

ESTUDIOS Y ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN

Humedales altoandinos bajo estrés ambiental: Contribución de la investigación científica interdisciplinaria en procesos conciliatorios por daño ambiental

*High Andean Wetlands Under Environmental Stress: Contributions of
Interdisciplinary Research in Reconciliation Processes for Environmental Damage*

Fernanda Caro Beveridge 

Edmundo Claro Rodríguez 

Daniela Gamboa Rosas

David Rubinos González 

María Paz Valenzuela Torrontegui 

Dilan Campos Quiroz 

Pablo Bustos Figueroa

Marcela Calderón Parada

Jacques Wiertz Frisque 

SMI-ICE-Chile, Universidad de Queensland, Australia

RESUMEN

Los humedales altoandinos son ecosistemas dinámicos que están cerca de los límites hidrológicos y altitudinales para la vida de especies vegetales, además de ser uno de los ecosistemas más amenazados a nivel mundial. Frente a la creciente presión que ha existido y sigue produciéndose sobre estos ecosistemas, es indispensable alcanzar una mayor comprensión sobre sus dinámicas ecosistémicas, además de desarrollar herramientas de apoyo a su gestión sostenible. El objetivo principal de este artículo es, a través de la presentación de casos de estudio y de las lecciones aprendidas en el desarrollo de diversos proyectos de investigación, proponer estrategias y lineamientos para abordar de manera efectiva los procesos conciliatorios por daño ambiental de los humedales altoandinos del norte de Chile. Al analizar los casos de estudio, se destaca la relevancia de generar una base de datos científica

sólida y estandarizada para la conservación y restauración de humedales altoandinos, así como de colaborar con comunidades locales e indígenas, habitantes de estos territorios y, además, realizar iniciativas de educación ambiental en conjunto con ellas. Este artículo muestra la importancia de la investigación interdisciplinaria para entender estos ecosistemas complejos, determinar las causas reales de los efectos observados y evaluar las medidas de reparación y de protección, así como aumentar la resiliencia de estos ecosistemas frente a las acciones antropogénicas y a los efectos del cambio climático.

PALABRAS CLAVE

Escasez hídrica, justicia ambiental, investigación interdisciplinaria, humedales altoandinos, restauración ecológica, comunidades indígenas.

ABSTRACT

High Andean wetlands are dynamic ecosystems that lie close to the hydrological and altitudinal limits for plant life and are also among the most threatened ecosystems worldwide. Given the increasing pressure that has existed and continues to exist on these ecosystems, it is essential to gain a better understanding of their ecosystem dynamics and develop tools to support their sustainable management. The main objective of this article, through the presentation of case studies and lessons learned from various research projects, is to propose strategies and guidelines to effectively address the conciliation processes for environmental damage in the high Andean wetlands of northern Chile. Analyzing the case studies highlights the importance of generating a robust and standardized scientific database for the conservation and restoration of high Andean wetlands, as well as collaborating with local and indigenous communities that inhabit these territories and implementing environmental education initiatives with them. This article highlights the importance of interdisciplinary research in understanding these complex ecosystems, determining the real causes of the observed effects, and evaluating repair and protection measures, as well as increasing the resilience of these ecosystems to anthropogenic actions and the effects of climate change.

KEYWORDS

Water scarcity, environmental justice, interdisciplinary research, high Andean wetlands, ecological restoration, indigenous communities.

Introducción

Los humedales son ecosistemas acuáticos cruciales en la conservación global de la biodiversidad. Proveen importantes funciones ecosistémicas, tales como la regulación de ciclos hidrológicos, la purificación de agua, la provisión de hábitat para la

fauna, actúan como corredores biológicos y cumplen un rol fundamental en la res- puesta de los ecosistemas al cambio climático, debido a su potencial capacidad de secuestro de carbono (Were y otros, 2019: 328). Aunque los humedales cubren solo entre un 5% y un 8% del área terrestre, conservan aproximadamente entre el 20% y el 30% del carbono del suelo terrestre (Mitsch y otros, 2013: 584). A pesar de su enorme importancia ecosistémica, se encuentran entre los ecosistemas más amenazados a nivel mundial (Paquis y otros, 2023: 2).

Los humedales altoandinos del norte de Chile se encuentran en los límites hi- droológicos y altitudinales que permiten la vida vegetal. En medio de un entorno de extrema aridez, actúan como verdaderos oasis que sostienen una rica biodiversi- dad (De la Fuente, Meruane y Suárez, 2021: 2; Molina, 2021: 2) y han sido esencia- les para la supervivencia de los pueblos que habitan la zona desde hace milenios (Baeza, 2018: 7). Estos ecosistemas, conocidos como sistemas vegetacionales azo- nales hídricos terrestres (SVAHT), destacan por su diversidad ecológica particular y desempeñan un rol fundamental en las comunidades locales (Ahumada Campos y Faúndez Yancas, 2009: 11). Los SVAHT se caracterizan por su condición azonal, al responder a condiciones locales de sustrato, suministro hídrico y afloramiento salino, y no a las condiciones mesoclimáticas, dependiendo su permanencia de un aporte hídrico continuo proveniente de precipitaciones, deshielos, escorrentías y aguas subterráneas (Squeo y otros, 2006: 246). Los humedales altoandinos cum- plen funciones ecológicas clave: además de la ya mencionada regulación de los ciclos hidrológicos, purificación del agua, servir de hábitat a numerosas especies, actuar como corredores biológicos, y almacenar carbono, contribuyen a mantener el equilibrio ecológico de las zonas altas del altiplano.

Las condiciones geológicas únicas que permitieron el desarrollo de estos eco- sistemas, combinadas con factores geográficos y climáticos extremos, han defi- nido una hidrología, hidrogeología e hidroquímica singulares. Estas determinan un hábitat donde coexisten comunidades microbianas, vegetales y animales muy particulares, cuya protección es crucial para preservar la biodiversidad y la funcio- nalidad ecológica de la región.

Por su parte, los ecosistemas altoandinos forman parte de territorios ance- trales habitados históricamente por pueblos originarios como los Atacameños o Lickanantay, Collas, Quechuas, Aymaras y Diaguitas. Estas comunidades han desarrollado un profundo conocimiento de los sistemas naturales, manteniendo prácticas de uso sustentable, como la trashumancia, que han perdurado pese a las extremas condiciones climáticas y agroecológicas del altiplano (Meseguer-Ruiz, Prieto y González Carimán, 2022: 110; Gunderman, 1998: 299).

Estos ecosistemas frágiles enfrentan amenazas tanto naturales como antrópi- cas, entre las cuales destaca el cambio climático, que proyecta una mayor variabi- lidad climática (Lee y Romero, 2023: 12) y un aumento de las temperaturas y los

períodos secos (Chávez y otros, 2023: 2). A ello se suma la presión derivada de la actividad minera, concentrada en el Norte Grande y Norte Chico de Chile, donde la extracción de minerales —principalmente cobre y litio— ha requerido históricamente grandes volúmenes de agua provenientes de las cuencas altoandinas. La sobreexplotación de estos recursos ha generado descensos significativos de los niveles freáticos y una disminución del aporte hídrico a los humedales, con graves consecuencias ecológicas y sociales.

En este contexto, las comunidades locales —que dependen ancestralmente de estos ecosistemas— han expresado preocupación y resistencia frente a los impactos ambientales y económicos asociados a la extracción de agua, lo que ha derivado en conflictos socioambientales y en diversos procesos judiciales por daño ambiental. Si bien en la actualidad la presión parece haber disminuido gracias a una mayor eficiencia hídrica, a la incorporación de agua de mar desalada y a la restricción en la entrega de nuevos derechos de aguas (Gundermann y Göbel, 2018: 480), la recuperación de los sistemas afectados es lenta y requiere de medidas activas de restauración y de un monitoreo prolongado. Las medidas ordenadas por los tribunales ambientales o acordadas en avenimientos imponen desafíos técnicos significativos, pues demandan un conocimiento detallado de los procesos ecológicos e hidrológicos que sustentan estos ecosistemas.

La singularidad de los humedales altoandinos exige, por tanto, una perspectiva interdisciplinaria que integre las ciencias de la tierra, biológicas y sociales. En este escenario, los centros de investigación aplicada desempeñan un papel decisivo al articular proyectos de investigación inter y multidisciplinarios que ponen la ciencia al servicio de la conservación, la restauración y la gestión sustentable de estos ecosistemas. Además, cumplen una función clave en los procesos judiciales y conciliatorios asociados a daño ambiental, al traducir conocimiento científico complejo en información comprensible y verificable que sustenta la toma de decisiones legales.

Considerando lo anterior, el objetivo de esta publicación es, a través de la presentación de casos de estudio y de las lecciones aprendidas en el desarrollo de diversos proyectos de investigación, mostrar la importancia del conocimiento científico aplicado en la implementación de medidas de compensación, reparación y conservación establecidas por los tribunales, y proponer lineamientos y estrategias para abordar de manera efectiva los procesos conciliatorios por daño ambiental en humedales altoandinos, contribuyendo así a su conservación, restauración y gestión sustentable.

Más específicamente, la pregunta que este artículo persigue responder es la siguiente: ¿cómo contribuye el conocimiento científico aplicado a la resolución de disputas ambientales y a la implementación de medidas judiciales de compensa-

ción, reparación y conservación en humedales altoandinos, y qué aprendizajes se derivan de estas experiencias para mejorar los programas de manejo, conservación y restauración de estos ecosistemas?

Para abordar esta cuestión, el artículo se estructura de la siguiente manera. A modo de revisión de literatura, se presenta el rol de la ciencia en las disputas ambientales y se identifican algunas herramientas de gestión ambiental basadas en ciencia. Seguidamente, se presentan la metodología y el contexto geográfico e histórico asociado al Salar de Pedernales, que servirá para el desarrollo de los casos de estudio. A continuación se presentan los casos de estudio, seguidos por las lecciones que ellos proporcionan, para finalmente desarrollar conclusiones.

Marco teórico y revisión de literatura

El rol de ciencia en las disputas ambientales

Las disputas ambientales conllevan una alta complejidad técnica y científica. La resolución de estos conflictos depende, en gran medida, de la interpretación de la evidencia científica y del testimonio experto en materias como la causalidad del daño, la magnitud de los impactos y las estrategias de reparación ambiental (Preston, 2014: 21). En este contexto, la ciencia cumple un papel fundamental al aportar los datos y metodologías que permiten a los tribunales establecer responsabilidades, cuantificar daños y definir medidas de restauración o compensación. Sin embargo, el vínculo entre ciencia y justicia enfrenta desafíos importantes, especialmente por la falta de conocimiento científico de jueces, abogados y autoridades ambientales, lo que puede generar errores de interpretación o una valoración insuficiente de la prueba técnica (Roy y otros, 2025: 547).

Dado que es difícil confiar en las afirmaciones de las partes interesadas o de sus representantes, incluso si estos son científicos (Martin, 1977: 1959), es importante que la provisión científica sea independiente. Los tribunales ambientales representan un intento institucional por reducir esa brecha epistemológica. Como señalan Robinson (2018: 17) y Sipiorski (2023: 60), la incorporación de expertos científicos en los procesos judiciales —ya sea como asesores, mediadores o jueces especializados— busca garantizar que la evidencia técnica sea comprendida y utilizada de manera efectiva. Este modelo responde a una transformación más profunda del razonamiento judicial, donde la ciencia deja de ser un insumo auxiliar y se convierte en un elemento estructural de la toma de decisiones. Los jueces ya no solo arbitran entre partes humanas, sino que deben integrar el conocimiento científico para proteger los sistemas naturales de los que depende la vida, lo que refleja una expansión ética y funcional del derecho en el contexto del desarrollo sostenible (Robinson, 2018: 5).

En Chile, la integración de la ciencia en la justicia ambiental se ha vuelto especialmente visible desde la creación de los tribunales ambientales (Ley 20600), diseñados para fortalecer la capacidad del sistema judicial en la comprensión y valoración de la evidencia científica. Su estructura mixta —con jueces de formación jurídica y ministros expertos en ciencias ambientales, hidrología, biología o ingeniería— permite un diálogo más equilibrado entre el conocimiento científico y el razonamiento jurídico. En varios fallos emblemáticos sobre daño ambiental en humedales altoandinos, la ciencia ha sido determinante: los tribunales han debido evaluar procesos de degradación vinculados a la extracción de agua para la minería, requiriendo peritajes y modelos hidrogeológicos que estiman balances hídricos, tendencias de recarga de acuíferos y efectos sobre la vegetación hidrófila. Estos insumos técnicos generan información verificable y trazable que contribuye tanto a fundamentar las sentencias como a orientar las medidas de compensación o restauración ordenadas por la justicia (Hernández Rojas, 2023: 1).

De este modo, la ciencia se consolida como un pilar estructural del sistema judicial ambiental chileno. Aporta los conocimientos técnicos necesarios para determinar la existencia, magnitud y causalidad del daño ambiental, y a la vez cumple una función legitimadora, al fortalecer la confianza pública en la justicia ambiental y mejorar la coherencia y previsibilidad de la jurisprudencia. La evidencia científica —a través de peritajes, estudios y modelaciones— constituye el núcleo del proceso probatorio y sustenta decisiones más rigurosas, transparentes y socialmente aceptadas. Así, la articulación entre conocimiento empírico y principios jurídicos de prevención, reparación y sustentabilidad contribuye a una gobernanza ambiental más informada, justa y efectiva (Sameshima Castillo, 2024: 4).

La relación durante los últimos años entre ciencia, tribunales y disputas ambientales refleja un «giro científico» del derecho: la ciencia no solo informa la creación de normas, sino que condiciona su aplicación efectiva. La justicia ambiental contemporánea depende de la capacidad institucional de incorporar evidencia científica confiable, trazable y transparente, y de traducirla en decisiones legítimas y socialmente aceptadas. Así, la ciencia se consolida como un puente entre los datos y la justicia, permitiendo que el derecho responda con mayor precisión, equidad y coherencia a la complejidad ecológica del mundo actual.

Ciencia y herramientas de gestión ambiental

El artículo 18 número 2 de la Ley 20600 establece que, ante la existencia de daños ambientales o afectación de alguno de sus componentes, cualquier persona directamente afectada, así como las municipalidades y el Consejo de Defensa del Estado (CDE), están facultados para demandar su reparación. En los últimos años, el número de demandas y sanciones por daño ambiental ha aumentado significa-

tivamente en las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta, Atacama y Coquimbo. De acuerdo con datos de la plataforma estadística del propio Tribunal, que consolida información sobre las causas tramitadas entre 2017 y diciembre de 2024, se han registrado 32 demandas de reparación por daño ambiental, varias de ellas vinculadas a humedales altoandinos. Este fenómeno evidencia una creciente sensibilidad pública y una mayor capacidad institucional para abordar conflictos que requieren comprender la complejidad ecológica y social de los territorios.

El trabajo del Tribunal Ambiental se sustenta en una estrecha relación entre gobernanza, gestión e investigación científica. Los casos de daño ambiental no pueden resolverse únicamente sobre la base de normas jurídicas; exigen diagnósticos y peritajes capaces de establecer la existencia, magnitud y causalidad del daño, así como la eficacia de las medidas de reparación. Para ello, la justicia requiere apoyarse en herramientas de gestión ambiental basadas en ciencia, tales como la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), los Sistemas de Gestión Ambiental (SGA) y los Planes de Manejo.

La EIA cumple un rol preventivo al anticipar impactos y definir medidas de mitigación sobre la base de estudios interdisciplinarios que integran información ecológica, hidrológica y social. Los SGA, por su parte, operacionalizan ese conocimiento mediante la mejora continua y la verificación del cumplimiento ambiental. Finalmente, los Planes de Manejo aplican la evidencia científica al diseño de acciones de conservación, restauración y monitoreo, asegurando la coherencia entre el conocimiento técnico y la gestión territorial.

En este marco, la investigación aplicada se convierte en un soporte esencial del proceso judicial. Estudios en hidrogeología, ecofisiología, geoquímica y ciencias sociales permiten generar información verificable para sustentar decisiones judiciales y administrativas. Las técnicas de investigación forense medioambiental, el análisis de isótopos estables, el intercambio gaseoso y de fluorescencia de la clorofila *a*, y la caracterización geoquímica y mineralógica, permiten la caracterización de contaminantes, el análisis de balances hídricos, la evaluación del estado ecológico y la estimación de servicios ecosistémicos, todos ellos insumos indispensables para los fallos y las medidas ordenadas por el Tribunal Ambiental.

La ciencia, por tanto, no solo documenta los impactos, sino que habilita la acción jurídica y la gestión ambiental. Es crucial para lograr un entendimiento detallado de las interacciones entre las actividades antropogénicas, las dinámicas ecosistémicas y la salud medioambiental, animal y humana, permitiendo formular e implementar estrategias adecuadas de mitigación de los impactos, conservación y restauración, así como prevenir posibles daños en el futuro de los humedales altoandinos. Así, la integración de la ciencia en la labor de los tribunales ambientales fortalece la legitimidad y la eficacia de las decisiones, al permitir que estas se fundamenten en conocimiento empírico, verificable y socialmente reconocido.

Metodología y contexto

Metodología

El presente documento aborda la pregunta de investigación analizando cómo el conocimiento científico aplicado contribuye a la resolución de disputas ambientales y a las estrategias de conservación en humedales altoandinos.

El estudio se basa en la presentación de casos de estudio y en la identificación de lecciones aprendidas durante el desarrollo de proyectos. Específicamente, se analiza parte del proceso judicial que culminó con el avenimiento entre el CDE y Codelco División Salvador, resuelto en 2020 ante el Primer Tribunal Ambiental.¹

El enfoque metodológico del documento es la demostración empírica de la importancia de la investigación interdisciplinaria para la justicia ambiental. Esto se logra mediante el análisis de dos casos concretos relacionados con el plan de compensación establecido en dicho avenimiento para el Salar de Pedernales:

- Caso de estudio 1 (puesta en valor): se examina cómo la investigación y la colaboración con las comunidades indígenas Colla se integraron para crear un plan de puesta en valor, un plan de educación ambiental y un plan de manejo, demostrando la legitimidad social y cultural de las medidas de reparación.
- Caso de estudio 2 (análisis forense): se describe la aplicación de una metodología de análisis forense ambiental basada en el uso del radionúclido plomo-210. Este caso se utiliza para mostrar cómo la ciencia aplicada genera evidencia verificable y trazable para establecer la cronología y la causalidad del daño ambiental, proveyendo así la base empírica para la acción legal.

Contexto: Salar de Pedernales

Descripción del Salar de Pedernales

El Salar de Pedernales se ubica en la cuenca endorreica más grande de la Región de Atacama, ubicada a alrededor de 4.000 metros sobre el nivel del mar. Con una superficie aproximada de 3.592 kilómetros cuadrados, es uno de los salares más grandes de Chile (**figura 1**). Tres ríos principales fluyen a esta cuenca: el río Juncalito, el río La Ola y el río Leoncito. Se caracteriza por la rica biodiversidad de sus humedales SVAHT, que cumplen un rol fundamental de provisión de servi-

1. Avenimiento y transacción del caso *Consejo de Defensa del Estado-Corporación Nacional del Cobre*, Primer Tribunal Ambiental, rol D-7-2020, daño ambiental, aprobada el 29 de diciembre de 2020. Disponible en <https://www.portaljudicialta.cl/sgc-web/ver-causa.html?rol=D-7-2020>.

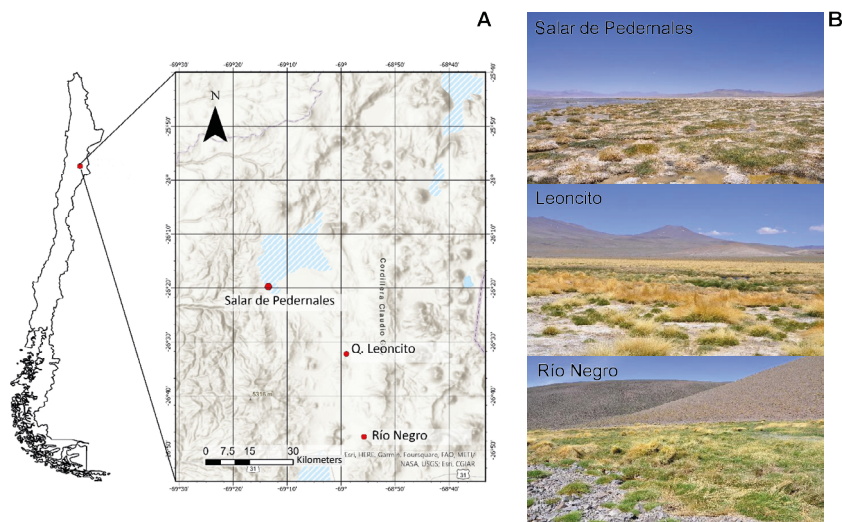


Figura 1. A la izquierda, el mapa del Salar de Pedernales. A la derecha, tipos de humedales presentes en la cuenca de Pedernales.

cios ecosistémicos, tales como reservorio de agua continental, hábitat de flora y fauna, refugio de aves migratorias y fijación de carbono en el suelo. Los tres tipos de humedales presentes en la cuenca del Salar de Pedernales (así como en toda la biorregión de la Puna de Atacama) son bofedales, pajonales hídricos y vegas.

Los SVAHT del Salar de Pedernales son un hábitat esencial para una diversidad biológica única que presenta altos niveles de endemismo. Tienen una alta relevancia de conservación, ya que son una zona importante para la reproducción de aves residentes y migratorias, y de pastoreo para camélidos. Además de su valor ambiental, presentan un gran valor cultural, puesto que son parte de las rutas de migración estacional de comunidades indígenas presentes en el desierto de Atacama desde tiempos ancestrales. Por estas razones, el Salar de Pedernales ha sido catalogado como un sitio prioritario para la conservación de la biodiversidad. Actualmente, la extracción de agua debido a las actividades mineras, el cambio climático y la falta de instrumentos de gobernanza son las principales amenazas para la conservación de este ecosistema.

Uso del territorio: pueblos indígenas y desarrollo minero en la región de Atacama

Históricamente, diversos actores con diferentes intereses han hecho uso de este territorio, incluyendo los pueblos ancestrales, la industria minera y otras actividades antrópicas, como el establecimiento de ciudades y el turismo. Adicionalmente, esta zona contiene litio, lo que, frente a la demanda creciente de este elemento estraté-

gico para la transición energética hacia la descarbonización, ha generado un gran interés por desarrollar nuevos proyectos extractivos.

Desde tiempos ancestrales el pueblo Colla ha habitado esta zona altoandina, donde han vivido de manera exitosa adaptándose a las dinámicas naturales del lugar. Los Colla habitan en la zona altoandina de las provincias de Chañaral y Copiapó, en la Región de Atacama. La característica principal del pueblo Colla ha sido la trashumancia, que consiste en el traslado entre zonas según la disponibilidad de recursos hídricos y alimento para el ganado. Su tránsito por las mesetas de alta montaña responde a sus necesidades y requerimientos de trabajo, educación, prácticas ancestrales y ciclos de la naturaleza, entre otros.

Por otro lado, el norte de Chile presenta una alta riqueza de minerales, lo que históricamente ha atraído a compañías mineras que han ido ejerciendo un creciente uso del territorio. Hoy en día, la minería juega un rol fundamental en la economía chilena, y la concentración espacial de esta industria en el árido desierto de Atacama requiere de una alta demanda hídrica para sus procesos productivos (Romero, Videla y Gutiérrez, 2017: 231). En la Región de Atacama, la minería es la actividad más importante, constituyendo en 2023 el 32,8% del producto interno bruto (PIB) regional (Consejo Minero, 2024: 70). Asimismo, los recursos hídricos del Salar de Pedernales han sido explotados por décadas por compañías mineras.

De este modo, el uso excesivo de agua en este ambiente extremadamente árido ha puesto en riesgo los humedales altoandinos debido a diversas presiones humanas y económicas. La creciente demanda de agua para las industrias extractivas, especialmente la minería, ha exacerbado la presión en un entorno ya vulnerable por la aridez extrema del desierto, afectando gravemente la biodiversidad y la sustentabilidad de los ecosistemas vegetales de la región. Esta situación resalta la necesidad urgente de gestionar el agua de manera sostenible para equilibrar los intereses económicos y las necesidades de conservación de la biodiversidad en zonas tan delicadas como la de Atacama.

Necesidad de proceso conciliatorio por daño ambiental

La Ley 19300 establece las bases de la política ambiental en Chile, definiendo principios fundamentales como la responsabilidad por daño ambiental, que obliga a quienes lo causen a repararlo mediante la restauración del medioambiente a su estado original o, si esto no es viable, con medidas compensatorias. Complementariamente, la Ley 20600 crea los tribunales ambientales, órganos especializados que resuelven controversias relacionadas con el medioambiente, incluidas las demandas por daño ambiental, que pueden ser presentadas por personas naturales, jurídicas o comunidades.

El procedimiento ante los tribunales ambientales incluye la admisibilidad de la demanda, la contestación, la recepción de la causa a prueba, la audiencia de conciliación y alegatos finales, y culmina con una sentencia que establece medidas de reparación o compensación ambiental. Este proceso permite que las partes expongan argumentos y pruebas, promoviendo resoluciones equilibradas mediante acuerdos conciliatorios o avenimientos, que buscan garantizar tanto la protección ambiental como el cumplimiento normativo.

Un caso emblemático es la demanda interpuesta por el CDE contra Codelco División Salvador, resuelta en 2020 con un avenimiento aprobado por el Primer Tribunal Ambiental (Valenzuela Mujica, 2023: 38). Este acuerdo examinó la presunta responsabilidad derivada de la extracción prolongada de aguas superficiales y subterráneas en el Salar de Pedernales, la cual habría generado un descenso sostenido en los niveles de agua, afectando el componente hídrico, los ecosistemas acuáticos continentales y los SVAHT. También se identificó la pérdida de servicios ecosistémicos clave, como soporte y hábitat de fauna, y el deterioro de relaciones ecosistémicas.

El avenimiento incluyó doce medidas agrupadas en un plan de compensación, entre las que destacan el plan de reparación *ex situ* (RC-01) y el plan de puesta en valor (RC-02). Estas medidas, orientadas a mitigar los efectos negativos en el Salar de Pedernales y los humedales altoandinos, buscan no solo restaurar el equilibrio ambiental, sino también generar beneficios sociales, económicos y culturales sostenibles para las comunidades cercanas, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas.

La realización de las investigaciones científicas necesarias para el desarrollo del plan de reparación *ex situ* (RC-01) y del plan de puesta en valor (RC-02) ha sido fundamental desde los ámbitos jurídico y social. Estas investigaciones permitieron construir una base científica sólida para evaluar los impactos ambientales y respaldar las decisiones judiciales con evidencia verificable. Al mismo tiempo, fortalecieron la legitimidad del proceso al visibilizar los efectos de la degradación ambiental sobre ecosistemas de alto valor ecológico y sobre las comunidades que dependen de ellos, contribuyendo a una comprensión más equitativa e integrada entre la protección ambiental, la responsabilidad legal y el bienestar social.

Casos de estudio: El conocimiento aplicado en el Salar de Pedernales

Caso de estudio 1: Puesta en valor del Salar de Pedernales

La puesta en valor del Salar de Pedernales tiene como propósito aumentar el conocimiento y la valoración de los humedales altoandinos, generando y divulgando información sobre el salar y otros ecosistemas cercanos. El proyecto implemen-

tado ha desarrollado un concepto de puesta en valor enfocado en los territorios con actividad minera que incluye destacar, preservar y comunicar los activos que generan conocimiento, así como crear herramientas efectivas para fortalecer los procesos de desarrollo en estos territorios. Esta sección describe los principales objetivos del proyecto y detalla algunos de los planes implementados y las lecciones aprendidas durante el proceso.

Un aspecto central en el desarrollo de la puesta en valor del Salar de Pedernales ha sido la participación de las comunidades indígenas Colla. Su involucramiento ha sido esencial para validar el proceso y enriquecerlo mediante el aporte de su conocimiento ancestral en aspectos culturales, espirituales y ecológicos. Esta colaboración no solo ha contribuido al cumplimiento exitoso de los objetivos del proyecto, sino que también ha fortalecido la pertinencia local y la calidad de las acciones implementadas, en línea con el enfoque de conservación y protección del territorio que habitan.

Descripción de las dimensiones estipuladas en la puesta en valor del Salar de Pedernales

Plan de manejo. Confección e implementación de un plan de manejo, incorporando la participación de diferentes actores del territorio y bajo las directrices de la metodología de los Estándares Abiertos para la Práctica de la Conservación (EAPC).

Plan de investigación científica. Elaboración de un estudio científico sobre los rasgos funcionales de especies dominantes en tres SVAHT del Salar de Pedernales y sus mecanismos de resistencia al déficit hídrico.

Plan de educación. Promover conocimientos, valores y conductas que contribuyan al desarrollo de una educación para el desarrollo sostenible de los alumnos y alumnas de la comuna de Diego de Almagro.

Plan de infraestructura. Implementación de un plan de infraestructura en las áreas con valor paisajístico de los SVAHT del Salar de Pedernales para establecer un reconocimiento territorial de los ecosistemas.

Plan de comunicaciones y difusión. Implementación de un plan de comunicaciones y difusión para la elaboración de material audiovisual y gráfico con la información base de los aspectos generales y los resultados de las etapas del proyecto, para su uso público.²

2. Información pública adicional sobre el avenimiento, las medidas adoptadas y los documentos y monitoreos asociados se encuentra en el sitio oficial de Codelco para el caso Pedernales, disponible en https://codelco.com/prontus_codelco/site/edic/base/port/pedernales.html.

Libro sobre la flora y fauna del Salar de Pedernales

Se desarrolló un libro de divulgación sobre la flora y fauna de los ecosistemas andinos del Sitio Prioritario para la Conservación de la Biodiversidad del Salar de Pedernales y sectores aledaños. Este material, concebido en formato de guía de campo, está diseñado para un público no especializado y será distribuido en colegios, liceos y bibliotecas de la comuna, con el propósito de fomentar el conocimiento y la valoración del patrimonio natural local. La elaboración del libro requirió la consulta de la literatura, la que fue corroborada mediante múltiples salidas de campo destinadas a la observación y el reconocimiento de especies. Durante estas actividades se generó un repositorio fotográfico exhaustivo que documenta tanto las especies registradas como el patrimonio físico del salar y sus alrededores.

A partir de los datos obtenidos, se construyó una base de datos detallada que incluye información específica sobre las especies detectadas en el Salar de Pedernales y sus alrededores. Con esta información se elaboraron fichas informativas que presentan de manera accesible las características clave de cada especie. Este libro constituye una herramienta fundamental para sensibilizar a las comunidades locales sobre la importancia de conservar los ecosistemas andinos y proteger su biodiversidad única.

Estudio científico sobre la ecofisiología vegetal del Salar de Pedernales

Se realizó un estudio científico en el cual se seleccionaron tres SVAHT ubicados en el Salar de Pedernales y en sitios aledaños (**figura 2**). Para cada SVAHT se seleccionaron las especies vegetales dominantes y se caracterizó un amplio espectro de rasgos morfofisiológicos de las plantas, junto con mediciones de intercambio gaseoso y análisis de isótopos estables, con el fin de entender y predecir las respuestas de estos ecosistemas ante cambios ambientales. Se realizaron salidas a terreno para la obtención de muestras de plantas y suelos para pruebas de laboratorio y para las evaluaciones fisiológicas *in situ*, llevadas a cabo por especialistas del Grupo de Investigación en Ecología y Biogeografía de la Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas de la Universidad de Concepción y del Laboratorio de Fisiología y Biología Molecular Vegetal de la Universidad de la Frontera.

Los resultados mostraron que, aun cuando los humedales altoandinos estudiados están adaptados a su ambiente, su limitada tolerancia a la deshidratación los hace vulnerables a futuros cambios hidrológicos (López y otros, 2025: 1-10). Por lo mismo, la extracción de agua en este tipo de ecosistemas puede tener efectos significativos en el bienestar y supervivencia de los humedales, lo que resalta la urgencia de conservar y proteger estos frágiles ambientes naturales. Además, este tipo de estudios es crucial para predecir la resiliencia de estos ecosistemas ante

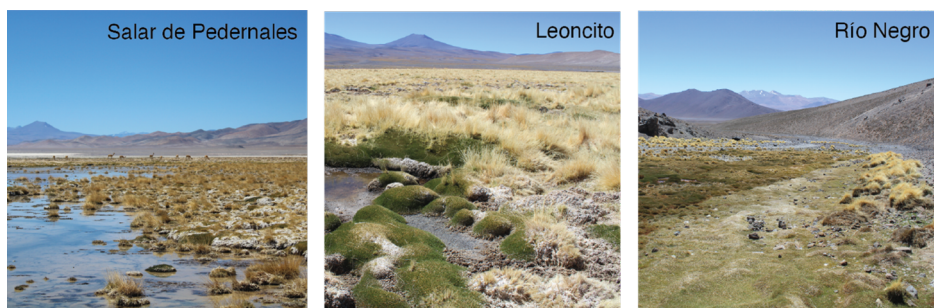


Figura 2. Humedales estudiados en el estudio científico sobre rasgos morfofisiológicos de plantas (López y otros, 2025, 1-10).

cambios climáticos. Este estudio forma parte del artículo científico «Caracterización de rasgos morfofisiológicos asociados a la tolerancia a la deshidratación de la vegetación de humedales de alta montaña en la Cordillera de los Andes en la región de Atacama, Chile», el cual ha sido publicado en la revista científica internacional *Plant-Environment Interactions*.

Desarrollo de plan de manejo e implementación de miradores y paneles informativos

Este plan tuvo como objetivo establecer un reconocimiento territorial de los SVA-HT del área, además de aportar información de interpretación ambiental sobre la flora, fauna, medio físico y comunidades de los sectores relevantes. El primer paso fue realizar un levantamiento de información base sobre el componente paisaje y una valoración de este, enfocándose en los atributos físicos y bióticos del lugar. En base a esta valoración fue posible definir tres sitios de instalación de miradores, donde se crearon paneles con información sobre las características ecológicas del sitio, el tipo de SVAHT presente, su flora y fauna dominante, además de señalética de buen uso e información del mirador, como el nombre del sitio, altitud geográfica, principales cumbres del horizonte, entre otros. Adicionalmente, se elaboraron y dispusieron una serie de paneles informativos en varias quebradas de agua dulce, mostrando información descriptiva para cada una de ellas (tipo de formación vegetal, especies relevantes y descripción de su importancia, superficie y medidas de manejo asociadas a su conservación).

Plan de educación ambiental y trabajo con comunidades Colla: patrimonio biocultural y relación con el bienestar humano

Las actividades del plan de educación (**figura 3**) tuvieron como objetivo promover conocimientos, valores y conductas que contribuyan al desarrollo de una educa-



Figura 3. Actividades realizadas como parte del plan de educación.

ción para el desarrollo sostenible de estudiantes de 13 a 18 años de la comuna de Diego de Almagro, en la Región de Atacama. Para ello se implementó una metodología integral que combinó talleres en aula y una salida de campo al Salar de Pedernales. Esta experiencia de aprendizaje se desarrolló en colaboración con dos escuelas y dos liceos de la comuna, involucrando a estudiantes, docentes y apoderados. Estas instancias se estructuraron en torno a dos elementos esenciales: la educación ambiental, que incorporó metodologías de indagación científica e interpretación del entorno, y el patrimonio biocultural de las comunidades Colla.

Los talleres implicaron el desarrollo de material didáctico y educativo que fue entregado a cada participante, además de un set para cada escuela y liceo para ser usado en actividades culturales y ecológicas que contaron con la guía de investigadores e investigadoras y representantes de las comunidades indígenas Colla. Es importante señalar que la participación y sinergia con dichas comunidades fueron un elemento clave para generar una experiencia de educación ambiental integral, de alta calidad y con pertinencia local. Esto enriqueció significativamente el desarrollo curricular de las y los estudiantes, fortaleciendo la conexión entre el conocimiento científico y el saber ancestral.

Integración de resultados interdisciplinarios en el proceso de puesta en valor

La recopilación, consolidación y difusión de información sobre el Salar de Pedernales —impulsada a través de un enfoque interdisciplinario durante la puesta en valor— ha puesto en evidencia tanto la relevancia ecológica de estos ecosistemas únicos como su vulnerabilidad frente a los cambios ambientales. Los estudios ecológicos realizados contribuyeron a caracterizar estos ecosistemas altoandinos, mientras que las acciones de educación, manejo y comunicación fortalecieron el vínculo entre la ciencia y las percepciones sociales del territorio. Este esfuerzo no solo promueve la conciencia sobre la necesidad urgente de proteger y restaurar estos entornos, sino que también establece un precedente de colaboración efectiva entre la academia, las comunidades y otros actores clave.

Asimismo, el enfoque adoptado ha sido crucial para fortalecer la vinculación entre las partes interesadas y compañías mineras, promoviendo una gestión territorial basada en el diálogo y la participación. Esta visión multicultural y colaborativa ha permitido integrar dimensiones culturales, ambientales, económicas y sociales, contribuyendo a la construcción de estrategias sostenibles que garantizan el bienestar de las comunidades y la conservación del patrimonio biocultural a largo plazo, dando respuesta y legitimidad a las decisiones del Tribunal Ambiental.

En particular, la participación de las comunidades indígenas Colla fue un elemento central de esta integración. Su conocimiento ancestral y su interpretación del paisaje permitieron contextualizar los resultados biofísicos en una dimensión cultural y espiritual, reconociendo que la degradación ambiental también afecta las prácticas, los valores y el bienestar de las comunidades. Esta interacción entre ciencia y cultura otorgó legitimidad al proceso y fortaleció la pertinencia local de las medidas implementadas.

Así, la puesta en valor del Salar de Pedernales se consolida como un ejemplo de cómo una resolución judicial puede transformarse en un proceso interdisciplinario de investigación, restauración y diálogo territorial. La experiencia demuestra que la conciliación puede trascender el ámbito legal, convirtiéndose en una oportunidad para articular la ciencia aplicada, el derecho ambiental y el conocimiento ancestral en la construcción de estrategias sostenibles que garanticen la conservación ecológica y el bienestar comunitario a largo plazo.

Caso de estudio 2: Análisis forense de los sistemas de vegetación azonal hídrica terrestre (SVAHT) con afectación en el Salar de Pedernales

Contexto y objetivos del estudio

La disponibilidad de agua (y su calidad) es crucial para la supervivencia de las especies vegetales y la fauna en los SVAHT, así como de las comunidades loca-

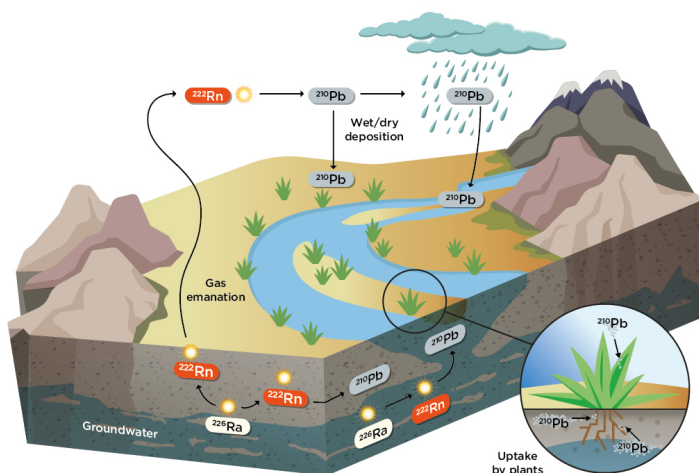


Figura 4. Esquema de las principales fuentes y procesos de transporte del plomo-210 en el medioambiente. Representa el decaimiento del radio-226 en ^{222}Rn , que a su vez decae en plomo-210 en el suelo y/o en la atmósfera.

les. Es por esto que la disminución o desvío de flujos de agua que los alimentan puede llevar a una degradación ecológica rápida y severa, en ocasiones irreversible. La presente investigación, desarrollada en colaboración con investigadores del Departamento de Oceanografía de la Universidad de Concepción, se basó en la premisa de que no existen metodologías disponibles que permitan estimar con precisión la fecha y la cronología de la afectación de la vegetación en este particular ambiente altoandino, un aspecto fundamental para comprender las dinámicas y causas de los impactos observados.

De este modo, se desarrolló y aplicó una metodología de análisis forense ambiental basada en el uso de los radionúclidos naturales plomo-210 y radio-226 ampliamente utilizados como marcadores temporales para reconstruir procesos ambientales ocurridos durante los últimos 150 años. Esta técnica permitió estimar la cronología de afectación de la vegetación, aportando evidencia empírica sobre cuándo y cómo ocurrieron los cambios ecológicos en el territorio. La **figura 4** muestra un esquema de las diferentes vías mediante las cuales el plomo-210 puede incorporarse al medioambiente.

Se identificaron y analizaron tres zonas claramente diferenciadas dentro del Salar de Pedernales: activa, intermedia e inactiva, ubicadas a lo largo de un gradiente ecológico del sistema vegetacional. Estas zonas fueron definidas en función del estado de la vegetación presente. La zona activa comprende aquellas áreas del SVAHT donde se observa la presencia de vegetación viva y vigorosa. En términos hidrológicos, esta zona se encuentra asociada a presencia constante de agua, lo

que garantiza la disponibilidad de nutrientes y la estabilidad de los procesos ecológicos. En la zona intermedia, la vegetación presenta signos de estrés hídrico y disminución en la vigorosidad. Finalmente, la zona inactiva se caracteriza por la presencia de vegetación muerta. El objetivo de este estudio fue determinar la fecha y dinámica de muerte de los SVAHT inactivos en el Salar de Pedernales.

Para ello se llevaron a cabo dos campañas de muestreo en otoño y primavera, en las que se recolectaron muestras de plantas vivas y muertas. Posteriormente, en el laboratorio se analizaron las actividades de plomo-210 y radio-226 mediante espectrometría alfa y centelleo gaseoso, respectivamente, y en base a estas se determinó la cronología de muerte de la vegetación aplicando dos métodos: el Método de Actividad Inicial Constante (MCI) y el Método de Desequilibrio Radioactivo (DER) plomo-210 y radio-226.³

Resultados y relevancia jurídica de la cronología forense

La datación de la muerte de la vegetación, calculada por ambos métodos, ofrece un rango de tiempo estimado comparable, que osciló entre 17 y 72 años para el método DER, y entre 11 y 61 años para el método MCI. Los resultados de ambos métodos indican de manera consistente que la muerte de las plantas de la zona *inactiva* no se produjo simultánea y repentinamente, sino que ocurrió a través de un proceso continuo y progresivo, desde el sur hacia el norte del salar, que se inició hace al menos 70 años (aproximadamente en 1951), y se estabilizó en torno a 2011. En la zona *intermedia* el proceso comenzó en el año 1959, estabilizándose alrededor de 2010. En base al análisis de imágenes satelitales, se estima que la superficie de la zona *activa* se redujo aproximadamente un 50% en el periodo desde 1950 hasta 2011, progresando a un porcentaje de reducción promedio de 0,8% anual.

Estos resultados revelaron una reducción progresiva y continua de la superficie con cubierta vegetal en el Salar de Pedernales durante un largo periodo. Los hallazgos del estudio, apoyados en imágenes de satélite históricas y de vuelos de drones, evidencian una afectación significativa de este ecosistema clave y reafirman la importancia del monitoreo continuo y la investigación científica para el desarrollo e implementación de estrategias de gestión efectivas para preservar los humedales altoandinos.

Estos resultados también aportan una línea de tiempo científicamente verificable sobre la degradación del ecosistema, lo que reviste especial relevancia en contextos judiciales y de conciliación ambiental. En primer lugar, permiten vincu-

3. La ficha educativa del muestreo, disponible públicamente gracias al avenimiento en el Primer Tribunal Ambiental, puede consultarse en https://codelco.com/prontus_codelco/site/docs/20231205/20231205105831/aforense_folleto_informativo_version_digital.pdf.

lar la dinámica de pérdida de vegetación con períodos específicos de cambios en la disponibilidad de agua, contribuyendo a establecer una atribución temporal y causal del daño ambiental. En segundo lugar, la datación precisa respalda la trazabilidad del impacto y fortalece la argumentación técnica en procesos de reparación o compensación ambiental, al ofrecer una base empírica sólida sobre la magnitud y duración del daño.

En un proceso de conciliación ante un tribunal ambiental, esta información puede emplearse como evidencia científica para:

- Sustentar la existencia y antigüedad del daño ambiental, demostrando que las afectaciones son previas a la implementación de medidas de mitigación.
- Apoyar la estimación de compensaciones proporcionales a la extensión y cronología del deterioro ecológico.
- Contribuir a la definición de medidas de restauración o compensación más precisas, basadas en los períodos y tasas de pérdida identificados.

Así, el análisis forense de los SVAHT en el Salar de Pedernales constituye un aporte significativo a la práctica de la justicia ambiental, al integrar herramientas científicas avanzadas en la evaluación del daño ecológico. Este tipo de evidencia permite articular la ciencia con el derecho, fortaleciendo los fundamentos técnicos de las decisiones judiciales y garantizando procesos de conciliación más transparentes, trazables y legítimos.

Lecciones aprendidas sobre la integración de conocimiento científico en la justicia ambiental

La resolución de disputas ambientales complejas, como las que afectan a los humedales altoandinos, requiere que la justicia no solo aplique normas, sino que utilice el conocimiento científico en sus resoluciones de manera socialmente legítima (Roy y otros, 2025: 560). Los estudios de caso del Salar de Pedernales ilustran cómo la ciencia aplicada contribuye a la justicia ambiental: primero, al generar evidencia verificable que permite establecer la causalidad del daño; y segundo, al otorgar legitimidad social y cultural a las medidas de reparación. La ciencia, en este sentido, no solo aporta datos, información y conocimiento, sino que participa activamente en la construcción institucional de la justicia ambiental.

La integración científico-social en la legitimación de la reparación

El caso de estudio 1, centrado en la puesta en valor del Salar de Pedernales, muestra que el conocimiento científico adquiere legitimidad cuando se articula con los saberes y valores de las comunidades locales. Los estudios ecológicos proporcio-

naron la base técnica para comprender la vulnerabilidad de los SVAHT frente al déficit hídrico, pero fue la colaboración con las comunidades indígenas Colla la que otorgó sentido social y cultural a las medidas de reparación.

El conocimiento ancestral sobre el uso del agua y las dinámicas del territorio permitió reinterpretar los resultados biofísicos desde una mirada territorial más amplia, donde la restauración ecológica se entiende también como restauración de vínculos culturales y sociales. Esta interacción entre ciencia y saberes locales reforzó la legitimidad del proceso (Peterson St-Laurent y otros, 2020: 2) y mostró que la justicia ambiental no se agota en la reparación material del daño, sino que implica restablecer las relaciones entre comunidad, territorio y ecosistema.

La prueba científica y la causalidad del daño

El análisis forense de la vegetación altoandina desarrollado en el caso de estudio 2 ejemplifica el papel de la ciencia como un aspecto central del proceso probatorio. Ante la falta de metodologías para datar la afectación de la vegetación en ecosistemas de altura, el uso del radionúclido plomo-210 permitió reconstruir la cronología de la degradación ambiental. Los resultados demostraron que la pérdida de vegetación fue progresiva y sostenida durante siete décadas, lo que permitió vincular temporalmente los periodos de degradación con fases específicas de extracción hídrica.

Esta capacidad de datación confiere a la investigación científica un valor jurídico: traduce procesos ecológicos en evidencia legalmente verificable, permitiendo establecer causalidad y atribución de responsabilidades (Stuart-Smith y otros, 2021: 2). En los procesos de conciliación ambiental, este tipo de prueba aporta trazabilidad y proporcionalidad a las decisiones judiciales, fortaleciendo la transparencia y legitimidad de los acuerdos alcanzados.

El rol estructural de los tribunales ambientales

Ambos casos descritos en el presente artículo se desarrollaron bajo la jurisdicción de los tribunales ambientales de Chile, instituciones diseñadas precisamente para reducir la brecha entre ciencia y derecho. Su composición mixta —con jueces jurídicos y ministros científicos— permite un diálogo epistémico institucionalizado que convierte la evidencia técnica en fundamento jurídico (Hernández Rojas, 2023: 5).

Este modelo asegura que las decisiones se basen en conocimiento empírico, lo que refuerza la coherencia y previsibilidad de la jurisprudencia. La ciencia deja así de ser un insumo externo para transformarse en un componente estructural del

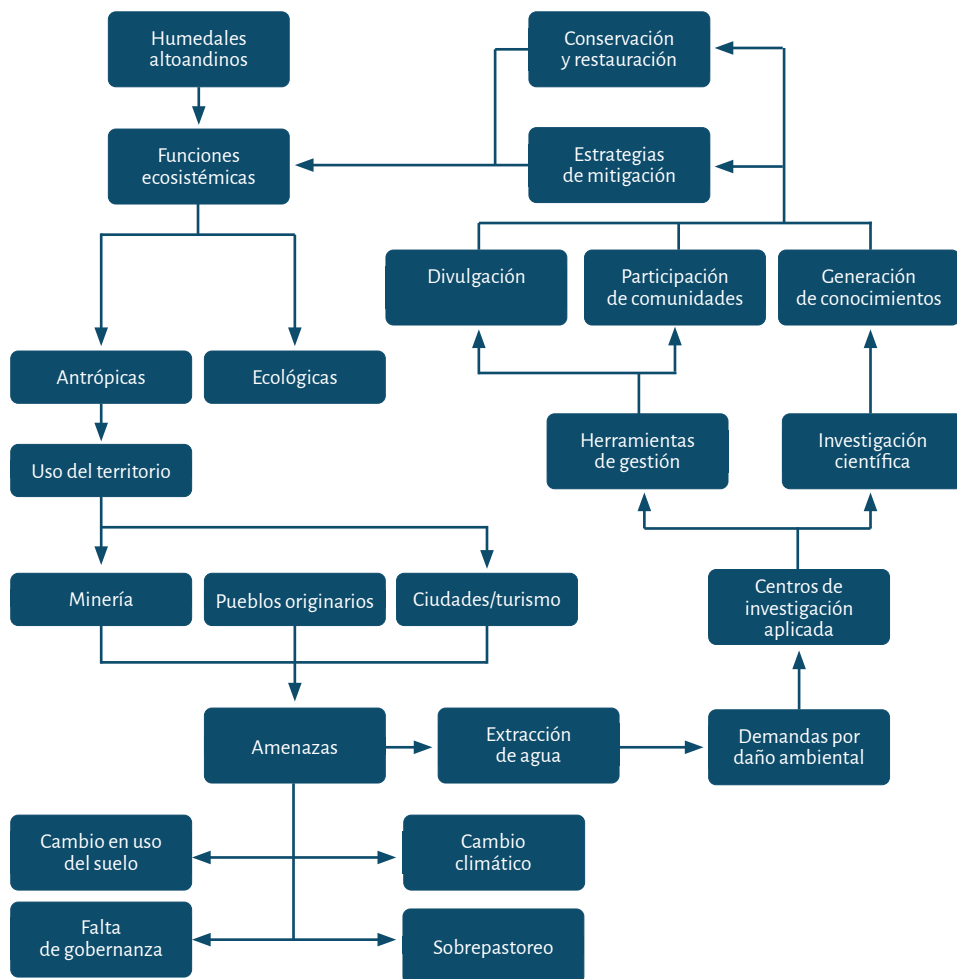


Figura 5. Mapa conceptual que muestra la relación entre los humedales altoandinos, sus funciones ecosistémicas junto con sus amenazas, y el rol que cumplen los centros de investigación como mediadores para generar los conocimientos y estrategias necesarias para la conservación y restauración de estos ecosistemas.

razonamiento judicial, consolidando un tipo de justicia ambiental que se apoya en la evidencia y se orienta a la protección efectiva de los sistemas naturales.

En resumen, abarcar los procesos conciliatorios por daño ambiental desde un enfoque interdisciplinario es fundamental para abordar los problemas ambientales de manera sistémica (**figura 5**). Analizar, compartir y consolidar estos aprendizajes podría permitir en el futuro crear una estructura sistematizada para manejar procesos conciliatorios por daño ambiental que se pueda aplicar en otras regiones

del país, adaptándola a las necesidades específicas de cada lugar. Este enfoque colaborativo y adaptativo sería clave para garantizar soluciones más efectivas y sostenibles en la gestión ambiental en contextos diversos.

Conclusiones y proyecciones

En conclusión, la experiencia en la gestión de conflictos en humedales altoandinos, ejemplificada por el caso del Salar de Pedernales, subraya la importancia crítica de la investigación interdisciplinaria. El documento demuestra que la ciencia no solo aporta datos, sino que participa activamente en la construcción institucional de la justicia ambiental. Los hallazgos de la discusión confirman dos contribuciones esenciales de la ciencia en este contexto:

- Establecimiento de causalidad: la ciencia, a través de herramientas como el análisis forense, genera evidencia verificable y trazable que permite establecer la existencia, magnitud y cronología del daño, lo que confiere valor jurídico a los procesos ecológicos y fortalece la legitimidad de los acuerdos de conciliación.
- Legitimación social y estructural: el conocimiento científico adquiere legitimidad cuando se articula con el saber ancestral de las comunidades locales, garantizando la pertinencia cultural de las medidas de reparación. Además, la estructura mixta de los tribunales ambientales (ministros abogados y ministros científicos) convierte a la ciencia en un componente estructural del razonamiento judicial, asegurando que las decisiones sean rigurosas, transparentes y coherentes.

En última instancia, el análisis de estos casos valida un enfoque sistémico y colaborativo para manejar disputas ambientales, sentando las bases para crear una estructura sistematizada que permita adaptar y aplicar estos aprendizajes en otras regiones del país, avanzando hacia una gestión más efectiva y sustentable de estos ecosistemas únicos.

Referencias

- AHUMADA CAMPOS, Mario y Luis Faúndez Yancas (2009). *Guía descriptiva de los sistemas vegetacionales azonales hídricos terrestres de la ecorregión altiplánica (SVAHT)*. Santiago: Ministerio de Agricultura de Chile, Servicio Agrícola y Ganadero. Disponible en https://tipg.link/l9_a.
- BAEZA, Eduardo (2018). *Los humedales en Chile y su relación con territorios indígenas*. Valparaíso: Biblioteca del Congreso Nacional. Disponible en https://tipg.link/l9_c.

- CONSEJO MINERO (2024). *Cifras actualizadas de la minería*. Disponible en https://tipg.link/l9_h.
- CHÁVEZ, Roberto, Oliver Mesequer-Ruiz, Matías Olea, Matías Calderón-Seguel, Karina Yaguer, Rosa Isela Meneses, José A. Lastra, Ignacio Núñez-Hidalgo, Pablo Sarricolea, Roberto Serrano-Notivoli y Manuel Prieto (2023). «Andean peatlands at risk? Spatiotemporal patterns of extreme NDVI anomalies, water extraction and drought severity in a large-scale mining area of Atacama, northern Chile». *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 116: 103138. DOI: [10.1016/j.jag.2022.103138](https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103138).
- DE LA FUENTE, Alberto, Carolina Meruane y Francisco Suárez (2021). «Long-term spatiotemporal variability in high Andean wetlands in northern Chile». *Science of the Total Environment*, 756: 143830. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.143830](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143830).
- GUNDERMANN, Hans (1998). «Pastoralismo andino y transformaciones sociales en el norte de Chile». *Estudios Atacameños*, 26: 293-319. DOI: [10.22199/So7181043.1998.0016.00012](https://doi.org/10.22199/So7181043.1998.0016.00012).
- GUNDERMANN, Hans y Barbara Göbel (2018). «Comunidades indígenas, empresas del litio y sus relaciones en el Salar de Atacama». *Chungará Revista de Antropología Chilena*, 50 (3): 471-486. DOI: [10.4067/So717-73562018005001602](https://doi.org/10.4067/So717-73562018005001602).
- HERNÁNDEZ ROJAS, Marcelo (2023): «Aporte de la ciencia en la Justicia Ambiental en Chile». *Diálogos y Voces Judiciales*, 2 (1). Disponible en https://tipg.link/l9_n.
- LEE, Hoesung y José Romero (editores) (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report, Summary for Policymakers. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ginebra: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Disponible en https://tipg.link/l9_q.
- LÓPEZ, Dariel, Patricia L. Sáez, Lohengrin A. Cavieres, Fernanda C. Beveridge, Felipe Saavedra-Mella y León A. Bravo (2025). «Morpho-Physiological Traits and Dehydration Tolerance of High-Altitude Andean Wetland Vegetation in the Chilean Atacama Region». *Plant-Environment Interaction* 6: 1-10. DOI: [10.1002/pei3.70038](https://doi.org/10.1002/pei3.70038).
- MARTIN, James A. (1977). «The Proposed “Science Court”». *Michigan Law Review*, 75: 1058-1091. Disponible en https://tipg.link/l9_u.
- MESEGUER-RUIZ, Óliver, Manuel Prieto y Kassandra V. González Carimán (2022). «Conocimiento ecológico tradicional en el Altiplano chileno: Entre la variabilidad climática y la percepción local». *Revista de Geografía Norte Grande*, 83: 107-123. DOI: [10.4067/So718-34022022000300107](https://doi.org/10.4067/So718-34022022000300107).
- MITSCH, William J., Blanca Bernal, Amanda M. Nahlik, Ülo Mander, Li Zhang, Christopher J. Anderson, Sven E. Jørgensen y Hans Brix (2013). «Wetlands, carbon, and climate change». *Landscape Ecology*, 28: 583-597. DOI: [10.1007/s10980-012-9758-8](https://doi.org/10.1007/s10980-012-9758-8).

- MOLINA, Verónica, Yoanna Eissler, Camila Fernández, Marcela Cornejo-D'Ottone, Cristina Dorador, Brad M. Bebout, Wade H. Jeffrey, Carlos Romero y Martha Hengst (2021). «Greenhouse gases and biogeochemical diel fluctuations in a high-altitude wetland». *Science of the Total Environment*, 768: 144370. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.144370](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144370).
- PAQUIS, Pablo, Martha B. Hengst, July Z. Florez, Joseline Tapia, Verónica Molina, Vilma Pérez y Coral Pardo-Esté (2023). «Short-term characterisation of climatic-environmental variables and microbial community diversity in a high-altitude Andean wetland (Salar de Huasco, Chile)». *Science of the Total Environment*, 859 (2): 160291. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2022.160291](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160291).
- PETERSON ST-LAURENT, Guillame, George Hoberg, Stephen R. J. Sheppard y Shannon M. Hagerman (2020). «Designing and evaluating analytic-deliberative engagement processes for natural resources management». *Elementa: Science of the Anthropocene*, 8 (8). DOI: [10.1525/elementa.402](https://doi.org/10.1525/elementa.402).
- PRESTON, Brian John (2014). «Characteristics of successful environmental courts and tribunals». *Journal of Environmental Law*, 26: 365–393. DOI: [10.1093/jel/equ019](https://doi.org/10.1093/jel/equ019).
- PRIMER TRIBUNAL AMBIENTAL (2024). *Facultades y Funciones Primer Tribunal Ambiental*. Disponible en https://tipg.link/l9_x.
- ROBINSON, Nicholas (2018). «The nature of courts», en Christina Voigt y Zen Makuch (editores), *Courts and the Environment*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing.
- ROMERO, Hugo, Angélica Videla y Felipe Gutiérrez (2017). «Explorando conflictos entre comunidades indígenas y la industria minera en Chile: las transformaciones socioambientales de la región de Tarapacá y el caso de Lagunillas». *Estudios Atacameños*, 55: 231-250. DOI: [10.4067/S0718-10432017005000019](https://doi.org/10.4067/S0718-10432017005000019).
- ROY, Kovel, Sameera Fatima, Sabrina Roy Chaudhary, Shreya Sonal, Archita Mishra y Sandip Chanda (2025). «Forensic Environmental Science and Legal Admissibility: Bridging the Gap Between Data and Justice». *International Journal of Environmental Sciences*, 11: 546-563. DOI: [10.64252/6pq8m965](https://doi.org/10.64252/6pq8m965).
- SAMESHIMA CASTILLO, Sofía (2024). *El daño ambiental y la prueba científica: un análisis sobre la valoración de la prueba científica dentro de los procedimientos de daño ambiental en el derecho chileno*. Memoria para optar al grado de Licenciado en Ciencias Jurídicas y Sociales de la Universidad de Chile. Disponible en https://tipg.link/l9_z.
- SIPIORSKI, Emily (2023). «Scientific Knowledge: Its Impacts on Judicial Decision-Making and International Law in the Era of Sustainability», en Maria da Glória Garcia y Antonio Cortês (editores), *Blue Planet Law: The Ecology of our Economic and Technological World*. Springer. Disponible en <https://tipg.link/lA01>.

- SQUEO, Francisco, Barry G. Warner, Ramón Aravena y Diana Espinoza (2006). «Bofedales: turberas de alta montaña de los Andes centrales». *Revista Chilena de Historia Natural*, 79 (2): 245-255. DOI: [10.4067/S0716-078X2006000200010](https://doi.org/10.4067/S0716-078X2006000200010).
- STUART-SMITH, Rupert, Aisha Saad, Friederike Otto, Gaia Lisi, Kristian Laut, Petra Minnerop y Thom Wetzer (2021). *Attribution science and litigation: facilitating effective legal arguments and strategies to manage climate change damages*. Oxford: Smith School of Enterprise and the Environment. Disponible en <https://tipg.link/1A07>.
- VALENZUELA MUJICA, Javiera (2023). *Principio de indemnidad en la reparación del daño ambiental a la biodiversidad: el aporte del Primer Tribunal Ambiental*. Memoria para optar al grado de Licenciado en Ciencias Jurídicas y Sociales de la Universidad de Chile. Disponible en <https://tipg.link/1A0A>.
- WERE, David, Frank Kansime, Tadesse Fetahi, Ashley Cooper y Charles Jjuuko (2019). «Carbon sequestration by wetlands: a critical review of enhancement measures for climate change mitigation». *Earth Systems and Environment*, 3: 327-340. DOI: [10.1007/s41748-019-00094-0](https://doi.org/10.1007/s41748-019-00094-0).

Sobre los autores

FERNANDA CARO BEVERIDGE es ingeniera agrónoma de la Pontificia Universidad Católica de Chile, mención en Ciencias Vegetales. Máster de investigación (MPhil) en Restauración Ecológica y doctora en Ecología de Semillas Nativas de la Universidad de Queensland. Investigadora de SMI-ICE-Chile, Universidad de Queensland. Su correo electrónico es f.caro@smiicechile.cl.  ID: 0000-0002-4891-4843.

EDMUNDO CLARO RODRÍGUEZ es ingeniero civil de Industrias, Pontificia Universidad Católica de Chile; MSc in Geography, King's College London; PhD in Land Economy, University of Cambridge. Investigador de SMI-ICE-Chile, Universidad de Queensland. Su correo electrónico es e.claro@smiicechile.cl.  ID: 0000-0002-2381-8775.

DANIELA GAMBOA ROSAS es licenciada en Ciencias Forestales de la Universidad de Chile y diplomada en Gestión Integrada de Humedales y Ordenamiento Territorial de la misma Universidad. Administradora de contratos e investigadora de SMI-ICE-Chile, Universidad de Queensland. Su correo electrónico es d.gamboa@smiicechile.cl.

DAVID RUBINOS GONZÁLEZ es farmacéutico de la Universidad de Santiago de Compostela, mención en Ecología. Doctor en Farmacia de la Universidad de Santiago de Compostela. Líder científico de SMI-ICE-Chile, Universidad de Queensland. Su correo electrónico es d.rubinos@smiicechile.cl.  ID: 0000-0002-0161-7745.

MARÍA PAZ VALENZUELA TORRONTGUEI es ingeniera agrónoma, magíster en Manejo de Suelos y Aguas de la Universidad de Chile. Investigadora de SMI-ICE-

Chile, Universidad de Queensland. Su correo electrónico es m.valenzuela@smiice-chile.cl.  0009-0009-6251-7797.

DILAN CAMPOS QUIROZ es geólogo de la Universidad de Concepción. Investigador de SMI-ICE-Chile, Universidad de Queensland. Su correo electrónico es d.campos@smiicechile.cl.  0009-0007-4879-9623.

PABLO BUSTOS FIGUEROA es ingeniero agrónomo de la Universidad de Chile. Magíster en Manejo de Suelos y Aguas de la Universidad de Chile. Investigador de SMI-ICE-Chile, Universidad de Queensland. Su correo electrónico es p.bustos@smiicechile.cl.

MARCELA CALDERÓN PARADA es ingeniera civil en Metalurgia Extractiva de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Investigadora de SMI-ICE- Chile, Universidad de Queensland. Su correo electrónico es m.calderon@smiicechile.cl.

JACQUES WIERTZ FRISQUE es ingeniero civil geólogo de la Université de Liège, Bélgica, y doctor en Ciencias Aplicadas de la misma Universidad. Investigador líder del SMI-ICE-Chile, Universidad de Queensland. Su correo electrónico es j.wiertz@smiicechile.cl.  0009-0001-5218-3860.