4–1,8 USD/m³

Pacífico, 1,2 m³/s: unos 62 MW de bombeo y 15 MW de desalinización, sin inversión, acueducto, servidumbres ni salmuera. Jáchal: cada 100 m de ascenso desde la planta agrega ≈ 0,34 kWh/m³.

COSTO DE CAPITAL Y OPERACIÓN DE LA ETAPA 2

Tabla 4. Sensibilidad a la tasa de descuento (25 años)



Tasa	Capital (M USD/año)	Capital (USD/m³)	Total con operación (USD/m³)	Total (M USD/año)
0 %	20,7	0,132	0,432	68,1
5 % (referencia)	36,8	0,233	0,533	84,1
8 %	48,6	0,308	0,608	95,9
10 %	57,1	0,362	0,662	104,4

Con factor de planta del 85 % y tasa de 5 %, el costo de la etapa 2 sube a 0,574 USD/m³.

COSTO COMBINADO DE LAS ETAPAS 1 Y 2

Tabla 5. Costo anual del sistema (configuración de la propuesta)

Concepto	Volumen (hm³/año)	Costo unitario (USD/m³)	Costo anual (M USD)
Etapa 1: eliminación de boro (3 m³/s)	94,6	0,8 – 1,0	75,7 – 94,6
Etapa 2: desalinización (5 m³/s, 5 %)	157,7	0,533	84,1
Total	—	—	159,8 – 178,7
Por m³ desalinizado (157,7 hm³/año)	—	1,01 – 1,13	—
Por m³ del río Jáchal (283,8 hm³/año)	—	0,56 – 0,63	—

- Con recuperación de 80 % (4 m³/s de permeado): etapa 2 en 67,3 M USD/año y total de 143–162 M USD/año.
- El rango de la tabla es el más conservador.

COMPARACIÓN PRELIMINAR DE AMBAS ALTERNATIVAS

Tabla 6. Lo que se puede afirmar con la información disponible

Aspecto	Pacífico (proyecto)	Cuenca de Jáchal (esta propuesta)
Caudal tratado	1,2 m³/s (37,8 hm³/año)	5 m³/s (157,7 hm³/año); el yacimiento toma 1,2 m³/s
Salinidad de entrada	≈ 35 g/l	≤ 3,5 g/l
Energía de desalinización	3,0–3,5 kWh/m³	1,5–2,0 kWh/m³
Energía de elevación	≈ 14 kWh/m³ (4.230 m, 80 %)	≈ 0,34 kWh/m³ por cada 100 m de ascenso
Jurisdicciones	Chile y Argentina; servidumbres múltiples y Protocolo Binacional Minero	Provincia de San Juan
Externalidades	Salmuera en el ecosistema marino	Mejora la calidad del Jáchal; salmuera en cuenca cerrada

APTITUD AGRONÓMICA DEL AGUA TRATADA

Mezcla de 1,4 g/l ($\approx 2,2$ dS/m) y boro de 0,5 a 1,9 mg/l

CE del suelo y del agua

Los umbrales se refieren al suelo (ECe), que con lavado razonable es $\approx 1,5$ veces la CE del agua (ECw).

El boro limita cultivos

Con 1,7–1,9 mg/l se limitan olivo, pistacho, vid y almendro; cebada y sorgo toleran 2,0 mg/l; la alfalfa está en el límite.

Menos lavado

De 4,4 a 2,2 dS/m, LR baja de 0,42 a 0,17 (ECe = 3 dS/m): ahorro de ≈ 30 % en riego bruto; 18 % con ECe = 4 dS/m.

El factor limitante para ampliar la superficie no es la cantidad de agua (284 hm³/año frente a una demanda bruta de 108–144 hm³/año para 12.000 ha), sino su calidad, su regulación y el drenaje.

IMPACTO SOCIOECONÓMICO: ÁREA DE INFLUENCIA

Tabla 7. Línea de base de Iglesia y Jáchal (incluye Huaco)



Indicador	Valor
Superficie con derecho de riego (Jáchal)	12.000 ha
Superficie regada actual	≈ 3.500 ha (29 %)
Caudal medio del río Jáchal	9 m³/s (284 hm³/año)
Boro / sales del río Jáchal	3,5 mg/l / 2,5 g/l

Fuentes: Censo 2022 (INDEC, vía Telencuestas), Instituto del Agua.

ESCENARIOS DE PRODUCCIÓN Y EMPLEO

Tabla 8. Situación sin proyecto frente a tres escenarios con proyecto

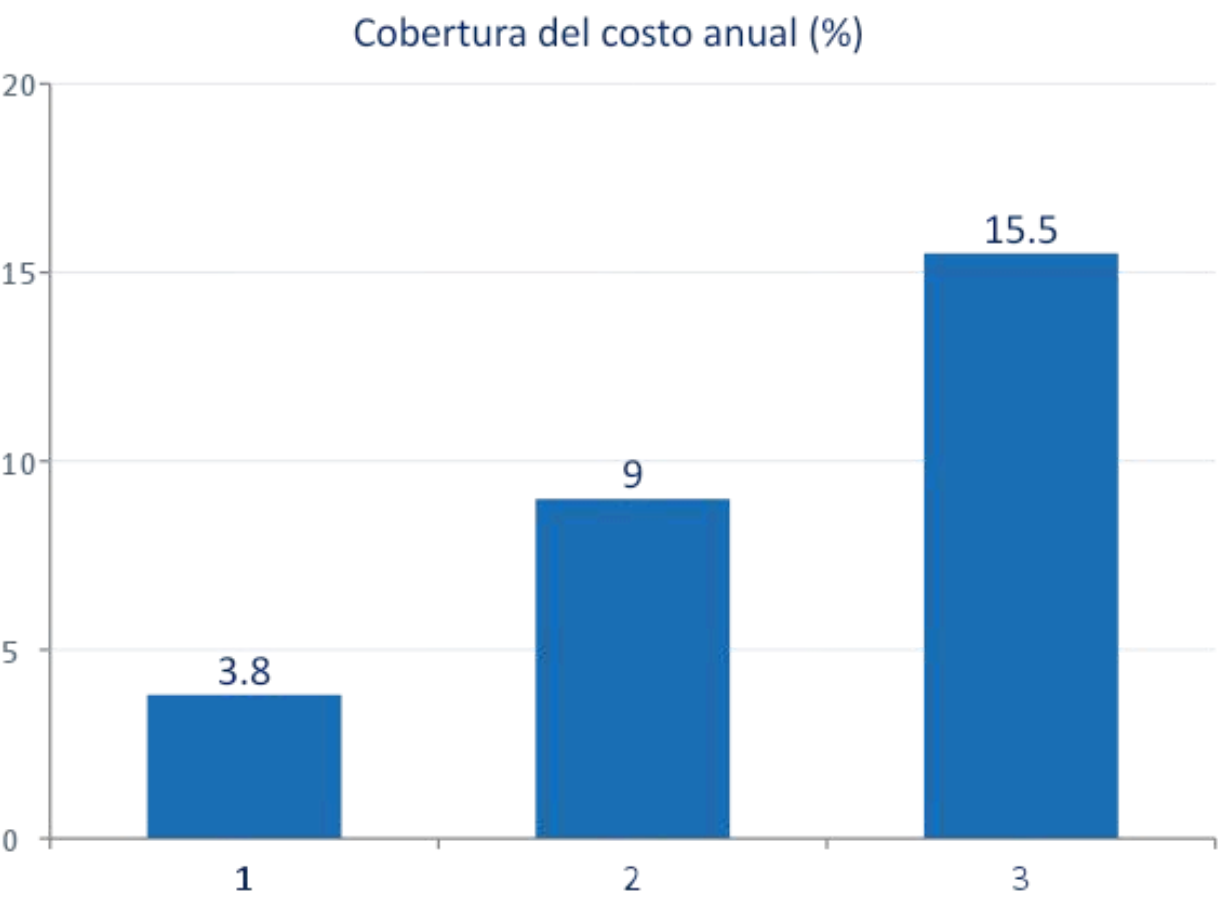
Escenario	Superficie (ha)	VBP (USD/ha)	VBP total (M USD/año)	VBP incremental (M USD/año)	Empleo adicional (personas)
Sin proyecto	3.500	1.500	5,3	—	—
Conservador	6.000	1.875	11,3	6,0	540 – 1.070
Medio	9.000	2.179	19,6	14,4	1.180 – 2.360
Alto	12.000	2.505	30,1	24,8	1.820 – 3.640

- Empleo adicional medio: 1.200–2.400 personas, equivalente a 3,5–7 % de la población del área.
- Cifras brutas: indican el tamaño del efecto económico, no la rentabilidad privada.

Cálculo del autor. Empleo: 0,21–0,43 personas por hectárea incorporada.

BENEFICIOS Y COSTOS

Tabla 9. Cobertura del costo anual por el beneficio agrícola bruto



4.700–5.200 USD

costo por habitante por año

3 % a 15 %

del costo cubierto por beneficios agrícolas

La propuesta tiene sentido solo si cumple varias funciones a la vez y si quienes obtienen los beneficios contribuyen a pagarla.

EL ENFOQUE DE COSTO EVITADO

Tabla 10. Costo del sistema no cubierto por el ahorro de la empresa (M USD/año)

Costo evitado (USD/m ³)	Ahorro de la empresa (M USD/año)	No cubierto, sistema 159,8 M	No cubierto, sistema 178,7 M
1,5	56,8	103,0	121,9
2,0	75,7	84,1	103,0
2,5	94,6	65,2	84,1
3,0	113,5	46,2	65,2

- La viabilidad depende de cuatro factores:
- El costo real de la alternativa del Pacífico, aún no publicado.
- La valoración de los efectos sobre la salud y el agua potable.
- La optimización del diseño (variante A o puesta en marcha por módulos).
- El reparto de costos entre empresa, Estado provincial y beneficiarios.

ESCALA FRENTE AL PROYECTO MINERO

Tabla 11. Peso relativo del sistema de desalinización

Magnitud	Valor	Fuente
Inversión total del proyecto	US\$ 9.737 M (RIGI) a US\$ 18.000 M	Río Negro (2026); iProfesional (2026)
Exportaciones anuales	US\$ 2.600 M a más de US\$ 6.000 M	Río Negro (2026); iProfesional (2026)
Empleo total (directo e indirecto)	19.000 a 31.700	iProfesional (2026); Río Negro (2026)
Empleo directo en operación	5.500	iProfesional (2026)
Inversión del sistema / inversión del proyecto	2,9 % a 5,3 %	518,4 M USD sobre el rango anterior
Costo anual / exportaciones anuales	2,7 % a 6,9 %	159,8–178,7 M USD sobre el rango anterior

Una parte relevante del costo podría ser asumida por la empresa como inversión en abastecimiento y licencia social.

QUIÉN PAGA Y QUIÉN SE BENEFICIA

Tabla 12. Distribución de beneficios y posibles fuentes de financiamiento

Actor	Beneficio principal	Instrumento posible
Empresa minera	Agua de proceso sin conducción desde el Pacífico; estabilidad de suministro; licencia social	Inversión en la planta y pago por el agua tomada (costo evitado)
Estado provincial	Calidad del agua potable y de riego; desarrollo agrícola; arraigo	Fideicomiso minero y presupuesto de obras hídricas
Regantes y productores	Más cultivos posibles, menor lavado, mayor valor por hectárea	Canon de agua tratada gradual, ligado al uso real
Población de Iglesia, Jáchal y Huaco	Mejor agua potable; empleo	Tarifa social y rendición de cuentas

Esquema orientativo del autor.

SALUD, CALIDAD DE VIDA Y ODS

El valor más importante no se mide en producción

Salud

El boro en exceso y el arsénico afectan el agua que consume la población. Mejorar el río y el acuífero reduce el riesgo sanitario y evita costos futuros.

Datos necesarios

Costo actual del agua potable por habitante, exposición a boro y arsénico, y costo de tratamiento evitado.

ODS	Indicador sugerido
ODS 6 Agua limpia	Boro y sales en el Jáchal; población con agua segura
ODS 2 Hambre cero	Hectáreas regadas; número de cultivos
ODS 3 Salud y bienestar	Exposición y salud pública
ODS 8 Trabajo decente	Empleo adicional; proveedores locales
ODS 12 Producción responsable	m³ por hectárea; m³ por tonelada de cobre

RIESGOS E INCERTIDUMBRES

Tabla 14. Principales riesgos y acciones de mitigación

Riesgo	Descripción	Mitigación
Calidad del agua	Boro de La Palca desconocido; mezcla entre 0,5 y 1,9 mg/l	Muestreo por afluente; ajustar caudal tratado
Salmuera	0,5–1,25 m³/s con 11–27 g/l; 420.000 t/año de sal	Ingeniería de disposición; cristalización y estanques
Hidrología	Variación de caudales y concentraciones por cambio climático	Diseño modular; serie hidroquímica larga
Energía	27–36 MW de demanda continua	Contrato de suministro; energía renovable
Financiamiento	Brecha respecto de los beneficios agrícolas	Costo compartido entre empresa y Estado
Gobernanza	Reparto del agua tratada entre Iglesia, Jáchal y Huaco	Consejo de cuenca con usuarios y empresa
Plazo	Obra de gran escala frente al cronograma minero	Etapas y puesta en marcha por módulos

GOBERNANZA E IMPLEMENTACIÓN

El agua tratada es un bien con costo: su reparto necesita reglas claras

1

Caracterización y piloto

Medición de los afluentes y planta piloto en la Junta de la Palca

2

Etapa 1

Eliminación de boro del río Blanco

3

Etapa 2

Ampliación de la capacidad según la demanda efectiva de riego y de bebida

Gestión integrada de la cuenca del río Jáchal, con participación de regantes, departamentos y empresa.

CONCLUSIONES

- Técnicamente plausible y coherente con la solución que el proyecto analiza para el Pacífico; salinidad de la mezcla de 1,4 g/l.
- El boro de la mezcla (1,7–1,9 mg/l) depende de La Palca; llegar a 0,5 mg/l exige tratar todo el caudal, con un costo cerca de 80 % mayor.
- La salmuera es un componente de diseño: con 80 % de recuperación, 1 m³/s y 426.000 t de sal por año.
- Costo anual de 160–179 M USD (1,0–1,1 USD/m³) con 5 % y 25 años; comparable con el Pacífico solo por costo evitado.
- Los beneficios agrícolas cubren entre 3 % y 15 % del costo; el empleo adicional va de 540 a 3.640 personas.
- Se justifica como solución integrada con financiamiento compartido y efecto sobre la licencia social.

INFORMACIÓN Y ESTUDIOS NECESARIOS

Insumos para pasar de la propuesta al diseño

- Serie de caudales y calidad (sales, boro, arsénico) por afluente y estación; aforos en la Junta de la Palca
- Ensayos piloto de ósmosis inversa con ajuste de pH y resina NMDG sobre agua real
- Diseño de la disposición de salmuera y evaluación ambiental
- Cota, trazado del acueducto y costo energético de elevación
- Consumo de agua del proceso de Vicuña y costo de la alternativa del Pacífico
- Relevamiento de superficie, cultivos, rendimientos, márgenes y empleo agrícola
- Estudio de salud: exposición a boro y arsénico y costo evitado
- Esquema legal e institucional: derechos de agua tratada, tarifas y gobernanza

BIBLIOGRAFÍA PRINCIPAL

Formato APA

Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). Water quality for agriculture (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29, Rev. 1). FAO.

Greenlee, L. F., Lawler, D. F., Freeman, B. D., Marrot, B., & Moulin, P. (2009). Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges. *Water Research*, 43(9), 2317–2348.

Maas, E. V., & Hoffman, G. J. (1977). Crop salt tolerance: Current assessment. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 103(IR2), 115–134.

Organización de las Naciones Unidas. (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (A/RES/70/1).

Tiempo de San Juan. (2025, 21 de octubre). La solución sanjuanina: la Universidad Católica, el agua de una minera y el río Jáchal en lugar de traerla del Pacífico.

Río Negro. (2026, 30 de julio). El Gobierno aprobó el proyecto número 22 del RIGI: Vicuña invertirá US\$9.700 millones en cobre.

iProfesional. (2026). El CEO de Vicuña revela las divisas por exportaciones y el empleo que generará el proyecto.

World Health Organization. (2017). Guidelines for drinking-water quality (4th ed., incl. 1st addendum).