

OBSERVATORIO ECOSOCIAL PARA EL SEGUIMIENTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN ECOSISTEMAS DE ALTURA EN LA REGIÓN DE TARAPACÁ: PROPUESTAS, AVANCES Y PROYECCIONES*

ECO-SOCIAL OBSERVATORY FOR THE MONITORING OF CLIMATE CHANGE IN HIGH WETLANDS IN THE TARAPACÁ REGION: PROPOSALS, PROGRESS AND PROJECTIONS

*David Uribe Rivera***, *Carolina Vera Burgos***, *Maritza Paicho*** y *Guillermo Espinoza***

Los sistemas biológicos y sociales del altiplano están entre los más vulnerables al cambio climático. Sin embargo existe un pobre entendimiento acerca de cómo podrían ser impactados a escala regional. En este contexto, la necesidad de una aproximación multidisciplinaria surge como imperativa para investigar sus efectos. Se presenta aquí el diseño y la implementación del Observatorio Ecosocial para el Seguimiento del Cambio Climático en Ecosistemas de Altura en la Región de Tarapacá. Desde 2013, el Observatorio ha sido gradualmente implementado en cuatro humedales de altura: dos lagos salinos y vertientes asociadas (salar del Huasco: 20° 18' S-68° 50' W, 3800 msnm; laguna Lagunillas: 19° 56' S-68° 51' W, 4.100 msnm), una vega de altura (Copaquire: 20° 55' S-68° 53' W, 3.500 msnm), y un humedal de quebrada (Iquiuca-Parca: 20° 01' S-69° 13' W, 2.500 msnm). El Observatorio contempla el seguimiento de variables del medio físico, biológico y social, integrando diferentes fuentes de conocimiento desde las distintas ciencias. El esclarecimiento de los efectos del cambio climático a escala regional ayudará a generar mejores predicciones de sus potenciales efectos, confiriendo nuevas herramientas para el diseño de medidas de adaptación más efectivas frente a los estimados.

Palabras claves: Aproximación multidisciplinaria, altiplano, biodiversidad, cambio climático, indicadores, monitoreo, patrones de largo plazo, salar, vega de altura.

Biological and social systems from the Puna ecoregions are considered one of the most vulnerable to climate change. However there is poor understanding about the way that these systems would be impacted by future climatic change on a regional scale. In this context, the need of a multidisciplinary approach in the climate change effects assessment arises as imperative. The design and implementation of the Eco-social Observatory of Climate Change Effects for High Altitude Wetlands of Tarapacá Region is presented here. Since 2013, the Observatory has been gradually implemented by the Centro de Estudios de Humedales in four high altitude wetlands from northern Chile, including two salt lakes and associated springs (Salar del Huasco: 20° 18' S-68° 50' W, 3800 masl; and Laguna Lagunillas: 19° 56' S-68° 51' W, 4100 masl), one high altitude fertile plaine (Copaquire: 20° 55' S-68° 53' W, 3,500 masl), and one ravine wetland (Iquiuca-Parca: 20° 01' S-69° 13' W, 2,500 masl). The Observatory is monitoring variables of the physical, biotic and social components of the environment, integrating different sources of knowledge from natural and social sciences. The understanding of climate change effects on natural and social systems will help to generate better predictions of their effects, providing new tools to design more efficient adaptation strategies in face of future climate change.

Key words: Biodiversity, climate change, fertile plaine, indicators, long-term trends, monitoring, multidisciplinary approach, puna, salt lakes.

Introducción¹

Los humedales son “extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean estas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros” (Convención de Ramsar

1971). Estos ecosistemas son reconocidos por la sociedad desde tiempos remotos por su notable “subsido ambiental”, ya que aportan una amplia variedad de bienes y servicios ecosistémicos, entre los que destacan servicios de regulación (como la regulación del suministro de agua y del clima) y de provisión (como la provisión de alimentos y materias primas), además de albergar una gran diversidad biológica (Mitsch y Gosselink 2000). Gracias a

* Proyecto FONDECYT N° 1150701.

** Centro de Estudios del Desarrollo. Santiago, Chile. Correos electrónicos: de.uribe.r@gmail.com, cverabu@gmail.com, alejandra.ph@gmail.com y gespinoza@ced.cl

esta valiosa “subvención natural”, la mayor parte de los asentamientos humanos en el norte de Chile se han establecido desde decenas de miles de años en torno a los humedales, los que les confieren el sustento necesario (Núñez *et al.* 2002). A pesar de su relevante valor como patrimonio natural, los humedales son probablemente los ecosistemas más amenazados y menos protegidos a nivel mundial (Zedler y Kercher 2005).

Cambio climático: vulnerabilidad de los humedales de altura en Tarapacá

El cambio climático es considerado una problemática global, pero con consecuencias a escala global, regional y local. Sus efectos recaerán no solo sobre el medio físico, sino también sobre la biodiversidad pudiendo provocar pérdidas de diversidad y funcionalidad biológica; por consiguiente, irremediablemente tendrán consecuencias en el bienestar humano (Scheffers *et al.* 2016).

Se espera que los efectos del cambio climático sean más intensos a bajas latitudes (Deutsch *et al.* 2008, Feeley y Silman 2010), y altas altitudes (Vuille *et al.* 2008, McCain 2009). Lo anterior, sumado a la alta vulnerabilidad dada por su posición hidrológica (ubicados generalmente en zonas bajas de las cuencas), convierte a los humedales del altiplano en uno de los ecosistemas más vulnerables al cambio climático a nivel mundial (Larsen *et al.* 2011), y por tanto prioritarios a la hora de destinar recursos para su conservación.

Potenciales efectos del cambio climático sobre humedales

El cambio climático podría modificar principalmente las condiciones físicas del ambiente, desequilibrando los ciclos del agua y biogeoquímicos, donde la magnitud de la amenaza y sus impactos a nivel regional y local son variables en el espacio y el tiempo (Erwin 2009).

Los aumentos de temperatura superficial del planeta provocarán un ciclo hidrológico más vigoroso, con cambios regionales en las tasas de precipitación y evapotranspiración. Estos cambios, a su vez, se espera alteren la disponibilidad de aguas superficiales y subterráneas, y por tanto el régimen de recarga de estos ecosistemas (Middelkoop *et al.* 2001, Klove *et al.* 2014).

Se espera además una disminución de carbono orgánico disuelto a causa del calentamiento climático; la acidificación causaría una mayor penetración de la radiación ultravioleta en el ambiente, interfiriendo principalmente en los organismos que habitan aguas superficiales (Schindler 2001). La disminución de la renovación de aguas aumentará la eutrofización e intensificará muchos de los procesos biogeoquímicos. El enriquecimiento de carbono y otros nutrientes aumentará su ciclación y con esto la productividad primaria, modulando también el intercambio de carbono suelo-atmósfera (Trettin *et al.* 2006). Finalmente la disminución en la recarga del acuífero permitirá la entrada de oxígeno a suelos previamente anegados, favoreciendo la descomposición aeróbica de la materia orgánica acumulada en ellos, aumentando la emisión de gases de efecto invernadero, como el CH₄, el N₂O y CO₂ e incidiendo en un desbalance de carbono de los ecosistemas (e.g. Wolf *et al.* 2007, Ellis *et al.* 2009, van Groenigen *et al.* 2011). En consecuencia, la función que cumplen hoy los humedales como sumideros de carbono es muy probable que cambie como consecuencia del cambio climático (Wrona *et al.* 2006).

Tendencias actuales y futuras en el clima de la Región

Para el norte de Chile se proyectan tendencias claras hacia un aumento de las temperaturas (entre 1,5-2 °C para 2046-2065; IPCC-AR5 WG1, escenario RCP4.5, 2013); sin embargo, estos cambios podrían no ser homogéneos en el espacio. Tendencias recientes (1980-2010) indican que para el altiplano el aumento es más marcado en las temperaturas, aunque para zonas costeras incluso se han observado disminuciones en ellas (Vuille *et al.* 2015). Por el contrario, para las precipitaciones las reconstrucciones generadas mediante anillos de crecimiento de la queñoa (*Polylepis tarapacana*) indican que los últimos treinta años presentan una tendencia sostenida hacia la disminución, llegando a los menores niveles en los últimos 700 años (Morales *et al.* 2012). Por su parte, las tendencias proyectadas por modelos globales no son tan claras en cuanto a cambios en la precipitación total anual respecto de los valores actuales (cambios no significativos para 2046-2065; IPCC-AR5 WG1, escenario RCP4.5, 2013), aunque con modelos en mayor detalle surgen

tendencias hacia la baja en las precipitaciones incluso en los escenarios más conservadores de cambio climático (i.e. escenario RCP2.6; Neukom *et al.* 2015). Además de los cambios en precipitaciones totales anuales, existe una tendencia hacia su concentración dentro del año (menos días de lluvias pero más intensas; Ortega *et al.* 2016). Esto último podría aumentar el riesgo de aluviones y afectar la dinámica de sucesión ecológica de los humedales de la región.

Cómo esclarecer los efectos del cambio climático

La manera más apropiada de estudiar los efectos que tendrán estos cambios y describir los mecanismos que subyacen a dichos efectos es llevar a cabo programas de monitoreo continuo y sistemático de indicadores de sus potenciales implicancias (Everard 2008). Estas observaciones resultan esenciales para detectar patrones de largo plazo, y ayudar al diseño de prácticas de manejo para la mitigación y adaptación al cambio climático (Conly y van der Kamp 2001).

La gran incerteza de cuáles serán los efectos del cambio climático en el altiplano de los Andes centrales se debe principalmente a la escasez de observaciones que permitan describirlos (i.e. monitoreo de la respuesta de los humedales a variaciones en el clima). Estas observaciones permitirían identificar los mecanismos por los que se manifiesta, y modelarlos matemáticamente para predecir sus efectos frente a escenarios futuros de cambio climático (Scheffers *et al.* 2016). Estas predicciones a su vez permitirían diseñar medidas de mitigación y adaptación a dichos efectos, e informar a la toma de decisiones para su correcta planificación y gestión. Sin embargo y a pesar de su relevancia, son aún insuficientes los estudios de largo plazo en Chile.

El desafío de incorporar el cambio climático en la planificación regional

Los factores más relevantes que influyen en la percepción del cambio climático y sus potenciales implicancias son: i) el conocimiento y la disponibilidad de información respecto de sus efectos a nivel local; y ii) la existencia de otros agentes de amenaza, cuyas relaciones de causa-efecto en los ecosistemas resulten más evidentes que aquellas derivadas del cambio climático (Erwin 2009). Estudios recientes

indican que en la Región de Tarapacá las percepciones acerca del cambio climático responden justamente a estos factores, influenciando la consideración (o desconsideración) del cambio climático en instrumentos de planificación regional.

La falta de reconocimiento regional del fenómeno global ha imposibilitado que se diferencien los cambios de largo plazo del cambio climático y de la variabilidad climática natural de la región². Esta imprecisión ha contribuido a que efectos del cambio climático sean confundidos, estén sobrepuestos o no puedan ser atribuidos de manera causal a este fenómeno. Como consecuencia, solo 4% de una muestra de los actores clave de la Región (i.e. académicos, aymaras, empleados de servicios públicos competentes y del rubro minero) consideran al cambio climático como una amenaza relevante para la conservación de los humedales de la Región de Tarapacá (Silva 2014). Otro estudio similar encontró que el 70% de otra muestra de actores clave considera que la Región de Tarapacá no tiene ningún desafío frente al cambio climático, debido principalmente a la gran incerteza de las proyecciones (tanto del fenómeno mismo como de sus potenciales efectos), o bien a que sus implicancias resultan poco claras frente a otras amenazas más evidentes (como es el caso del aumento de la presión sobre el recurso hídrico; Castillo 2015). Más aún, el mismo estudio señala que entre los que sí consideraron al cambio climático como amenaza, la mayor parte coincide en que uno de los principales desafíos es la determinación de sus efectos. Todo esto refleja un desconocimiento al respecto, sugiriendo que no existe la evidencia suficiente para que quienes manejan los recursos naturales de la región consideren al cambio climático como una amenaza, ignorando la posibilidad de generar planes de manejo que contemplen el dinamismo y la incerteza de los escenarios climáticos futuros.

El observatorio

En este contexto, se está llevando a cabo el primer monitoreo sistemático en el norte de Chile, con foco en los efectos del cambio climático respecto del medio físico, biológico y social. El objetivo es esclarecer cómo los humedales responderán a estos efectos y sus potenciales consecuencias en el bienestar humano. Los objetivos específicos son: i) analizar el comportamiento del clima a escala local

en humedales de altura de la Región de Tarapacá, ii) aplicar indicadores biológicos para el seguimiento de los efectos del cambio climático sobre la biodiversidad de estos ecosistemas, y iii) incorporar la percepción de actores clave de la comunidad local de la Región en estos procesos y las consecuencias en su calidad de vida.

Diseño e implementación del observatorio

Desde 2013, el observatorio ha sido implementado gradualmente en cuatro humedales de altura del norte de Chile. En primer lugar, y para coleccionar la información necesaria para la selección de los humedales y de las variables a monitorear, se llevó a cabo entre 2011 y 2013 un inventario de humedales, un sistema integral de información geográfica relevante, un inventario de las estaciones meteorológicas de la Región de Tarapacá, y un estudio de las cuencas más adecuadas para la investigación del cambio climático en la Región. A partir de esta información se seleccionaron cuatro humedales para las mediciones: los salares del Huasco y Lagunillas (salar del Huasco: $20^{\circ} 18' S-68^{\circ} 50' W$, 3.800 msnm; salar de Lagunillas: $19^{\circ} 56' S-68^{\circ} 51' W$, 4.100 msnm), una vega de altura en Copaquire ($20^{\circ} 55' S-68^{\circ} 53' W$, 3.500 msnm), y un humedal de quebrada en

Iquiuca-Parca ($20^{\circ} 01' S-69^{\circ} 13' W$, 2.500 msnm; ver Figura 1).

En estos cuatro humedales se miden diversas variables del medio físico (climáticas y de calidad de agua) y biológico (indicadores de cambio climático); se incluye la instalación de estaciones meteorológicas en o cercanas a cada uno de ellos (Tabla 1). Además, actualmente se trabaja en describir y monitorear la percepción de las comunidades locales acerca del cambio climático. Las metodologías aplicadas en las variables que ya se han implementado, así como también la propuesta metodológica para variables que serán incorporadas se detallan en el Anexo 1.

Componente abiótico

Se han instalado cuatro estaciones meteorológicas completas, una en cada sitio de estudio. Además y teniendo en cuenta que gran parte de las cuencas hidrográficas de la Puna son cerradas, terminando en un cuerpo de agua conformado por una laguna salobre de evaporación (Risacher *et al.* 2003), se ha instalado un evaporímetro en las cercanías de la laguna salobre del salar del Huasco. También se han identificado variables de calidad como claves para el estudio de sistemas de agua dulce, teniendo

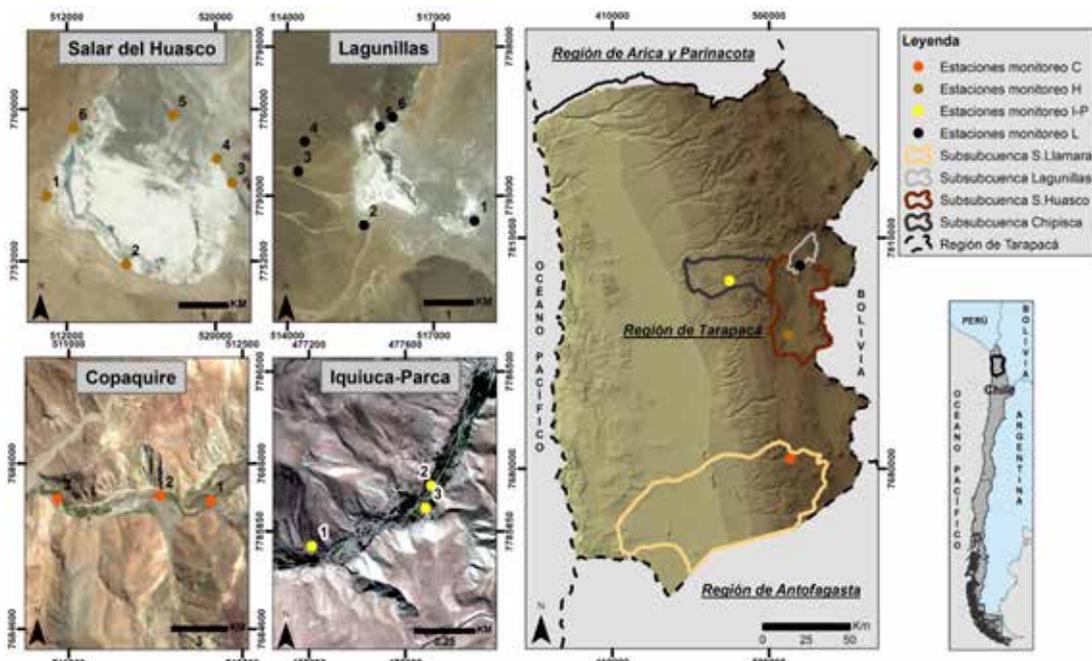


Figura 1. Mapa de los sitios de estudio seleccionados para el observatorio.

su variabilidad grandes consecuencias en la ecología de estos sistemas (Donald *et al.* 1999). Por esta razón es que el observatorio ha implementado un seguimiento bianual de las condiciones físico-químicas del agua.

Biodiversidad

La integridad de los humedales y por tanto los bienes y servicios que ellos puedan aportar al bienestar de las comunidades, depende considerablemente de la composición, estructura y funcionalidad de la biodiversidad propia de estos ecosistemas. Es por esto que en 2012, a partir de una completa revisión del estado del conocimiento del rol de los humedales en el cambio climático a nivel mundial (Centro de Estudios del Desarrollo y Centro de Estudios de Humedales 2012), se han seleccionado varios componentes de la biodiversidad, según los criterios definidos por Everard (2008), los que se detallan en la Tabla 1.

Componente social

La elaboración y validación de un instrumento que describa y caracterice la percepción local respecto del cambio climático permitirá reconocer la perspectiva de actores sociales e incluirla de manera activa, dinámica y contextual para conferirle al observatorio una visión integradora de las consecuencias del cambio climático y de cómo abordarlas (Alexander *et al.* 2011). La componente social del observatorio busca responder a las siguientes interrogantes: i) ¿Cómo percibe la comunidad local la variabilidad

en el clima y los cambios que ha presentado en el largo plazo (i.e. distinguiendo variabilidad climática del cambio climático)? ii) ¿Percibe la comunidad local una respuesta en los ecosistemas y en las especies de fauna y flora frente al cambio climático? y 3) ¿Percibe la comunidad local efectos de la variabilidad climática en su bienestar?

La aproximación metodológica es una modificación de la llevada a cabo por Chaudhary y Bawa (2011), y se describe en el Anexo 1.

Resultados a la fecha

Componente abiótico

a) Meteorología

Hasta la fecha se encuentran activas cuatro estaciones meteorológicas (salar del Huasco, Lagunillas, Copaquire y Alto Noasa), las que han sido implementadas a contar de junio de 2013. Ellas están registrando las variables temperatura del aire, humedad relativa del aire, velocidad del viento, velocidad de las ráfagas de viento, dirección del viento, radiación solar y precipitación cada 15 minutos. Las fluctuaciones en la temperatura media del aire y la precipitación mensual se muestran en la Figura 2.

b) Condiciones físicoquímicas del agua

Actualmente se han establecido 16 estaciones fijas de monitoreo limnológico (monitoreo de

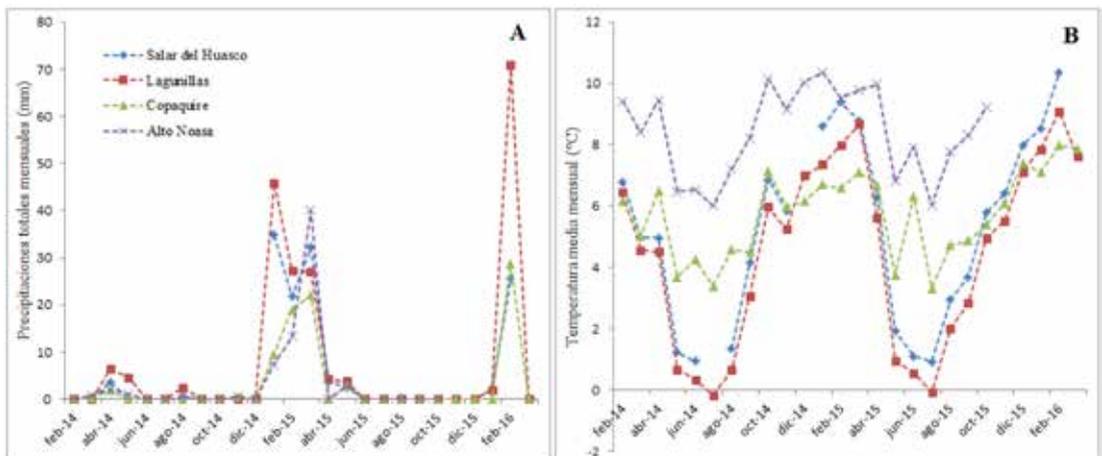


Figura 2. Fluctuaciones en la precipitación total mensual (A) y en la media mensual de las temperaturas medias diarias (B) entre febrero 2014 y febrero 2016 registradas en las cuatro estaciones meteorológicas que forman parte del observatorio.

Tabla 1. Variables, metodologías, localidades, periodicidad y fecha de implementación de cada uno de los indicadores para el seguimiento del cambio climático incorporados en el Observatorio.

Componente	Indicadores monitoreados	Variables medidas	Metodología	Localidad	Periodicidad	Fecha de comienzo
Abiótico	Físico-química del agua	pH, potencial de óxido-reducción, conductividad, sólidos totales disueltos, salinidad, resistividad, oxígeno disuelto, temperatura	medición <i>in situ</i> sensor multi-parámetro Sanxin® Modelo L0160675	curso de agua (Huasco, Lagunillas, Iquiuca-Parca y Copaquire) y lagunas salobres (Huasco y Lagunillas)	semestral	Mayo 2013
	Meteorología	Temperatura, Humedad relativa, Velocidad viento, Dirección del viento, Radiación solar, Precipitación, Evaporación	Estaciones meteorológicas	Huasco, Lagunillas, Iquiuca-Parca y Copaquire	cada 15 minutos	Junio 2013
Biodiversidad	Micromamíferos	densidades poblacionales	captura-recaptura en grillas	Huasco, Lagunillas, Iquiuca-Parca y Copaquire	semestral	Mayo 2013
	Avifauna acuática	abundancia total	censo estaciones no fijas	Huasco y Lagunillas	semestral	Mayo 2013
	Zooplancton	densidades poblacionales	tamizado en estaciones fijas	Lagunillas, Iquiuca-Parca y Copaquire) y lagunas salobres (Huasco y Lagunillas)	semestral	Mayo 2013
	Fitoplancton	densidades poblacionales	concentración en cámaras de sedimentación	curso de agua (Huasco, Lagunillas, Iquiuca-Parca y Copaquire) y lagunas salobres (Huasco y Lagunillas)	semestral	Mayo 2013
Social	Banco de semillas	densidad de semillas en el suelo	5 muestras por cada parcela de micromamíferos	Huasco, Lagunillas, Iquiuca-Parca y Copaquire	semestral	Mayo 2013
	Fenología de floración	producción de flores por individuo	observación directa	Huasco, Lagunillas, Iquiuca-Parca y Copaquire	cada 15 días (octubre-abril)	Octubre 2014
	Percepción de la comunidad local sobre cambio climático	percepción sobre el cambio climático <i>per se</i> ; percepción de sus efectos sobre la biodiversidad; percepción de sus efectos en el bienestar propio	Encuestas cuantitativas y talleres participativos	Cobertura regional	Cada 5 años	En proceso de implementación

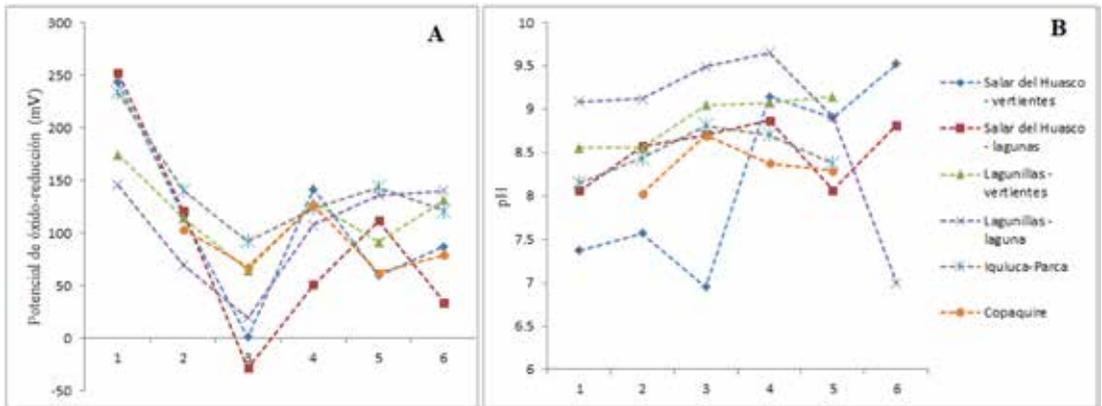


Figura 3. Fluctuaciones en el pH (A) y en el potencial de óxido-reducción (B) durante las seis primeras campañas del observatorio, separadas por tipo de ambiente.

calidad de agua, zooplancton y fitoplancton; ver Anexo 1 para su localización exacta). El seguimiento de la calidad del agua contempla mediciones *in situ* de las siguientes variables: pH, potencial de óxido-reducción, conductividad, sólidos totales disueltos, salinidad, resistividad, oxígeno disuelto y temperatura del agua. En la Figura 3 se muestran las fluctuaciones de las dos variables más relevantes para el monitoreo de calidad de agua: pH y potencial de óxido-reducción (Langmuir 1997), durante las seis primeras campañas del Observatorio.

Biodiversidad

a) Micromamíferos

En las primeras seis campañas del observatorio se han realizado 985 capturas de micromamíferos, correspondientes a 412 individuos distintos, de por lo menos 10 especies nativas (*Abrocoma cinerea*, *Abrothrix andinus*, *Abrothrix* sp., *Akodon albiventer*, *Auliscomys sublimis*, *Ctenomys opimus*, *Eligmodontia puerulus*, *Phyllotis limatus*, *Phyllotis magister*,

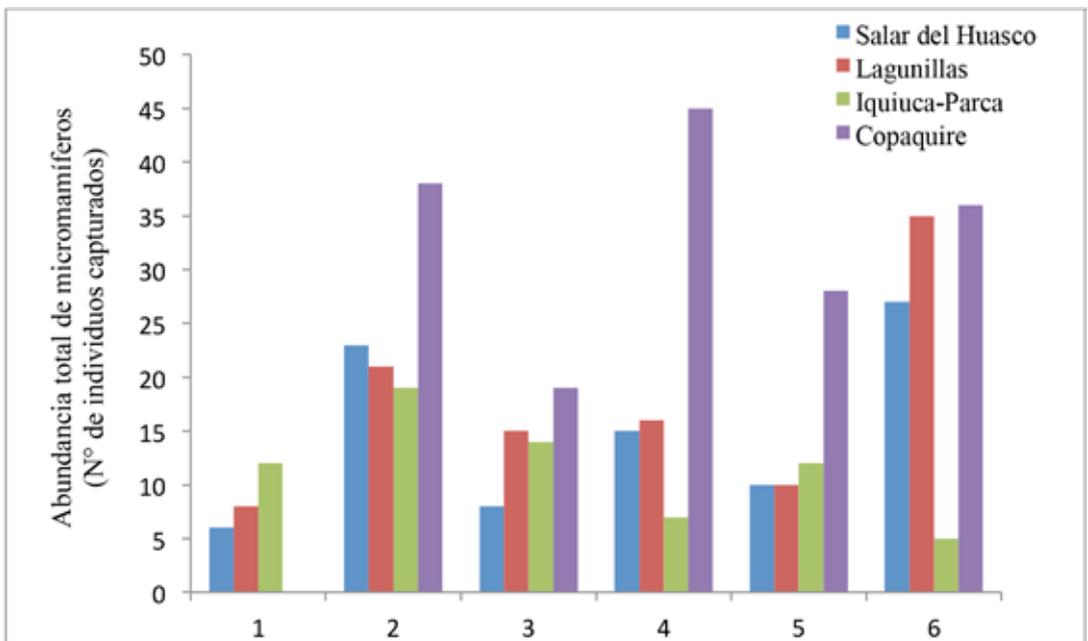


Figura 4. Fluctuaciones en la abundancia de micromamíferos durante las seis primeras campañas del observatorio en cada humedal monitoreado. El humedal de Copequire comenzó a ser monitoreado desde la segunda campaña.

Phyllotis xanthopygus, *Thylamys pallidior*) y una exótica (*Mus musculus*) obtenida frecuentemente en el sector de Iquiuca-Parca. La mayor abundancia se observa en la estación de otoño, la que acumula el 71% de los individuos capturados. Las oscilaciones en la cantidad total de individuos capturados para los cuatro humedales se muestran en la Figura 4.

b) *Aves acuáticas*

Las aves acuáticas, en particular aquellas más fáciles de detectar (como las tres especies de flamencos), se espera respondan rápidamente a los cambios en el clima, ya que dependen notablemente de las dinámicas de recarga del humedal y de las dinámicas de sus presas. En este caso se estima la transmisión de los efectos del cambio climático mediante la red trófica (e.g. efectos *bottom-up*: clima→fitoplancton→zooplancton→flamencos; o efectos *top-down*: clima→flamencos→zooplancton→fitoplancton; Gilman *et al.* 2010, Frau *et al.* 2015).

En las primeras seis campañas del observatorio se han contabilizado 14.200 individuos de aves acuáticas, correspondientes a 25 especies nativas (Tabla 2). Al igual que con los micromamíferos, las aves acuáticas presentan una marcada estacionalidad en su abundancia en las lagunas salobres del Huasco y Lagunillas, siendo los flamencos más abundantes a finales de la primavera que en otoño (11.072 individuos en 3 campañas de finales de la primavera contra 2.374 individuos en 3 campañas de otoño, sumando las 3 especies); el resto de las especies son más abundantes en otoño que en primavera (505 individuos totales de 23 especies en otoño y 249 en primavera; Tabla 2). Sin embargo y a diferencia de los micromamíferos, las oscilaciones (sean estacionales o interanuales) de estas aves no necesariamente reflejan procesos demográficos, ya que su capacidad de moverse de un humedal a otro les permitiría responder a cambios en las condiciones físicas del ambiente, o a cambios en la disponibilidad de alimentos mediante su desplazamiento (Derlindati *et al.* 2014). Las oscilaciones en la abundancia de flamencos y en la riqueza de especies acuáticas detectadas en las seis campañas se muestran en la Figura 5.

c) *Zooplancton*

Hasta la fecha se han observado 18 taxa en total para las 16 estaciones fijas de monitoreo limnológico. Los ambientes con mayor riqueza de taxa

son las vertientes y la laguna salobre de Lagunillas con 18 y 15 taxa identificados en las seis campañas, mientras que el ambiente con menor riqueza de especies fue el humedal en Iquiuca-Parca con tan solo seis taxa. Las mayores densidades poblacionales se encontraron en las vertientes del salar del Huasco y la vega de Copaquire, mientras que la menor abundancia se obtuvo en Iquiuca-Parca. Las oscilaciones entre campañas en las densidades poblacionales y en la riqueza de especies para cada ambiente se muestran en la Figura 6.

d) *Fitoplancton*

Se han registrado a la fecha 58 taxa entre las seis campañas y las 16 estaciones fijas de monitoreo limnológico. Los ambientes con mayor riqueza de taxa fitoplanctónica son las vertientes del salar del Huasco y Copaquire con 35 y 34 taxa identificados en las seis campañas, respectivamente, mientras que el ambiente con menor riqueza fue la laguna Lagunillas con 24 taxa identificados. Los ambientes con mayores densidades poblacionales fueron las vertientes de la laguna Lagunillas y la vega de Copaquire, mientras que el que presenta menor abundancia fue la laguna Lagunillas. Las fluctuaciones entre campañas en las densidades poblacionales y en la riqueza de especies para cada ambiente se muestran en la Figura 7.

e) *Banco de semillas*

Se ha reportado que la producción de semillas está estrechamente relacionada a factores climáticos, respondiendo principalmente a la precipitación y temperatura del año previo (LaBastide y Vredenburg 1970). Además, tal dependencia se podría transmitir mediante la cadena trófica, especialmente a los consumidores de semillas (e.g. micromamíferos; Previtali *et al.* 2009). Por estas razones el observatorio ha incorporado el monitoreo de la disponibilidad de semillas en el suelo superficial, acoplado al monitoreo de micromamíferos. Las fluctuaciones observadas en la riqueza de taxa identificados y en la abundancia total de semillas en el suelo se muestran en la Figura 8.

f) *Fenología de plantas vasculares*

Las plantas están estrechamente sincronizadas con los ciclos naturales de su entorno, particularmente

Tabla 2. Total de individuos contabilizados en las seis primeras campañas del observatorio. Se muestran las sumas de las tres campañas de primavera y las tres de otoño, separadas por humedal (SH = salar del Huasco; LL = laguna Lagunillas) y por especie.

Nombre común	Nombre científico	Primavera		Otoño	
		SH	LL	SH	LL
Flamenco chileno	<i>Phoenicopterus chilensis</i>	47	0	169	27
Flamenco andino	<i>Phoenicoparrus andinus</i>	439	6	2214	154
Flamenco de James	<i>Phoenicoparrus jamesi</i>	1838	4	7242	1049
Flamencos indeterminados		0	0	37	0
Juveniles indeterminados		39	1	0	180
Pimpollo	<i>Rollandia rolland</i>	0	0	0	0
Blanquillo	<i>Podiceps occipitalis</i>	0	1	0	0
Cuervo de pantano de la puna	<i>Plegadis ridgwayi</i>	26	27	12	0
Huairavo	<i>Nycticorax nycticorax</i>	0	0	0	0
Garza boyera	<i>Bubulcus ibis</i>	0	0	0	0
Garza azul	<i>Egretta caerulea</i>	0	0	0	0
Guallata	<i>Chloephaga melanoptera</i>	39	9	97	6
Pato juarjual	<i>Lophonetta specularioides</i>	38	39	11	11
Pato jergón chico	<i>Anas flavirostris</i>	17	61	4	22
Pato jergón grande	<i>Anas georgica</i>	18	0	0	3
Pato puna	<i>Anas puna</i>	6	65	0	0
Pato gargantillo	<i>Anas bahamensis</i>	2	0	0	0
Pato colorado	<i>Anas cyanoptera</i>	0	0	0	0
Tagüita purpúrea	<i>Porphyrio martinicus</i>	0	0	0	0
Tagüita del norte	<i>Gallinula chloropus</i>	0	0	0	0
Tagua andina	<i>Fulica ardesiaca</i>	4	0	0	0
Tagua chica	<i>Fulica leucoptera</i>	0	0	0	0
Tagua gigante	<i>Fulica gigantea</i>	0	0	0	0
Tagua cornuda	<i>Fulica cornuta</i>	0	0	0	0
Queltehue de la puna	<i>Vanellus resplendens</i>	0	0	0	0
Chorlo dorado	<i>Pluvialis dominica</i>	0	0	0	0
Chorlo de la puna	<i>Charadrius alticola</i>	2	15	0	3
Chorlo de campo	<i>Oreopholus ruficollis</i>	0	1	0	2
Chorlito cordillerano	<i>Phegornis mitchellii</i>	0	0	0	0
Caití	<i>Recurvirostra andina</i>	43	6	14	5
Pitotoy grande	<i>Tringa melanoptera</i>	9	0	0	0
Pitotoy chico	<i>Tringa flavipes</i>	2	0	0	0
Playero grande	<i>Catoptrophorus semipalmatus</i>	0	0	0	0
Playero de Baird	<i>Calidris bairdii</i>	39	0	7	15
Playero pectoral	<i>Calidris melanotos</i>	11	0	2	0
Playero de patas largas	<i>Calidris himantopus</i>	0	0	0	0
Becacina de la puna	<i>Gallinago andina</i>	0	0	0	0
Pollito de mar tricolor	<i>Steganopus tricolor</i>	0	0	0	1
Perdicita cordillerana	<i>Attagis gayi</i>	0	0	0	0
Perdicita cojón	<i>Thinocorus orbignyianus</i>	0	4	0	0
Perdicita	<i>Thinocorus rumicivorus</i>	0	0	0	0
Gaviota andina	<i>Larus serranus</i>	18	0	19	0
Cormoran yeco	<i>Phalacrocorax brasilianus</i>	0	0	0	0
Churrete acanelado	<i>Cinclodes fuscus</i>	1	0	0	0
Churrete alas blancas	<i>Cinclodes atacamensis</i>	0	0	1	0
Colegial del norte	<i>Lessonia oreas</i>	1	1	13	1

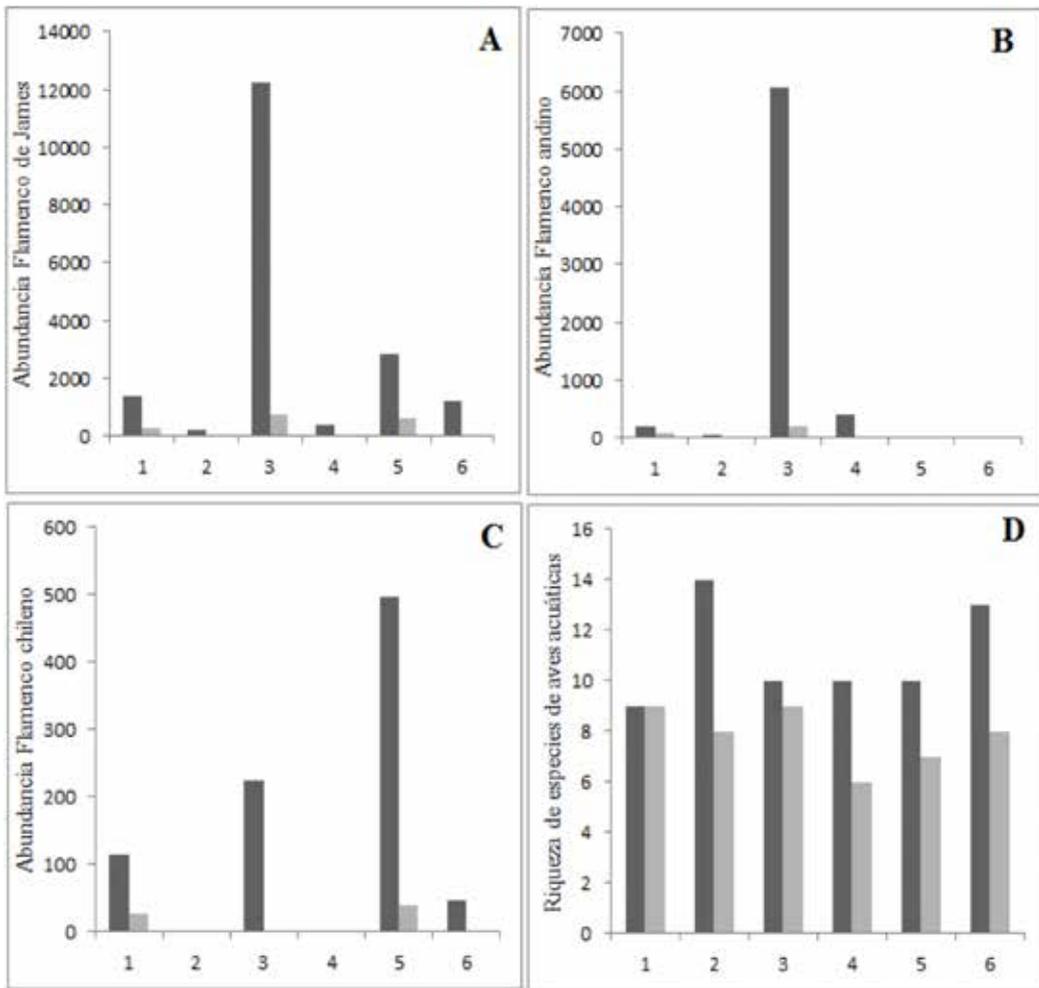


Figura 5. Fluctuaciones en la abundancia de las tres especies de flamencos (A: flamento de James, B: flamenco andino, C: flamenco chileno) y en la riqueza de especies de aves acuáticas (D) en las seis primeras campañas del observatorio. En gris oscuro los datos correspondientes al salar del Huasco y en gris claro los de la laguna Lagunillas.

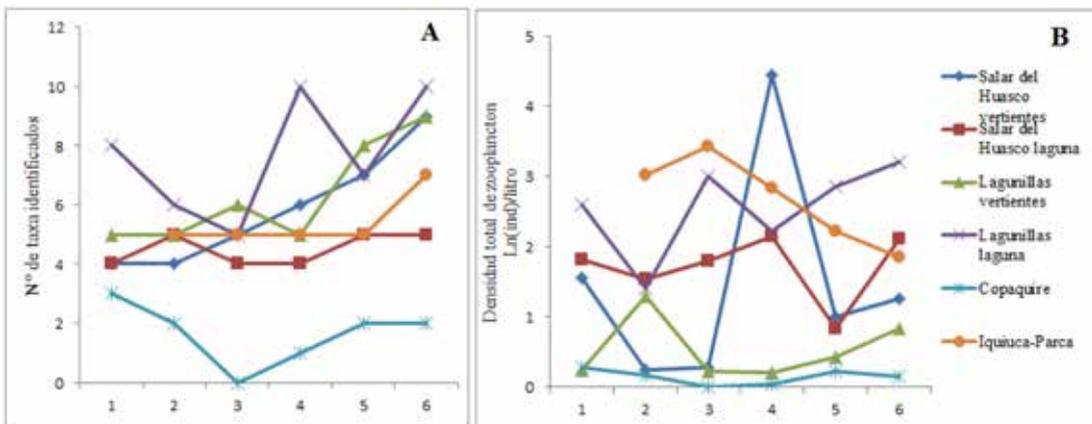


Figura 6. Fluctuaciones en la riqueza y abundancia de zooplancton (expresadas como A: N° de taxa identificados, y B: Densidad total de zooplancton, respectivamente) durante las seis primeras campañas del observatorio, separadas por tipo de ambiente.

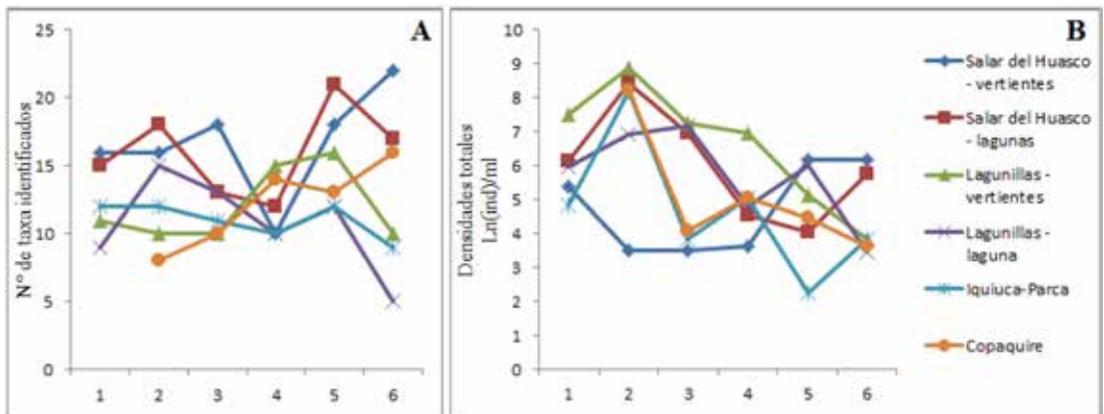


Figura 7. Fluctuaciones en la riqueza y abundancia de fitoplancton (expresadas como A: N° de taxa identificados, y B: Densidad total de fitoplancton, respectivamente) durante las seis primeras campañas del Observatorio, separadas por tipo de ambiente.

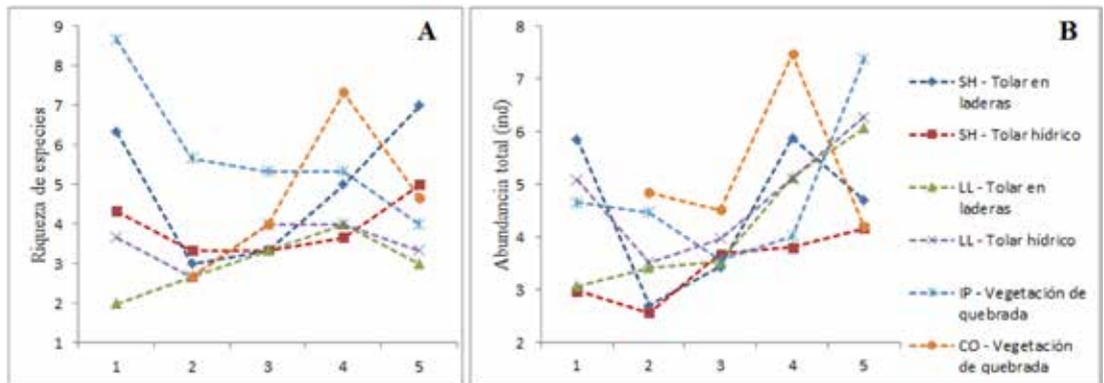


Figura 8. Fluctuaciones en la riqueza (A) y abundancia total (B) de las semillas en el suelo superficial durante las cinco primeras campañas del Observatorio, separadas por tipo de ambiente.

la temporalidad de la actividad de las plantas (es decir, la fenología) está estrechamente relacionada a variables climáticas. Las relaciones entre fenología y clima constituyen una de las pruebas más convincentes de que las especies y los ecosistemas están siendo influenciados por el cambio global (Cleland *et al.* 2007). Además de evaluar la disponibilidad de semillas en el suelo, se monitorea la temporalidad de la floración en individuos de plantas vasculares representativas de los ambientes monitoreados. Los resultados de los primeros dos años (temporadas octubre 2014 - marzo 2015 y octubre 2015 - marzo 2016) muestran comportamientos diferenciales en la temporalidad de floración de una misma especie en distintos ambientes (Figura 9), así como también distintas temporalidades entre distintas especies dentro de un mismo ambiente (como es el caso de la fenología de *Morella* y *Escallonia* en el humedal

de Iquica-Parca; Figura 10). Hasta el momento se puede observar una potencial sincronía entre la temporalidad de la floración y la temperatura ambiente del año anterior; sin embargo, son necesarias más temporadas de monitoreo para una evaluación mediante un análisis estadístico.

Componente social

El Observatorio está diseñando un instrumento acorde con el resto de las mediciones que permita monitorear las percepciones de la comunidad local acerca del cambio climático y sus efectos. Actualmente se está llevando a cabo una revisión sistemática de la literatura científico-técnica acerca de aspectos sociales del cambio climático, en particular de sus potenciales efectos en el bienestar humano, con el objetivo de aclarar el marco conceptual

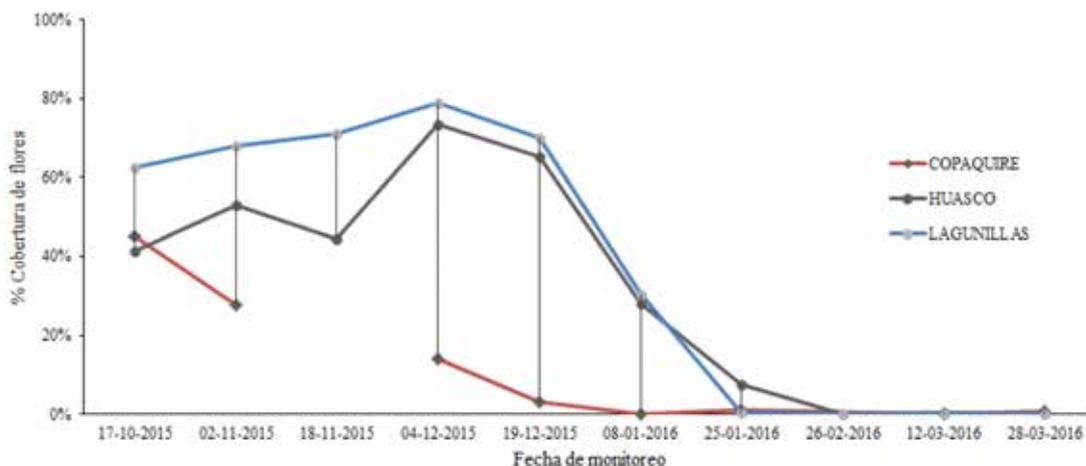


Figura 9. Fenología de floración de *Parastrephia lucida* en los tres humedales en que está presente, durante el periodo octubre 2015 a marzo 2016.

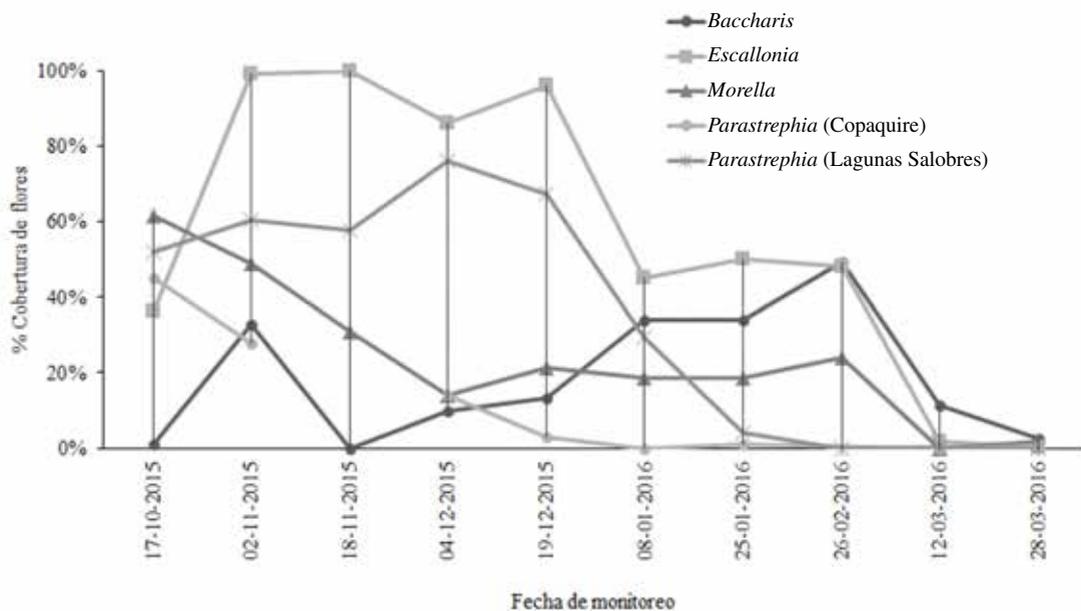


Figura 10. Fenología de floración de las distintas especies monitoreadas.

y generar hipótesis respecto de percepciones de cambio climático. Esto constituye la primera de cinco etapas para el diseño y perfeccionamiento del instrumento (ver Anexo 1).

A pesar de las etapas tempranas en la implementación del componente social, ya se tienen algunos resultados preliminares acerca de las percepciones de comunidades locales acerca del cambio climático y sus efectos en la Región de Tarapacá. En

noviembre de 2015 se llevó a cabo un taller guiado con integrantes de la comunidad local de origen aymara, estando constituido por un rango etario de entre 55 y 75 años. La comunidad aymara es la etnia con mayor presencia en la Región de Tarapacá, y su cultura está estrechamente relacionada a los ciclos naturales (Van Kessel 1989). Los objetivos fueron: i) definir qué consideran los aymaras por cambio climático y por variabilidad climática,

ii) describir los cambios percibidos en el clima durante las últimas décadas, iii) describir las señales que según el conocimiento aymara son predictoras del comportamiento anual del sistema climático, y iv) identificar cuáles son las consecuencias del cambio climático percibidos por esta etnia.

Los aymaras de la Región de Tarapacá entienden por cambio climático al “conjunto de cambios bruscos e impredecibles que ocurren en la naturaleza desde hace años”. Los participantes coinciden en que las estaciones del año y su duración han cambiado, que ahora los factores meteorológicos y atmosféricos (la lluvia, el viento, la nieve, el sol, el frío) son más extremos y bruscos, existiendo una percepción de mayor desorden e imprevisibilidad en el clima. Esta percepción de cambio es descrita desde la década del 60, agudizándose paulatinamente en las siguientes décadas hasta la actualidad, resaltando años de sequía prolongada desde el 2008. Entre los hitos recordados resalta un aumento de los vientos de gran intensidad que arrastran material particulado desde la pampa hacia valles cordilleranos a contar de las décadas del 70 y 80, un aumento de las lluvias intensas e impredecibles durante las décadas del 80 y 90, una disminución progresiva en las lluvias en valles precordilleranos y de la vertiente oeste de los Andes (2500-3700 msnm), y el acortamiento de la época de lluvias en el altiplano de Tarapacá. Sin embargo, no es posible establecer un discernimiento entre variabilidad climática y cambio climático.

Entre los potenciales predictores del comportamiento climático anual destacan: i) años con escasas tormentas eléctricas son indicadores de lluvias estivales homogéneas (y por tanto buen forraje para el ganado), ii) comportamiento de excavación intensa en el ratón tuco-tuco indica año seco, iii) vizcachas engordando indican año seco, mientras que su comportamiento de excavación y refriega indican año lluvioso, iv) la parición de las llamas adelantada a las alpacas indica que viene un año seco, v) brotes abundantes de muña-muña (*Satureja parvifolia*) indican año lluvioso.

Debido a la considerable dependencia de la etnia aymara con los ciclos naturales, en particular con la estacionalidad y la variabilidad interanual de las precipitaciones como agentes reguladores de la disponibilidad de forraje para el ganado, las principales consecuencias mencionadas a partir de los cambios observados son la pérdida de la capacidad predictiva del comportamiento climático del año y

sus patrones de precipitación. Esto, sumado a otros procesos demográficos, sociales y económicos, podría estar incidiendo en la emigración de esta etnia hacia áreas urbanas ya experimentada desde la década de los 60.

Desafíos y oportunidades

Actualmente el observatorio se encuentra en una fase de adaptación hacia la validación de los indicadores monitoreados y a la incorporación del medio social. El objetivo es abordar no solo los efectos de los sistemas naturales (es decir, en la biodiversidad), sino además describir las consecuencias que tendrían dichos cambios en relación con los sistemas sociales.

La oportunidad de aportar a la conservación de estos ecosistemas mediante el estudio de los efectos del cambio climático responde a dos de los principales desafíos que los actores clave de la Región de Tarapacá han identificado para abordar el cambio climático: i) esclarecer de forma científica los efectos del cambio climático, y ii) el diseño de instrumentos de adaptación (Castillo 2015). Esta labor se constituye como un desafío, ya que al igual que otros estudios de largo plazo, la mayor parte de las fuentes de financiamiento concursables son diseñadas para estudios de no más de un par de años, condicionando la obtención de resultados a la continuidad del financiamiento.

El observatorio ya está generando importantes observaciones respecto del comportamiento del clima y de la singular biota de la región, y con el tiempo se espera: i) generar la información necesaria para sustentar la toma de decisiones de manejo de los humedales de altura de la puna chilena en un contexto de cambio climático, ii) promover la transferencia del conocimiento científico-técnico hacia instrumentos de manejo y política ambiental, y iii) diseñar y promover la implementación de medidas de adaptación a los efectos identificados, tomando en cuenta el dinamismo de estos ecosistemas frente a escenarios futuros de cambio climático.

Esta iniciativa tiene además la ventaja de integrar el conocimiento generado mediante el monitoreo de variables físicas y biológicas con fuentes alternativas de conocimiento por medio de las ciencias sociales. Así es posible responder a la necesidad imperante de comprender los efectos del cambio climático en conjunto con la dinámica de los sistemas naturales y sociales, incluyendo

medidas de seguimiento, adaptación y mitigación adecuadas a la realidad local-regional.

Agradecimientos

Investigación financiada por el Centro de Estudios de Humedales, y los proyectos FONDECYT 1150701 “Investigación Participativa a Través de Observatorios Ecológico-Sociales de los Cambios y Variabilidades Climáticas del Altiplano Andino del Norte de Chile”, y FONDECYT 1120204 “Análisis Multiescalar de los Cambios Climáticos y su Consideración en la

Evaluación Ambiental Estratégica del Desarrollo Regional Sustentable del Altiplano del Norte de Chile”. A las comunidades indígenas de Cancosa, Iquiuca, Parca y a la Asociación Indígena Aymara Laguna del Huasco por permitirnos llevar a cabo investigaciones en sus territorios, y a las autoridades ambientales competentes por autorizar la captura de micromamíferos con fines científicos mediante las Resoluciones Exentas N° 7423/2013, 1687/2015, y 1909/2016. Los autores finalmente quieren extender su gratitud a todos quienes han participado activamente de las campañas de terreno llevadas a cabo hasta la fecha.

Referencias Citadas

- Alexander, C., *et al.*
2011 Linking indigenous and scientific knowledge of climate change. *BioScience* 61: 477-484.
- Castillo, M.P.
2015 *Análisis estratégico de las implicancias del cambio climático en el proceso de desarrollo regional de Tarapacá, Chile*. Tesis para optar al grado de Magíster en Gestión y Planificación Territorial, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Centro de Estudios del Desarrollo y Centro de Estudios de Humedales
2012 Humedales del altiplano Andino y su rol en el cambio climático: Informe final. Centro de Estudio de Humedales, Pica, Chile.
- Chaudhary, P. y K.S. Bawa
2011 Local perceptions of climate change validated by scientific evidence in the Himalayas. *Biology Letters*: rsbl20110269.
- Cleland, E.E.; I. Chuine; A. Menzel; H.A. Mooney y M.D. Schwartz
2007 Shifting plant phenology in response to global change. *Trends in Ecology and Evolution* 22: 357-365.
- Conly, F.M. y G. Van Der Kamp
2001 Monitoring the hydrology of Canadian prairie wetlands to detect the effects of climate change and land use changes. *Environmental Monitoring and Assessment* 67: 195-215.
- Donald, D.B.; J. Syrgiannis; F. Hunter y G. Weiss
1999 Agricultural pesticides threaten the ecological integrity of northern prairie wetlands. *Science of the Total Environment* 231: 173-181.
- Convención de Ramsar
1971 Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional Especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas. UNESCO, Ramsar, Irán.
- Derlindati, E.J.; M.C. Romano; N.N. Cruz; C. Barisón; F. Arengo e I.M. Barberis
2014 Seasonal activity patterns and abundance of Andean flamingo (*Phoenicoparrus andinus*) at two contrasting wetlands in Argentina. *Ornitología Neotropical* 25: 317-331.
- Deutsch, C.A.; J.J. Tewksbury; R.B. Huey; K.S. Sheldon; C.K. Ghalambor; D.C. Haak y P.R. Martin
2008 Impacts of climate warming on terrestrial ectotherms across latitude. *Proceedings of the National Academy of Science USA* 105: 6668-6672.
- Ellis, T.; P.W. Hill; N. Fenner; G.G. Williams; D. Godbold y C. Freeman
2009 The interactive effects of elevated carbon dioxide and water table draw-down on carbon cycling in a Welsh ombrotrophic bog. *Ecological Engineering* 35: 978-986.
- Erwin, K.L.
2009. Wetlands and global climate change: the role of wetland restoration in a changing world. *Wetlands Ecology and Management* 17: 71-84.
- Everard, M.
2008 Selection of taxa as indicators of river and freshwater wetland quality in the UK. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 18: 1052-1061.
- Feeley, K.J. y M.R. Silman
2010 Biotic attrition from tropical forests correcting for truncated temperature niches. *Global Change Biology* 16: 1830-1836.
- Frau, D.; Y. Battauz; G. Mayora y P. Marconi
2015 Controlling factors in planktonic communities over a salinity gradient in high-altitude lakes. *International Journal of Limnology* 51: 261-272.
- Gilman, S.E.; M.C. Urban; J. Tewksbury; G.W. Gilchrist y R.D. Holt
2010 A framework for community interactions under climate change. *Trends in Ecology and Evolution* 25: 325-331.
- Kløve, B., *et al.*
2014 Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems. *Journal of Hydrology* 518: 250-266.
- LaBastide, J.G.A. y C.L. van Vredenburg
1970. The influence of weather conditions on the seed production of some forest trees in the Netherlands. *Mededeling, Stichting Bosbouwproefstation 'De Dorschkamp'*, Wageningen, Países Bajos.
- Langmuir, D.
1997 *Aqueous Environmental Chemistry: Upper Addle River*. Prentice-Hall, Inc. New Jersey, USA.
- Larsen, T. H.; G. Brehm; H. Navarrete; P. Franco; H. Gómez; J. L. Mena; V. Morales; J. Argollo; L. Blacutt y V. Canhos
2011 Range shifts and extinctions driven by climate change in the Tropical Andes: Synthesis and directions. En: *Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes*, editado por S. K. Herzog, R. Martínez, P. M. Jørgensen y H. Tiessen, pp. 47-67. Inter-American Institute for Global Change (IAI)

- and Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE), Saint Louis, USA.
- McCain C.M.
2009 Vertebrate range sizes indicate that mountains may be 'higher' in the tropics. *Ecology Letters* 12: 550-560.
- Middelkoop, H., K. Daamen, D. Gellens, W. Grabs, J. C. Kwadijk, H. Lang, B.A.H. Parmet, B. Schädler, J. Schulla y K. Wilke
2001 Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine basin. *Climatic Change* 49: 105-128.
- Mitsch, W.J. y J.G. Gosselink
2000 The value of wetlands: importance of scale and landscape setting. *Ecological Economics* 35: 25-33.
- Morales, M.S., D.A. Christie, R. Villalba, J. Argollo, J. Pacajes, J.S. Silva, C.A. Álvarez, L.C. Llancabure y C.C. Soliz-Gamboa
2012 Precipitation changes in the South American Altiplano since 1300 AD reconstructed by tree-rings. *Climate of the Past* 8:653-666.
- Neukom, R., M. Rohrer, P. Calanca, N. Salzmann, C. Huggel, D. Acuña, D.A. Christie y M.S. Morales
2015 Facing unprecedented drying of the Central Andes? Precipitation variability over the period AD 1000-2100. *Environmental Research Letters* 10: 084017.
- Núñez, L., M. Grosjean y I. Cartajena
2002 Human occupations and climate change in the Puna de Atacama, Chile. *Science* 298: 821-824.
- Ortega, C.; Vargas, G.; Rojas, M.; Pantoja, S.; Muñoz, P.; Lange, C.B.; Rutllant, J.A.; Dezileau, L. y L. Ortlieb
2016 Acute ENSO-driven torrential rainfall episodes since the early 19th century and projected desertification at the semi-arid Atacama's southern rim. Manuscrito en posesión de los autores.
- Previtali, M.A.; M. Lima; P.L. Meserve; D.A. Kelt y J.R. Gutiérrez
2009 Population dynamics of two sympatric rodents in a variable environment: rainfall, resource availability, and predation. *Ecology* 90: 1996-2006.
- Risacher F.; H. Alonso y C. Salazar
2003 The origin of brines and salts in Chilean salars: a hydrochemical review. *Earth-Science Reviews* 63: 249-293.
- Scheffers, B.R., *et al.*
2016 The broad footprint of climate change from genes to biomes to people. *Science* 354: aaf7671.
- Schindler, D.W.
2001 The cumulative effects of climate warming and other human stresses on Canadian freshwaters in the new millennium. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* 58: 18-29.
- Silva, M.J.
2014 *Percepción del cambio climático y la conservación de los humedales altoandinos de la Región de Tarapacá*. Seminario para optar al título profesional de Biólogo Ambiental, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Trettin, C.C.; R. Laiho; K. Minkinen y J. Laine
2006 Influence of climate change factors on carbon dynamics in northern forested peatlands. *Canadian Journal of Soil Science* 86: 269-280.
- Van Kessel, J.
1989 La cosmovisión aymara. En *Etnografía: Sociedades Indígenas Contemporáneas y su Ideología*, pp. 169-187. Editorial Andrés Bello, Santiago, Chile.
- Van Groenigen, K.J.; C.W. Osenberg y B.A. Hungate
2011 Increased soil emissions of potent greenhouse gases under increased atmospheric CO₂. *Nature* 475: 214-216.
- Vuille, M.; B. Francou; P. Wagnon; I. Juen; G. Kaser; B.G. Mark y R.S. Bradley
2008 Climate change and tropical Andean glaciers: past, present and future. *Earth-Science Reviews* 89: 79-96.
- Vuille, M.; E. Franquist; R. Garreaud; L. Casimiro; W. Sven y B. Cáceres
2015 Impact of the global warming hiatus on Andean temperature. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 120: 3745-3757.
- Watson, R.T. y D.L. Albritton
2001 Climate change 2001: synthesis report: a report of the Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC.
- Wolf, A.A.; B.G. Drake; J.E. Erickson y J.P. Megonigal
2007 An oxygen-mediated positive feedback between elevated carbon dioxide and soil organic matter decomposition in a simulated anaerobic wetland. *Global Change Biology* 13: 2036-2044.
- Wrona, F.J.; T.D. Prowse; J.D. Reist; J.E. Hobbie; L.M. Lévesque y W.F. Vincent
2006 Climate Change Effects on Aquatic Biota, Ecosystem Structure and Function. *AMBIO* 35: 359-369.
- Zedler, J.B. y S. Kercher
2005 Wetland resources: status, trends, ecosystem services, and restorability. *Annual Reviews on Environmental Resources* 30: 39-74.

Notas

- ¹ Trabajo desarrollado en el marco de la administración del Centro de Estudios de Humedales. CP 1170000, Pica, Chile.
- ² Es importante destacar que el clima es un sistema dinámico, con procesos y ciclos naturales tanto de corto (interanuales) como de largo plazo (incluso miles de años). El cambio climático es definido por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (Watson y Albritton 2001) como "importantes variaciones en el estado medio del clima o en su variabilidad, que persiste durante un período prolongado (normalmente decenios o

incluso más)...". El mismo organismo define variabilidad climática como "las variaciones en el estado medio y otros datos estadísticos (como las desviaciones típicas, la ocurrencia de fenómenos extremos, etc.) del clima **en todas las escalas temporales y espaciales**, más allá de fenómenos meteorológicos determinados...". Tanto el cambio climático como la variabilidad climática pueden ser modulados por la acción humana, y distinguir los fenómenos de cambios de largo plazo en las tendencias centrales y en la variabilidad del clima resulta clave para el manejo de estos fenómenos.

Anexo 1

Aproximación metodológica implementada por el observatorio

Componente abiótico

Metodología para el seguimiento de cambios en variables climáticas

Hasta la fecha, el observatorio ha adquirido e instalado cuatro estaciones meteorológicas completas, las que han sido emplazadas en cada uno de los sitios de estudio. Cada una de ellas registra mediciones de temperatura del aire, precipitaciones, velocidad y dirección del viento, velocidad del viento en ráfagas, humedad relativa del aire y radiación solar cada 15 minutos. Además, la estación emplazada en el salar del Huasco cuenta con un evaporímetro. Las coordenadas geográficas de la ubicación de cada una de las estaciones se muestran en la Tabla S1.

Metodología para el seguimiento de cambios en condiciones fisicoquímicas del agua

Cada otoño (fines de abril-principios de mayo) y primavera (fines de noviembre-principios de diciembre) las variables pH, potencial de oxidorreducción (ORP), conductividad (C), sólidos totales disueltos (TDS), salinidad (S), resistividad (R), oxígeno disuelto (OD) y temperatura (t°) son medidas *in situ* utilizando sensor multiparámetro Sanxin® Modelo L0160675. En la Tabla S2 se muestran las coordenadas geográficas de las 16 estaciones de muestreo limnológico.

Componente biodiversidad

Metodología para el seguimiento de cambios en la comunidad de micromamíferos

Dos veces al año (otoño y primavera) se llevan a cabo protocolos de marcaje-captura-recaptura, con el objetivo de estimar densidades poblacionales de las especies de micromamíferos que en estos humedales habitan. La captura se lleva a cabo mediante trampas Sherman cebadas con una mezcla de avena molida, granola, fruta picada y jurel en conserva. El esfuerzo de muestreo en cada laguna salobre es de 300 trampas por cuatro días, dispuestas en 6

Tabla S1. Coordenadas geográficas (WGS84; UTM-19K) de las cuatro estaciones meteorológicas instaladas y administradas por el Centro de Estudios de Humedales.

Estación Meteorológica	E	S
Salar del Huasco	511692	7756081
Laguna Lagunillas	511803	7757136
Copaquire	477528	7785881
Alto Noasa	476935	7785718

Tabla S2. Coordenadas geográficas (WGS84; UTM-19K) de las estaciones de muestreo limnológico en la laguna salobre del Salar del Huasco (HL) y sus vertientes (HV); en la laguna salobre de Lagunillas (LL) y sus vertientes (LV); y en los cursos de agua de Copaquire (C) y de la quebrada de Iquiuca-Parca (IP).

Estación	E	S
HL1	511692	7756081
HL2	511803	7757136
HL3	512277	7758148
HV1	516280	7751473
HV2	511532	7757208
HV3	512720	7758828
LL1	515938	7795824
LL2	516095	7795781
LL3	516115	7795732
LV1	515924	7796395
LV2	515879	7796433
LV3	515739	7796313
HC1	511940	7685702
HC2	511687	7685694
IP1	477528	7785881
IP2	476935	7785718

grillas de 50 trampas en torno a las lagunas; y en las quebradas el esfuerzo es de 144 trampas por cuatro días, dispuestas en tres grillas de 48 trampas, revisándolas dos veces al día. Se considerarán ambientes con vegetación azonal (e.g. vegetación de fondos de quebrada), intrazonal (e.g. tolar hídrico) y zonal circundante o extrazonal (*sensu* Luebert y Plissock 2006; e.g. laderas rocosas, ver Tabla S3). Los individuos capturados son manipulados utilizando guantes de vinilo o látex sin talco, para ser identificados, medidos, pesados y marcados con microcrotales auriculares, permitiendo distinguir individuos en eventuales recapturas. Se registran

para cada campaña el éxito de captura, la riqueza e identidad de las especies capturadas, la abundancia total, y se calculan índices de diversidad biológica (Índice de diversidad de Shannon-Wiener e Índice de equitatividad de Pielou). Además se reconstruyen los historiales de capturas individuales para cada categoría de ambiente por humedal, ajustándose a partir de estos datos modelos de poblaciones cerradas utilizando la función de máxima heterogeneidad de Huggins (Huggins 1989) para estimar el tamaño poblacional de cada subpoblación. Los modelos poblacionales son construidos por tipo de ambiente y campaña, y solo para especies en que se capturen 5 o más individuos en el mismo ambiente y humedal. Finalmente se calcula la densidad poblacional dividiendo el tamaño poblacional estimado por el área muestreada en cada ambiente-humedal. La ubicación exacta de cada grilla se detalla en las coordenadas de la Tabla S3.

Metodología para el seguimiento de cambios en la comunidad de aves acuáticas

Cada otoño y primavera se llevan a cabo censos de aves acuáticas en la laguna del salar del Huasco y en laguna Lagunillas. Para ello, en cada campaña se establecen estaciones de observación, según la distribución espacial de las aves en el humedal

durante el día del censo. Cada censo requiere el conteo de al menos dos observadores independientes, registrando los valores de manera independiente para poder incorporar el error de observación en los análisis (Kéry & Schmidt 2008). En cada estación se realizan conteos de individuos por especie, utilizando un telescopio de potencia 20-60X, 80 mm. Para la identificación de las especies se utiliza la lista de especies descritas para la zona, construida a partir de una revisión bibliográfica previa (CED-CEH 2013) y la guía de campo de Aves de Chile (Jaramillo 2005). A partir de estos datos se registra la riqueza de especies y la abundancia total, y se realizan estimaciones de la diversidad computando el Índice de Shannon-Wiener (H') y el índice de equitatividad de Pielou (J').

Metodología para el seguimiento de cambios en la comunidad de zooplancton

Dos veces al año (otoño y primavera), en cada uno de los cuatro humedales monitoreados, se colectan muestras de agua para determinar la composición del zooplancton. En cada estación de muestreo limnológico (ver Tabla S2) se colectan 3 muestras con el contenido de 15 litros tamizados ($75\mu\text{m}$), fijándolas en alcohol al 70%, para posteriormente ser analizadas en laboratorio. La

Tabla S3. Ubicación de cada grilla para captura de micromamíferos (WGS-84; UTM-19K) y tipo de hábitat en que fueron establecidas. H es salar del Huasco; L es laguna Lagunillas; IP es quebrada de Iquiuca y Parca; y C es quebrada de Copaquire.

Grilla	Coordenadas		Altitud (msnm)	Tipo de hábitat (régimen hídrico)
	E	N		
H1	510923	7755456	3890	Tolar en ladera (zonal)
H2	515204	7751825	3799	Tolar hídrico (intrazonal)
H3	520902	7756145	3818	Tolar en ladera (zonal)
H4	520094	7757378	3799	Tolar hídrico (intrazonal)
H5	517807	7759632	3798	Tolar hídrico (intrazonal)
H6	512371	7758999	3805	Tolar en ladera (zonal)
L1	517846	7794495	4023	Tolar hídrico (intrazonal)
L2	515572	7794411	4022	Tolar hídrico (intrazonal)
L3	514225	7795488	4097	Tolar en ladera (zonal)
L4	514357	7796087	4079	Tolar en ladera (zonal)
L5	515897	7796386	4032	Tolar hídrico (intrazonal)
L6	516165	7796572	4042	Tolar en ladera (zonal)
IP1	477213	7785790	2548	Vegetación de quebrada (azonal)
IP2	477707	7786035	2562	Ladera rocosa con vegetación arbustiva (zonal)
IP3	477685	7785944	2563	Ladera rocosa con vegetación arbustiva (zonal)
C1	512230	7685684	3551	Vegetación de quebrada (azonal-intrazonal)
C2	511791	7685725	3537	Vegetación de quebrada (azonal)
C3	510907	7685701	3504	Vegetación de quebrada (azonal-intrazonal)

caracterización de la composición de zooplancton se realiza con lupa estereoscópica Wild M3 haciendo uso de una cámara de conteo de zooplancton Bogorov®. Para la identificación de las especies se utilizan las siguientes guías: Araya & Zúñiga (1985), Villalobos (2006), Williamson & Reid (2001), Wallace & Snell (2001), y De los Ríos & Salgado (2012). Además, la determinación de los distintos estados larvarios se realiza según Chapman & Burns (1976).

Metodología para el seguimiento de cambios en la comunidad de fitoplancton

Dos veces al año (otoño y primavera) se colectan una muestra de 1 litro de agua en cada una de las estaciones de muestreo limnológico (ver Tabla S2), totalizando 16 muestras entre los cuatro humedales estudiados. Cada muestra es almacenada en recipientes plásticos, y fijada agregando alícuotas de lugol, para posteriormente ser analizadas en laboratorio. Los análisis cuantitativos se realizan de acuerdo con el método de concentración en cámaras de sedimentación marca Hydrobios® (Utermöhl 1958) utilizando un microscopio invertido modelo Olympus CK2® a un aumento de 400X. Se utilizan cámaras de 5, 10 y 25 ml según el sedimento o la abundancia fitoplanctónica de las muestras, dejando sedimentar por lo menos 2 horas por centímetro de altura según las recomendaciones de Elosegí & Sabater (2009). Para cada muestra se cuentan los individuos hasta que la especie más abundante alcance los 100 individuos o se llegue a 300 campos, lo que se cumpla primero. Los organismos son contabilizados como células, excepto los organismos de las clases *Chlorophyceae* y *Cyanophyceae*, que se presentan en forma filamentosa. La identificación taxonómica de los géneros se basa en las descripciones de Cox (1996), Parra & Bicudo (1996), Parra *et al.* (1982, 1983), Bicudo & Menezes (2005) y Sant' Anna *et al.* (2006). Finalmente se utiliza la fórmula de Arocena & Conde (1999) para calcular la abundancia de los organismos.

Tanto para las muestras de zooplancton como de fitoplancton se observan las densidades totales de individuos o células (DT) para cada taxa. Se realizan estimaciones de diversidad de morfotipos mediante la riqueza específica (S) y el índice de Shannon-Wiener (H'), mientras que la equitatividad se calcula usando el índice de Pielou (J').

Metodología para el seguimiento de cambios en el banco de semillas

En cada una de las parcelas para muestreo de micromamíferos se colectan dos veces al año (otoño y primavera) cinco muestras de suelo superficial (primeros 5 cm de profundidad), tomadas en la base de arbustos o donde se observe acumulación de materia vegetal. Las muestras son almacenadas en compartimientos de PVC de 550 cm³ y trasladadas a las instalaciones del Centro de Estudios de Humedales para su procesamiento. Para separar e identificar las semillas contenidas en las muestras de suelo, se sigue un método modificado de Gross (1990), que consiste en el tamizaje en seco, con tamices de luz de malla de 2,36 mm, 1,18 mm y de 600 μ m. Una vez que las semillas son separadas del suelo, se almacenan en sobres de papel kraft, etiquetados según origen de la muestra. Luego de terminada la separación por origen, se procede a segregar las muestras de semillas según morfotipo y a su conteo manual. En los casos de morfotipos con abundancias superiores a 300 semillas, se realizan estimaciones, contando solo en una porción de la muestra (submuestra), para luego proyectar esa abundancia en el total de la muestra extrapolando por volumen. A partir de la identificación de morfotipos y conteo de semillas se calcula la diversidad de Shannon-Wiener (H') y la equitatividad de Pielou (J') de morfotipos por tipo de ambiente y humedal.

Metodología para el seguimiento de la fenología de plantas vasculares

Para el monitoreo de la temporalidad de la floración y producción de frutos se han establecido estaciones fijas de monitoreo en los salares del Huasco y laguna Lagunillas, correspondientes a dos parcelas establecidas en vegetación azonal y dos en vegetación intrazonal, en que se monitorea la fenología de cinco individuos de *Parastrephia lucida* en cada una de ellas. Además de estas estaciones, en la quebrada de Copaquire se estableció una parcela en ambiente intrazonal, en que se monitorea la fenología de cinco individuos de *Baccharis scandens*, y una parcela en ambiente azonal, en que se monitorean cinco individuos de *Parastrephia lucida*. Finalmente, en el humedal de la quebrada de Iquiuca-Parca se han establecido dos parcelas en ambientes azonales, en las cuales se monitorean cuatro especies con distintos hábitos reproductivos

(*Morella pavonis*, *Baccharis scandens*, *Escallonia angustifolia* y *Equisetum giganteum*), monitoreándose cinco individuos de cada especie por parcela. Las coordenadas en que se emplaza cada parcela para el seguimiento de la fenología de floración y producción de frutos de plantas vasculares se muestra en la Tabla S4.

Componente social

Diseño del instrumento

- a) *Revisión del estado del arte*: Se abordan las publicaciones y estudios relativos a cambio climático que describan los efectos del cambio climático sobre sistemas sociales, además de investigaciones que incluyan percepciones locales sobre el territorio y contextos geográficos desde una perspectiva sociocultural. Como producto de esta etapa se levantan conceptos esenciales en torno a aspectos sociales del cambio climático, los que serán utilizados para la elaboración de un instrumento que permita el seguimiento en el tiempo. A partir de estos conceptos se: i) establecen interrogantes relacionadas a percepciones locales sobre cambio climático, ii) categorizan las interrogantes en una matriz conceptual a partir de los conceptos esenciales identificados preliminarmente, y iii) generan hipótesis preliminares para su contrastación por medio del instrumento.
- b) *Consulta a expertos*: En esta etapa se validan los conceptos, interrogantes e hipótesis propuestas para su consideración en el instrumento, con herramientas destinadas a actores de la comunidad local y a expertos del área social. Se realizan consultas mediante entrevistas con el fin de aproximarse etnográficamente a las diferentes realidades geográficas y sociales de la región.
- c) *Propuesta de instrumento*: La información recopilada por las tres vías anteriormente descritas se triangulará para elaborar una propuesta de instrumento.

Aplicación del instrumento

- a) *Puesta a prueba*: Se aplicará el cuestionario a un conjunto reducido de actores sociales. El objetivo es poner a prueba la encuesta en términos de formato (i.e. evaluar su aplicabilidad, la comprensión de las preguntas, la comodidad de los encuestados frente al cuestionario, el tiempo empleado, el orden de los factores, etc.). Sobre la base de las sugerencias que puedan surgir de este procedimiento, el instrumento será adaptado según corresponda. Se aplicará el instrumento a actores que habiten o conozcan un determinado territorio el tiempo suficiente como para observar patrones de cambio en el clima (i.e. > 30 años). Se usará estadística descriptiva para caracterizar las respuestas y para identificar preguntas en las que no exista variabilidad en las respuestas, ya sea en general o entre grupos de encuestados de distintos contextos sociales y geográficos.
- b) *Monitoreo de las percepciones locales del cambio climático*: El instrumento se aplicará en el tiempo a una selección de actores sociales relevantes que permita contrastar las evidencias obtenidas del monitoreo de los componentes físicos y biológicos con la percepción de la comunidad local respecto de la variabilidad climática, el cambio climático y sus efectos en su calidad de vida.

Referencias Citadas

- Araya, J. y L. Zúñiga
1985 Manual taxonómico del zooplancton lacustre de Chile. *Boletín Informativo Limnológico*, Valdivia Chile.
- Arocena, R. y D. Conde
1999 *Métodos en Ecología de Aguas Continentales con Ejemplos de Limnología en Uruguay*. D.I.R.A.C. Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
- Bicudo, C. E. y M. Menezes
2005 *Gêneros de Algas de Águas Continentais do Brasil: Chave para Identificação e Descrições*. São Carlos: RiMa Editora, Brasil.
- Centro de Estudios del Desarrollo y Centro de Estudios de Humedales
2013 Consultoría "Humedales y Cambio Climático en la Región de Tarapacá" Informe Final. Licitación pública ID: 609102-4-LE12. Pica, Región de Tarapacá.
- Chapman, M. A. y C. W. Burns
1976 Sexual and other differences in copepodite stages of some New Zealand Calamoecia and Boeckella Spp. (Copepoda: Calanoida). *New Zealand Journal of marine and Freshwater research* 10: 131-137.
- Cox, E. J.
1996 *The identification of freshwater diatoms from live material*. Chapman & Hall, Londres, U.K.

- De los Ríos, P. y I. Salgado
2012 *Artemia* (Crustacea, Anostraca) in Chile: a review of basic and applied biology. *Latin American Journal of Aquatic research* 40: 487-497.
- Elosegi, A. y S. Sabater
2009 *Conceptos y Técnicas en Ecología Fluvial*. Fundación BBVA, Bilbao, España.
- Gross, K. L.
1990 A comparison of methods for estimating seed numbers in the soil. *Journal of Ecology* 78: 1079-1093.
- Huggins, R. M.
1989 On the statistical analysis of capture experiments. *Biometrika* 76: 133-140.
- Jaramillo, A.
2005 *Aves de Chile*. Editorial Lynx, Barcelona, España.
- Kéry, M. y B. R. Schmidt
2008 Imperfect detection and its consequences for monitoring for conservation. *Community Ecology* 9: 207-216.
- Luebert, F. y P. Plissock
2006 *Sinopsis Bioclimática y Vegetacional de Chile*. Editorial Universitaria, Santiago, Chile.
- Parra, O. y C. M. Bicudo
1996 *Algas de Aguas Continentales: Introducción a la Biología y Sistemática*. Ediciones Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Parra, O. M. González, V. Dellarossa, P. Rivera y M. Orellana
1982-1983 *Manual Taxonómico del Fitoplancton de Aguas Continentales, con especial referencia al fitoplancton de Chile*. Editorial de la Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Sant'Anna, C., M. T. Azevedo., L. F. Agujaro., L. R. M. De Carvalho y R. C. R. Souza
2006 *Manual ilustrado para identificação e contagem de cianobacterias planctônicas de águas continentais brasileiras*. Rio de Janeiro: Interciência.
- Utermöhl, M.
1958 Zur Vervollkommnung der quantitativen Phytoplankton-Methodik. *Mitteilungen der Internationale Vereinigung Theoretische und Angewandte Limnologie* 9: 1-38.
- Villalobos, L.
2006 Estado del conocimiento de los crustáceos zooplanc-tónicos dulceacuícolas de Chile. *Gayana* 70:31-39.
- Wallace, R.L. y T. W. Snell
2001 Phylum Rotifera. En *Ecology and Classification of North American Freshwater Invertebrates*, editado por J. H. Thorp y A. P. Covich, 2° ed., pp. 195-254. Academic Press, San Diego, California, Estados Unidos de América.
- Williamson, C. E. y J. K. Reid
2001 Copépoda. En *Ecology and Classification of North American Freshwater Invertebrates*, editado por J. H. Thorp y A. P. Covich, 2° ed., pp. 915-954. Academic Press, San Diego, California, Estados Unidos de América.