

# DetECCIÓN DE CAMBIOS A LARGO PLAZO CON ANÁLISIS MULTIESPECTRAL EN LA VEGETACIÓN AZONAL HÍDRICA ALTOANDINA: CASO DE ESTUDIO SALAR MICHINCHA, 1985-2019

## DETECTION OF LONG-TERM CHANGES BY MULTISPECTRAL ANALYSIS IN THE HIGH-ALTITUDE ANDEAN WETLANDS VEGETATION'S: MICHINCHA CASE STUDY, 1985-2019

Olga Lucia Puertas Orozco<sup>1</sup> , María Paz Cardenas<sup>2</sup>, Jessica Barría Meneses<sup>3</sup>, Tomás Lizama Sanchez<sup>4</sup> y Héctor Jiménez Núñez<sup>5</sup> 

### RESUMEN

Los sistemas azonales presentan una alta vulnerabilidad a cambios hidrológicos. El presente estudio tuvo como propósito describir cambios espaciotemporales en la fisonomía de un humedal con variaciones en el suministro hídrico. Para tal fin, se desarrolló un modelo basado en percepción remota de la vegetación azonal altoandina ubicada al suroeste del salar Michincha (Región Tarapacá, 4.200 m snm). Se utilizaron registros de flora-vegetación, se delimitaron los recubrimientos entre 1985-2019 mediante clasificación supervisada con imágenes satelitales de alta y media resolución y se realizó un análisis tendencial de la actividad vegetal según índices de Landsat NDVI y WETNESS. Los resultados detectan cambios fisionómicos, siendo más importante el reemplazo de bofedal por bofedal-vega y pajonal hídrico, posteriormente a áreas con rastrojo y recientemente en unidades de vega, pajonal hídrico conservando vegetación muerta. Los cambios sucesionales ocurren principalmente por el recambio a especies menos dependientes del suministro hídrico, acompañado de descensos en cobertura y actividad vegetal, y altas superficies de rastrojo. El modelo implementado, se basa en el análisis multitemporal de imágenes históricas, respaldado con catastros de flora-vegetación. Los resultados permiten comprender el efecto de variaciones hídricas en humedales altiplánicos para orientar el diseño de medidas adecuadas de protección/conservación.

**Palabras Clave:** sistemas azonales altiplánicos, humedales de altura, salar Michincha, análisis multiespectral, percepción remota.

<sup>1</sup> Cedrem Consultores. Correo: olgapuertas@gmail.com

<sup>2</sup> Cedrem Consultores. Correo: mpazitacc@gmail.com.

<sup>3</sup> Doctorat en Geografia, PTiGA, Facultat de Geografia e Historia, Depto. Geografia Universitat de Barcelona. Correo: jbarime80@alumnes.ub.edu

<sup>4</sup> Cedrem Consultores. Correo: tomas.lizama@cedrem.cl

<sup>5</sup> Cedrem Consultores, correo: hector.jimenez@cedrem.cl

### ABSTRACT

Wetlands vegetation systems have high vulnerability due to hydrologic changes. The objective of this study was to describe the spatiotemporal changes in the physiognomy of a wetland vegetation's by variations on its water streaming. For this purpose, a model was developed based on remote perception of a high-altitude Andean wetland vegetation's located southwest of the Michincha salt flat (Tarapacá Region, 4100 masl.). We used flora-vegetation records, vegetation coverages was obtained from supervised classification of high and medium satellite images resolutions during the period 1985-2019 and trend analysis of the vegetational activity according to multispectral Landsat's index NDVI and WETNESS. The results showed important physiognomic vegetation's changes on time, such us the replacement of a high Andean peatland vegetation's to a mixture of wet meadow and grassland at first, later, into areas with stubble and finally in units of wet meadow and grassland, remaining dead vegetation. The implemented model is based on multitemporal analysis of historical satellite images, validated with flora-vegetation observed records. These results allow us to understand the effect of hydric variations in high-altitude wetlands and guide measures according to its protection and conservation.

**Keywords:** High-altitude Andean ecosystems, high-altitude wetlands vegetation's, Michincha salt flat, multispectral analysis, remote sensing.

## Introducción

Los humedales de alta montaña son ecosistemas vulnerables que juegan un papel fundamental en la dinámica hidrológica, cultural, ecológica y socioeconómica, constituyéndose como áreas de alta prioridad para la conservación en la región (CONAF, 2006). La región altoandina del norte de Chile se extiende desde los 2.000 m de altitud hacia los Andes y contiene un número importante de humedales, entre los cuales se encuentra el sistema del salar Michincha (Región Tarapacá). Los sistemas vegetacionales en esta zona, corresponden a bofedales, vegas y pajonales húmedos caracterizados por una condición de aporte hídrico permanente (Ahumada & Faundez, 2009), los cuales presentan alta biodiversidad, endemismo y productividad primaria respecto al ambiente árido donde se desarrollan. A pesar de su relevancia, estos ecosistemas se encuentran frecuentemente deteriorados, por causas asociadas al cambio climático y la presión generada por actividades antrópicas (Valencia & Figueroa, 2014). Esto combinado con su fragilidad por el suministro hídrico, aumentan las amenazas y hace imperativo evaluar el nivel de impacto específico de cada sitio, para entregar herramientas de manejo (CEA, 2017).

La Percepción Remota y los Sistemas de Información Geográfica (PR y SIG), constituyen una herramienta para la detección de cambios de cobertura y usos de suelo en ecosistemas sensibles y con intervención antrópica (Haque & Bazak, 2017). En ecosistemas como los humedales, la evaluación del índice normalizado de vegetación NDVI e índices de humedad del suelo, son enfoques probados para hacer análisis de tendencias en superficies con cobertura vegetal y cuerpos de agua (Ahmed & Akter, 2017). La determinación y comprensión de los cambios existentes en humedales altoandinos está abordada parcialmente; en este sentido, el uso de estos índices espectrales en conjunto con técnicas de clasificación supervisada de imágenes satelitales y validación de terreno, puede ayudar a la evaluación espacio-temporal de los cambios a largo plazo (>30 años), lo cual permitirá guiar de mejor manera a tomadores de decisión en la generación de medidas de adaptación actuales y futuras en estos ecosistemas de alta relevancia y vulnerabilidad.

El presente estudio trató de un análisis comparativo multitemporal con registros de terreno e imágenes satelitales, para responder a la pregunta: ¿cuáles son los cambios en la fisonomía vegetal y la composición florística de especies dominantes de humedales altoandinos, sometidos a presiones antrópicas y ambientales las cuales modifican el suministro hídrico?; En este contexto, se utilizaron como estudio de caso los Sistemas Vegetacionales Azonales Hídricos Terrestres (SVAHT) del salar Michincha.

Para dar respuesta a la pregunta de investigación planteada, se recopilaron datos de terreno de la vegetación, inventarios florísticos y la cartografía de vegetación, siendo esta última la Carta de Ocupación de Tierras (COT, Etienne & Prado, 1982) la cual fue validada *in situ* para el periodo 2013-2015 (MWH & Teck Quebrada Blanca, 2014 y Cedrem Consultores, 2014). Adicionalmente, para el periodo 1985-2019 se procesaron imágenes satelitales y se obtuvieron los índices multiespectrales NDVI (Rouse et al., 1973) y WETNESS, correspondiente este último a la tercera componente principal de la transformación Tasseled Cap que entrega la interrelación de humedad entre el suelo y el dosel (Wang & Zhu, 2010). Con el conjunto de datos, se realizó el análisis multitemporal de la vegetación, determinando las transiciones en las formaciones vegetales, mediante la obtención y comparación de COTs en distintas fechas dentro del periodo de estudio y estableciendo tendencias en la actividad de la vegetación con las series de tiempo de los indicadores multiespectrales usados.

Este artículo, presenta a continuación las etapas metodológicas y describe los resultados obtenidos en el área de estudio, correspondientes en orden consecutivo a: i) la flora y vegetación catastrada (2013-2015); ii) los cambios en la composición florística (1998-2015) y iii) los cambios multitemporales en la vegetación (1985-2019), según un análisis comparativo y de tendencias con la información generada, en conjunto con los antecedentes disponibles.

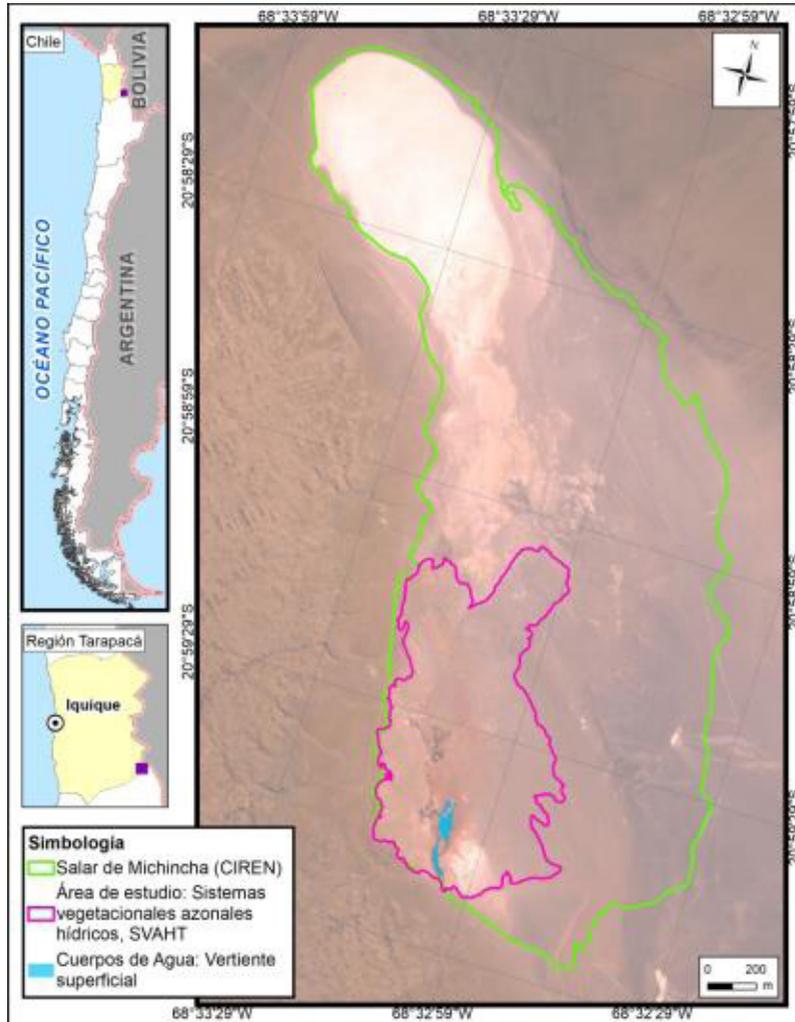
## **Área de estudio: Sistemas Vegetacionales Azonales Hídricos del Salar Michincha**

El salar Michincha se ubica al norte de Chile (Región Tarapacá) a 4.200 m snm en los Andes. La depresión cerrada que lo conforma abarca 30 mil hectáreas y el salar propiamente, cubre alrededor de 400 hectáreas. Al interior del salar, el área de estudio comprende 79,4 hectáreas en el suroeste, donde aflora agua potencialmente subterránea que posibilita la formación de SVAHT alrededor de la vertiente de afloramiento, la cual, además, se alimenta por recarga artificial y de la escorrentía acumulada por las lluvias (Schlumberger Water Services, 2014; Figura N°1).

El salar Michincha presenta clima desértico marginal de altura con marcada aridez, temperaturas frías y episodios pluviométricos concentrados durante el verano (Invierno Altiplánico entre diciembre-marzo; Henríquez, 2013). La cuenca es principalmente endorreica y la principal recarga es la precipitación desde mayor altitud, con promedio 140-180 l/s (Schlumberger Water Services, 2014). Los niveles freáticos responden a variaciones pluviométricas y caudales de bombeo existentes desde 1993 por parte de la minera Quebrada Blanca y en 2005 se sumó Collahuasi. Durante 2003-2005 la explotación del agua subterránea provocó que la vertiente del salar dejara de descargar. Por lo tanto, desde 2005, Collahuasi implementó en el afloramiento, la reposición del caudal medio anual de 5 l/s (resolución N° 167/2001 CONAMA, Región Tarapacá; Arcadis, 2018a).

**Figura N°1.**

Ubicación del área de estudio: SVAHT altoandinos en la vertiente suroeste del salar Michincha al norte de Chile (Región Tarapacá)



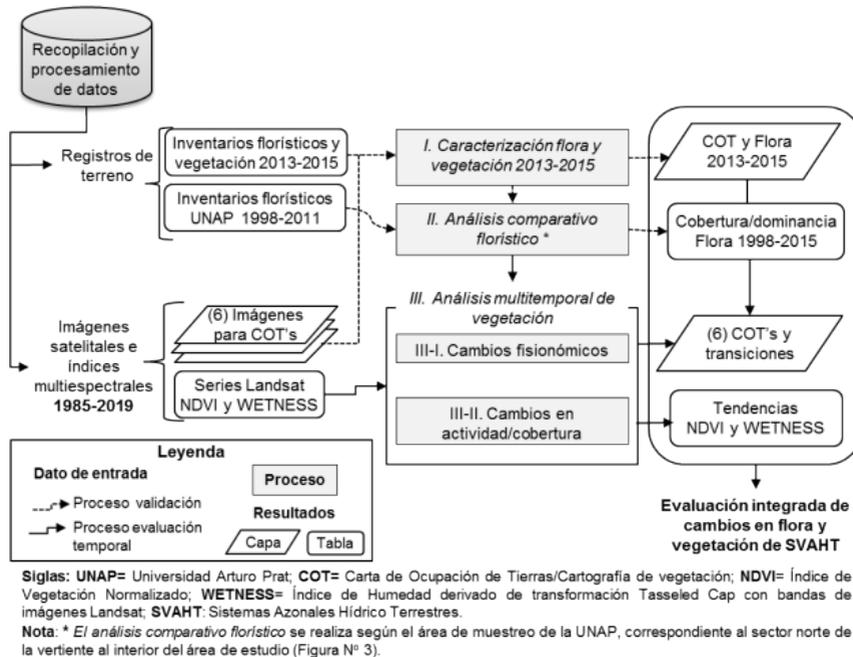
Fuente: Elaboración propia en base a cartografía CIREN (2016) y Cedrem Consultores (2014).

## Datos y Métodos

La detección y evaluación integrada de cambios en la fisonomía vegetal y la composición de especies dominantes en SVAHT del salar, se determinó a partir de la recopilación y procesamiento de registros de terreno y mediante análisis de imágenes satelitales para el periodo 1985-2019. Esta sección describe los datos y procesos presentados en la Figura N°2.

**Figura N°2.**

Diagrama de flujo: Detección de cambios con registros de terreno y análisis multiespectral en SVAHT del salar Michincha, 1985-2019



Fuente: Elaboración propia.

## Datos: recopilación y procesamiento

- a. Registros de terreno
  - Inventarios florísticos y vegetación 2013-2015

Para identificar y caracterizar la flora y vegetación en el área de estudio, se utilizaron inventarios florísticos y la Carta de Ocupación de Tierras (COT) obtenidos a partir de ocho campañas estacionales de terreno, realizadas por Cedrem Consultores, durante el periodo entre primavera 2013 - invierno 2015. Se realizaron 61 inventarios florísticos distribuidos en 18 transectas de muestreo (Cedrem Consultores, 2014). Adicionalmente, los registros de cobertura de especies dominantes de 7 de éstas transectas ubicadas en unidades vegetales al norte de la vertiente, fueron utilizados para complementar el *análisis comparativo florístico* (sección 3.2.; Figura N°3).

Los muestreos se realizaron en transectas o parcelas de muestreo de 200 de largo y 10m de ancho, donde se catastraron dos tipos de registros:

1) *El catastro de la vegetación* se basó en la metodología de la COT (Etienne & Prado, 1982), la cual describe la vegetación desde una perspectiva fisionómica. Posteriormente, se genera una cartografía de la vegetación con la delimitación de unidades cartográficas homogéneas que identifican formaciones vegetales. Éstas se clasifican en términos estructurales (tipo biológico y rangos de altura) y según especies dominantes (con mayor porcentaje de cobertura).

La denominación final de las formaciones vegetales se realizó de acuerdo al tipo biológico y especies dominantes. Además, cada unidad vegetal fue catalogada según el estado de las especies como “vegetación muerta” si la presencia de esta cobertura de rastrojo fue >50%, y la viva <25%; como “vegetación regular” si la cobertura muerta estuvo entre 10-50%, y la “vegetación viva” si lo muerto fue <10%.

II) Los *inventarios florísticos* siguieron el método de Braun Blanquet (1989) para identificar el listado de especies y una estimación visual (semicuantitativa) de su cobertura/abundancia (SEA, 2015).

- Inventarios florísticos UNAP 1998-2011

En el proceso de *análisis comparativo florístico*, se consideraron registros de cobertura de las especies dominantes obtenidos de monitoreos realizados por la Universidad Arturo Prat (UNAP) entre los años 1998-2011 (exceptuando 2002, 2003 y 2007) en el sector norte de la vertiente al interior del área de estudio (Figura N°3).

Los autores hicieron estos inventarios de flora y estimaron su cobertura relativa mediante parcelas de muestreo. Para esto, siguieron distintas metodologías que restringen la evaluación comparativa: -

I) En 1998 (dos campañas), fueron 12 parcelas no permanentes de 2 m<sup>2</sup>.

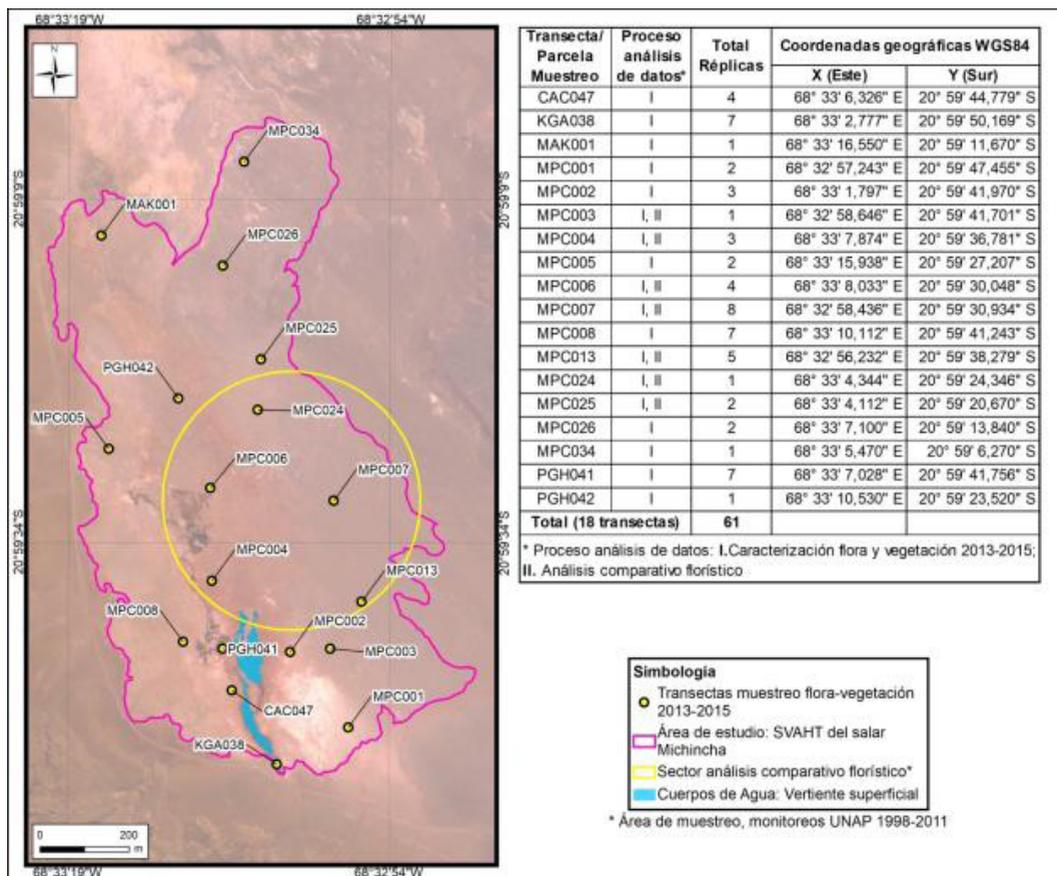
II) Entre 1999-2001, muestrearon 8 parcelas no permanentes de 100 m<sup>2</sup> (3 a 4 campañas por año).

III) En 2004 (dos campañas), fue una parcela de 100 m<sup>2</sup> fija, sin registro detallado de vegetación y flora.

IV) Entre 2005-2011, se muestreó la misma parcela fija de 100m<sup>2</sup> muestreada en 2004 y en algunas campañas, también hubo catastro de la riqueza y cobertura en parcelas aleatorias de 4m<sup>2</sup> (MWH & Teck Quebrada Blanca, 2014).

**Figura N°3.**

Transectas de muestreo flora-vegetación en campañas estacionales primavera 2013-invierno 2015, usados en los procesos de validación: I- Caracterización de flora y vegetación y, II- Análisis comparativo florístico



Fuente: Elaboración propia a partir de Cedrem Consultores (2014) y MWH & Teck Quebrada Blanca (2014).

b. Imágenes satelitales e índices multiespectrales NDVI y WETNESS

Imágenes satelitales fueron utilizadas para el análisis multitemporal de la vegetación en el área de estudio para el periodo 1985-2019, el cual cubre los distintos hitos del proceso previo y posterior al bombeo de agua desde el salar. Dicho análisis tuvo dos partes:

I) *Detectar cambios en la fisonomía de la vegetación*, mediante la obtención y comparación de la cartografía de vegetación basada en la metodología de la COT, para seis fechas dentro del periodo de estudio. Para esto, se utilizaron imágenes con la mayor resolución espacial disponible en cada fecha, a fin de facilitar el proceso de detección/ delimitación de las formaciones vegetales (Cuadro N°2).

II) *Evaluar variaciones en la actividad de la vegetación*, mediante el uso de los índices multiespectrales de vigor y humedad del suelo siendo respectivamente el NDVI (Rouse et al., 1973) y

el WETNESS (Wang & Zhu, 2010). Estos índices fueron utilizados, por presentar buen ajuste en el estudio multiespectral de coberturas con vegetación y presencia de cuerpos de agua (Ahmed & Akter, 2017). Para esto, se utilizaron imágenes de sensores Landsat de media resolución (pixel 30m), las cuales se encuentran disponibles para un amplio periodo histórico. Se evaluó una imagen por año para el periodo diciembre-abril el cual cubre el periodo estival y pos-estival donde se registra la mayor actividad de la vegetación del salar. Las características de las imágenes Landsat usadas, se muestran en el Cuadro N°3.

El conjunto de imágenes satelitales fue obtenido y procesado; para esto inicialmente se georeferenciaron en Sistema de Referencia WGS84 (World Geodetic System 1984) y se designó la proyección cartográfica UTM zona 19S. Luego, se realizó una corrección radiométrica, para obtener valores de reflectancia espectral absoluta, lo cual proporciona una base para la comparación de datos (Chander et al., 2009).

Posteriormente con las imágenes Landsat, se realizó la corrección atmosférica, la cual busca reducir el efecto en la reflectancia de la interacción de las moléculas y partículas de la atmósfera. El método usado corresponde a la Sustracción de Objetos Oscuros (DOS sigla en inglés) el cual postula que en la imagen algunos píxeles están completamente en sombra y sus radiancias recibidas en el satélite se deben a la dispersión atmosférica (efecto bruma). Basado en esto, se sustrae en cada banda de la escena, el valor representativo de la diferencia con la radiancia casi nula (de 10%; Chavez, 1996). Estas correcciones se realizaron utilizando el Plugin Semi-Automatic Classification en QGIS versión 3.4.6. Seguidamente, en las imágenes del sensor Landsat 7, se corrigió el bandeo proveniente de un fallo en el Corrector de Escaneo Lineal (SLC) del satélite utilizando el paquete Rgdal en la plataforma R. Por último, se procedió al cálculo y extracción de valores para la obtención de los índices multiespectrales NDVI y WETNESS, en el software QGIS y en el caso del WETNESS, se utilizó como complemento el Módulo Tasseled Cap Transformation originado desde el sistema SAGA (Conrad et al., 2015).

### Cuadro N°2.

Periodos e imágenes satelitales usadas para detectar cambios en la fisonomía de los SVAHT durante 1985-2019 en el área de estudio

Situación de intervención en el acuífero del salar Michincha	Año Carto. Vegetación	Fecha imagen		Satélite-Sensor	Resolución bandas RGB* (m)
		mes	año		
1) Inicio periodo de estudio	1985	Feb	1985	Landsat-5	30,0
2) Previo bombeo por CMQB <sup>§</sup>	1992	Dic.	1992		
3) Previo bombeo CMIC <sup>§</sup>	2003	May.	2003	QuickBird	4,0
4) Aumento bombeo y recarga artificial vertiente desde 2005	2006	Feb.	2006	Landsat-5	30,0
5) Estabilización del sistema por aumento de bombeo y recarga artificial	2013-2015 <sup>§§</sup>	Feb.	2013	SPOT-5	2,5
		Ago.	2013	Pleiades 1A	2,0
6) Fin periodo de estudio	2019	May.	2019	Sentinel 2A	10,0

Dónde: <sup>§</sup> Compañías Mineras que bombean agua desde el salar: Ines de Collahuasi (CMIC) y Quebrada Blanca (CMQB). <sup>§§</sup> La carta 2013-2015 cuenta con validación de registros de terreno, a partir de esta capa se construyeron las demás cartas de la vegetación.

Fuente: Elaboración propia a partir de Cedrem Consultores (2014).

**Cuadro N°3.**

Imágenes satelitales Landsat usadas para evaluar cambios en la actividad de los SVAHT del área de estudio con los índices NDVI y WETNESS, periodo 1985-2019

Sensor	Características	Detalle bandas utilizadas	Fechas de análisis (mes-año)
LANDSAT 5, TM (Thematic Mapper)	Bandas Sensor	1 Azul: 0.45 – 0.52 $\mu\text{m}$	03-1985; 02-1986; 02-1987; 02-1988; 12-1989; 02-1990; 02-1991; 02-1992; 02-1993; 02-1994; 04-1995; 01-1996; 02-1997; 03-1998; 03-1999; 03-2000; 04-2001; 01-2002; 02-2003; 02-2004; 02-2005; 02-2006; 03-2007; 02-2008; 02-2009; 03-2010; 01-2011
		2 Verde: 0.52 – 0.60 $\mu\text{m}$	
		3 Rojo: 0.63–0.69 $\mu\text{m}$	
		4 NIR: 0.76–0.90 $\mu\text{m}$	
		SWIR 1: 1.55 – 1.75 $\mu\text{m}$	
		SWIR 2: 2.08 – 2.35 $\mu\text{m}$	
	Resolución espacial	Multiespectral: 30 mts	
LANDSAT 7, ETM+ (Enhanced Thematic Mapper)	Bandas Sensor	1 Azul: 0.45 – 0.52 $\mu\text{m}$	01-2012; 03-2013; 02- 2014; 01-2015; 01-2016; 03-2017; 02-2018; 02- 2019
		2 Verde: 0.52 – 0.60 $\mu\text{m}$	
		3: Rojo: 0.63–0.69 $\mu\text{m}$	
		4: NIR: 0.77–0.90 $\mu\text{m}$	
		SWIR 1: 1.55 – 1.75 $\mu\text{m}$	
		SWIR 2: 2.09 – 2.35 $\mu\text{m}$	
	Resolución espacial	Multiespectral: 30 mts	

Fuente: Adaptado de USGS (sf.).

## Metodología del estudio

El presente estudio se ejecutó en tres procesos principales, donde los dos primeros fueron validados con registros de terreno y el último es la evaluación temporal (Figura N°2):

I) *Caracterización de la flora y vegetación 2013-2015*, a partir de los registros de terreno en dicho periodo, donde se obtuvo la descripción del catastro florístico existente y de la vegetación, mediante la COT 2013-2015 en el área de estudio.

II) *Análisis comparativo florístico 1998-2015*, compilando los catastros existentes de la UNAP 1998-2011 y de Cedrem Consultores 2013-2015 (periodos sin dato de muestreo: 2002-2003 y 2010-2012), correspondientes a la estimación de cobertura de los taxa dominantes históricamente en el sector norte de la vertiente, según el área de monitoreo histórica de la UNAP (Figura N°3).

El cálculo de las coberturas por especie-campaña, se realizó según los registros por tipo de muestreo de los catastros existentes: II-I) Periodo 1999-2011, datos UNAP considerando la sumatoria de la abundancia relativa medida como porcentaje de cobertura por especie, en parcelas variables (1999-2001) y fijas (2004-2011) de 100m<sup>2</sup>. II-II) Periodo 2013-215, datos Cedrem Consultores considerando el valor central del rango de abundancia relativa de Braun Blanquet en transectas lineales fijas de 200 x 4m (800m<sup>2</sup>); en este caso, la cobertura por especie-campaña se obtiene mediante el promedio de las abundancias en todas las transectas.

Al final de este proceso, tras obtener la serie temporal de las coberturas, se estudió su evolución histórica en términos de composición y cobertura de la flora representativa (dominante) en los SVAHT del área de estudio.

III) *Análisis multitemporal de la vegetación 1985-2019 con imágenes satelitales e índices multi-espectrales (NDVI y WETNESS)*. Este proceso se subdividió en dos partes:

III-I) *Detección de cambios en la fisonomía de la vegetación* mediante la comparación multitemporal de la cartografía de la vegetación en las distintas fechas dentro del periodo estudio. Este análisis se ejecutó partiendo de la COT 2013-2015 validada *in situ*, seguidamente se obtuvieron respectivamente las capas en retrospectiva (2006, 2003, 1992 y 1985) y luego las actualizaciones posteriores (2019); esto último basado en el entrenamiento empírico de la asociación entre respuesta espectral y falso color con los tipos vegetales existentes en el salar. El método usado corresponde a clasificación supervisada o fotointerpretación, el cual sugiere alta precisión, no obstante la incertidumbre es difícil de estimar y depende proporcionalmente de la calidad de las imágenes, de la información de referencia, como del conocimiento y la certeza del especialista en el reconocimiento de los objetos (Thierry & Lowell, 2001).

Paso seguido, se evaluaron comparativamente las seis COT's utilizando la herramienta de SIG "Combinar" del software Arcgis 10.3 y obteniendo la matriz de confusión (Camacho et al., 2015) entre las fechas de estudio. Con estos datos, se tipificaron las transiciones de las formaciones vegetales según las superficies que abarcaron en el área de estudio.

III-II) *Evaluación de variaciones en la actividad de la vegetación*, para lo cual se extrajeron los valores desde cada imagen Landsat de los índices NDVI y WETNESS para el periodo de estudio 1985-2019 del interior de las unidades vegetales delimitadas, tomando como referencia la capa más reciente (COT 2019). Estos valores se agregaron mediante la estimación del valor promedio anual de cada índice y se observó la variación y tendencia interanual entre las fechas de interés dentro del periodo de estudio, con el fin de inferir sus implicancias en la biomasa del área de estudio.

## Resultados y Discusión

### *Flora y vegetación catastrada en terreno, periodo 2013-2015*

En el área de estudio los SVAHT son humedales representados por formaciones de Vegas y Pajonales Hídricos; también se registran cuerpos de agua formados por la vertiente y otros recubrimientos, conformados por vegetación muerta. Las Vegas (20,0 Ha) y formaciones azonales en estado muerto (56,0 Ha), abarcan la principal superficie, en conjunto 96% del área (Figura N°4 – COT 2013-2015).

Espacialmente se delimitaron 21 unidades cartográficas de vegetación en el área de estudio. El Pajonal Hídrico con dominancia de *Festuca rigescens* se distribuye circundante a la vertiente (4 unidades) y alrededor de éste, formaciones de Vega de *Carex maritima* (3 de 4 unidades en el área de estudio), las que están rodeadas por vegetación azonal muerta (7 unidades). Hacia el borde este, probablemente asociado a niveles freáticos más someros se posibilita la existencia de

formaciones de Vegas de *Deyeuxia curvula* (2 unidades) y *Xenophyllum incisum* (una unidad). Al norte del área, se registró una unidad de Vega de *C. maritima*, donde previamente se describieron cuerpos de agua dentro del área de estudio (Figura N°4 – COT 2013-2015).

La condición de la vegetación catastrada en el área de estudio, reflejó mejor estado de las formaciones alrededor de la vertiente (porcentaje inferior a 20% de cobertura de individuos muertos en las unidades de Vegas de *D. curvula* y de *C. maritima* y el Pajonal Hídrico con dominancia de *F. rigescens*). En contraparte, en cinco unidades de las vegas visitadas, se registraron en condición regular y las demás encontrándose un porcentaje mayor al 90% de cobertura de vegetación muerta o con cobertura vegetal inferior a 5% (Figura N°4, COT 2013-2015). Adicionalmente en terreno, se constató la aparición de ambientes ecotonales, dificultando la distinción de una formación respecto de otra (pajonal hídrico/vega), por la mezcla de las especies dominantes y principalmente por la variación de las coberturas en los individuos de *Festuca sp.* y *Deyeuxia curvula* con amplio registro de individuos muertos.

En cuanto a la flora vascular, la riqueza total registrada en el área de estudio es de 25 taxa (22 de origen nativo); de éstas una se identificó solo a nivel de género (*Viola sp.*). Además otros registros spp (3) fueron taxa descritos a nivel de género y cuyas especies están dentro de la riqueza catastrada. El principal registro, ocurrió durante las campañas de otoño (18 taxa), posterior a la época estival y con temperatura templada, lo que explica mayor actividad florística. La forma de crecimiento predominante es el herbáceo del tipo perenne (19 taxa), característico de formaciones de humedal con abastecimiento hídrico permanente. En las formaciones de Vega, se registraron 14 taxa, predominando el registro en otoño (10 taxa). En términos de su composición, las especies dominantes, (con mayor frecuencia relativa de 22 a 50%) son las herbáceas *Carex maritima*, *Deyeuxia curvula* y *Xenophyllum incisum*, las cuales tienen principalmente crecimiento rizomatoso; la cobertura vegetal registrada tiene rango desde escasa a clara (5% a 50%), mientras que la abundancia relativa de estas especies tiene rango mayoritario entre 5 a 25% de cobertura. Los Pajonales Hídricos, están compuestos por especies cespitosas con desarrollo de tallos aéreos con dominancia de *Festuca rigescens* y cobertura vegetal densa (75% a 90%); la riqueza registrada en estas formaciones fue de 19 especies, con mayores registros en otoño y verano (14 y 13 taxa, respectivamente). Adicional a las especies dominantes, otras especies frecuentes y con abundancia relativa entre 5 a 25% son *Phylloscirpus deserticola* y *Juncus stipulatus* (Apéndice N°1).

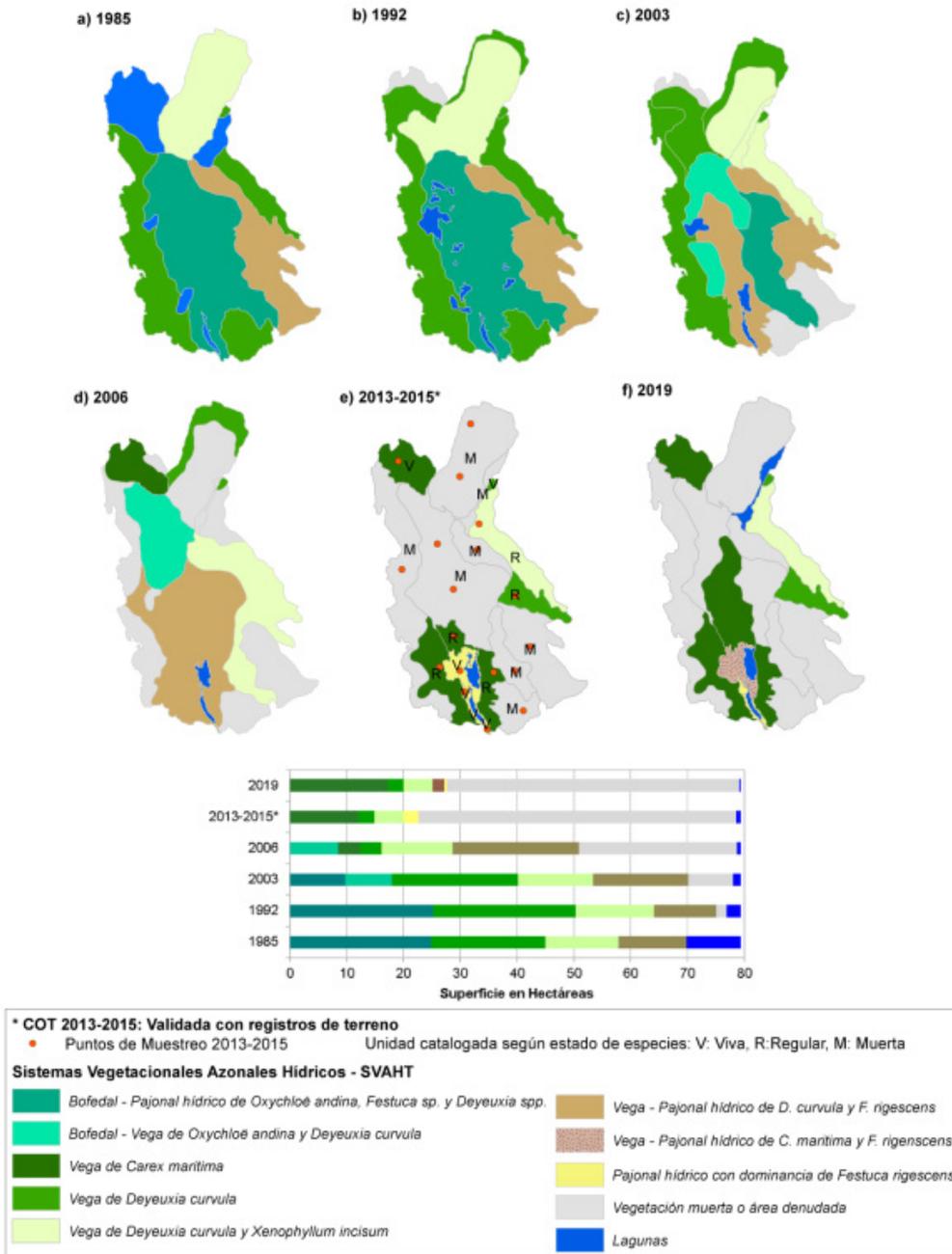
Los catastros de terreno dan muestra de un deterioro en la estructura y la cobertura de la vegetación en el área de estudio. Se registró una amplia superficie de formaciones azonales en estado muerto (56,0 Ha), sumado con la mayoría de vegas visitadas en condición regular y muertas o con cobertura vegetal inferior al 5%. Este registro, se explica por la sensibilidad de la cobertura vegetal en humedales, a la actividad humana y a procesos naturales como el cambio climático (Liang et al., 2020), los cuales estarían interviniendo el salar desde hace varias décadas.

Por otra parte, el sustento de la cobertura vegetal activa se encuentra restringido al sector circundante a la vertiente (con recarga artificial superficial desde 2005) y en los bordes norte y este por afloramientos y/o niveles freáticos más someros (Figura N° 4 – COT 2013-2015). Este registro, sugiere alta importancia de los procesos hidrológicos existentes en los humedales; ya que juegan un rol clave tanto en el desarrollo de la cobertura vegetal (Dai et al., 2016; Liang et al., 2020), como en la estructura comunitaria dado que cambios en las condiciones hidrológicas,

pueden alterar la dominancia/abundancia de especies (Ahumada & Faundez, 2009; Craine & Dyzinski, 2013).

**Figura N°4.**

Evolución espacio-temporal de los tipos de vegetaciones de los SVAHT en el área de estudio, periodo 1985-2019



Fuente: Elaboración propia en base a registros de terreno y análisis multiespectral con imágenes satelitales según antecedentes en Cedrem Consultores (2014).

## *Cambios de composición florística, periodo 1998-2015*

Para el periodo 1998-2015, se infieren cambios en la composición y cobertura de las especies dominantes en el sector noreste de la vertiente al interior del área de estudio (Figura N° 5):

Entre 1998-2001 la composición se mantuvo con dominancia de tres especies herbáceas perennes, las cuales en orden decreciente de cobertura corresponden a *Oxychloë andina* (típica de Bofedales con alto hidromorfismo), *Festuca* spp. (identificada como *F. hypsophila* en algunos meses del año 2000 y 2001) y se asoció al registro de *F. rigescens* identificado en los últimos años (característica de Pajonales Hídricos con menor nivel de hidromorfismo) y, *Deyeuxia curvula* (dominante en Vegas, con nivel intermedio de hidromorfismo entre las especies dominantes del sistema).

*O. andina* como especie característica de bofedales y su frecuente registro anterior al 2001, sugieren la existencia previa de formaciones mixtas de Bofedal - Pajonal Hídrico y Vega- Pajonal Hídrico con especies en cojín (*O. andina*) junto a gramíneas (*Festuca* sp. y *Deyeuxia* sp.), distribuidas de forma homogénea y con presencia de áreas inundadas al interior de ellas (Figura N°4 – COTs 1985 y 1992, muestran posible distribución de estas formaciones, apoyado por proceso de fotointerpretación y análisis multiespectral). Durante el periodo 1998-2001, se registra un amplio rango de variabilidad en la cobertura total entre 31% (agosto, 2000) y 115% (febrero 1998), posiblemente asociado a variaciones en el suministro hídrico, producto del régimen de precipitaciones y del bombeo existente desde 1993 en la cuenca del salar.

Desde el año 2000, disminuyeron los rangos de cobertura de la especie *O. andina*, registrando menos del 5% en agosto y diciembre de ese año, y en 2005 fue el último registro de esta especie de acuerdo con los antecedentes disponibles. Por lo mismo, el principal cambio en la composición de especies dominantes habría ocurrido al momento de inicio de la recarga hídrica del salar (año 2005), correspondiente al descenso-desaparición de *O. andina*, en conjunto con un marcado ascenso de la cobertura de *D. curvula* (promedio entre 1998-2000 de 12% a 41% entre 2004-2011). Este proceso sustenta la posible transición fisionómica de bofedal hacia formaciones de vegas dominadas principalmente por *D. curvula* con *Festuca* sp. de acompañante en el sector de estudio (Figura N°4 – COTs 2003 y 2006, presentan posible transición en estas formaciones, estableciendo una distribución heterogénea más parchosa respecto al histórico).

A partir de 2008, la cobertura vegetal registra una tendencia a la baja, principalmente desde julio 2009 (promedio de 75% entre 2004-2009 a 36% en 2009-2011), lo que en conjunto con la dominancia de especies con menor hidromorfismo (*D. curvula* y *Festuca* sp), indican una disminución en la productividad asociada al posible descenso en la disponibilidad hídrica, producto de la intensificación de las extracciones desde el salar y descensos en los montos de precipitación anual (Figura N°7A).

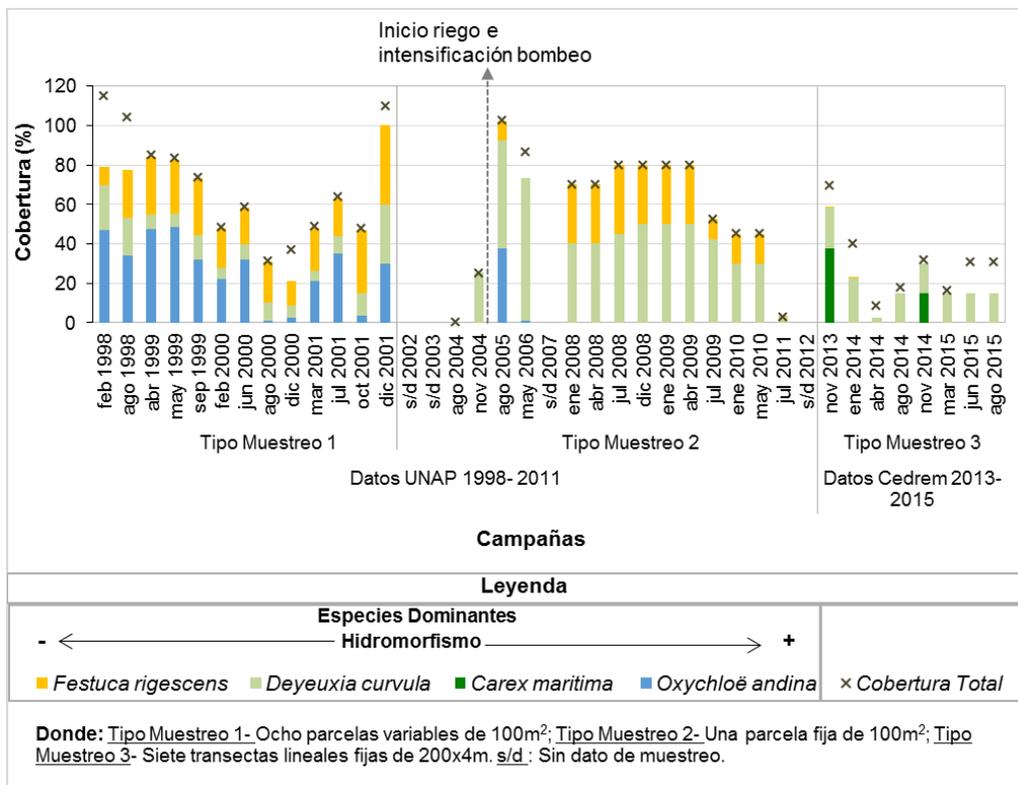
Entre 2013-2015 (datos de Cedrem), la cobertura total se mantiene en un rango bajo (promedio 31%, con excepción de ascenso en noviembre 2013). Las coberturas de las especies dominantes varían presentando mayor heterogeneidad (diferencia promedio de 10% entre coberturas total y de especies dominantes), con mayor presencia de *D. curvula* y *C. maritima*, las cuales conforman formaciones con fisionomía de vegas y unidades de vegetación muerta en el sector de estudio (En Figura N°4 – COT 2013-2015).

Para los años más recientes, el catastro de especies de fisionomía de vega con registro de mayor cobertura respecto al histórico (i.e. *C. maritima*) y en conjunto con el análisis multitemporal (sección 4.3), sugieren una reactivación parcial del sistema, la cual ocurre principalmente en el sector entorno a la vertiente. Este proceso está unido a un posible ascenso en el suministro hídrico durante el mismo periodo y por lo mismo, al aumento de la productividad (Figura N°7A), conduciendo al cambio de dominancia de *F. rigescens* de Pajonal Hídrico, hacia formaciones de mayor hidromorfismo de Vega y Vega - Pajonal Hídrico en el sector de estudio (Figura N°4 – COTs 2013-2015 y 2019, muestran la posible transición de estas formaciones, apoyado por proceso de fotointerpretación y análisis multiespectral hacia el periodo más reciente).

El mayor registro puntual de *C. maritima* (especie Ciperácea de mayor respuesta hidrófila en vegas; Ahumada & Faundez, 2009) en noviembre 2013 y 2014, ocurre seguido de episodios de altas precipitaciones (años 2011-2013 sobre el promedio anual de 137mm, Figura N°7A). Este comportamiento, sugiere una activación temporal del sistema asociada a la recarga producida por eventos de mayor aporte hídrico, lo cual continúa variando en el tiempo conduciendo entre otros, al descenso de cobertura de *C. maritima* (Figura N°5).

**Figura N° 5.**

Coberturas de las especies dominantes, según registros de terreno del periodo 1998-2015 en sector noreste de la vertiente al interior del área de estudio



Fuente: Elaborado según antecedentes 1998-2011 de la Universidad Arturo Prat- UNAP (MWH & Teck Quebrada Blanca, 2014) y registros 2013-2015 de Cedrem Consultores (2014).

En general, las distintas transiciones detectadas en la cobertura-dominancia de las especies en los SVAHT del área de estudio, se encuentran relacionadas con cambios en los procesos hidrológicos de suministro y recarga hídrica, existentes en el salar. Estos resultados coinciden con estudios antecedentes, los cuales sugieren una estrecha relación entre procesos de degradación ecológica de humedales con modificaciones en la disponibilidad hídrica (*i.e.* Craine & Dyzbinski, 2013; Dai et al., 2016; Shen et al., 2019; Liang et al., 2020).

## *Cambios multitemporales en la vegetación, periodo 1985-2019*

### a. Cambios fisionómicos

En el área de estudio se observan cambios tanto en el recubrimiento de suelo como en los tipos de formaciones vegetales presentes durante el periodo 1985-2019 (Figura N°3). En total se determinaron 64 tipos de cambios sucesionales del tipo de vegetación dominante en el área de estudio, los cuales han ocurrido en 94% del área (Se eligieron cambios >0,1Ha por la menor resolución de las imágenes Landsat utilizadas; Figura N°6):

La comparación 1985-1992, sugiere que previo al bombeo de agua (en 1993) existía una mayor cobertura vegetal y de fisionomía más estable y homogénea (coincidente con la variación del NDVI en los SVAHT, Figura N°7).

Durante el periodo 1992-2003, se estima que ocurrieron cambios fisionómicos en aproximadamente 46 Ha (58% del total), siendo el de mayor magnitud en términos de superficie, el reemplazo hacia formaciones de menor requerimiento hídrico permanente, desde una formación de Bofedal-Pajonal Hídrico ( $\approx$ 25 Ha) a Vega ( $\approx$ 9 Ha), Vega – Pajonal Hídrico ( $\approx$ 9 Ha) y Bofedal- Vega ( $\approx$ 7 Ha). Este cambio, se infiere principalmente por el descenso catastrado en la cobertura de la especie *O. andina* hacia el año 2000 (especie de bofedal) y la mantención-ascenso de las gramíneas *Festuca sp.* y *Deyeuxia spp.*, las cuales conforman formaciones de pajonales hídricos y vegas, respectivamente (Figura N°5).

En los siguientes periodos 2003-2006-2013/15, se calcularon los cambios más importantes en términos de superficie, primando el retroceso de la cobertura vegetal en las Vegas de *X. incisum* y *D. curvula* a vegetación muerta, principalmente en los márgenes del área de estudio ( $\approx$ 18 Ha; en Figura N°6 cambios con magnitud alta, códigos 1 y 4), y hacia el último periodo 2006- 2013/15, la misma transformación en formaciones de Vega – Pajonal Hídrico ( $\approx$ 14 Ha) y la desaparición de Bofedales – Vega ( $\approx$ 9 Ha). Asimismo, la posible aparición-expansión de Vegas de *C. maritima* en reemplazo de vegas dominadas por *D. curvula* ( $\approx$ 12 Ha).

Entre 20013/15 y 2019, se refleja recuperación parcial de la cobertura vegetal alrededor de la vertiente, por la ocupación de *C. maritima* en áreas descritas como vegetación muerta en 2013/15 ( $\approx$ 5 Ha) y Pajonales Hídricos de *F. rigescens* ( $\approx$ 2 Ha). Sin embargo, un aproximado de 50 Ha (63% del total) se conservaría en estado muerto.

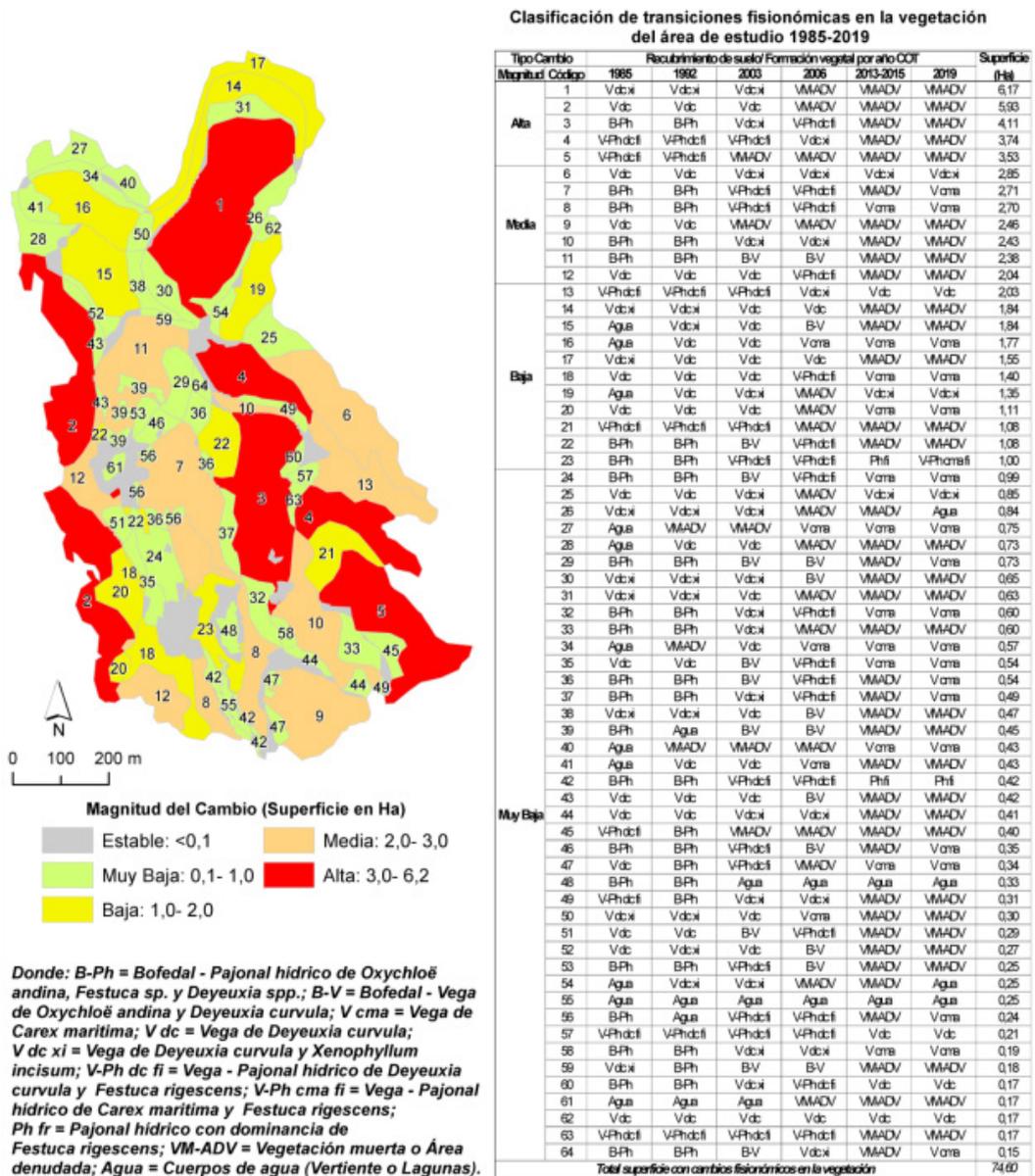
Para el periodo total analizado, destacan como cambios fisionómicos en el área de estudio: la desaparición temprana de formaciones más dependientes del suministro hídrico permanente, (correspondiente a los bofedales) y el aumento de la cobertura de vegetación muerta. Mientras

temporalmente, los menores cambios sucesionales se registran durante 1985-1992 y 2013/15-2019 (en ≈15 y 9 Ha, respectivamente) y existe una tendencia continua al descenso en los cuerpos de agua (vertiente y zonas de inundación someras) entre 1985-2019 de 9,6 a 2,1Ha, respectivamente.

Los cambios fisionómicos determinados principalmente de retroceso de la cubierta vegetal pueden asociarse con las variaciones existentes en el suministro hídrico producto del bombeo en

**Figura N°6.**

Cambios multitemporales de los SVAHT en el área de estudio: formaciones vegetales y otros recubrimientos, periodo 1985-2019



Fuente: Elaboración propia.

la cuenca del salar desde 1993. Ante una condición de humedad permanente en el sustrato, la vegetación presente es más hidromórfica (Ciperáceas y juncáceas) y los contenidos de materia orgánica son más altos; siendo esta vegetación la más sensible a disminuciones de aportes hídricos. A medida que el sistema se hace menos hidromórfico, la vegetación presente se manifiesta visualmente con menor cobertura y plantas de menor vigor, así como una mayor cantidad de rastrojo y un período de crecimiento más restringido (Ahumada & Faundez, 2009; MMA, SAG & DGA, 2011).

Los resultados obtenidos, muestran tanto que las fluctuaciones hidrológicas conducen a cambios fisionómicos de la cobertura vegetal; como que el efecto de éstas tiene distintos grados de influencia espacio-temporal sobre las diferentes formaciones vegetales del humedal (Liang et al., 2020), y por lo mismo, determinan en gran medida los tipos de transiciones detectadas en los SVAHT del área de estudio (Figura N°6).

#### b. Variación de la actividad vegetal según índices multiespectrales

Las áreas con mayor cobertura y actividad de la vegetación reflejan mayores valores del NDVI, basándose en la reflectancia diferencial de la clorofila (mayor en el Infrarrojo; Paruelo, 2008). El NDVI presenta amplia variación entre las formaciones vegetales del área de estudio, con rango del valor promedio entre 0,08 y 0,46 durante el periodo 1985-2019. La variación temporal de este índice registra una tendencia al descenso, reduciendo el valor promedio en el área de estudio de 0,35 en el primer periodo previo a las extracciones, a 0,13 en el último caso, posterior al 2005 donde inicia el riego de la vertiente y se intensifican las extracciones (Figura N°7-A).

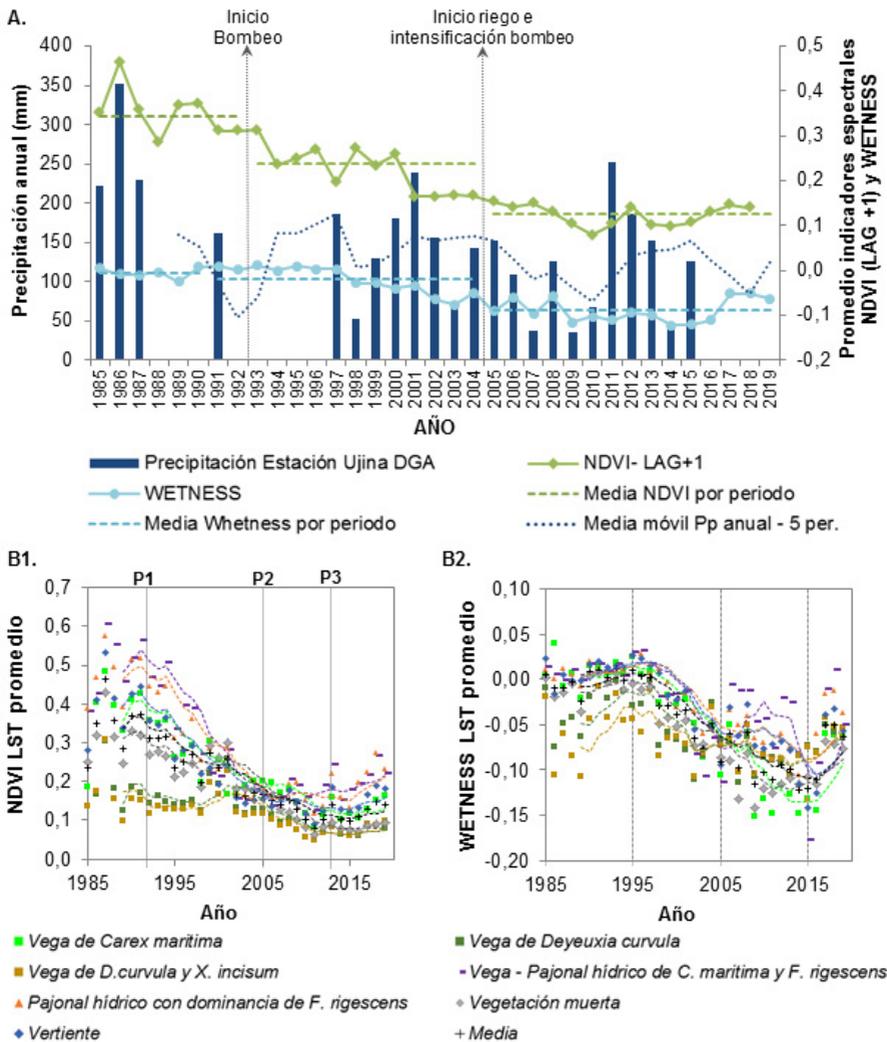
La respuesta multitemporal en los SVAHT entre 1985-2019, sugieren tres periodos de mayor variación del NDVI (Figura N°7-B1): el primer periodo (P1) corresponde al periodo de mayor descenso, coincidente con el inicio del bombeo desde el salar en 1993 y previo a la restitución de la vertiente en 2005. Durante este periodo, los descensos más importantes del NDVI ( $\approx$ -60%), sucedieron en lo que actualmente correspondería a formaciones de Vega - Pajonal Hídrico y Pajonal Hídrico. El siguiente periodo (P2), comprende entre 2005 con el inicio del riego e intensificación del bombeo desde el salar, hasta el año 2012 donde inicia una recuperación parcial del sistema. En P2, la principal baja del NDVI estuvo entre -40% y -55% en formaciones que en el presente conforman Vegas y vegetación muerta. El tercer periodo (P3) inicia en 2013, indicando un ascenso en la actividad principalmente en formaciones con dominancia de *C. maritima*, del orden de 10% (comparando el percentil 50% de variaciones anuales del NDVI entre 2013-2019). Este último periodo, además, se caracteriza por el aumento previo de las precipitaciones anuales entre 2011-2013 (Figura N°7-A) y de la humedad subsuperficial según el WETNESS desde 2017 (Figura N°7-B2).

La variación del NDVI en los SVAHT, se reflejó inicialmente con mayor descenso en formaciones circundantes a la vertiente (actualmente corresponden a Vega - Pajonal Hídrico y Pajonal Hídrico), explicado por el mayor recambio a especies dominantes de menor hidromorfismo (*O. andina* por *Festuca spp.*) lo que determinó el principal cambio fisionómico en reemplazo de formaciones de Bofedal - Pajonal Hídrico (Figura N°3 - COTs 1985-2006), junto con un descenso generalizado en la cobertura y el vigor de las plantas. Este resultado coincide con Ahumada & Faundez (2009), indicando que son precisamente las formaciones dependientes del suministro hídrico permanente (i.e. Bofedales) las más sensibles a disminuciones de aportes hídricos.

Hacia el periodo más reciente (2013-2019), el relativo ascenso de la actividad en los SVAHT, se refleja principalmente por la mayor cobertura y actividad en unidades dominadas por *C. maritima*

**Figura N°7.**

Variación temporal de la actividad vegetal y la humedad del suelo usando los índices multispectrales Landsat NDVI y WETNESS en los SVAHT, periodo 1985-2019: A) valores anuales promedio, incluida la precipitación total; B1 y B2) valores de índices multispectrales en los tipos de vegetación existentes en 2019



**Nota:** Los valores promedio de los índices espectrales NDVI y WETNESS se extrajeron desde la cartografía de vegetación – COT 2019, considerando una imagen satelital Landsat por año, capturada en el periodo estival (diciembre-abril).

En **B1** y **B2**, las curvas punteadas corresponden a la media móvil de 5 años.

En **B1** periodos de mayor variación del NDVI, donde **P1** = 1993, inicio bombeos desde el salar y mayor descenso del NDVI. **P2** = 2005, inicio del riego en la vertiente e intensificación del bombeo, continuidad de valor bajos del NDVI. **P3** = 2013, recuperación parcial de SVAHT con aumentos del NDVI.

alrededor de la vertiente. Este patrón coincide con ascensos en la productividad, detectados en humedales altoandinos hacia las décadas recientes por Chavez et al. (2019). Posiblemente esto se asocia con una tendencia regional de aumento de la precipitación (Segura et al., 2020), lo cual repercute en mayores recargas al acuífero (Chadwik et al., 2012). Además, localmente se han registrado variaciones en los caudales de bombeo con tendencia al descenso en algunos pozos (Arcadis, 2018b). Estos procesos en conjunto favorecen el ascenso de los niveles freáticos al sur del salar (Arcadis, 2018b) y el consecuente aumento del suministro hídrico para la actividad vegetal.

La amplia variación espaciotemporal del NDVI, se explica por la presencia de distintos tipos y subtipos de SVAHT y las sucesiones fisionómicas determinadas durante el periodo de estudio, producto de las variaciones existentes en el suministro hídrico (sección 4.3a). Estos resultados coinciden con los gradientes de variación determinados mediante análisis multiespectral en ecosistemas altoandinos por Moreau et al. (2003) y Otto et al. (2011).

En los SVAHT de estudio, la variación de la cobertura y actividad vegetal está relacionada con la condición de humedad subsuperficial (coeficiente correlación Pearson  $R^2=80,1\%$  y valor  $p=0,0$  significativo, entre promedios anuales del NDVI y WETNESS en el área de estudio). Esto supone que la tendencia al descenso del agua disponible en el suelo previo al 2013, según lo refleja el WETNESS (Figura N° 7-B2), tiene influencia principal en la baja de la actividad de los SVAHT en el área de estudio. Además, destaca que el WETNESS promedio se relaciona con la precipitación anual con  $R^2$  de 30,8% (valor  $p=0,19$ ; valores 1997-2015 en Figura N°7-A), por lo que variaciones pluviométricas intranuales y de los caudales de bombeo, pueden estar incidiendo en mayor medida sobre la determinación de los niveles freáticos y por ende en el suministro hídrico para sustento de la vegetación.

## Conclusiones

En el área de estudio durante 1985-2019, se infieren cambios multitemporales a nivel fisionómico en los SVAHT, constatados con variaciones en la composición y cobertura de las especies dominantes. El principal proceso sucesional ( $\approx 25$  hectáreas, 31% del total), correspondería al reemplazo de Bofedal- Pajonal Hídrico, pasando a Bofedal-Vega y Pajonal Hídrico, posteriormente a vegetación muerta y recientemente en parte a Vega, Pajonal Hídrico y Vega- Pajonal Hídrico. El NDVI valida una tendencia al descenso en la cobertura/actividad vegetal (-61% del valor promedio, 1985-2019), la cual es asimétrica entre las formaciones vegetales, siendo las unidades entorno a la vertiente las que presentan mayor variación (descenso previo 2013, seguido por una recuperación de  $\approx 10\%$ ).

La distribución y mantención de los SVAHT, se explica principalmente por el aporte hídrico. La variación de la productividad (NDVI), se relaciona ampliamente con la humedad del suelo (WETNESS) y éstas a su vez, presentan conexión parcial con la precipitación anual. En este sentido, la variabilidad climática intranual (*i.e.* precipitación, temperatura y evapotranspiración), y en los caudales de bombeo, estarían incidiendo mayormente el suministro hídrico para sustento de la actividad vegetal. Por lo tanto, estudiar a profundidad estas variables hidroclimáticas, representa un aporte en el análisis de causalidad para recomendaciones futuras.

El enfoque metodológico implementa el análisis multitemporal de imágenes satelitales con catastros de flora-vegetación en SIG. Los resultados permiten comprender el efecto y externalidades negativas producto de variaciones hídricas en humedales, para orientar medidas de gestión adecuadas en resguardo de estos ecosistemas prioritarios. Las estimaciones implican la incertidumbre generada por la extrapolación espacio-temporal y el sesgo por diferencias en la resolución de las imágenes usadas ( $\pm 0,1$  hectáreas). En contrapeso, el enfoque posee como ventaja la flexibilidad de aplicación en diversas escalas espacio-temporales. Adicionalmente, la libre disponibilidad de imágenes y software de procesamiento, facilita y promueve su implementación.

## Referencias bibliográficas

Ahmed, K.F. & Akter, S. *Analysis of landcover change in southwest Bengal delta due to floods by NDVI, NDWI and K-means cluster with landsat multi-spectral surface reflectance satellite data*. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2017, Vol. 8, p. 168-181.

Ahumada M., & Faundez, L. *Guía descriptiva de los sistemas vegetacionales azonales hídricos terrestres de la ecorregión altiplánica (SVAHT)*. Santiago de Chile: Editorial Ministerio de Agricultura de Chile, Servicio Agrícola y Ganadero, 2009.

Arcadis. Capítulo 5 - pertinencia de ingreso al SEIA y necesidad de elaborar un EIA. En Arcadis & COMPAÑÍA MINERA INES DE COLLAHUASI. Estudio de Impacto Ambiental "Desarrollo de infraestructura y mejoramiento de capacidad productiva de Collahuasi". Diciembre, 2018a. Disponible en internet: [https://seia.sea.gob.cl/archivos/2019/01/02/Capitulo\\_5.pdf](https://seia.sea.gob.cl/archivos/2019/01/02/Capitulo_5.pdf).

Arcadis. Capítulo 3.7 - hidrogeología. En Arcadis & COMPAÑÍA MINERA INES DE COLLAHUASI. Estudio de Impacto Ambiental "Desarrollo de infraestructura y mejoramiento de capacidad productiva de Collahuasi". Diciembre, 2018b. Disponible en internet: [https://seia.sea.gob.cl/archivos/2019/01/02/Capitulo\\_3\\_01\\_Medio\\_Fisico.part1.rar](https://seia.sea.gob.cl/archivos/2019/01/02/Capitulo_3_01_Medio_Fisico.part1.rar).

Camacho-Sanabria, J., Pérez, J., Pineda, B., Cadena, E., Bravo, L., & Sánchez, M. *Cambios de cobertura/uso del suelo en una porción de la Zona de Transición Mexicana de Montaña*. Madera bosques, 2015, Vol. 21, N° 1, p. 93-112.

Cedrem Consultores. *Análisis temporal de la vegetación 1986-2004, Salar de Michincha*. En MWH & COMPAÑÍA MINERA TECK QUEBRADA BLANCA. Estudio de impacto ambiental actualización proyecto minero Quebrada Blanca, 2014. Disponible en Internet: [https://seia.sea.gob.cl/archivos/Anexo\\_4\\_3-6.pdf](https://seia.sea.gob.cl/archivos/Anexo_4_3-6.pdf).

Centro de Ecología Aplicada, CEA. *Análisis de adaptación al cambio climático en humedales andinos. Resumen Ejecutivo del informe final del estudio*. Calama: Editorial Gobierno Regional de Antofagasta. 2017.

Centro de Información de Recursos Naturales. *Coberturas y Metadata Región de Tarapacá, Catastro vegetacional y uso del suelo*. Corporación Nacional Forestal, CONAF. 2016. Disponible en Internet: <http://sitha.ciren.cl/regiones/i-region-tarapaca/cobertura-i-region-tarapaca/>.

Chadwick, F., Uribe, J., Acosta, O., Delgado, J., Muñoz, J.F. Estimation of recharge by precipitation to the aquifers of Coposa and Minchincha Salar Basins. *Water in Mining 3rd International Congress on Water Management in the Mining Industry*, Santiago, Chile.

Chander, G., Markham, B.L. & Helder, D.L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+ and EO-1 ALI sensors. *J. Remote Sensing of Environment*, 2009, Vol 11, p. 893–903.

Chavez, J. *Image-Based Atmospheric Corrections, Revisited and Improved*. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1996, Vol. 62, No 9, p.1025-1036.

Chávez, R.O.; Duncan C. A.; Olea M.; Anderson, T.G. A Multiscale Productivity Assessment of High Andean Peatlands across the Chilean Altiplano Using 31 Years of Landsat Imagery. *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No 24, p. 2072-4292. <https://doi.org/10.3390/rs11242955>.

Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., & Böhner, J. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geosci. Model Dev.*, 2015, Vol. 8, No 7, 1991-2007.

Corporación Nacional Forestal, CONAF. Plan de acción para la conservación y uso sustentable de humedales Altoandinos. Santiago de Chile: Editorial Gobierno de Chile CONAF y Convención de Ramsar, 2006.

Craine, J.M. & Dybziński, R. Mechanisms of plant competition for nutrients, water and light. *Funct. Ecol.*, 2013, Vol. 27, No. 4, p. 833–840. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12081>.

Dai, X., Wan, R., Yang, G., Wang, X. & Xu, L. Responses of wetland vegetation in Poyang Lake, China to water level fluctuations. *Hydrobiologia*. 2016, Vol. 773, No. 1, p. 35–47. <https://doi.org/10.1007/s10750-016-2677-y>.

Etienne, M. & Prado, C. Descripción de la vegetación mediante la Carta de Ocupación de Tierras. Santiago de Chile: Publicaciones Misceláneas Ciencias Agrícolas N°10. Fac. Cs. Agrarias y Forestales, U. de Chile, 1982.

Haque, I. & Basak, R. Land cover change detection using GIS and remote sensing techniques: A spatio-temporal study on Tanguar Haor, Sunamganj, Bangladesh. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2017, Vol. 20, No 2, p. 251-263.

Henríquez, G. Antecedentes climáticos, I región de Tarapacá. En Centro de Información de Recursos Naturales CIREN, Caracterización de Humedales Altoandinos para una gestión sustentable de las actividades productivas del sector norte del país. Disponible en Internet: <http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/6803/CIREN-HUMED036.pdf>.

Liang, D., Lu, J., Chen, X., Liu, Ch. & Lin, J. An investigation of the hydrological influence on the distribution and transition of wetland cover in a complex lake–floodplain system using time-series

remote sensing and hydrodynamic simulation. *Journal of Hydrology*, 2020, Vol. 587, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125038>.

Mao D., Wang, Z., Luo, L., Ren, Ch. Integrating AVHRR and MODIS data to monitor NDVI changes and their relationships with climatic parameters in Northeast China, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, Vol. 18, p. 528-536.

Ministerio de Medio Ambiente MMA, Servicio Agrícola y Ganadero SAG & Dirección General de Agua DGA. Guía para la Conservación y Seguimiento Ambiental de Humedales Andinos, Santiago de Chile: Editorial Gobierno de Chile, 2011, 50p.

Moreau, S., Bosseno, R., Gu, X.F., Baret, F. Assessing the biomass dynamics of Andean bofedal and totora high-protein wetland grasses from NOAA/AVHRR. *J. Remote Sensing of Environment*, 2003, Vol. 85, p. 516-529.

MWH & Compañía Minera Teck Quebrada Blanca. Línea de base Ecosistemas. Estudio de impacto ambiental actualización proyecto minero Quebrada Blanca, 2014. Disponible en Internet: [https://seia.sea.gob.cl/archivos/-CAPO3\\_LB\\_O2\\_Ecosistemas.pdf](https://seia.sea.gob.cl/archivos/-CAPO3_LB_O2_Ecosistemas.pdf).

Otto M., Scherer D. & Richters J. Hydrology differentiation and spatial distribution of high altitude wetlands in a semi-arid Andean region derived from satellite data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, Vol. 15, p. 1713-1727.

Paruelo, J.M. La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas*, 2008, Vol. 17, No. 3, p. 4-22.

Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. & Deering, D.W., 1973, Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. 3rd ERTS Symposium, NASA SP-351, 1973, Vol. I, p. 309-317.

Schlumberger Water Services. Modelo hidrogeológico del sector Michincha y evaluación de efectos sobre las aguas subterráneas. En MWH & COMPAÑÍA MINERA TECK QUEBRADA BLANCA. Estudio de impacto ambiental actualización proyecto minero Quebrada Blanca, 2014. Disponible en Internet: <https://seia.sea.gob.cl/documentos/documento.php?idDocumento=2129640752>.

Segura, H., Espinoza, J.C., Garreaud, R. Vuille, M. Recent changes in the precipitation-driving processes over the southern tropical Andes/western Amazon. *J. Climate Dynamics*, 2020, In press. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05132-6>.

Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental, SEA. Guía para la descripción del área de influencia: Descripción de los componentes suelo, flora y fauna de ecosistemas terrestres en el SEIA. Editorial: Servicio de Evaluación Ambiental Disponible en Internet: [https://www.sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2016/02/08/guia\\_ecosistemas\\_terrestres.pdf](https://www.sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2016/02/08/guia_ecosistemas_terrestres.pdf).

Shen, G., Yang, X., Jin, Y., Xu, B. & Zhou, Q. Remote sensing and evaluation of the wetland ecological degradation process of the Zoige Plateau Wetland in China. *Ecological Indicators*, 2019, Vol. 104, Pages 48-58, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.04.063>.

Thierry, B. & Lowel, K. An Uncertainty-Based Method of Photointerpretation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2001, Vol. 67, No 1, p. 65-72.

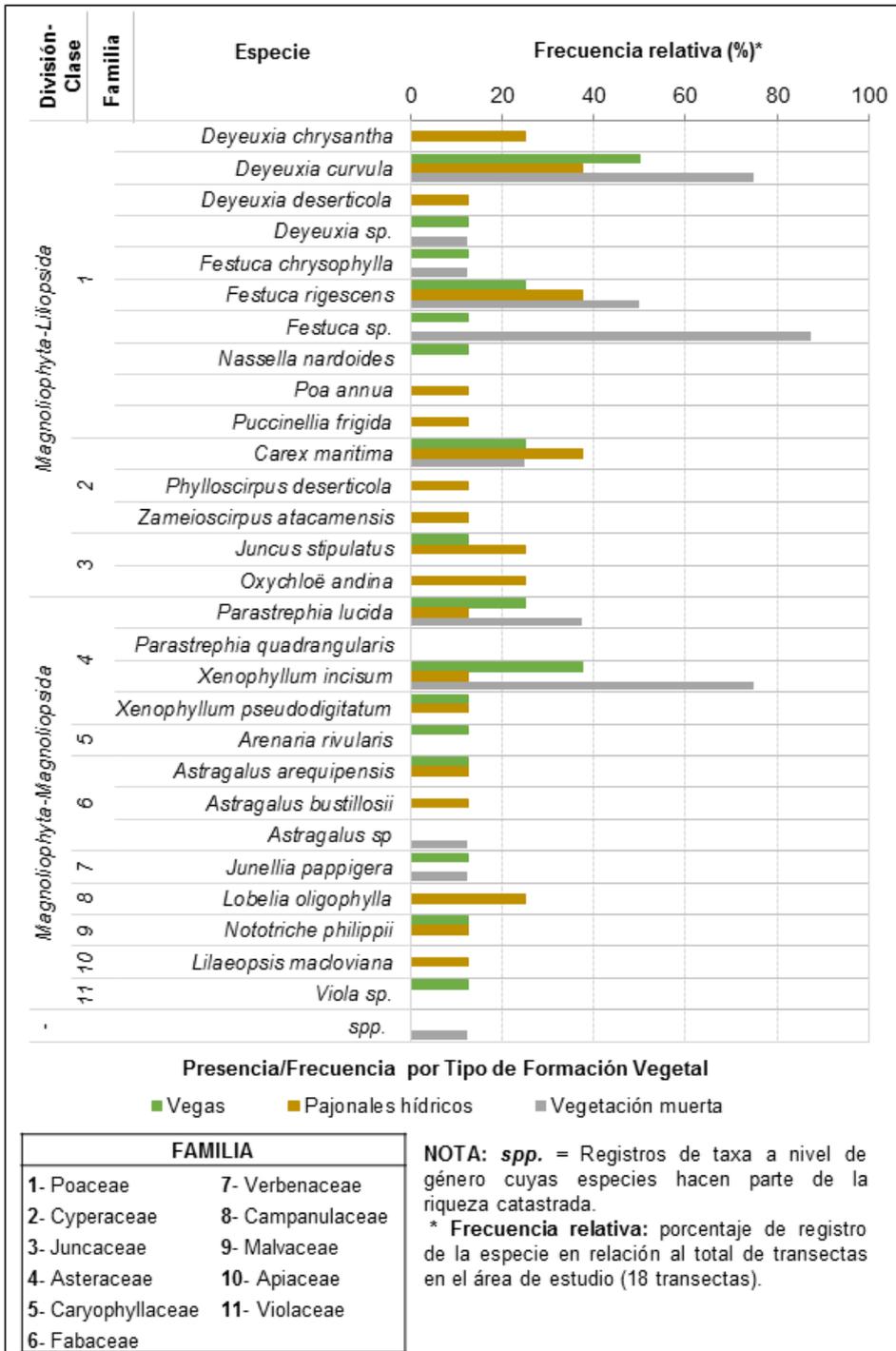
U.S. Geological Survey, USGS. Landsat Satellite Missions. Disponible en Internet: <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-satellite-missions>.

Valencia, P. & Figueroa, A. Vulnerabilidad de humedales altoandinos ante procesos de cambio: tendencias del análisis. *Revista Ingenierías*, 2014, Vol. 14, No. 26, p. 29-42.

Wang, K. & Zhu, Y. Recognition of water bodies from remotely sensed imagery by using neural network. University Of Nebraska-Lincoln, CSE873 Computer Vision, 2010.

**Apéndice N° 1.**

Listado taxonómico de flora vascular y frecuencia relativa por formación vegetal de especies registradas en campañas de terreno en el área de estudio, periodo 2013-2015.



Fuente: Elaboración propia en base a registros Cedrem Consultores (2014).