

The background image is a wide-angle photograph of a desert landscape. In the foreground, there is a vast, flat, golden-brown field with sparse, low-lying vegetation. A dashed white line with three small white dots marks a winding path that starts from the bottom left and curves towards the center. In the background, a large, dark, conical mountain rises against a sky filled with soft, white and grey clouds. The lighting suggests a late afternoon or early morning setting, with long shadows and warm tones.

ENTREGANDO DESARROLLO ECONÓMICO Y SOCIAL EN ZONAS ÁRIDAS MEDIANTE SISTEMAS INTELIGENTES DE SUMINISTRO DE AGUA

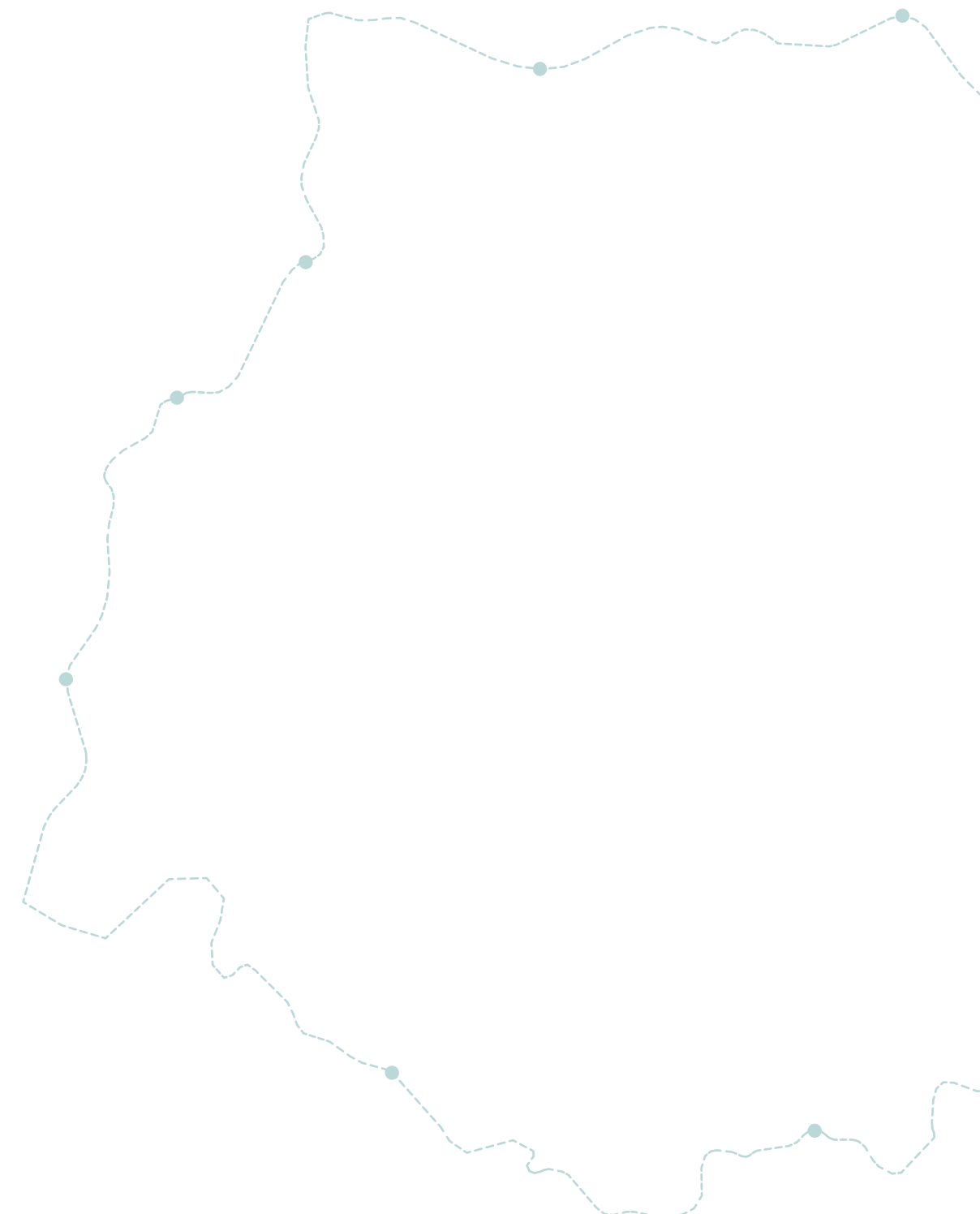
INFORME DEL SEGUNDO AÑO

M.C.Inversiones Limitada
una subsidiaria de Mitsubishi Corporation



THE UNIVERSITY
OF QUEENSLAND
AUSTRALIA

SMI ICEChile
INTERNATIONAL CENTRE OF EXCELLENCE





Banco de imágenes gratis (Unsplash)

INTRODUCCIÓN

Actualmente, existe una importante demanda mundial de minerales producto del crecimiento económico y la constante preocupación en el medio ambiente de la sociedad. El declive de los ecosistemas y los impactos del cambio climático presiona e impulsa de manera imperante el desarrollo de soluciones sustentables en materia tecnológica.

Chile se encuentra en una posición altamente compleja frente a estos desafíos. Por un lado, está siendo afectado por aumentos de temperatura, disminución de lluvias y fenómenos climáticos extremos cada vez más frecuentes. Por otro lado, el país tiene reservas importantes de cobre, litio, y minerales críticos para la transición energética. Asimismo, la extracción de estos minerales se ve afectada por el cambio climático y por las dinámicas locales, tanto sociales como ambientales.

El agua además de ser necesaria para la extracción de minerales, es uno de los principales recursos afectados por el cambio climático. Su escasez afecta de manera importante al desarrollo regional, a los ecosistemas y comunidades locales.

Mejoras en la gestión de este recurso puede potenciar la resiliencia de Chile ante el cambio climático, apoyando el desarrollo regional y mejorando el suministro de los minerales mencionados.

Para hacer frente a la escasez de agua en las regiones mineras áridas de Chile, ha habido una considerable inversión en el desarrollo de plantas de desalinización. Esto ha llevado a una mayor disponibilidad de agua para algunos

grupos de usuarios. Sin embargo, muchos de estos proyectos de suministro de agua van dirigidos a usuarios individuales o grupales, con una coordinación limitada entre las partes interesadas a nivel regional. Esto ha restringido el acceso al agua y las oportunidades para compartir la infraestructura de suministro de agua y optimizar los beneficios regionales.

A medida que aumenta el interés en nuevos suministros de agua, en especial en las regiones del norte y centro de Chile, hay una necesidad de encontrar soluciones optimizadas que maximicen el desarrollo regional y minimicen el impacto ambiental y los costos para los usuarios.

Para abordar la necesidad mencionada SMI-ICE-Chile desarrolló este proyecto en colaboración con M.C Inversiones y el Sustainable Minerals Institute. Se identificó la necesidad de tener herramientas para comunicar y analizar las oportunidades para sistemas integrados de suministro de agua, y se decidió que el proyecto desarrollaría estas herramientas y las usaría para involucrar a quienes toman las decisiones y a otras partes interesadas en la exploración de opciones integradas de suministro de agua para la Región de Atacama en Chile. El proyecto se encuentra en el final del segundo año, de un total de tres años.

Durante este tiempo, se desarrollaron dos herramientas de planificación y se produjo una interacción considerable con las partes interesadas para realizar pruebas y recibir comentarios.

VISIÓN Y PROPÓSITO DEL PROYECTO

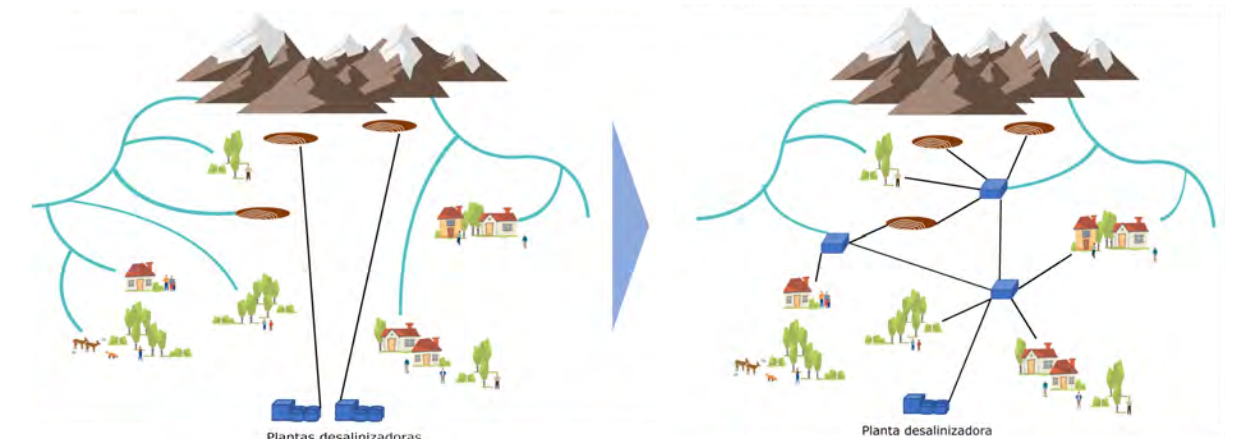
La visión detrás del proyecto es el desarrollo generalizado de sistemas integrados de suministro de agua que aumenten el acceso para todos los usuarios, minimicen los costos unitarios y el impacto ambiental asociado a su uso.

El propósito del proyecto es apoyar la transición desde sistemas individuales de suministro de agua que aumentan la presión en fuentes individuales a sistemas integrados que permitan la optimización del uso del recursos por medio del desarrollo y la aplicación de herramientas y de la participación de las partes interesadas.

Para lograr esto, el proyecto tiene tres objetivos clave:

- Desarrollar una herramienta basada en SIG que apoye la planificación de sistemas de suministro de agua a partir del uso de datos físicos, sociales y ambientales, y la aplicación de algoritmos de optimización.
- Desarrollar una herramienta educativa en línea que permita al usuario desarrollar y analizar sistemas integrados básicos de suministro de agua.
- Identificar e interactuar con las partes interesadas pertinentes, para apoyar el desarrollo de herramientas y la continuación del proyecto.

El concepto detrás del proyecto es realizar un cambio desde sistemas de suministro de agua desconectados a sistemas integrados, más eficientes y confiables.



UBICACIÓN DEL PROYECTO

Se escogió la Región de Atacama como el lugar de desarrollo del proyecto debido los desafíos locales de gestión de recursos hídricos, al potencial socioeconómico y la probable inversión futura en nueva infraestructura de suministro de agua. La ubicación proporciona datos con los que desarrollar y probar las herramientas, a la vez que permite

que una variedad de partes interesadas contribuyan con conocimiento, nuevas ideas y retroalimentación para el proyecto. No obstante, el concepto del proyecto es altamente aplicable tanto en otras regiones de Chile como otros países. Por tanto, el equipo del proyecto también está considerando posibles futuras aplicaciones en otras áreas.



RESULTADOS DEL PRIMER AÑO DEL PROYECTO

El objetivo del primer año del proyecto era estudiar la factibilidad y utilidad de este mediante la participación de los actores relevantes. Esto incluyó la recepción de comentarios acerca del concepto y enfoque del proyecto, desarrollar una metodología y versiones preliminares de las herramientas, e investigar la factibilidad de los sistemas integrados de suministro de agua en Chile. Dada la importancia del primer año como base para el segundo, esta sección proporcionará una descripción general de las principales actividades y resultados.

DESARROLLO DE HERRAMIENTAS

Para contribuir a una mejor gestión de los recursos hídricos, que sea participativa y transparente, el proyecto considera el desarrollo de dos herramientas:

- La herramienta simplificada: una herramienta en línea de acceso público dirigida a no expertos e instituciones educativas. El objetivo de esta herramienta es educar al público general sobre el concepto de infraestructura de agua compartida y permitir la exploración inicial de soluciones de suministro de agua interconectadas.
- La herramienta integral: una herramienta completa dirigida a partes interesadas que son expertos en planificación del suministro de agua. El objetivo es permitir que el usuario identifique y analice soluciones de suministro de agua que sean confiables, sostenibles y costo-eficientes. La herramienta está diseñada para facilitar el diálogo entre las partes interesadas que puedan tener diferentes objetivos en el suministro de agua.

PARTICIPACIÓN DE LAS PARTES INTERESADAS

Un aspecto crítico para el éxito del proyecto es la participación de diversas partes interesadas de múltiples sectores que apoyen la dirección del proyecto y garanticen que los productos y los resultados sean relevantes para los posibles usuarios. La participación en el primer año se realizó mediante una serie de talleres en línea para presentar el proyecto y su concepto, para recibir comentarios sobre la relevancia e identificar vacíos, y discutir las oportunidades y desafíos asociados con la implementación del concepto.

Se realizaron tres talleres, cada uno para un sector diferente: la industria minera, la agricultura y las instituciones públicas. Se invitó a los participantes con sede en la Región de Atacama para garantizar una fuerte perspectiva local. Los talleres se llevaron a cabo en línea debido a las restricciones existentes en ese momento por la pandemia de Covid-19.

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD

Una de las preguntas clave consideradas en el primer año del proyecto fue “¿es el concepto factible?”. Los sistemas integrados de suministro de agua se aplican comúnmente en entornos urbanos donde hay una alta concentración de usuarios de agua, pero aún no son comunes en zonas más remotas con diversos sectores de usuarios de agua. Este es particularmente el caso en las regiones mineras de Chile donde tradicionalmente hay una colaboración limitada entre sectores en torno a fuentes y sistemas de suministro de agua.

Se llevó a cabo un estudio de la factibilidad del concepto considerando factores económicos, sociales e institucionales, por el equipo del proyecto y expertos del Centro de Derecho y Gestión del Agua de la Pontificia Universidad Católica de Chile. El estudio revisó documentos públicos disponibles de estudios chilenos e internacionales, incluida literatura científica e informes de la industria y del gobierno. El estudio también consideró la retroalimentación de la industria y otras partes interesadas en el proyecto.

RESULTADOS DE DESARROLLO DE HERRAMIENTAS

Los objetivos principales del desarrollo de herramientas en el primer año fueron desarrollar un prototipo de la herramienta simplificada, desarrollar los conjuntos de datos de referencia para la herramienta integral, generar la metodología de las herramientas de planificación y probar posibles algoritmos de optimización. La metodología de las herramientas de planificación se resume en la Figura 1 y consta de cuatro pasos. Los resultados para la Región de Atacama se resumen en la Figura 2.

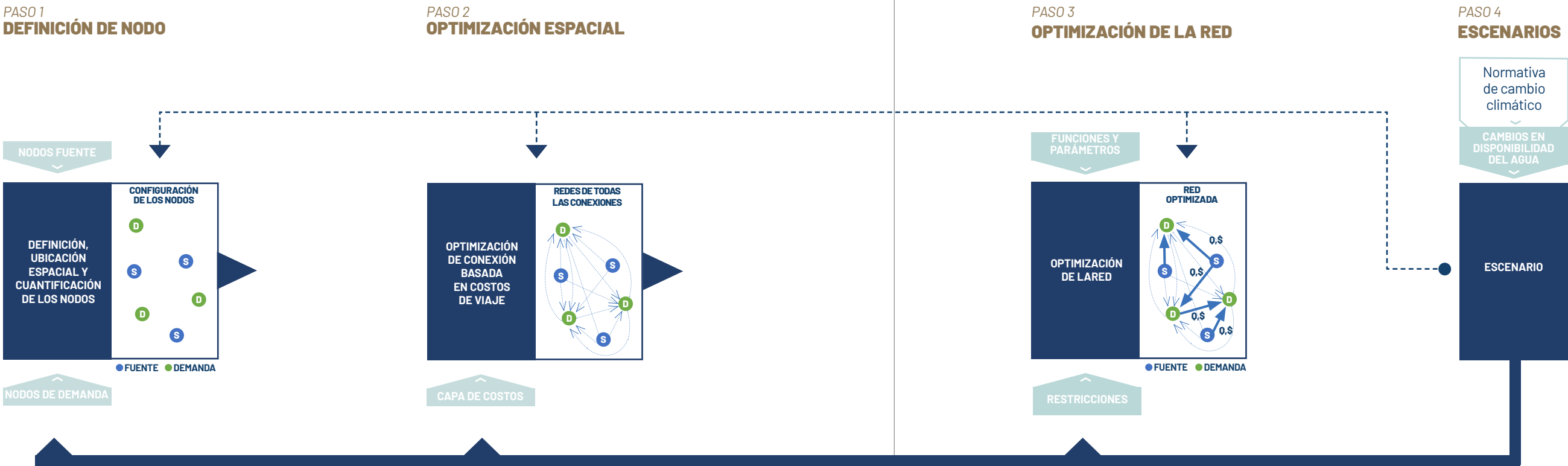


Figura 1: Descripción general de la metodología

Los nodos fuente representan los lugares donde se extrae el agua y los nodos de demanda representan los lugares donde se usa el agua.

Los nodos de fuente y demanda se identificaron y mapearon en el Paso 1. Los nodos fuente definidos para la Región de Atacama son Agua Superficial (WC), Agua Subterránea (GW), Plantas Desalinizadoras (DP) y Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (WWTP). Los nodos de demanda son Agua Potable Urbana (UPW), Agua Potable Rural (RPW), Comunidades Indígenas (IC), Minería (M), Otras Industrias (I), Agricultura (A).

Una capa de costos es un mapa que se puede utilizar para estimar los costos, incluidos los financieros y ambientales, de cualquier infraestructura de suministro de agua.

Se creó una capa de costos al combinar un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) y áreas de protección ambiental para la Región de Atacama. Utilizando como entrada la capa de costos y los nodos del paso 1, se utilizaron herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para obtener la forma más costo-eficiente de conectar los nodos. Se generó una red resultante de todas las conexiones posibles. Estas conexiones se caracterizan por la longitud (L), la diferencia de elevación (Δh) y el costo medioambiental (área perturbada).

Se optimizó una función objetivo que combina el costo económico y ambiental para encontrar, a partir de la red de todas las posibles conexiones de la Etapa 2, la red óptima de suministro de agua que satisface todas las demandas de agua con un costo mínimo.

Se implementaron escenarios para probar las capacidades de la herramienta. Estos incluyeron cambiar los nodos para representar nuevas fuentes y demandas de agua, y la cantidad de agua disponible para representar el cambio climático y nuevos escenarios de regulación.

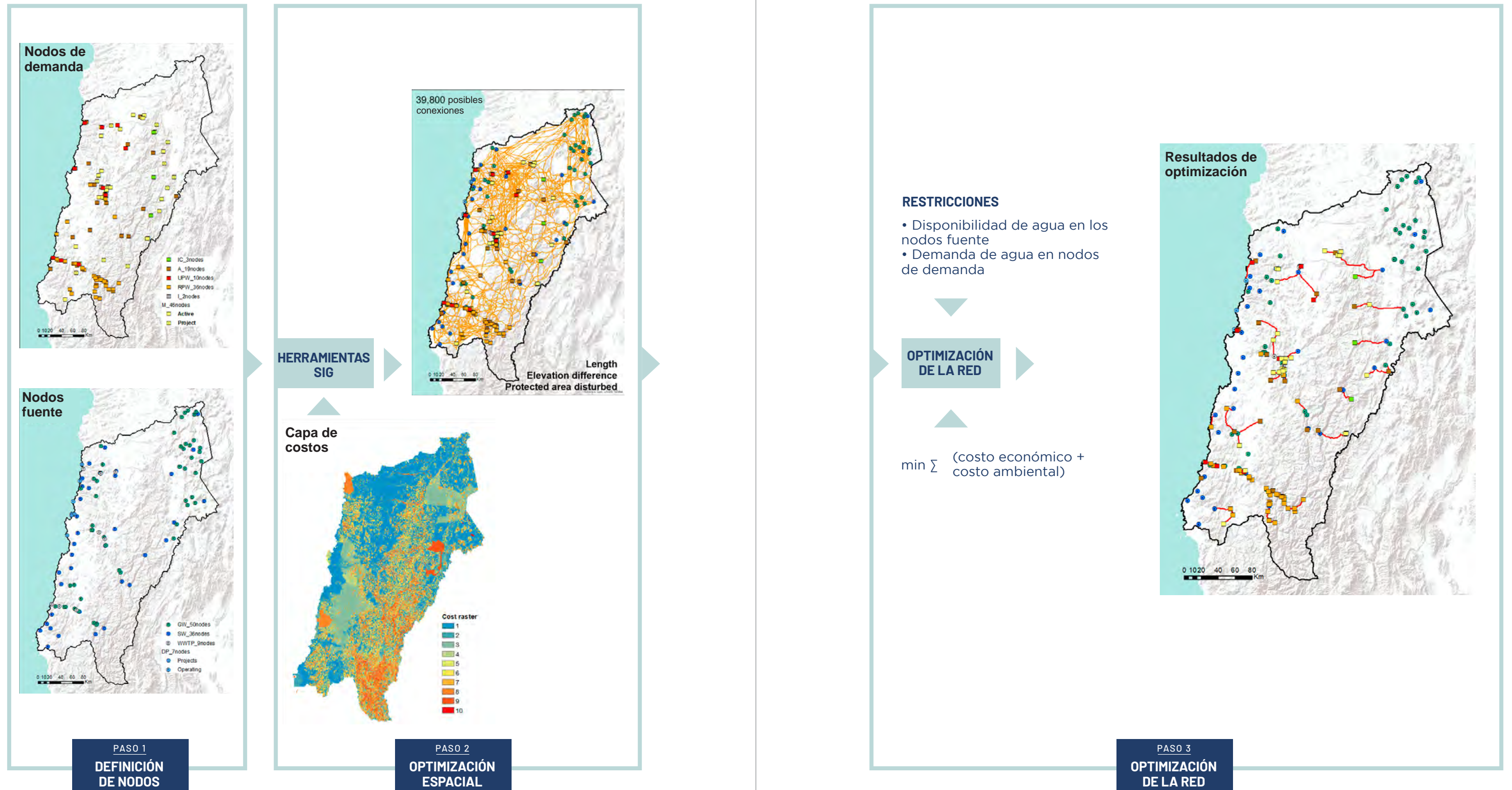


Figura 2: Descripción general de los resultados del primer año para la Región de Atacama

RESULTADOS DE LA PARTICIPACIÓN DE LAS PARTES INTERESADAS

Los talleres realizados durante el primer año se enfocaron en recibir retroalimentación con respecto al concepto y proyecto. Las actividades de discusión en grupo se centraron en el potencial de las herramientas que se estaban desarrollando, las barreras y los desafíos que enfrenta el concepto y cómo cada sector podría apoyar el proyecto y la implementación de dicho concepto. A continuación, se presentarán los principales resultados.

Los resultados de las encuestas demostraron que todos los participantes de cada sector consideraron que el concepto sería beneficioso para la región. También se descubrió que todos los participantes creían muy probable que la institución a la que pertenecen usaría las herramientas de planificación. Hubo un consenso general de que la mayoría de los sectores estarían dispuestos a compartir infraestructura, aunque algunos participantes del sector agrícola pensaron que esto sería poco probable.

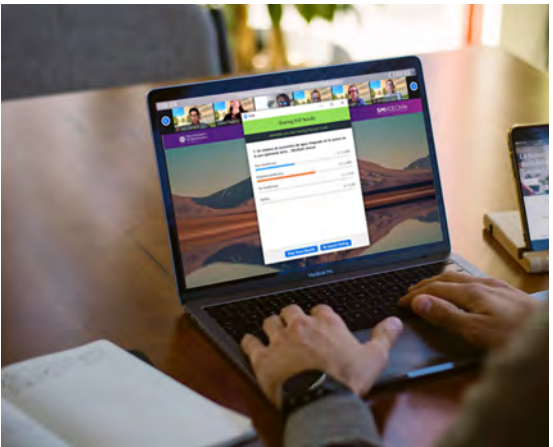
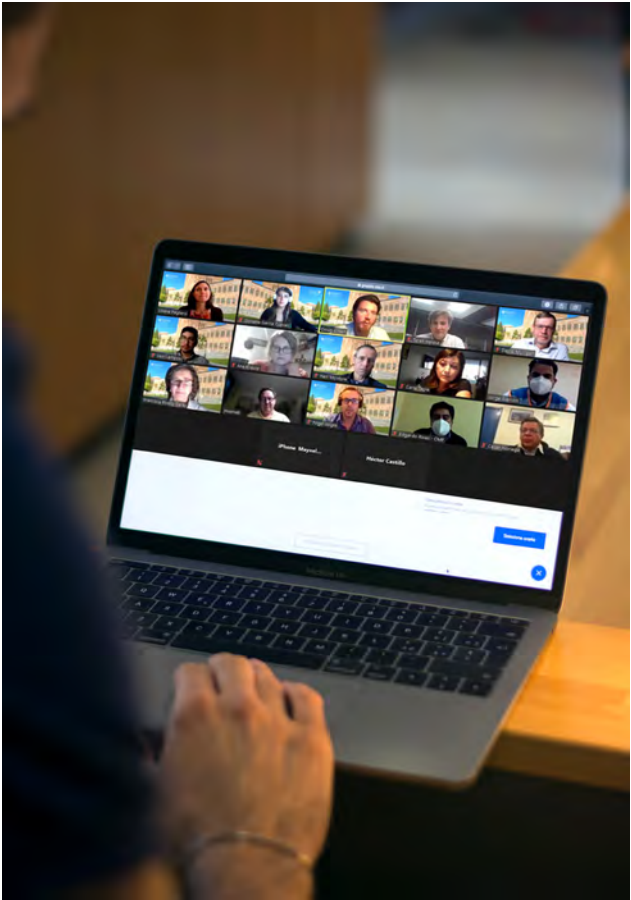
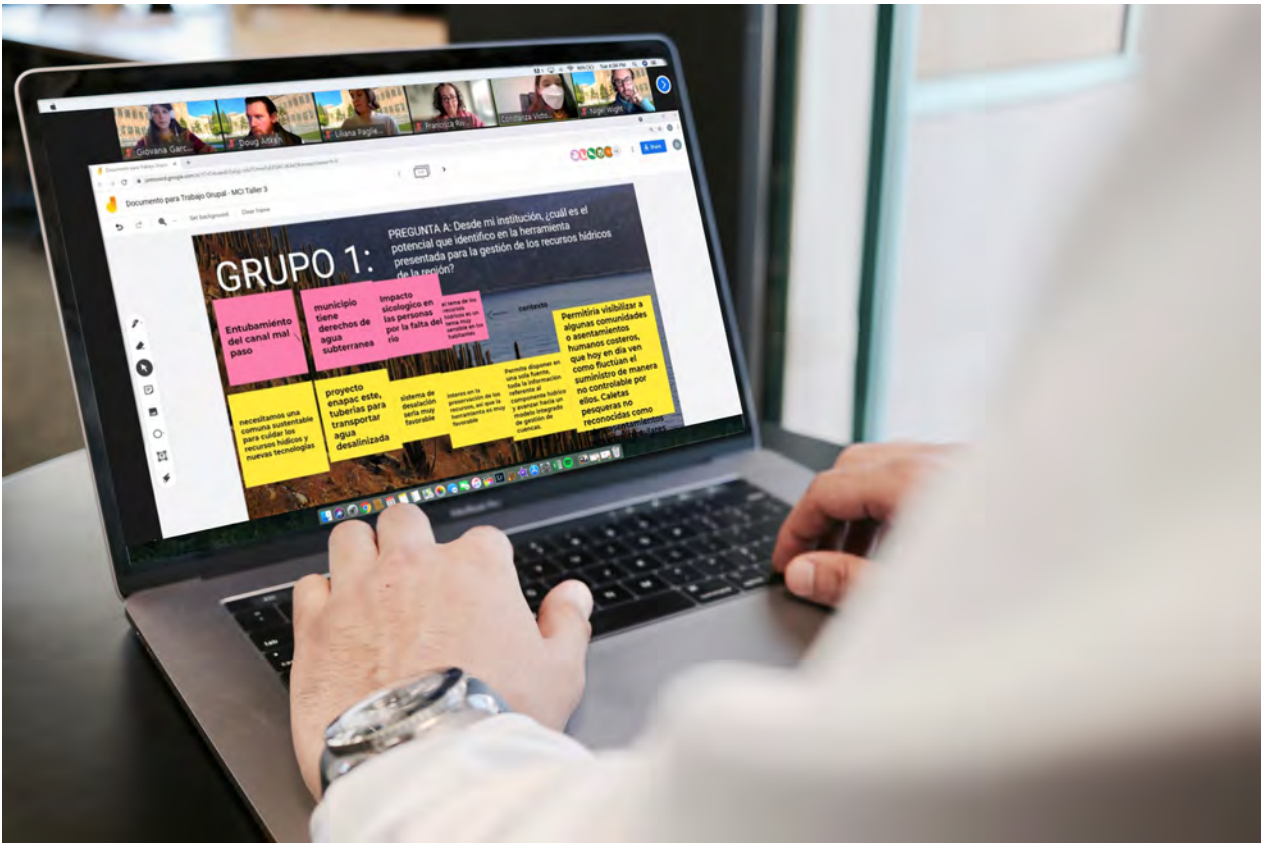
Hubo un acuerdo general en que la herramienta tiene un gran potencial para generar información que cada usuario pueda utilizar con el fin de comprender mejor el contexto actual y considerar futuras opciones de manera más colaborativa. Se mencionó con frecuencia que la implementación de las herramientas podría actuar como un paso clave en la transición hacia una gestión integrada de cuencas, un resultado final que cada sector consideró importante.

Cada sector identificó numerosas barreras y desafíos en los talleres. Estos tendían a enfocarse en varios puntos clave: la falta de una política existente para apoyar y legislar el uso de agua salada y el uso compartido de infraestructura; la coordinación existente entre sectores a nivel regional; y el acceso limitado a información confiable sobre el contexto y las oportunidades actuales.

REFLEXIONES

Los resultados de la participación de las partes interesadas durante el primer año fueron muy prometedores. Se vio un claro interés de las partes interesadas en el concepto y el proyecto, y hubo un consenso de que los sistemas integrados de suministro de agua son necesarios en la región. Las barreras y retos identificados son una preocupación, puesto que: actualmente hay una cultura limitada en lo que concierne a coordinación entre sectores para abordar retos y oportunidades de gestión de aguas; la legislación y políticas públicas acerca del tema no proveen claridad ni apoyo; y la falta general de información sobre el contexto regional del agua dificulta el avance.

Este proyecto busca ayudar a resolver varias de las barreras y desafíos identificados. Otro resultado central de los talleres fue la evidente voluntad de cada sector para involucrarse en el proyecto y ayudar a combatir las barreras que el concepto enfrenta en la región.



RESULTADOS DEL ESTUDIO DE FACTIBILIDAD

El estudio de factibilidad realizado durante el primer año fue crítico para identificar los mayores problemas que pudieran afectar la implementación del concepto en Chile. El estudio fue realizado por el equipo de investigación con el apoyo de expertos locales de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Los temas centrales que se consideraron fueron la factibilidad económica, social e institucional del concepto. En las siguientes subsecciones se presenta un resumen de cada tema.

FACTIBILIDAD ECONÓMICA

La factibilidad económica del concepto es considerada como uno de los factores críticos, dado que una rentabilidad negativa podría impactar la posición financiera en la que se encuentran los usuarios de agua e inversores en la región. Estudios anteriores indican que la integración de infraestructura hídrica existente puede ser costosa, con un beneficio económico poco claro. Es probable que los sistemas integrados sean más económicamente factibles cuando se desarrollan utilizando infraestructura nueva y, posiblemente, alguna de la infraestructura ya existente.

En términos de factibilidad para diferentes sectores, el caso más positivo es probablemente el de la industria minera, sector que tiende a contar con suficientes recursos para financiar costes de agua ligeramente más altos a cambio de mayor confiabilidad y una menor probabilidad de generar conflictos locales. La experiencia internacional sugiere que el sector agrícola y las comunidades necesitarían apoyo financiero para tener acceso a un sistema integrado que utilice agua desalinizada. Sin embargo, otros sectores como el minero pueden contemplar beneficios en subsidiar el acceso al sistema. La experiencia internacional también muestra que tanto el sector público como privado pueden invertir en la implementación del concepto para apoyar el desarrollo socioeconómico regional.

FACTIBILIDAD SOCIAL

La factibilidad social del concepto depende de si cada grupo de usuarios se beneficia y de si cada grupo está dispuesto a aceptar el concepto a través del uso compartido de recursos y colaboración.

Parece probable que la implementación del concepto podría generar un considerable beneficio de un mayor acceso al agua y una reducción del impacto ambiental. No obstante, el manejo de aguas es un tema extremadamente sensible en áreas con escasez hídrica, particularmente en áreas donde existe un historial de conflicto entre los usuarios. La confianza entre los usuarios de agua y la participación de todos los sectores en la toma de decisiones es crítica para la factibilidad social del concepto, por lo tanto, uno de los mayores desafíos es cómo construir e implementar procesos inclusivos.

FACTIBILIDAD INSTITUCIONAL

Las instituciones y regulaciones pueden tener una influencia considerable en la factibilidad de conceptos relacionados con infraestructura, lo que es particularmente el caso para proyectos de gestión de agua. Chile es un caso muy particular con respecto a su código de aguas y el sistema de mercado que emplea. Esta particularidad puede facilitar un tipo de sistema integrado donde los derechos del sistema son controlados y vendidos a través de un mercado de vendedores y usuarios. No obstante, el actual debate constitucional en Chile parece que resultará en un cambio hacia el control público de los recursos y la priorización del agua para grupos de usuarios particulares, y el sistema de mercado podría ser potencialmente abolido.

El concepto también es aplicable a un contexto regulatorio donde se priorizan usuarios específicos y donde la compra y venta de derechos de agua está restringida. Sin embargo, la factibilidad dependerá de qué nuevas regulaciones se den en Chile y cómo estas se implementen.

Hay una gran incertidumbre en Chile acerca de cómo las instituciones del sector público abordarán el manejo de aguas en el futuro, lo que probablemente afectará la inversión del sector privado en nuevos proyectos de infraestructura. En cuanto al concepto, su flexibilidad para adaptarse a diferentes contextos institucionales debería respaldar su factibilidad general.

A pesar de la naturaleza prometedora del concepto y los posibles beneficios para Chile, hay algunas áreas de preocupación sobre la factibilidad que necesitan ser analizadas más a fondo y abordadas. El costo de los sistemas integrados tiende a ser alto, en particular cuando el agua de mar desalinizada se considera una fuente de suministro.

Esto puede dificultar que el sector agrícola y las comunidades accedan a dichos sistemas. Subsidios del Estado o el apoyo de la industria minera pueden ofrecer soluciones. El concepto también depende de la confianza y cooperación entre los distintos involucrados, incluyendo a los operadores del sistema, propietarios de derechos de agua y usuarios de agua. Dicha confianza no tiende a ser común en las zonas áridas de Chile. Esta tendría que ser cultivada durante un período de tiempo relativamente a través de la participación, colaboración y acuerdos.

Finalmente, la incertidumbre acerca de la regulación es un factor clave en la factibilidad del concepto y hay una falta de regulación y política clara para respaldar el concepto. Ahora hay un enfoque en las instituciones gubernamentales en el desarrollo de planes de gestión integrada de cuencas y el uso compartido de infraestructura hídrica. Sin embargo, se deben desarrollar guías y regulaciones para respaldar el proceso.



EL PLAN DEL SEGUNDO AÑO

El primer año del proyecto estuvo enfocado en gran medida en obtener datos regionales, desarrollar versiones preliminares de las herramientas integral y simplificada, y un involucramiento temprano con las partes interesadas locales. El segundo año estuvo enfocado en actualizar los datos regionales, desarrollar las herramientas y las funciones y modelos asociados, desarrollar y probar escenarios de suministro de agua, profundizar la participación con los interesados locales y establecer conexiones con grupos y proyectos nacionales e internacionales.

DESARROLLO DE HERRAMIENTAS

Los objetivos técnicos en el segundo año incluyeron hacer que la herramienta integral fuera más fácil de usar, y mejorar los algoritmos de optimización. El trabajo en la optimización espacial incluyó la incorporación de una capa de costos de peligros naturales, e investigaciones de doctorado para mejorar las funciones de costo ambiental.

El trabajo en la optimización de la red incluyó la selección de un *solver* gratuito (el primer año se utilizó uno con licencia comercial), la implementación de no-linealidad para refinar los resultados optimizados, y la inclusión preliminar de nodos de almacenamiento de embalses en optimización dinámica. Todos los pasos para aplicar la herramienta integral fueron codificados en Python e implementaron en un único flujo de trabajo para uso fácil por parte de usuarios técnicos. Un manual de usuario se está escribiendo actualmente.

En base a los talleres realizados con las partes interesadas durante este año se crearon y optimizaron un conjunto de escenarios para tres áreas diferentes en la región utilizando la herramienta integral.

Se recopilaban sugerencias para mejorar la herramienta simplificada en los talleres del segundo año y actualmente se están implementando.

PARTICIPACIÓN DE LAS PARTES INTERESADAS

La interacción con las partes interesadas durante el primer año se limitó a compromisos virtuales debido a la pandemia de Covid-19. La participación directa fue una prioridad para el segundo año, lo que se logró a través de una serie de talleres presenciales en la Región de Atacama.

En contraste con los talleres del primer año, que fueron organizados por sector, los talleres del segundo año se organizaron por localidad regional e incluyeron múltiples sectores de manera conjunta. El propósito de los talleres fue presentar el proyecto y las actualizaciones recientes de este, permitir a los participantes probar la herramienta simplificada y proporcionar comentarios, y discutir los desafíos regionales de suministro de agua y construir posibles escenarios de suministro de agua integrado.

Los talleres se llevaron a cabo en abril de 2022 en Vallenar, Copiapó y Diego de Almagro. Un total de 40 personas participaron, de 19 organizaciones, lo que llevó a conversaciones extremadamente productivas. El equipo del proyecto está muy agradecido con aquellos que participaron.

Además de la serie de talleres, se planificó el compromiso con organizaciones nacionales e internacionales para garantizar la difusión del concepto y del proyecto en múltiples niveles. Se realizaron encuentros con el Ministerio de Minería, la Dirección General de Aguas y la Comisión Chilena del Cobre para discutir el proyecto y su alineamiento con la estrategia nacional. El equipo del proyecto también fue invitado al Centro de Estudios del Cobre y la Minería (CESCO) para liderar un proyecto que analice las oportunidades y desafíos asociados con infraestructura hídrica compartida en Chile y Perú. Dicho proyecto condujo a una mayor diseminación del concepto y el proyecto MCI- SMI.

El compromiso con las partes interesadas también se llevó a cabo a través de presentaciones del proyecto en varias conferencias y seminarios tanto en Chile como en Australia.

Detalles adicionales sobre las actividades de participación del segundo año se incluyen más adelante en este informe.

EQUIPO DEL SEGUNDO
AÑO DE PROYECTO



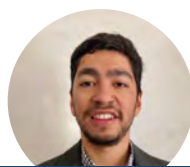
PROF. NEIL MCINTYRE
Asesor técnico



DR LILIANA PAGLIERO
Líder técnico



DR DOUG AITKEN
Líder de Proyecto



LEVI CAMPOS
Investigador - Desarrollo
de Herramienta



DR PASCAL BOLZ
Investigador - SIG & Mapeo



DR NATHALIE JAMETT
Investigadora - Optimización
& Desarrollo de Herramienta



PROF. GUILLERMO DONOSO
Investigador - Factibilidad
del Concepto



DR MARTIN STRINGER
Investigador - Visualización
de la herramienta



DR SEBASTIÁN HERRERA
Optimización & Desarrollo
de Herramienta



FRANCISCA RIVERO
Investigadora - Participación
de Partes interesadas



PROF. LUIS CISTERNAS
Investigador - Optimización
& Desarrollo de Herramienta



CLAUDIA MORENO
Investigadora PhD -
Costos ambientales



BABAK ZOLGHADR-ASLI
Investigador PhD - Suministro
de agua agrícola



RODRIGO RIVAS
Gerente Finanzas



DR GABRIEL PÉREZ MURILLO
Investigador PhD - SIG &
Codificación en Python



GIOVANA GARCIA
Investigadora -
Recursos Hídricos





CONTEXTO HÍDRICO REGIONAL Y DESAFÍOS

Situación de los recursos hídricos

Las regiones del norte de Chile enfrentan una grave escasez de agua debido a la aridez natural de la zona, la sobreexplotación de los recursos hídricos continentales y el aumento de la demanda. La Región de Atacama representa bien la escasez de agua del Norte de Chile. La región (Figura 3) es una zona de transición entre el norte árido y los fértiles valles centrales.

El clima se caracteriza por bajas precipitaciones, por lo general bajo los 100 mm/año, concentradas en unos pocos días durante el invierno.

Las demandas de agua de la región son mayores que la disponibilidad de agua continental (Ministerio del Interior, 2015).

Tanto los recursos hídricos superficiales como subterráneos están sobre asignados y, actualmente más de la mitad de los recursos hídricos subterráneos disponibles están declarados restringidos o prohibidos. Desde 2008 se ha declarado 10 veces la existencia de “zonas de escasez hídrica” en la región, la mayoría de estas declaraciones fueron en 2021 (DGA, 2021).

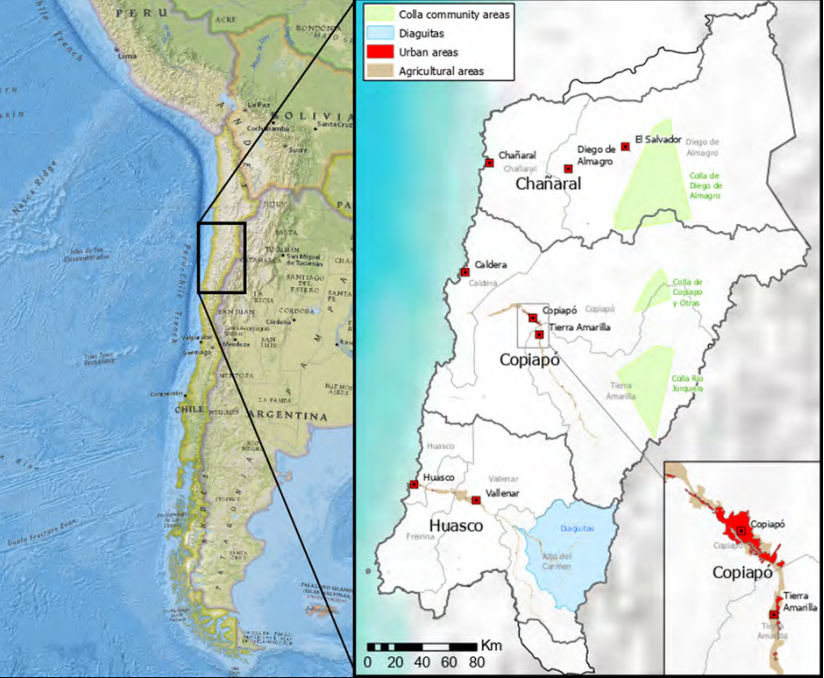


Figura 3: La Región de Atacama



Figura 4: Reserva Santa Juana, Valle del Huasco (DGA, 2014)

La Región de Atacama tiene cuatro importantes cuencas hidrográficas: El río Salado, el río Copiapó, el río Huasco y las cuencas de los Andes altos. Las cuencas altoandinas no desembocan en el mar, sino en cuerpos de agua donde el agua se evapora. Como resultado, en estas cuencas existen grandes salares y lagos.

El agua subterránea existe principalmente en los acuíferos aluviales a lo largo de los valles fluviales. La Región de Atacama presenta la peculiaridad de tener glaciares en zonas áridas (Universidad de Atacama, 2011) con una superficie glaciaria total de 168.908 ha (García et al. 2017).

En la Región de Atacama existen dos grandes embalses, una en la Cuenca del río Copiapó (Embalse Lautaro) y otra en la Cuenca del río Huasco (Embalse Santa Juana, Figura 4), ambos suministran agua para riego.

Los mayores usuarios de agua en la Región de Atacama son la agricultura y la minería. La agricultura se concentra en las cuencas de los ríos Copiapó y Huasco y depende de fuentes de agua superficiales y subterráneas. La minería está presente en toda la región, utilizando aguas subterráneas, aguas superficiales y agua de mar desalinizada. La región tiene una importante población indígena, en particular las comunidades Colla y Diaguita, que dependen de los suministros locales de agua superficial y subterránea.

Situación de los recursos hídricos

La Dirección General de Aguas (DGA) está desarrollando un “Plan Estratégico de Gestión de Recursos Hídricos” para cuencas prioritarias en Chile. En la Región de Atacama, las cuencas priorizadas son las cuencas del río Copiapó del río Huasco. Los hallazgos resaltan la necesidad de herramientas participativas que conduzcan a una colaboración eficiente entre los usuarios de agua y las partes interesadas, que permita una planificación y gestión coordinada de los recursos hídricos. Las soluciones propuestas en estos estudios incluyen aumentar el suministro subterráneo de agua por medio de recarga artificial de acuíferos en los valles de las cuencas del río Copiapó y Huasco. Se planifica la construcción de un gran embalse de suministro de agua, el Embalse Carmen, en la cuenca del Huasco, así como la reutilización de agua proveniente de plantas de tratamiento de aguas residuales.

Los estudios reconocen proyectos de desalinización existentes para agua potable y la industria minera, pero no proponen mejoras en el uso compartido de este recurso. La DGA también tiene planeado un programa colaborativo para mejorar la red de monitoreo tanto de la cantidad como de la calidad del agua superficial y subterránea en la región.

Otras oportunidades y desafíos hacia una gestión sostenible del agua

Los proyectos mineros en la región han invertido en suministro de agua de mar desalinizada para liberar fuentes de agua tradicionales para uso de las comunidades, y comparten el agua desalinizada con la agricultura en al menos un caso. Una motivación importante para este proyecto es la oportunidad de tener múltiples beneficiarios de nuevas inversiones en infraestructura, apoyadas en una modelación y planificación participativas. Sin embargo, el estudio de factibilidad realizado durante el primer año del proyecto resaltó numerosos desafíos, incluyendo: incertidumbres sobre los futuros mecanismos regulatorios para compartir suministros de agua; la necesidad general de que el uso agrícola de agua desalinizada esté fuertemente subsidiado; y el desafío de manejar los distintos objetivos y preocupaciones de los diferentes grupos de usuarios en un proceso participativo.





TALLERES – DESAFÍOS HÍDRICOS

Se llevaron a cabo una serie de talleres en la Región de Atacama en abril de 2022, uno en Diego de Almagro, dos en Copiapó y uno en Vallenar.

Asistieron una variedad de participantes, incluyendo representantes de la industria minera, agricultura, gobierno regional y otras partes interesadas. Se dividieron a los participantes de cada taller en grupos y se les pidió discutir y reportar sus impresiones acerca de la situación de los recursos hídricos, los desafíos y sus posibles soluciones.

La Región de Atacama se dividió en tres áreas basadas en las tres cuencas principales: el área del río Huasco, el área del río Copiapó, y el área del río Salado (Figura 5).



Figura 5: Áreas de la Región de Atacama

VALLENAR (ÁREA DEL RÍO HUASCO)

La actividad económica más importante en esta área es la agricultura, que comenzó a proveer comida a la industria salitrera a fines de 1800. Desde entonces, los habitantes han estado manejando esta área de escasos recursos hídricos. Para el manejo del agua, el área del río Huasco está dividida en cuatro secciones, desde su nacimiento hasta la desembocadura del río.

Los problemas y conflictos actuales sobre recursos hídricos surgen por la disminución del acceso al agua para irrigación en la sección VI, desde Vallenar hasta la desembocadura del río Huasco en el mar. Se cree que esto es a causa de la tecnificación del riego en áreas río arriba, lo que ha resultado en una disminución en la recarga del acuífero que provee a la sección IV. También se mencionó que existe un derecho de agua por 960 L/s asignado en la primera sección del río, que está bajo la administración de la Región de Coquimbo. Este derecho de agua nunca se ha utilizado, sin embargo, si lo fuese, impactaría enormemente el acceso al agua río abajo. La industria minera en el área también ha reportado una escasez de agua para actividades tales como control de polvo. Se identificaron conflictos por el agua entre comunidades indígenas de los sectores altos y bajos del valle de Huasco.

La desalinización del agua es vista como una posible solución al problema del agua en la sección IV. Se aprobó un proyecto de desalinización con una capacidad máxima de 1400 L/s, pero al parecer se desconoce la fecha de inicio de construcción. También hay una percepción positiva del potencial que tendrían acueductos y otras soluciones para mejorar el acceso al agua. Los participantes reportaron que, pese a que se han realizado muchos estudios, ninguno ha resultado en proyectos.



CIUDAD DE COPIAPÓ
(ÁREA DEL RÍO COPIAPÓ)

El área de Copiapó es la más desarrollada en la región, con importantes sectores de minería y agricultura. Aguas CAP provee actualmente agua desalinizada para la minería (Cerro Negro Norte y Magnetita), para el consumo en los pueblos de Caldera (pagado por mina Caserones) y Puerto Totoralillo, y para regadío, descargando agua en el Canal Mal Paso. Aguas CAP también está buscando oportunidades para proveer con agua desalinizada a más usuarios en la región y está interesada en promover el desarrollo de infraestructura interconectada.

Como resultado de la reducción de los recursos de agua subterránea, recientemente comenzó a funcionar una nueva planta desalinizadora (ECONSSA) con una capacidad máxima de 1,200 L/s para abastecer a las ciudades de Copiapó, Chañaral y Tierra Amarilla.

Otro problema identificado que afecta los recursos hídricos es la infiltración desde el Embalse Lautaro. Esto tiene efectos diversos entre los usuarios de agua, ya que algunos ven esto como una pérdida de agua, mientras que otros se benefician de que la filtración recarga los acuíferos río abajo en el valle. Se identificó un conflicto en el área relacionado con la escasez de agua en los salares de los Andes altos.

Las oportunidades identificadas son el posible uso de agua desalinizada para riego de áreas costeras cercanas a la ciudad de Caldera y para proveer agua potable a comunidades pesqueras en la costa. Otras fuentes de agua alternativas identificadas en los talleres son el uso de atrapanieblas, para recolectar bruma marina, y el uso de aguas residuales tratadas, dependiendo de la calidad que tengan. Otra solución propuesta es la construcción de pequeñas reservas en los afluentes del río Copiapó.



**DIEGO DE ALMAGRO
(ÁREA DEL RÍO SALADO)**

Esta área es la de mayor escasez de agua en la región, y la industria minera tiene una importante presencia e impacto en el manejo de los recursos hídricos.

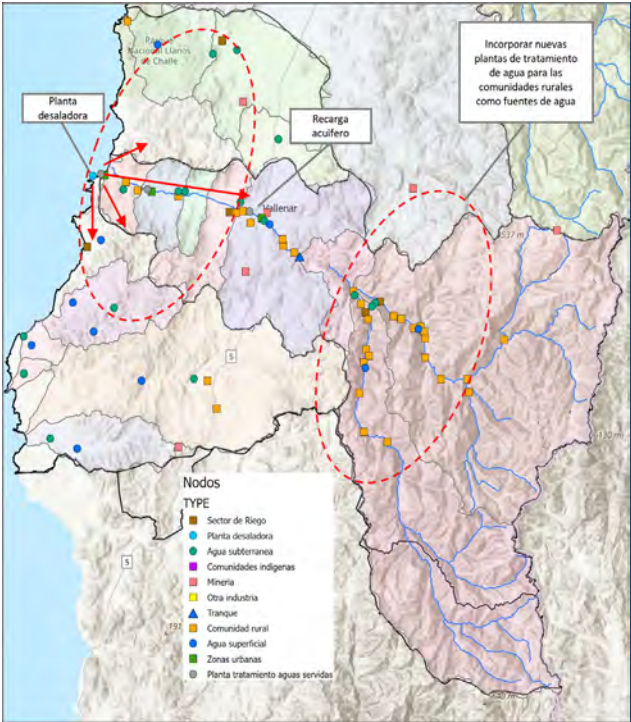
Actualmente, el pueblo de Diego de Almagro tiene problemas de suministro de agua, y se proyecta que estos problemas se intensifiquen debido al desarrollo minero en la zona, lo que aumentaría la población flotante en la localidad. La comuna de Diego de Almagro y las comunidades vecinas, junto a los usuarios de agua están organizados en un comité para evaluar y trabajar en pos de mejorar la situación hídrica en la zona. La División Salvador de Codelco está situada cerca de Diego de Almagro. La mina El Salvador provee 26 L/s de agua a Diego de Almagro desde las fuentes de agua existentes de la mina.

Salvador está llevando a cabo estudios para analizar opciones de suministro de agua como parte de sus obligaciones para el nuevo proyecto de la mina Rajo Inca. Otro problema que se identificó fue la extracción ilegal de agua desde el río Salado, lo que afecta en gran medida a los usuarios de agua río abajo. Adicionalmente, los participantes del taller notaron el bajo nivel de coordinación entre los proyectos de suministro de agua en el área.



ESCENARIOS DE SUMINISTRO INTEGRADO DE AGUA

Basándonos en la información recogida en la región, incluyendo los recientes estudios por parte del gobierno chileno y las ideas que entregaron los participantes de los talleres, se crearon escenarios que consideran sistemas integrados de suministro de agua para las tres áreas principales de la región.



Área del río Huasco:

El área costera del río Huasco (sección IV del río Huasco) carece de agua para satisfacer la demanda para irrigación y minería. Se propone la creación de una planta desalinizadora con una capacidad de 1400 L/s (basada en una planta planificada con permiso aprobado) y están planificadas plantas de tratamiento de aguas residuales para las comunidades en el valle aguas arriba.

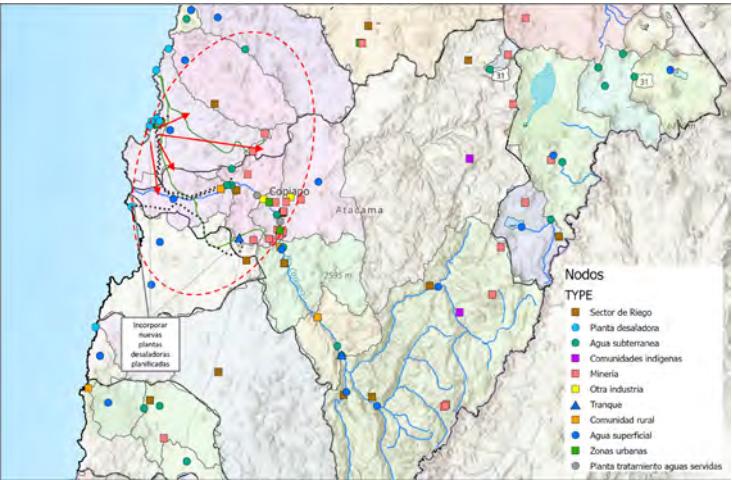
Este escenario asume la construcción de una planta desalinizadora con el objetivo de proveer de agua con fines de regadío en las plantas existentes de tratamiento de aguas residuales.

Una extensión de este escenario incorpora la reutilización de agua de las nuevas plantas de tratamiento de aguas residuales planificadas.

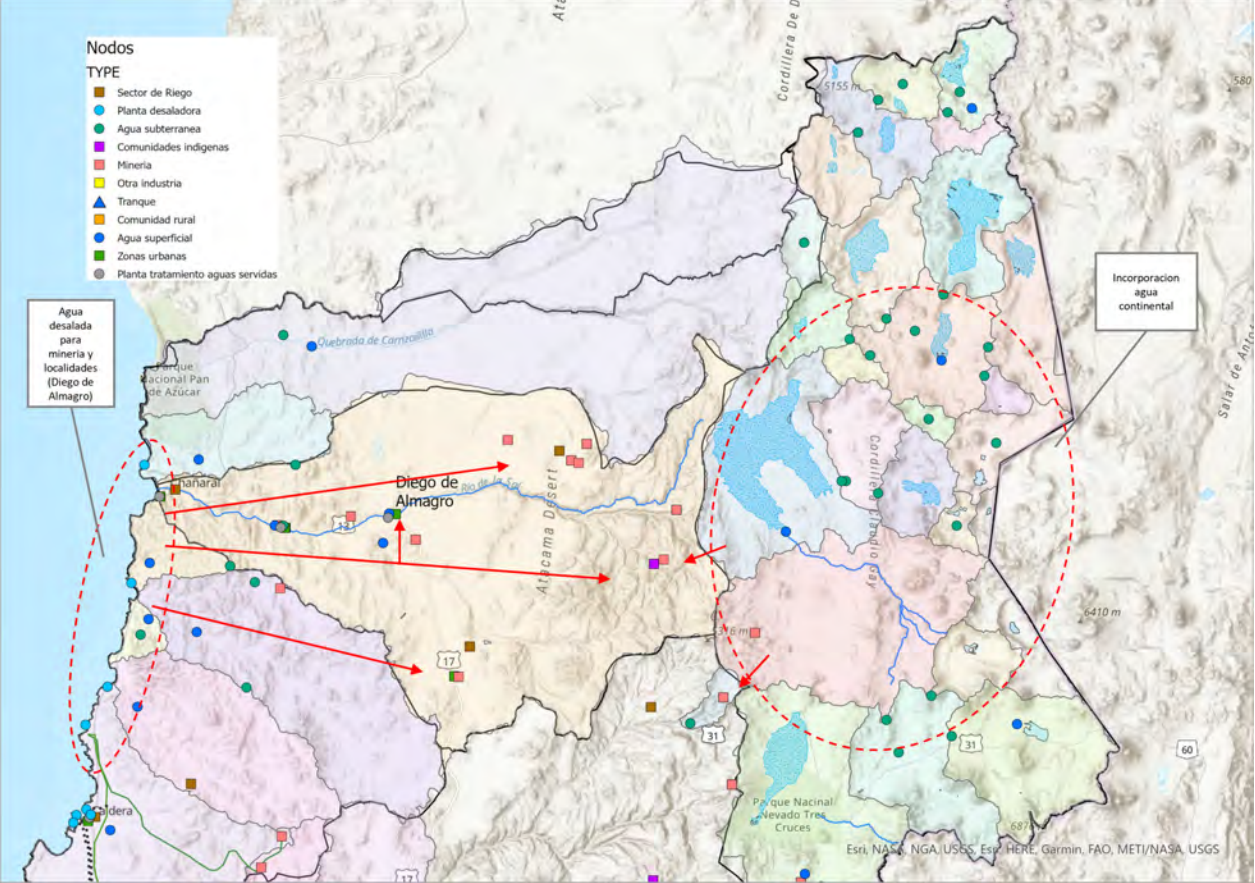
Área del río Copiapó:

De todas las áreas en la región de Atacama, la del río Copiapó tiene la mayor población, desarrollo económico y presencia industrial. El sector minero es extremadamente importante, con una creciente demanda por agua. Como resultado, existen numerosas plantas desalinizadora operativas y otras en etapa de desarrollo o planificación.

El escenario para el área del río Copiapó considera proveer agua desalinizada a las minas como ya está planeado y, además, a otras dos operaciones mineras.



También se asume que esas mismas fuentes de agua desalinizada proveerán agua a las comunidades y áreas de regadío junto a la costa.



Área del río Salado:

El área del río Salado se caracteriza por la poca disponibilidad de agua en la cuenca del río Salado. La disponibilidad de agua es mayor en los humedales en las cuencas altoandinas, pero su uso generalmente está restringido.

Se espera que la demanda por agua aumente en esta área a causa del

desarrollo del sector minero. Se está planificando una planta desalinizadora.

El escenario para este sector comprende la planta desalinizadora planeada con una mayor capacidad para cubrir la futura demanda de agua de las minas y el pueblo de Diego de Almagro.

Cada uno de estos escenarios incluyó el uso de una o más plantas desalinizadoras. Esto asegura un suministro de agua confiable para la industria minera sin impactar la disponibilidad de agua dulce y, en algunos casos, provee suministro de agua a algunas comunidades cercanas a la costa.

Esta asignación puede permitir que el agua dulce a mayor altura sea utilizada para la agricultura y las comunidades aguas arriba sin afectar a los usuarios aguas abajo. Este se considera uno de los beneficios del concepto: que los sistemas integrados pueden asignar el agua en una cuenca o región de manera óptima.

DESARROLLO TÉCNICO

Un enfoque para el segundo año fue desarrollar aún más las herramientas de planificación y, en particular, la herramienta integral. El primer año proporcionó una validación general de la metodología propuesta para la herramienta, un prototipo de la herramienta simplificada y la mayoría de los datos necesarios para el proyecto.

Los avances técnicos del segundo año incluyeron la actualización y validación de la base de datos del proyecto; mejoras en la herramienta integral; el desarrollo de nuevas capas de costo; probar algoritmos de optimización e implementar la herramienta integral como un flujo de trabajo único, y realizar ajustes a la herramienta simplificada.

Los escenarios construidos en los talleres también se modelaron utilizando la herramienta integral, cuyos resultados se presentarán después de esta sección.

Actualización y validación de la base de datos del proyecto.

Basándose en nueva información pública, se agregaron nodos de fuentes de agua adicionales a la base de datos. Esto incluye ocho nuevos nodos de agua subterránea, los que corresponden a nuevos sectores acuíferos definidos por la DGA en la Región de Atacama (DGA, 2021). También se incluyeron cuatro plantas desalinizadoras, dos para minería, una para agua potable y una para producir agua industrial, recolectadas de declaraciones de Estudios de Impacto Ambiental (SEIA Chile, 2022). Esto eleva a 236 el total de nodos definidos para la Región de Atacama, 117 de fuentes y 119 de demandas (Figura 6).

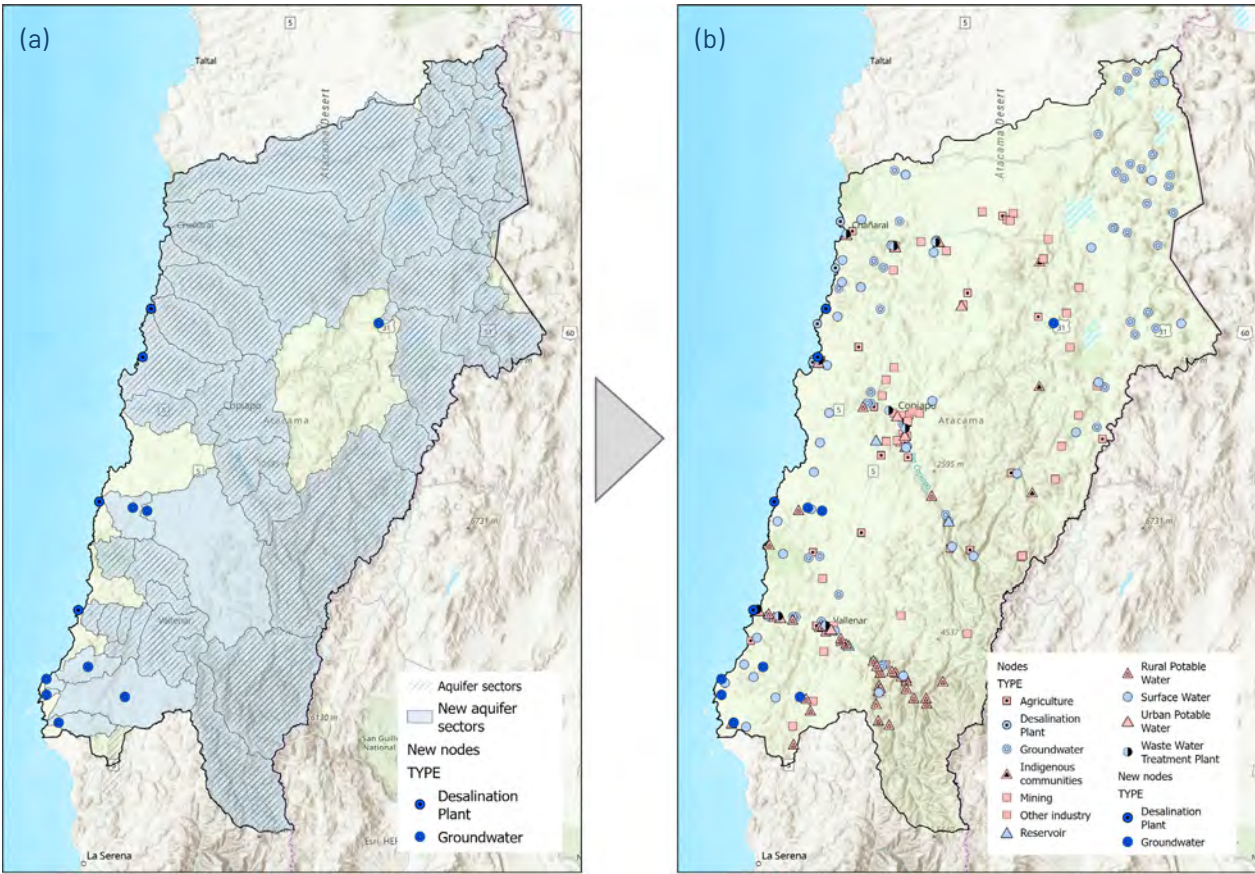


Figura 6: Distribución de nodos actualizada para a) Acuíferos y nuevos nodos de aguas subterráneas; b) Todos los nodos de oferta y demanda.

Las estimaciones de disponibilidad de agua continental que se usaron el primer año del proyecto necesitaban ser revisadas, ya que se considera que eran sobreestimaciones. En el segundo año se revisaron fuentes alternativas de información y se realizaron actualizaciones. Para el caso del agua superficial, no se encontraron fuentes de información que cubrieran toda el área de estudio, por lo tanto, se utilizaron las simulaciones del modelo VIC del Balance Hídrico de Chile (DGA, 2017a). En lugar de usar el valor promedio anual, el cual se usó en el primer año, se utilizó el quinto percentil del año seco del período 1985-2015 para definir la disponibilidad de agua superficial. Esto significa que la optimización es más robusta para años extremadamente secos. Esto redujo la disponibilidad de agua superficial de 675 GL/año a 224 GL/año para la región.

Para el caso de las aguas subterráneas, se utilizó la información reportada a la DGA sobre el uso real de las aguas subterráneas en lugar de los derechos de agua asignados. Esto se consideró una estimación más realista de la disponibilidad real de agua subterránea. Con estas correcciones, el agua subterránea disponible para la Región de Atacama pasó de 316 GL/año a 76 GL/año. La Figura 7 muestra la disponibilidad de agua continental actualizada y la Figura 8 muestra los balances hídricos actualizados para la región.

Se generaron series de tiempo mensuales de disponibilidad y demanda de agua para la simulación de nodos de almacenamiento en una optimización dinámica. La información estaba disponible para agua superficial y demanda de riego. Se utilizaron series de tiempo mensuales para el periodo 1985-2015 del modelo VIC (DGA, 2017a) para el agua superficial y las demandas de riego estimadas mensualmente por la DGA (DGA, 2017b) para la demanda agrícola. También se contaba con veinte años de series de tiempo mensuales para el agua superficial bajo escenarios de cambio climático para el período 2040-2060 a partir de las simulaciones del modelo VIC (DGA, 2017a) y estimaciones de las demandas de riego para los años 2030 y 2040 (DGA, 2017b). Estos últimos datos son útiles para simular condiciones futuras.

DISPONIBILIDAD DE AGUA CONTINENTAL

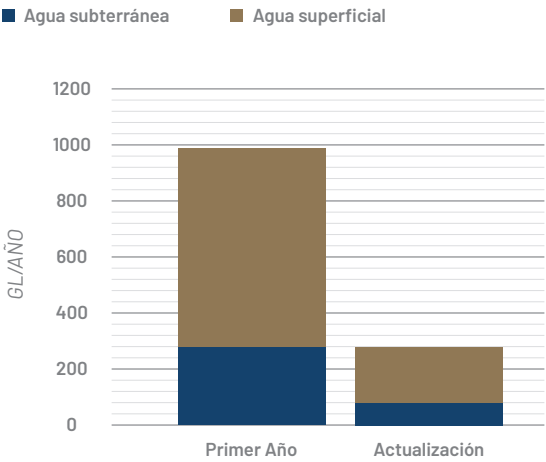


Figura 7: Agua continental actualizada Región de Atacama

BALANCE DE AGUA REGIÓN ATACAMA [GL/AÑO]

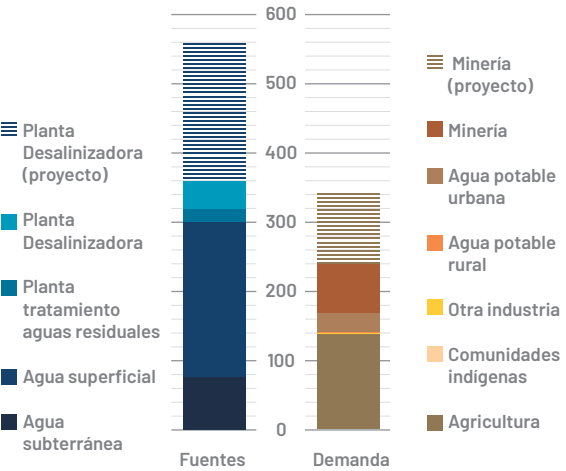


Figura 8: Balance hídrico actualizado Región de Atacama

Herramienta integral y algoritmos de optimización

El trabajo en la herramienta integral se puede dividir en dos aspectos principales: 1) perfeccionamiento de los algoritmos y parámetros; 2) construcción de la herramienta integral como un flujo de trabajo único. La refinación de los algoritmos ha incluido la creación de una capa de costos alternativos para ser utilizada en la optimización de las rutas de las tuberías. Se han recopilado datos sobre terremotos, tsunamis, inundaciones, aludes y erupciones volcánicas (Figura 9).

Esto supone que la construcción de acueductos en áreas propensas a peligros aumentaría los costos de construcción y operación y debería evitarse en la medida de lo posible. Con esta información, se está elaborando una capa de costos de riesgos. Una vez que esté terminada, esto se puede incorporar en la optimización combinándolo con las capas de costo económico y ambiental, o como una capa de costos alternativa dependiendo de la elección del usuario.

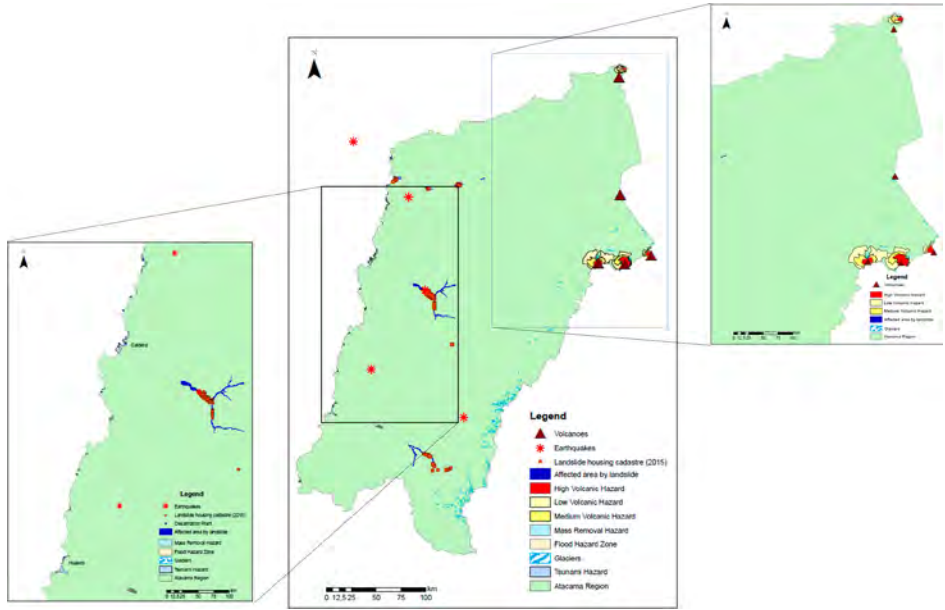
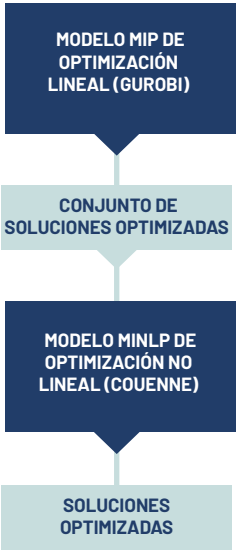


Figura 9: Ejemplos de capas de costo de riesgo



El perfeccionamiento de los algoritmos también ha incluido el reemplazo del solver de optimización lineal con licencia comercial que se utilizó en el primer año del proyecto, por un solver lineal gratuito para todos los socios de investigación.

Se probaron varios solvers y el que funcionó mejor, en comparación con el solver anterior, fue Gurobi (Gurobi, 2022), el cual se integró en la herramienta.

El trabajo también incluyó investigar estrategias para implementar optimización no lineal. Esto permite que las tuberías más grandes puedan tener costos más bajos que las tuberías más pequeñas por unidad de suministro de agua, lo que fomenta aún más el uso de acueductos compartidos, detalle que ignoran los solvers lineales. Sin embargo, los solvers no lineales tardan demasiado en resolver el problema de optimización de la red completa. El enfoque que se eligió fue determinar un conjunto de buenas soluciones utilizando optimización lineal (Gurobi) y luego ejecutar una optimización no lineal (el solver de COUENNE, Couenne, 2022) para refinar cada una de ellas y determinar cuál entrega la solución de menor costo (Figura 10).

Figura 10: Flujo de trabajo de optimización, que incluye la optimización no lineal



Para que la aplicación de la herramienta integral sea fácil para los usuarios, la base de datos del proyecto debe integrarse de manera eficiente con los solvers de optimización y con la visualización de resultados. Estos han sido programados como un flujo de trabajo único para crear un *toolbox* del Sistema de Información Geográfica (SIG). Esto permite a los usuarios crear o editar conjuntos de datos eficientemente y optimizar bajo diferentes escenarios. La Figura 11 muestra el flujo de trabajo para la definición y solución de un escenario de optimización.

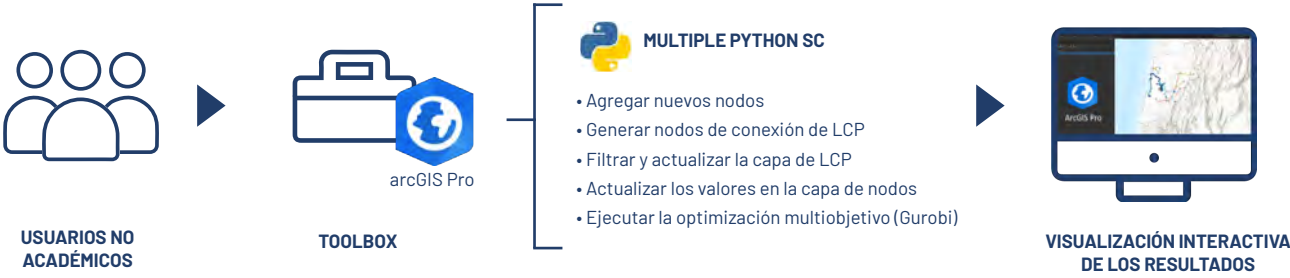
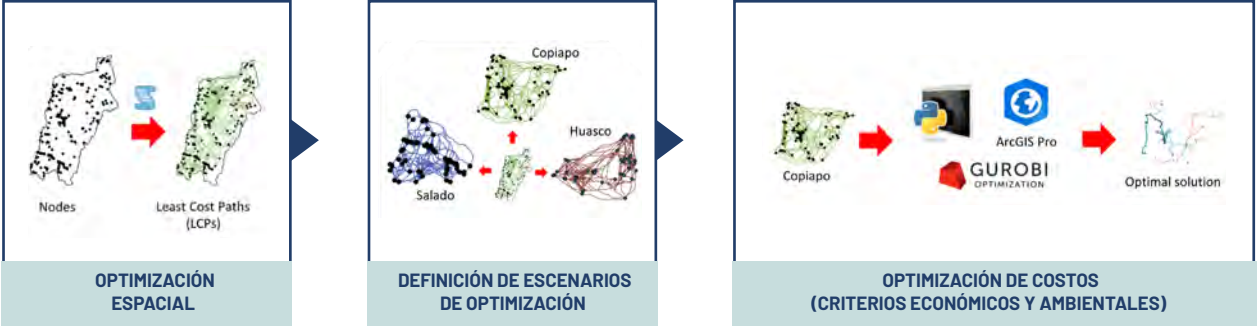


Figura 11: Flujo de trabajo esquemático para la optimización de escenarios de distribución de agua utilizando el toolbox de SIG.

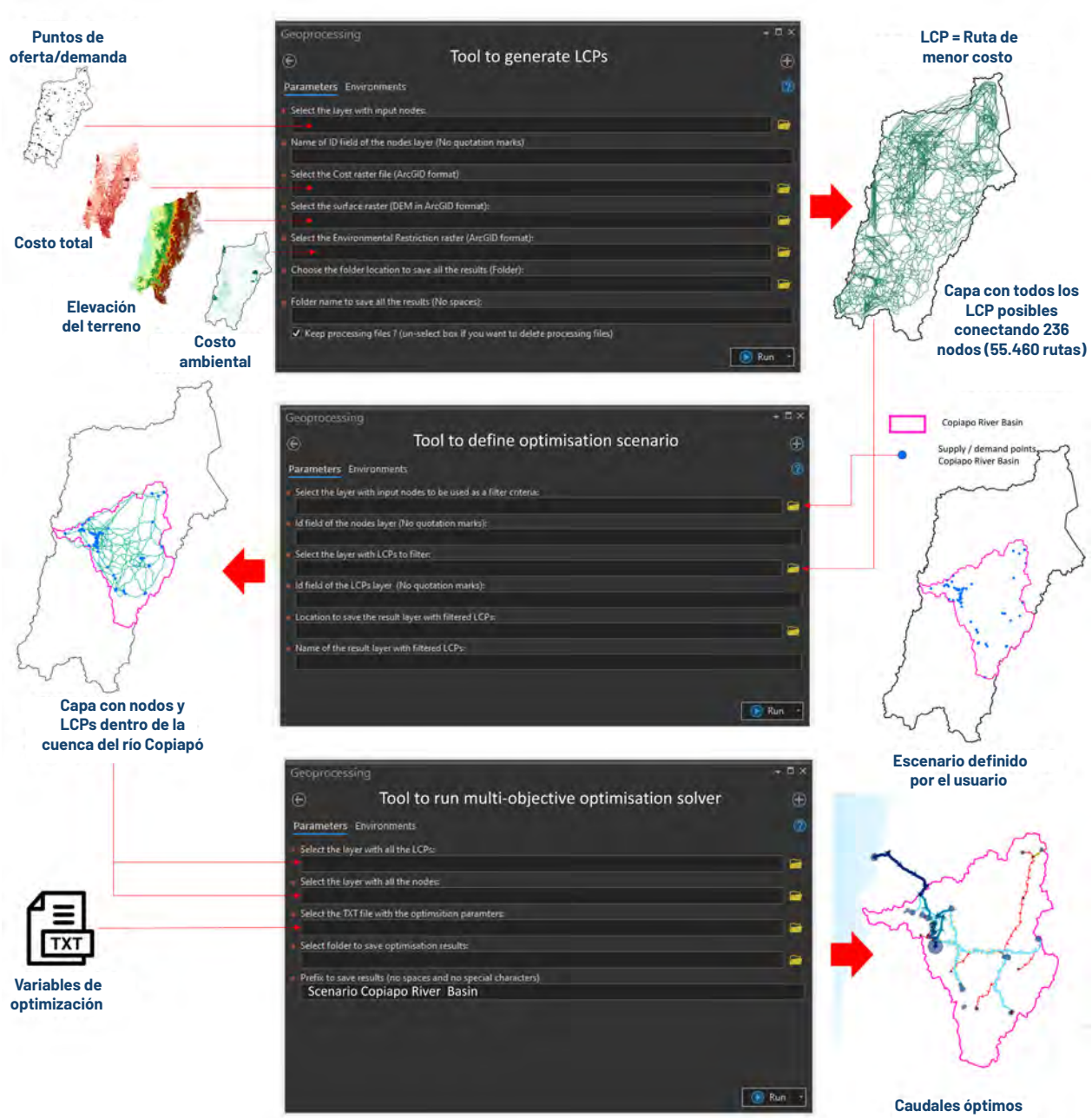


Figura 12: Ejemplo de experiencia de usuario para la creación y optimización de un escenario de distribución de agua. Capturas de pantalla correspondientes a la interfaz de usuario de diferentes herramientas SIG ejecutadas en ArcGIS Pro

El *toolbox* del SIG contiene más de 15 scripts (pequeños programas) escritos en Python, que permiten a los usuarios realizar diferentes tareas, como definir la ubicación y la magnitud de las demandas de agua. Estas herramientas se ejecutan a través de la interfaz de ArcGIS Pro para aprovechar la funcionalidad avanzada de este software y facilitar la experiencia del usuario. De momento, es necesario tener una licencia de ArcGIS para poder ejecutar el script dentro del *Toolbox*.

Sin embargo, es posible migrar estas herramientas a otras plataformas SIG de código

abierto. La Figura 12 muestra un resumen de la experiencia de usuario para crear y optimizar un escenario para la zona del río Copiapo. Se está elaborando un manual de usuario que explica el uso de todas las herramientas con ejemplos y videos.



ESCANEE PARA VER UNA DEMOSTRACIÓN DE LA HERRAMIENTA INTEGRAL

Herramienta simplificada

La herramienta simplificada tiene como objetivo permitir a las partes interesadas y a otros actores explorar de forma sencilla el costo y los beneficios medioambientales de un suministro de agua optimizado. Se desarrolló un prototipo de la herramienta simplificada en el primer y segundo año del proyecto (Figura 13). El prototipo permitió la conexión de cualquier punto de demanda en la región con un nodo fuente.

De los talleres, se sugirieron mejoras para su desarrollo futuro:

- Agregar puntos de referencia para ayudar a orientarse
- Aclarar el uso de símbolos en la herramienta
- Actualizar las rutas al cambiar el ráster de costo
- Presentar los costos por componente (costos operativos, costos de capital, costos ambientales).
- Permitir deshacer la selección del último nodo sin perder el trabajo anterior
- Permitir nodos fuente adicionales

Durante el segundo año del proyecto, estas sugerencias han progresado y el trabajo está en curso. La Figura 14 muestra el objetivo de permitir nodos fuente adicionales y la Figura 15 muestra el objetivo de permitir la exploración de opciones de suministro de agua compartido.

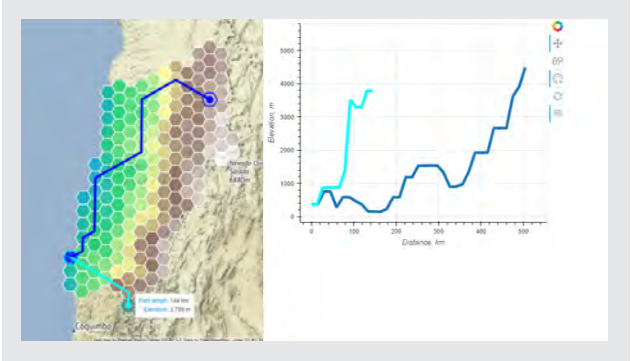


Figura 13: Prototipo de la herramienta simplificada – Primer año

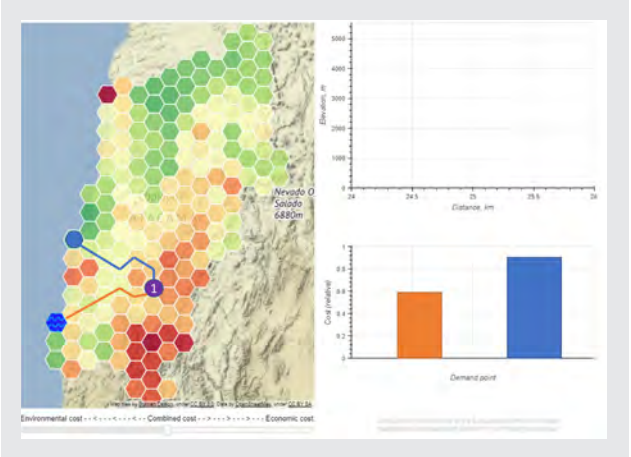


Figura 14: Mejoras – más nodos fuente

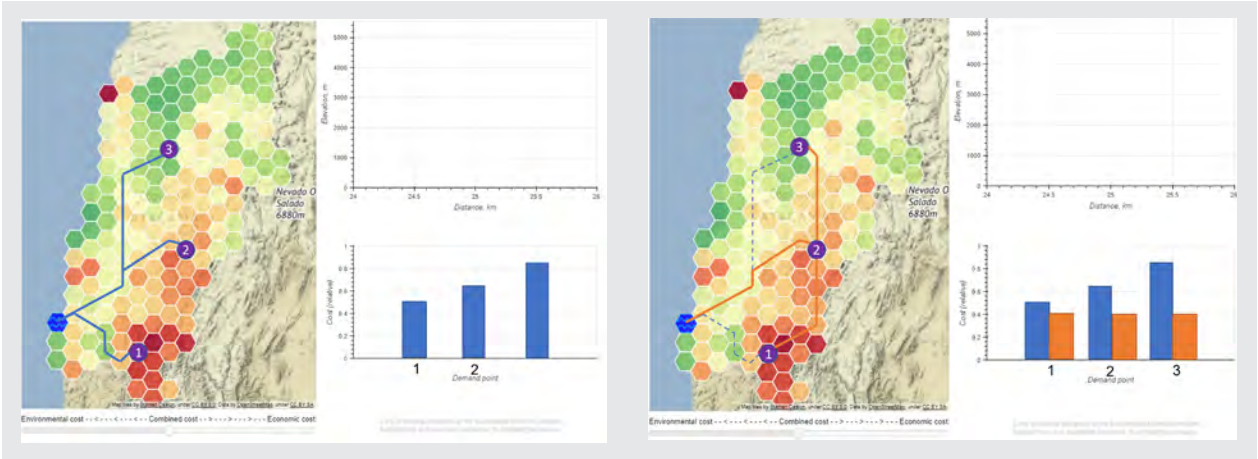


Figura 15: Mejoras – opciones de suministro de agua compartido





RESULTADO DE LOS ESCENARIOS

Uno de los objetivos clave del segundo año del proyecto fue probar y demostrar las capacidades de la herramienta utilizando posibles escenarios futuros de suministro de agua. Los escenarios que se construyeron durante la serie de talleres se modelaron utilizando las fuentes de agua y los puntos de demanda de agua propuestos, junto con información sobre la disponibilidad de agua y las demandas de cada usuario.

Para cada escenario, la herramienta se utilizó para seleccionar primero los nodos relevantes para cada escenario y obtener las mejores conexiones entre cada par de nodos, tomando en cuenta los costos económicos y ambientales. El sistema fue luego optimizado dando igual importancia a cada costo al mismo tiempo que se abastece a todos los usuarios. La herramienta proporcionó una visualización de los sistemas modelados y estimaciones de los costos económicos y ambientales.

Es importante señalar que los costos económicos son sólo indicativos en esta fase, ya que sólo incluyen los costos de las tuberías y del bombeo, y no otros costos, como los de las plantas desalinizadoras. Además, la optimización fue estática, utilizando valores anuales para las fuentes y demandas, y lineal porque no considera la variación de los diámetros de las tuberías. El periodo operacional considerado para los cálculos fue de 20 años.

Los resultados se presentan a continuación para cada una de las tres zonas. Los nodos azules representan las fuentes de agua y los rojos las demandas de agua; el tamaño de los nodos representa los valores de demanda de disponibilidad de agua, de las fuentes y las demandas, respectivamente.

ZONA DEL RÍO HUASCO

El escenario analizado para esta zona utiliza agua desalinizada para suministrar agua para riego aguas abajo de Vallenar y para proyectos mineros, incorporando las aguas residuales tratadas como fuente de agua. Este escenario permitiría a los usuarios de la cuenca superior utilizar el agua continental sin afectar la disponibilidad para quienes se encuentran aguas abajo.

El escenario asume que la planta desalinizadora planificada está operando a su máxima capacidad, de 1.400 L/s.

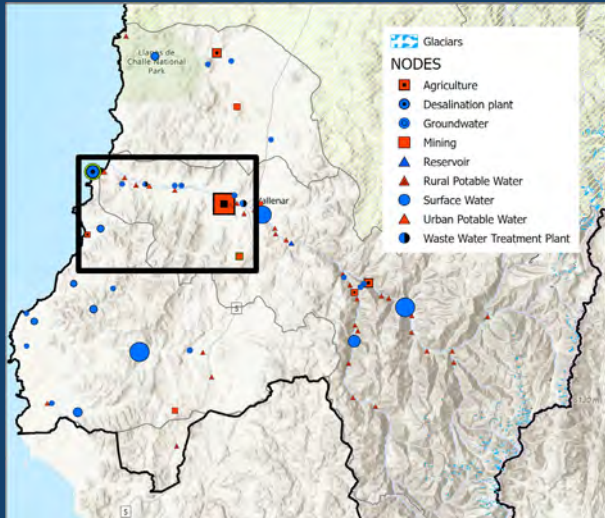
La Figura 16a presenta las fuentes de agua y la demanda considerada, la Figura 16b presenta las diferentes rutas posibles que conectan todos los nodos en el escenario y la Figura 16c presenta el sistema optimizado.

Costos asociados

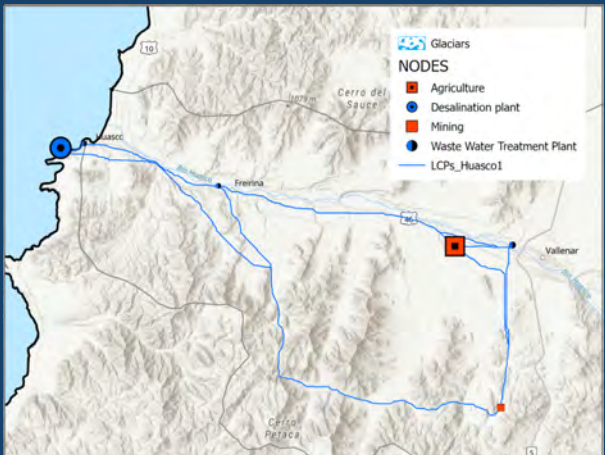
Se calculó que el costo económico total del sistema optimizado es de 187 millones de dólares. Este valor no incluye el costo de la planta desalinizadora. El costo medioambiental se calculó en 748, porque la solución pasa por zonas protegidas del desierto florido.

Los resultados optimizados para el escenario de Huasco muestran que la planta de desalinización proyectada a plena capacidad (1.400 L/s) podría suministrar agua a la demanda minera y a la demanda de riego de las zonas aguas abajo de Vallenar (río Huasco, Sección IV). La solución también incorpora aguas residuales tratadas.

a



b



c

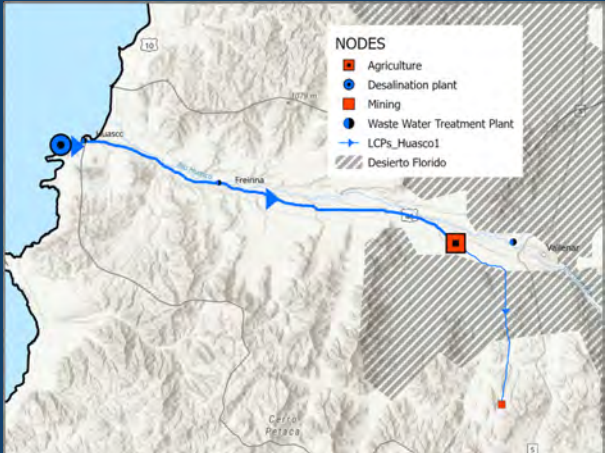


Figura16:Resultados escenario zona río Huasco (a) Nodos Escenario 41, (b) Red de todas las conexiones, (c) Resultados optimizados. Los nodos azules representan las fuentes de agua y los rojos las demandas de agua; el tamaño de los nodos representa los valores de disponibilidad y demanda de agua de las fuentes y las demandas, respectivamente.

ZONA DEL RÍO COPIAPÓ

El escenario analizado para esta zona utiliza agua desalinizada para abastecer de agua a los proyectos de minería e irrigación planificados y a los asentamientos a lo largo de la costa. Se espera que este escenario aumente la disponibilidad de agua para todos los usuarios a través del uso directo de una nueva fuente de agua y de un menor uso de agua dulce. El escenario asume que las plantas desalinizadoras proyectadas están operando, una de ellas a una capacidad mayor para cubrir la demanda.

El escenario considera como nodos de demanda todas las minas en funcionamiento y proyectadas en la zona, así como las minas en operación de Caserones y Refugio, que actualmente tienen problemas de suministro de agua.

La Figura 17a presenta las fuentes y demandas de agua consideradas, la Figura 17b presenta las distintas rutas posibles que conectan todos los nodos del escenario y la Figura 17c presenta el sistema optimizado.

Costos asociados

Se calculó que el costo económico total del sistema optimizado sería de 2.462 millones de dólares.

El costo medioambiental se calculó en U\$16.968 debido a que el proyecto pasa por zonas protegidas del desierto florido y sitios protegidos (biodiversidad).

Los resultados optimizados para el escenario del área del río Copiapó muestran que la planta desalinizadora y el embalse de almacenamiento proyectados, ubicados al sur de Copiapó, podrían abastecer de agua a las demandas mineras actuales y proyectadas en el Altiplano. Los resultados también muestran los beneficios de bombear suficiente agua a gran altitud y distribuirla al norte y al sur a una altitud similar.

Los costos ambientales son elevados debido a que hay muchos nodos de demanda de agua en el desierto florido y en las zonas protegidas o circundantes.

Por último, las demandas costeras son abastecidas por plantas desalinizadoras cercanas, lo que muestra el potencial de usar plantas desalinizadoras para las comunidades costeras.

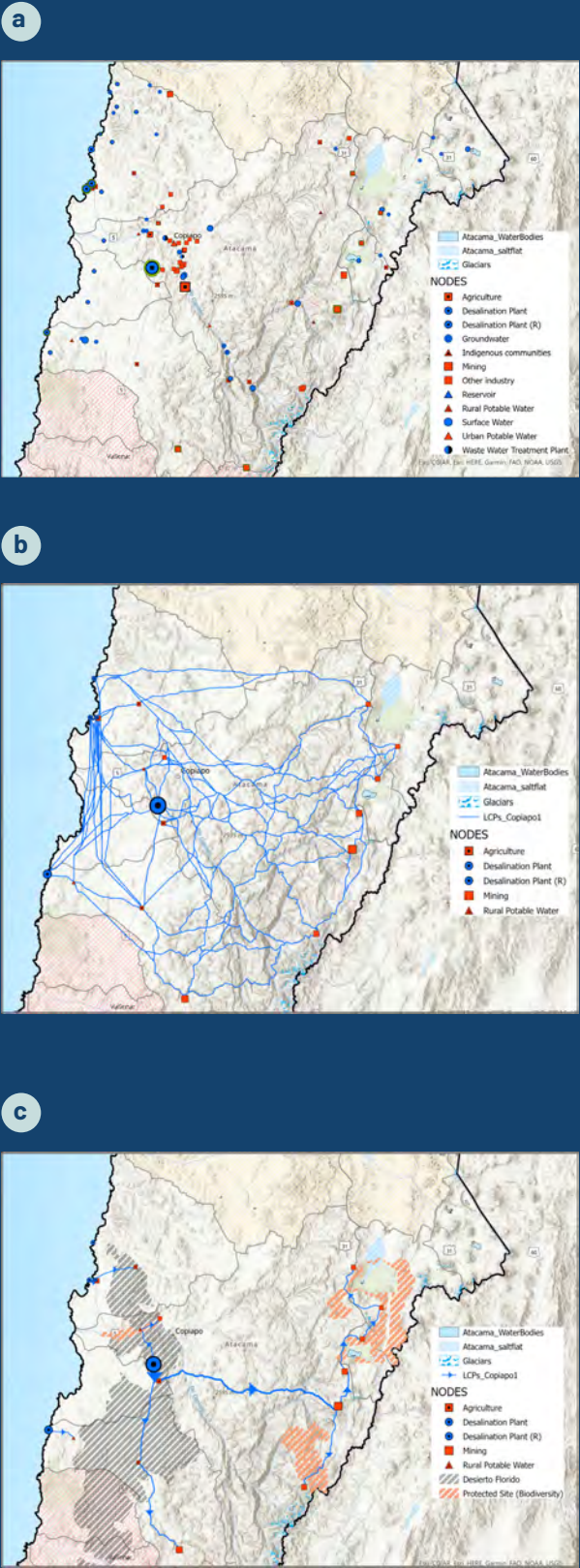


Figura 17: Resultados escenario zona río Copiapó (a) Nodos del escenario, (b) Red de todas las conexiones, (c) Resultados optimizados. Los nodos azules representan las fuentes de agua y los rojos las demandas de agua; el tamaño de los nodos representa los valores de disponibilidad y demanda de agua de las fuentes y las demandas, respectivamente.

ZONA DEL RÍO SALADO

El escenario analizado para esta zona utiliza agua desalinizada para la minería en la zona, incorporando el suministro para la ciudad de Diego de Almagro. Se espera que este escenario aumente la disponibilidad de agua para los usuarios de la zona.

El escenario asume que la planta desalinizadora planificada está operando a una mayor capacidad para cubrir la demanda. El escenario considera nodos de demanda a todas las minas operativas y planificadas en la zona, así como la Mina Salvador que está en funcionamiento y actualmente tiene problemas de suministro de agua.

La Figura 18a presenta las fuentes de agua y la demanda consideradas, la Figura 18b presenta las diferentes rutas posibles que conectan todos los nodos del escenario y la Figura 18c presenta el sistema optimizado.

Costos asociados

Se calcula que el costo económico total del sistema optimizado sería de 889 millones de dólares estadounidenses.

El costo medioambiental se calculó en 386, ya que el proyecto atraviesa zonas aledañas al Salar de Pedernales.

En el escenario del Salado, una planta desalinizadora con una capacidad de 1.700 L/s abastecería de agua a las demandas simuladas, que incluyen proyectos mineros y la actual mina Salvador.

La zona del Salado presenta un excelente potencial para el uso de infraestructuras compartidas entre las demandas mineras actuales y las proyectadas. Finalmente, los resultados optimizados proponen un diseño que va desde la planta desalinizadora hasta la localidad de Diego de Almagro, donde se bifurca. Hacia el norte, abastece de agua a los proyectos mineros del Altiplano, y hacia el sur abastece a los proyectos mineros del valle.

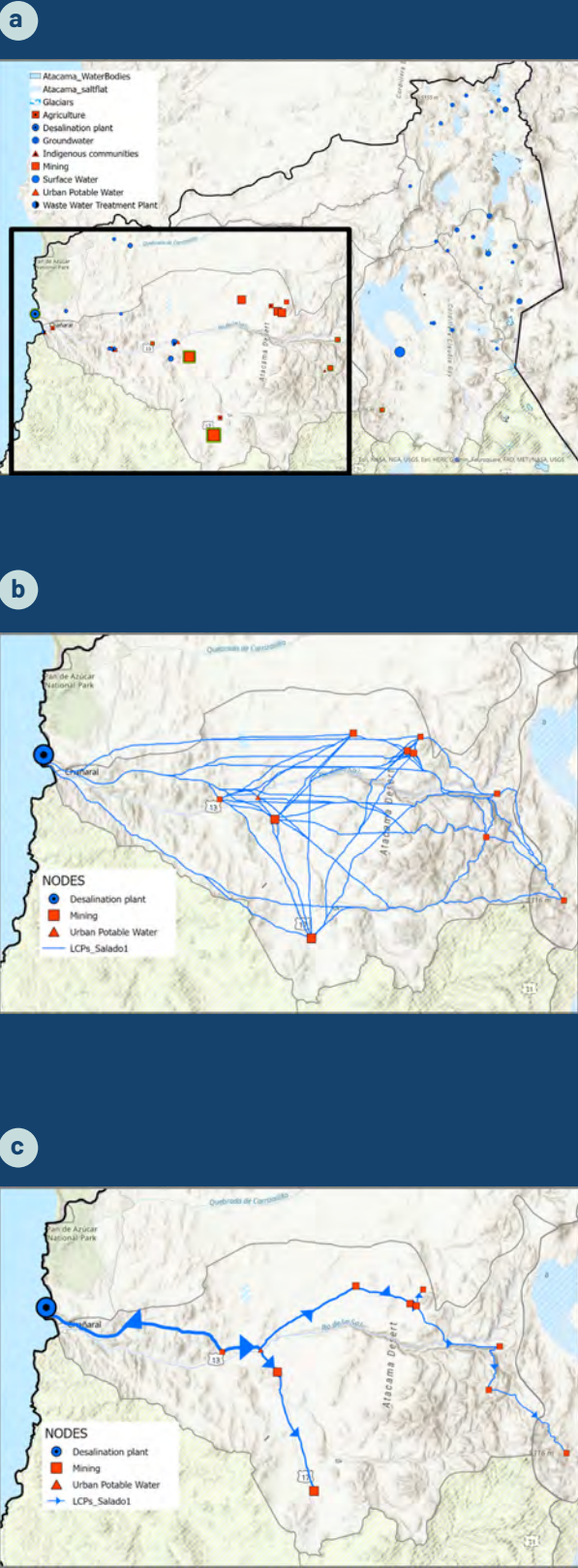
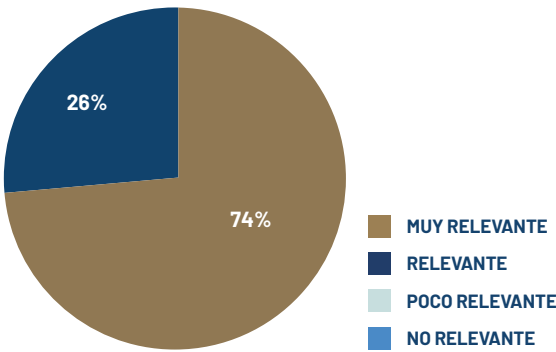


Figura 18: Resultados escenario zona río Salado (a) Nodos del escenario, (b) Red de todas las conexiones, (c) Resultados optimizados. Los nodos azules representan las fuentes de agua y los rojos las demandas de agua; el tamaño de los nodos representa los valores de disponibilidad y demanda de agua de las fuentes y las demandas, respectivamente.

COMENTARIOS GENERALES SOBRE EL PROYECTO

El éxito del proyecto depende de garantizar la relevancia del concepto para la región y la importancia del proyecto para los planificadores del suministro de agua y los usuarios esta. Para lograrlo, es crítico recibir la opinión de las principales partes interesadas. Se ha buscado la retroalimentación por parte de ellos a lo largo de todas las etapas del proyecto y se solicitó retroalimentación formal durante los talleres, tanto en el primer como en el segundo año. La retroalimentación general buscó investigar la alineación con las necesidades generales de los usuarios de agua

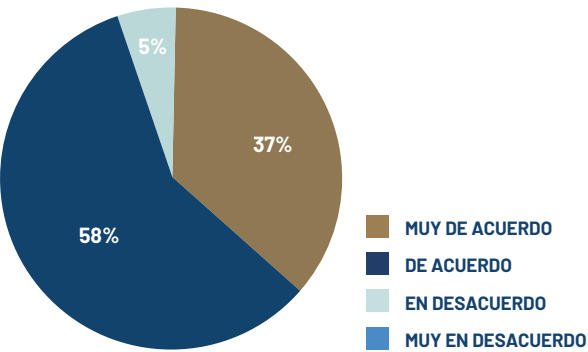
¿Qué relevancia tiene el proyecto para la región?



en la región; se solicitó retroalimentación específica para identificar dónde existen brechas en el proyecto y cómo se podrían mejorar el proyecto y las herramientas.

La retroalimentación solicitada en el primer año se centró en gran medida en el concepto del proyecto para tener una oportunidad temprana de ajustar los objetivos del proyecto. Por ejemplo, dos de las preguntas clave planteadas a los participantes de los talleres y sus respuestas fueron:

¿Utilizaría su organización la herramienta para la planificación de los recursos hídricos?



Los participantes en el taller del primer año también dieron su opinión sobre el proyecto en general, cómo se podrían mejorar las herramientas y qué podría hacer que los talleres fueran mejores. Los comentarios incluyeron (parafraseados para mayor claridad):

- Las herramientas están orientadas principalmente al sector privado.
- El proyecto debe ser diseñado y comunicado cuidadosamente para

no crear falsas expectativas. Habría sido ideal si las herramientas hubieran estado disponibles hace varios años, pero aún hay tiempo para hacer un cambio.

- Las herramientas son visionarias y existe una gran necesidad de proyectos centrados en el agua.
- Se espera que el proyecto apoye el progreso hacia la gestión integrada de las cuencas hidrográficas.
- El equipo debe tener en cuenta la importancia de las dinámicas migratorias, tanto humana como animal.

El *feedback* durante el segundo año fue en su mayoría muy positivo, particularmente con respecto a la relevancia del proyecto para la región. Sin embargo, existen preocupaciones que deben abordarse en cuanto a la claridad de propósito y la inclusión de todos los sectores.

Los resultados de la encuesta demostraron lo relevante que los participantes consideraron el proyecto. Esto fue respaldado por las conversaciones individuales que se dieron en los talleres y en conversaciones en otros contextos. Existe un claro sentimiento de que es necesario un enfoque colectivo para la gestión efectiva y sostenible de los recursos hídricos en Chile y en particular en la Región de Atacama.

La implementación de la gestión integrada de cuencas se considera una prioridad para muchas de las partes interesadas clave. Para lograr eso, se considera que el concepto de sistema integrado de suministro de agua es un pilar importante porque puede garantizar una distribución sostenible de los recursos hídricos entre los usuarios y apoyar la conservación de los sistemas de agua dulce.

Los comentarios recibidos sugieren que el proyecto es un buen enfoque para dar los pasos iniciales necesarios para trabajar hacia la implementación del concepto. Sin embargo, es necesario hacer hincapié en garantizar el acceso al proyecto y a las herramientas para todos los sectores, y en que los resultados finales del proyecto sean bien comunicados para gestionar las expectativas. Parece que hay un considerable interés en el uso de las herramientas y se debe tener en cuenta el *feedback* específico sobre el diseño de las herramientas para garantizar un alto nivel de usabilidad y adopción por parte de los interesados.



SOCIOS DEL PROYECTO

Una sólida red de socios del proyecto es crítica para su éxito y durante el segundo año se establecieron varias alianzas nuevas: Bloom Alert, Aguas CAP y la Universidad de Atacama. El equipo del proyecto desea agradecer a cada uno de los socios del proyecto por su participación y espera trabajar con cada uno durante el tercer año del proyecto.

AGRICULTURA



PÚBLICO



El equipo del proyecto invita a otras organizaciones a unirse como socios. Si necesita más información, no duden en ponerse en contacto con Doug Aitken en D.Aitken@smiicechile.cl

MINERÍA



EDUCACIÓN



EDUCACIÓN Y DIFUSIÓN

El proyecto está contribuyendo al desarrollo de dos proyectos de doctorado, uno en la Universidad de Queensland (UQ) y otro como proyecto conjunto entre la Universidad de Queensland y la Universidad de Exeter (dentro del programa QUEX):

- Optimización del uso de agua en la Región de Atacama mediante la incorporación de costos ambientales de la desalinización, por Claudia Moreno (UQ).
- Investigación de la viabilidad económica del uso de agua desalinizada para riego, por Babak Zolghadr-Asli (QUEX).

El proyecto ha respaldado dos proyectos de maestría en la Universidad de Queensland en 2022:

- Optimizando el papel de los embalses dentro de las redes de abastecimiento de agua en la región de Atacama, por Xinyu Hu
- Mejora de las estimaciones de los caudales fluviales en el desierto de Atacama, Chile, por Xurui Fan

Los avances del proyecto se están presentando en diversas conferencias científicas internacionales en América Latina y Australia:

- 09/2021: Congreso del Agua, Chile - Planificación de redes inteligentes de suministro de agua en regiones áridas: desarrollo de herramientas.
- 09/2021: Congreso del Agua, Chile - ¿Qué tan factibles son los sistemas integrados de suministro de agua inteligente en el contexto chileno?
- 09/2022: Congreso del Agua, Chile - Sistemas integrados de abastecimiento de agua como respuesta a la crisis del agua en Chile: explorando escenarios futuros en la Región de Atacama.
- 11/2022: XXX Congreso Latino Americano de Hidráulica, Brasil - Integración sostenible de agua de mar en la planificación regional de las infraestructuras hídricas.
- 12/2022: I Congreso Economía Circular, Perú - Inversión responsable para la gestión de la escasez de agua utilizando los principios de la economía circular.
- 06/2023: Congreso Mundial de Minería, Australia - Cómo hacer frente a la escasez de agua en zonas mineras áridas mediante la planificación coordinada de redes integradas de suministro de agua: un estudio de caso de la Región de Atacama en Chile.

HOJA DE RUTA DE IMPACTO ACTUALIZADA

El propósito del proyecto es crear un impacto socioeconómico y medioambiental positivo en zonas áridas de Chile a través del eventual desarrollo de sistemas inteligentes de suministro de agua. El desarrollo de herramientas de planificación es uno de los aspectos para lograr este objetivo, pero hay otros elementos necesarios que serán críticos para el éxito del proyecto. En el primer año, estos elementos se consideraron a través de la elaboración de una propuesta de hoja de ruta que se centró en alinear el proyecto con los desafíos nacionales, comunicar el concepto, establecer alianzas, comprender problemas de factibilidad y recibir evaluaciones externas sobre el proyecto.

Mediante el desarrollo de estos elementos, la intención es establecer colaboraciones con programas nacionales y regionales de gestión de recursos hídricos y garantizar la adopción de las herramientas y conocimiento del proyecto por parte de las principales partes interesadas, lo que resultará en soluciones de políticas públicas y planificación que aporten valor social y económico a través de los sistemas integrados de suministro de agua.



Alineación con los desafíos nacionales en materia de agua

Una actividad que se consideró crítica en el segundo año del proyecto fue involucrar a organizaciones y agencias que se ocupan de entender y abordar los desafíos hídricos nacionales mediante el desarrollo de políticas y actividades estratégicas. Se llevaron a cabo reuniones y talleres con el Ministerio de Minería, la Dirección General de Aguas y la Comisión Chilena del Cobre.

La gestión integrada de cuencas y la infraestructura hídrica compartida se han presentado como un tema clave a desarrollar e implementar en el corto plazo por parte del Gobierno, el Ministerio de Minería y la Dirección General de Aguas. La DGA está trabajando en el desarrollo de planes de gestión integrada de cuencas hidrográficas para varias regiones de Chile, incluida la Región de Atacama. El equipo del proyecto fue invitado a aportar su visión para el desarrollo del plan considerando la experiencia adquirida en el marco de este proyecto.

Durante el segundo año del proyecto, la Agencia Alemana para la Cooperación Internacional (GIZ) también financió un proyecto junto con el Centro de Estudios del Cobre y la Minería (CESCO) para investigar las oportunidades y los desafíos de la infraestructura de agua compartida en Chile y Perú. El equipo del proyecto SMI-ICE-Chile realizó este estudio en colaboración con la Comisión Chilena del Cobre, el Centro de Innovación Minera, la Fundación Chile, la Universidad de Antofagasta, el Ministerio de Minería de Chile, Teck, la Pontificia Universidad Católica de Chile, Codelco, MCI Chile y MCI Perú.

El proyecto está bien alineado con la visión del Gobierno y la industria en lo que respecta a los desafíos de gestión hídrica. Es importante que el equipo a cargo del proyecto refuerce su compromiso con los organismos gubernamentales durante el tercer año de su ejecución y se comprometa aún más con los representantes regionales.

Comunicación eficaz de los conceptos del proyecto y sus resultados

El segundo año del proyecto incluyó talleres presenciales en la Región de Atacama, lo que apoyó en gran medida la comunicación efectiva del proyecto. La naturaleza directa de la participación ayudó a establecer relaciones con las principales partes interesadas. El equipo del proyecto también presentó el proyecto y resultados preliminares en conferencias nacionales, lo que ayudó a comunicar el concepto del proyecto a un público más amplio.

El tercer año del proyecto requerirá continuar con el alto nivel de compromiso y comunicación. Se pondrá un enfoque en la comunicación con los gobiernos regionales y agencias gubernamentales nacionales para demostrar las oportunidades que existen en relación con los sistemas integrados de suministro de agua y para entender cómo el concepto puede alinearse con la planificación gubernamental regional.

Asociación con los principales actores nacionales y programas de trabajo

Desarrollar asociaciones con las partes interesadas clave y los programas nacionales para apoyar la continuación del proyecto es fundamental para lograr un impacto futuro. En el segundo año del proyecto, la red de socios se amplió, con la inclusión de Codelco Salvador y Bloom Alert, lo que sumó un total de 14 socios de la industria y del sector público. También ha habido interés por parte de varios organismos gubernamentales en asociarse con el proyecto. La formalización de estas alianzas se llevará a cabo en el tercer año del proyecto.

El potencial de asociación público-privada es un aspecto importante a tener en cuenta para la continuación del proyecto. Por esta razón, las asociaciones buscadas en el tercer año serán una combinación de actores de alto nivel tanto del sector público como privado.

En cuanto al sector público, será importante asociarse con los ministerios gubernamentales pertinentes, como el de Minería y el de Medio Ambiente, así como con el Gobierno Regional de Atacama.

En cuanto al sector privado, las empresas y organizaciones mineras y agrícolas serán clave. Esto no se limitará a la Región de Atacama, ya que el concepto es de gran interés para las empresas que operan en otras regiones de Chile. Las asociaciones industriales, como el Consejo Minero y la Sociedad Nacional de Minería en Chile, también se abordarán en el tercer año.

Entender la gama de problemas de factibilidad

En el primer año del proyecto se realizó un estudio para comprender cómo los problemas institucionales, financieros y sociales podrían afectar la factibilidad del proyecto y del concepto. Muchos de los problemas identificados siguen siendo críticos y algunos adquieren cada vez más importancia debido a la cambiante dinámica sociopolítica de Chile. Existe una gran incertidumbre en cuanto a los derechos de agua y la propiedad del agua de mar procesada.

Las dinámicas sociopolíticas dificultaron el desarrollo y mejoramiento del estudio de factibilidad durante el segundo año del proyecto. El tercer año del proyecto debe renovar el enfoque en la factibilidad a pesar de las dificultades, potencialmente mediante el análisis de la factibilidad en determinados escenarios sociopolíticos y/o de regulación del agua.

Hoja de ruta post-proyecto hacia el impacto

Este proyecto es un primer paso hacia el desarrollo de soluciones integradas de suministro de agua. Las iniciativas y acciones posteriores al proyecto serán críticas para determinar si el concepto es implementado de manera efectiva y extensa. Las acciones posteriores al proyecto deben incluir la adopción de las herramientas y el desarrollo de políticas que faciliten la implementación del concepto. Para lograr esto, es necesario maximizar la exposición al desarrollo de herramientas y a conversaciones acerca del concepto con las partes interesadas clave, e invitarles a participar en el desarrollo del proyecto y su retroalimentación regular.

Revisión y adaptación del proyecto y la hoja de ruta

Una brecha en el proyecto desde el primer año fue la falta de revisión externa a pesar de los esfuerzos para coordinar esto. Se llevará a cabo una revisión externa del proyecto al final del segundo año para recibir comentarios y adaptar el proyecto según sea necesario.



Banco de imágenes gratis (Unsplash)



PLANIFICACIÓN DEL TERCER AÑO

El tercer año es el año final del proyecto y se centrará en la finalización de las herramientas, pruebas, difusión, capacitación y planificación para un impacto continuo.

Los primeros meses del tercer año se centrarán en la finalización de las herramientas, utilizando los comentarios recibidos durante el segundo año para mejorar su utilidad y usabilidad. Las herramientas serán sometidas a pruebas adicionales utilizando escenarios futuros, considerando los sistemas propuestos de suministro de agua y las condiciones proyectadas de demanda y disponibilidad de agua.

Después de completar las herramientas, el proyecto se enfocará en la utilización de estas y en la difusión de sus resultados. La adopción será incentivada a través de una serie de talleres finales en la Región de Atacama y a nivel nacional en Santiago. Si hay interés en otras regiones, se considerarán talleres en otras partes del país. La difusión general se realizará mediante conferencias nacionales e internacionales. Dada la potencial importancia del concepto a nivel mundial, se pondrá especial énfasis en las conferencias internacionales. El proyecto se presentará en el Congreso Latinoamericano de Hidráulica (online), en el Congreso de Economía Circular de Perú y en el Congreso Mundial de Minería de Brisbane.

Para apoyar la adopción de las herramientas y la futura implementación del concepto, la planificación del impacto continuo y la identificación de los próximos pasos serán críticos en el tercer año. Este tema será prioritario durante las discusiones con las partes interesadas en los talleres regionales y nacionales del tercer año. Los actores y tomadores de decisiones clave a nivel nacional que tienen interés en el concepto y el proyecto son el Ministerio de Minería, la Dirección General de Aguas (DGA) y varias grandes empresas mineras. Tras consultar con MCI, se involucrará a los actores seleccionados para determinar los próximos pasos.

Para informar de esa planificación, se llevará a cabo una actualización del estudio de factibilidad y se formularán recomendaciones para las políticas públicas y la gobernanza. Dada la actual naturaleza incierta de la política en materia de gestión de los recursos hídricos en Chile, se involucrará a expertos nacionales para considerar los posibles escenarios futuros.

Al final del año se producirá un informe final que detallará todo el proceso del proyecto, los resultados, la información sobre las herramientas y el plan de continuidad del impacto. El informe y la herramienta simplificada estarán disponibles en línea, y la herramienta integral estará disponible bajo solicitud.

AÑO 3

N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	
●	●	●										Finalización de las herramientas
●	●	●	●									Análisis de escenarios
●	●	●	●	●								Estudio de factibilidad actualizado
●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		Promover y asistir adopción de herramientas
●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		Planificación para impacto continuado
				●	●	●	●	●	●	●		Actividades de divulgación
		●			●			●				Talleres con las partes interesadas
											●	Reporte final



REFLEXIONES

La escasez de agua está al frente de la discusión pública en Chile y la gestión de los recursos hídricos ha sido uno de los principales puntos del debate constitucional. Es evidente que hay una gran necesidad por considerar nuevas opciones de gestión hídrica y la relevancia de este proyecto dentro del contexto nacional sigue siendo clara. La positiva respuesta recibida durante el segundo año con relación al proyecto y la disposición de la industria, el gobierno y los socios universitarios a involucrarse, es extremadamente alentadora. Las iniciativas paralelas que se están llevando a cabo en Chile, como los planes de gestión integrada de cuencas de la DGA, las metas de infraestructuras hídricas compartidas dentro del Plan Nacional de Minería 2050 y el proyecto GIZ-CESCO sobre infraestructuras hídricas compartidas, demuestran que el concepto general está siendo considerado seriamente en varios niveles. En el tercer año debe haber un foco en cómo hacer avanzar el concepto de la mejor forma, teniendo en cuenta las distintas partes interesadas. Responsabilidades y liderazgo deben ser discutidos y definidos.

El equipo del proyecto hizo avances significativos en el desarrollo de las herramientas durante el segundo año; el proyecto cuenta ahora con una herramienta integral avanzada y probada que puede proporcionar una perspectiva profunda sobre los escenarios y las opciones de planificación, con objetivos claros para el tercer año.

La herramienta simplificada será un punto central en el tercer año para asegurar la difusión de la visión del proyecto y sus beneficios para el público. La participación de las partes interesadas en el segundo año fue extremadamente positiva gracias a la realización de los talleres presenciales y a los valiosos comentarios recibidos. En el tercer año se necesita lograr una mayor participación, incluyendo a organizaciones nacionales, y se debe invitar a las partes interesadas para influir en cómo el desarrollo del concepto y del proyecto debe continuar.

Al igual que en el primer año, la estrecha relación con el MCI ha continuado a lo largo del segundo año, lo que ha sido crucial para el desarrollo exitoso del proyecto. El equipo a cargo aprecia enormemente el apoyo, la visión y los consejos proporcionados por el equipo de MCI que está maximizando el valor del proyecto para Chile. El equipo espera con gran interés continuar esta relación en el tercer año y más allá de este proyecto en particular.

AGRADECIMIENTOS

PATROCINADORES DEL PROYECTO

El equipo del proyecto quiere dar las gracias al equipo de M.C. Inversiones por patrocinar el proyecto y por su continuo y sincero apoyo, sus valiosas contribuciones y sus comentarios.

UNIVERSIDADES ASOCIADAS

Gracias a nuestros colaboradores académicos de la Universidad de Antofagasta, la Universidad Católica del Norte y la Pontificia Universidad Católica de Chile por sus valiosas contribuciones al proyecto durante el primer y segundo año. El equipo también quiere agradecer a la Universidad de Atacama por ayudar a apoyar la actividad del proyecto que se realizará en Copiapó en noviembre y esperamos trabajar más estrechamente con la universidad en el último año del proyecto.

PARTICIPANTES DE LOS TALLERES

Gracias a los participantes de los talleres, tanto del primer (27) como del segundo año (40), por tomarse el tiempo de conocer el proyecto, hablar con el equipo, probar las herramientas y brindar opiniones. Se aprecia enormemente su contribución.

DISEÑADORES DEL INFORME

Expresamos nuestros agradecimientos a Aire Consultores por su apoyo en el diseño de este informe.

PATROCINADORES DE SMI-ICE-CHILE

SMI-ICE-Chile y la Universidad de Queensland reconocen con gratitud el apoyo del Gobierno de Chile a través del Programa Centro de Excelencia Internacional. SMI y el Centro están muy agradecidos por las colaboraciones con CORFO y ANID que permitieron la plataforma y la presencia local gracias a la cual se ha podido desarrollar este importante proyecto y la relación con MCI.

REFERENCIAS

• **Couenne (2022)** Couenne algorithm. <https://www.coin-or.org/Couenne/>

• **DGA (2014).** Diagnóstico de Recursos Hídricos Región de Atacama. Dirección General de Aguas

• **DGA (2017a)**, Actualización del Balance Hídrico Nacional, SIT N° 417, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: Universidad de Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile.

• **DGA (2017b).** Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile.

• **DGA (2021).** Acuíferos_SHAC.shp (shapefile) Dirección General de Aguas, Chile <https://dga.mop.gob.cl/estudiospublicaciones/mapoteca/Paginas/Mapoteca-Digital.aspx>

• **Esri (2021).** Esri, Geographical information system company. <https://www.esri.com/>

• **García, A., Ulloa, C., Amigo, G., Milana, J. P., & Medina, C. (2017).** An inventory of cryospheric landforms in the arid diagonal of South America (high Central Andes, Atacama region, Chile). Quaternary International, 438, 4–19.GUROBI (2022).

• **GUROBI (2022).** GUROBI optimization. <https://www.gurobi.com/>

• **SEA Chile (2022).** Servicio de Evaluación Ambiental, Chile. <https://www.sea.gob.cl/>

• **Universidad de Atacama (2016).** Inventario de glaciares, ambiente periglacial y otras reservas hídricas criosféricas de la III Región de Atacama y áreas binacionales, para determinar nuevas fuentes de agua. FIC-1401.

