

INTERNATIONAL COURT OF JUSTICE

DISPUTE OVER THE STATUS AND USE OF THE
WATERS OF THE SILALA

(CHILE v. BOLIVIA)

REPLY OF THE
REPUBLIC OF CHILE

ANNEXES 92 - 99 TO THE REPLY

VOLUME 2 OF 3

15 FEBRUARY 2019

**LIST OF ANNEXES TO THE REPLY
OF THE REPUBLIC OF CHILE**

VOLUME 2

ANNEXES 92 - 99

ANNEX N°	TITLE	PAGE N°
Annex 92	Letter from the General Manager of FCAB in Chile to the Secretary of the Board of Directors of FCAB, 7 April 1916 (Original in English)	1
Annex 93	Letter from the General Manager of FCAB in Chile to the Secretary of the Board of Directors of FCAB, 8 September 1916 (Original in English)	7
Annex 94	Bolivian Geology and Mining Survey (SERGEOMIN), <i>Study on Hydrographic Basins, Silala Springs Basin, Basin 20</i> , June 2003 (Original in Spanish, English translation)	13
Annex 95	National Report on the Implementation of the Ramsar Convention on Wetlands Submitted by the Plurinational State of Bolivia to the 12th Meeting of the Conference of the Contracting Parties, 2 January 2015 (Original in Spanish, English translation)	85

ANNEX N°	TITLE	PAGE N°
Annex 96	Ministry of the Environment and Water of Bolivia, <i>Characterization of Water Resources in the Southwest of the Department of Potosí – Municipality of San Pablo de Lipez “Wetlands of Silala Valley and Adjacent Sectors”</i> (Volume II), July 2016 (Original in Spanish, English translation)	113
Annex 97	Note N° VRE-Cs-58/2016 from the Ministry of Foreign Affairs of Bolivia to the Senior Advisor for the Americas of the Ramsar Convention Secretariat, 27 July 2016 (Original in Spanish, English translation)	187
Annex 98	Ana Paola Castel, <i>Multi-Temporal Analysis through Satellite Images of the High Andean Wetlands (bofedales) of the Silala Springs, Potosí – Bolivia</i> , September 2017 (Original in Spanish, English translation)	193
Annex 99	99.1 Note from the Agent of the Republic of Chile to the Agent of the Plurinational State of Bolivia, 5 November 2018 (Original in English)	293
	99.2 Note from the Agent of the Plurinational State of Bolivia to the Agent of the Republic of Chile, 22 November 2018 (Original in English)	296
	99.3 Note from the Agent of the Republic of Chile to the Agent of the Plurinational State of Bolivia, 30 November 2018 (Original in English)	297

ANNEX N°	TITLE	PAGE N°
99.4	Note from the Agent of the Plurinational State of Bolivia to the Agent of the Republic of Chile, 11 December 2018 (Original in English)	299
99.5	Note from the Agent of the Republic of Chile to the Agent of the Plurinational State of Bolivia, 21 December 2018 (Original in English)	302
99.6	Note from the Agent of the Plurinational State of Bolivia to the Agent of the Republic of Chile, 11 January 2019 (Original in English)	306
99.7	Note from the Agent of the Plurinational State of Bolivia to the Agent of the Republic of Chile, 7 February 2019 (Original in English)	307

Annex 92

Letter from the General Manager of FCAB in Chile
to the Secretary of the Board of Directors of FCAB,
7 April 1916

(Original in English)

Ferro-Carril de Antofagasta a Bolivia

130

Oficina del Administrador General

Antofagasta, April 7th 1916.

Por favor citar PRIVATE OFFICIAL.

ci6n Telegr6fica
"ROMISSORY"
C. Ed. 5.a
& McCUTCHEON'S N.º 1

A. W. Bolden, Esq.
1 Broad Street Place.,
LONDON E.C.

Recd
11 MAY 1916
Ans!

Dear Sir,

We have before us your private and official letters of the 11th (two) and 25th February, for which we beg to thank you.

STORES STOCKTAKING: The duplicate of your letter of February 11th on this subject, which arrived here the same date as the original, was immediately forwarded to the Accountant, who is at present in Bolivia, for his attention.

118
141

STANDING ORDERS NO.42: Staff Accountant's Dept: We have to thank you for the Directors' approval of an increase in the salary of Mr. Brandon, but you will have learnt from previous advices that this gentleman had left the service in order to volunteer.

34
143

LOCOMOTIVE SUPERINTENDENT: We beg to refer you to our letter of February 25th to which for the moment we have nothing to add.

MEDICAL DEPARTMENT: Dr.G.W.Young: We are certainly of the opinion that Dr. Young is entitled to six months leave of absence after

104

131

A.W.B.

- 2 -

P. and O.

practically four years' service, and therefore cabled you on the 4th instant "Young yes", indicating our wish that he be paid the equivalent of full salary for that period. It is, however, to be clearly understood that such time as he is absent from the Company's service will not be deducted from the period of his contract with us, and that he will return after the War to take up his duties on exactly the same terms as when he left.

MEJILLONES MOLE: Having now given us some explicit instructions as to how you wish this matter dealt with we shall be in a position to make our proposals and enter into negotiations, which we will do at an opportune moment. In the meantime you will have noted from the correspondence exchanged with Señor Garcia de la Huerta that we propose to present a "solicitud" requesting that we be given an extension of time for executing this work. If our request is not granted we will then start negotiations.

STAFF: Waterworks Dept: We have to thank you for having obtained the Board's approval to my recommendation that the salary of Mr. R. H. Fox be increased from £550. to £600. per annum as from the 1st January last.

With regard to Mr. Blakey, you will have seen from previous advices that he resigned owing to the delicate state of his wife's health.

137

A.W.B.

- 3 -

P. and O.

WATER: Third Pipe Line to Nitrate District; Doubling of

Siloli Main: We note that the Directors have definitely decided that it would be absolutely impossible to consider the laying of a third main and double the existing one from the Siloli springs, owing to the inability to raise the necessary capital. We will, however, continue to do our best under exceedingly difficult conditions, which will be aggravated if the Chile Exploration Company increase their units and ask us to supply them with 2000 tons of water per day.

$$\frac{116}{151}$$

LAND CONCESSIONS: We would draw your special attention to a very interesting private letter just received from Señor Garcia de la Huerta, which is a very pointed indication of the new President's views of the absolute necessity of raising funds at the expense of Foreign Companies.

$$\frac{0}{241}$$

PENON NITRATE GROUNDS: We advised you as far back as July 1911 that Messrs. Gibbs and Company had purchased one third of these grounds which their representative called and informed me yesterday that they had given an option on to an American Syndicate until next August. The said Syndicate is represented by a Mr. Adams who has taken up his residence in Antofagasta. Whether the deal will be brought off remains to be seen. In the meantime they are spending anything up to £25,000. in making a "cateo" of the grounds. This is a further indication of American capital being invested in Chile, and I should be obliged if you would please let

$$\frac{103}{241}$$

135

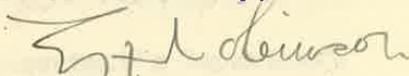
A.W.B.

- 4 -

P. and O.

me know what the Board's views are with regard to financing the continuation of the Remiendos No.2 branch to the Peñon grounds. We may have difficulty in obtaining the Government's permission to the approval of our modified route to tap this district which you will remember they once refused, although our concession still holds good. Messrs. Gibbs and Company are naturally interested in obtaining, if possible, the shipping at Mejillones. We are going into figures as to the capital required, freights, etc.

Yours faithfully,



GENERAL MANAGER.

Enclosure:-

✓ Copy of private correspondence exchanged with Señor Garcia de la Huerta.

File

Annex 93

Letter from the General Manager of FCAB in Chile
to the Secretary of the Board of Directors of FCAB,
8 September 1916

(Original in English)

Ferro-Carril de Antofagasta a Bolivia ³¹¹

Dirección Telefónica
"PROMISSORY"

Oficina del Administrador General

A. B. C. Ed. 5.
REING & McCUTCHEON'S N.º 1

Antofagasta, September 8th 1916.

Recd
12 OCT. 1916
Absd

Private and
OFFICIAL.

A. W. Bolden, Esq.,
Secretary, 1 Broad Street Place,
LONDON, E.C.

Dear Sir,

I last addressed you privately on August 11th, and have the pleasure to acknowledge the receipt of your favours of June 29th, and July 13th and 27th.

STORES STOCKTAKING. We have taken careful note of your observations which have been transcribed to the Accountant for his information and guidance. 284
339

STAFF: LOCOMOTIVE SUPERINTENDENT. I have notified Mr. Mayne that the Directors have approved of his appointment as Locomotive Superintendent of the Chilean Section. I certainly consider, however, that he is entitled to an increase in salary, as taking into consideration the small amount of rolling stock in Bolivia and the fact that the Workshops in Mejillones are directly under the supervision of the Locomotive Superintendent of this section, no comparison can be made between the work and responsibilities attaching to the respective positions. 295
314

312

A.W.B.

- 2 -

P.& O.

ACCOUNTANT'S VISIT TO BOLIVIA. We beg to inform you that we sent a copy of Mr. Hunt's report to the Acting General Manager of the Bolivian Section at the same time one was forwarded to your goodself. 17

I enclose herewith a letter from Mr. Hunt in acknowledgment of the bonus granted to him by the Directors.

HOUSE RENT: VALPARAISO AGENT. The suggestion was a spontaneous one from the writer. Taking into consideration the extent to which our expenses in Valparaiso have been reduced, the very excellent results which have been obtained since Mr. Loveday has been acting as our Agent, and the keen interest he takes in matters relating to the business connections of the Railway, I felt quite justified in recommending that his house-rent be paid by the Company, particularly in view of the increased cost of living on the Coast during the past year or two, as also Mr. Loveday's special wish that I should make his house my headquarters when in the South. 306
318

Mr. Loveday invariably asks my permission before undertaking any private business which, although very limited, might, were he given a free hand, be very materially increased. Other Companies - particularly the Arauco Company - would, I have no doubt, be very pleased to avail themselves of his very excellent services.

CHILE EXPLORATION COMPANY. I have been informed that drastic changes have been made in connection with the Officials of the Chile Exploration Company. There has evidently been trouble in New York amongst 275
333

313

A.W.B.

- 3 -

P. & O.

the financial group governing this business, with the result that Mr. Yeatman retired, whilst a new Engineer is being sent out to undertake all the constructional work independently of the General Manager.

We also understand that the group represented by Messrs. Potter and Wagner, the latter of whom is resident in Santiago, supersede Mr. Yeatman and presumably one of the Guggenheims.

The changes will not, I am afraid, improve our relations with the Chile Exploration Company, and I fear that we shall find Mr. Wagner an exceptionally difficult gentleman to deal with.

Mr. Hellmann returned with his contract renewed for three years, but we now hear that he is leaving next month to replace Mr. Yeatman.

THIRD PIPE LINE TO NITRATE DISTRICT: SECOND SILOLI MAIN. With reference to your remarks under this heading, it was always our intention that an additional main should be laid from San Pedro to the Siloli Springs in conjunction with the Third Pipe Line from our intakes at San Pedro to the Nitrate Zone; but in view of the complex situation created by the European War there is every possibility of our having to modify our scheme and be in a position to supply from San Pedro up to 2,000 tons of potable/water to the Chile Exploration Company. "Siloli". To enable us to do this it will be essential, as indicated in my previous letter, to lay a second pipe line from San Pedro to Siloli and deliver from our reservoirs such quantity of water as may be required by the American Company for their establishment at Chuquicamata.

314

A.W.B.

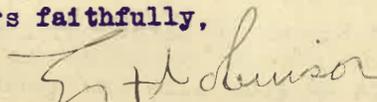
- 4 -

P. & O.

In my earlier communication I laid stress on our desire that these people should not be allowed to infringe on our rights, nor to participate in the water business which has for such a long time been in our hands; and to enable us to forestall any such move it may be an absolute necessity for us to construct a second pipe line to Siloli.

In connection with this matter I should mention that the Chile Exploration Company have a concession from Toconce, situated about 90 kilometres from Chuquicamata, but as the supply is limited to 1,000 tons per day it would undoubtedly suit them to obtain all the drinking water they require from the Railway, to be delivered into their main at San Pedro.

Yours faithfully,



GENERAL MANAGER.

P.S. LOCOMOTIVE SUPERINTENDENT. I beg to enclose herewith a letter from Mr. Mayne acknowledging my advice that the Directors had approved of his appointment as Locomotive Superintendent of the Chilian Section.

Enclosures. (1) Letter from Accountant.
 ----- (2) Letter from Locomotive Superintendent.

} Staff

311
315

Annex 94

Bolivian Geology and Mining Survey (SERGEOMIN),
Study on Hydrographic Basins, Silala Springs Basin,
Basin 20, June 2003

(Original in Spanish, English translation)

SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA Y RECURSOS MINERALES
PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL



ESTUDIO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS
CUENCA MANANTIALES DEL SILALA
CUENCA 20

PROVINCIA SUD LÍPEZ
DEPARTAMENTO DE POTOSÍ

Junio 2000 - 2001

Edición final
La Paz, Bolivia
Junio, 2003



PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

Cuenca No. 20

Estudio de la Geología, Hidrología, Hidrogeología
Y Medio Ambiente del Area de los Manantiales del Silala

Provincia Sur Lipez
Departamento de Potosí

Elaborado por:

Dr. Ing. Fernando Urquidi Barrau, Coordinador

Ing. Rodolfo Huaranca Olivera
Ing. Manuel Menacho León
Ing. Roberto Salgado Urquidi
Ing. Waldir Soruco Rodríguez
Ing. Julio Torrez Navarro
Ing. Alejandro Vargas Castillo, Asistente Coordinación
Ing. Egr. Nelson Huaranca Olivera
Ing. Egr. René Ramos Colque
Ing. Egr. Grover Salamanca Gutiérrez

Ing. Marcelo Claire Zapata, Director Ejecutivo de SERGEOMIN
Dr. Jaime Argollo, Consultor Externo
Ing. Joost Reidel, Consultor Externo

Dig. Carlos Huanca Fernández
Dig. Alejandro Ayarde Ontiveros
Dig. Jhonny Cano Guarachi

La Paz, Bolivia
Junio - 2001

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

LISTA DE CONTENIDO

	Página
1 INTRODUCCIÓN	7
1.1 Ubicación y Accesibilidad.....	7
1.2 Objetivo.....	7
1.3 Características Generales.....	7
2. GEOLOGIA REGIONAL	10
2.1 Actividad Volcánica.....	10
2.1.1 Ignimbritas Silala.....	11
2.2.2 Domos Volcánicos.....	11
2.2.3 Estrato Volcanes.....	14
2.3 Depósitos Cuaternarios y Recientes.....	14
2.3.1 Actividad Glacial.....	14
2.3.2 Procesos Coluviales.....	15
2.3.3 Actividad Aluvial.....	15
2.4 Rasgos Geomorfológicos.....	16
3. GEOLOGÍA SUPERFICIAL DE LAS QUEBRADAS DEL AREA DE LOS MANANTIALES DE SILALA	18
3.1 Formación de las Quebradas de Silala.....	18
3.2 Quebradas en Formación Por Procesos de Intemperismo.....	19
3.3 Suelos en las Quebradas de Silala.....	19
4. HIDROLOGIA	21
4.1 Precipitación.....	21
4.2 Temperatura.....	21
4.3 Evaporación.....	21
4.4 Aforo de Caudales.....	22
5. HIDROGEOLOGÍA	25
5.1 Aguas Superficiales.....	25
5.2 Inventario de Fuentes de Aguas Subterráneas.....	25
5.2.1 Canal Sur – Bofedal Sur u Oriental.....	27
5.2.2 Canal Sur – Segundo Bofedal.....	27
5.2.3 Canal Sur – Tercer Bofedal.....	27
5.2.4 Canal Norte – Bofedal Norte o Cajones.....	29
5.3 Acuífero de Silala.....	29
5.3.1 Caracterización del Acuífero.....	29
5.3.2 Niveles Piezométricos.....	34
5.3.3 Recarga.....	34
5.3.4 Descarga.....	35
6. HIDROQUÍMICA DE LAS AGUAS SUPERFICIALES	37
6.1 Muestreo de Aguas.....	37
6.2 Clasificación del Tipo de Agua.....	37
6.3 Edad del Agua.....	40
7. OBRAS HIDRAULICAS	54
7.1 Canal Sur.....	54
7.2 Canal Norte.....	54
7.3 Canal Principal.....	54

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

7.4	Desarenador.....	57
7.5	Pozos Piezométricos.....	57
8.	ASPECTOS MEDIO AMBIENTALES	58
8.1	Introducción	58
8.2	Agua Superficial	58
8.3	Aguas Subterráneas.....	58
8.4	Suelos.....	59
8.5	Flora.....	59
8.6	Fauna.....	60
8.7	Paisaje	61
8.8	Recursos Históricos y Arqueológicos	61
8.9	Recursos Humanos.....	61
9.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	63
9.1	Geología Regional.....	63
9.2	Geología de la Quebrada de Silala	63
9.3	Suelos en la Quebrada de Silala.....	64
9.4	Hidrología e Hidrogeología.....	64
9.5	Medio Ambiente.....	65

TABLAS

Tabla No. 2.1	Columna Estratigráfica del Area de Estudio
Tabla No. 4.1	Aforo de Caudales en los Canales de Silala
Tabla No. 5.1	Localización de los Manantiales y Datos Físico-Químicos
Tabla No. 5.2	Inventario de Pozos Piezométricos
Tabla No. 6.1	Ubicación de los Sitios de Muestreo de Aguas
Tabla No. 6.2	Composición Química de las Aguas de Silala
Tabla No. 6.3	Ubicación de Muestras de Agua Subterránea para Análisis de Tritio

FIGURAS Y FOTOGRAFÍAS

Figura No. 1.1	Ubicación del Area de Estudio
Figura No. 4.1	Histograma de Precipitación Media Mensual
Figura No. 4.2	Histograma de Temperatura Media Mensual
Figura No. 4.3	Histograma de Evaporación Media Mensual
Figura No. 5.1	Localización de Sitios de Aforo
Figura No. 5.2	Inventario de Manantiales y Pozos Piezométricos
Figura No. 5.3	Localización de Sitios de Muestreo de Aguas
Figura No. 6.1	Diagrama de Piper
Figura No. 6.2	Diagrama de Wilcox
Figura No. 6.3	Diagrama de Schoeller
Figuras Nos. 6.4 a 6.14	Diagramas de Stiff

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

- Fotografía 1 Vista panorámica del área de estudio, mirando al Sur (Bolivia) al Oeste Chile
- Fotografía 2 Contacto geológico entre el manto ignimbrítico y lavas, al centro panorama del bofedal del Canal Sur
- Fotografía 3 Volcán Inacaliri vista al Noroeste con sus flujos de lavas andecíticas. A la derecha el Cerro Negro
- Fotografía 4 Cobertura cuaternaria en el Canal Su, vista hacia el Este
- Fotografía 5 Quebrada en formación por procesos de intemperismo.
- Fotografía 6 Vertientes que afloran en la toma del Canal Sur
- Fotografía 7 Pozo piezométrico en el Canal Norte del área de Silala, al fondo se observa el manto ignimbrítico que delimitan el bofedal.
- Fotografía 8 Bofedales con ojos de agua delimitado por el manto ignimbrítico.
- Fotografía 9 Manantial que aflora en el Canal Norte (canal secundario de aducción), al fondo el manto ignimbrítico.
- Fotografía 10 Vista panorámica del Canal Sur, al fondo se observa la formación de bofedales.
- Fotografía 11 Canal Norte, principal colector.
- Fotografía 12 Canal Principal con vista al desarenador.
- Fotografía 13 Obra hidráulica construida para para el tratamiento físico del agua (decantador y desarenador).

SEPARATAS

MAPAS

- Mapa No. 1 Mapa Geológico Regional – Escala 1:50,000
- Mapa No. 2 Mapa Geológico con la Ubicación de los Manantiales de Silala y Ubicación de Muestras de Suelos – Escala 1:5,000
- Mapa No. 3 Mapa Hidrogeológico del Area de Silala – Escala 1:10,000

IMÁGENES SATELITALES

- Imágen Satelital 1 Area de Silala
- Imágen Satelital 2 Imágen Landsat Area de Silala – Escala 1:50,000
- Imágen Satelital 3 Imágen Spot Area de Silala – Escala 1:50,000

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL



PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

**ESTUDIO DE LA GEOLOGÍA, HIDROLOGIA,
HIDROGEOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE
DEL AREA DE LOS MANANTIALES DE SILALA****1 INTRODUCCIÓN**

1.1 Ubicación y Accesibilidad

El área de estudio de los Manantiales de Silala se encuentra ubicada en el Cantón Quetena, Provincia Sur Lípez del Departamento de Potosí. Geográficamente esta localizada en la Cordillera Occidental de los Andes Centrales, delimitada entre los paralelos 21°58' y 22°04' de latitud sur y 67°57' y 68°05' de longitud oeste (Figura No. 1.1). Al oeste limita con la frontera internacional con la República de Chile, pasando por los Hitos LXXIII, LXXIV y LXXV.

El área tiene fácil accesibilidad desde la población de Laguna Colorada (38 kilómetros al sur) por medio de dos caminos secundarios permanentes de tierra. El camino La Paz-Uyuni-Laguna Colorada tiene una distancia aproximada de 950 Km, y es transitable durante casi todo el año, con excepciones muy limitadas durante la época de lluvias.

1.2 Objetivo

El objetivo del presente trabajo es conocer la evolución geológica, hidrológica e hidrogeológica del área de estudio de Silala que abarca una extensión aproximada de 150 Km². Con un detalle en la formación y evolución de las Quebradas de Silala, del área de drenaje de Silala de 79 Km² y de la caracterización de las aguas de los manantiales que afloran en la misma.

El presente trabajo es componente y parte integrante del Proyecto de Integración Regional (PIR) del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERGEOMIN) por encargo del Ministerio de Desarrollo Económico y del Ministerio de Relaciones Exteriores y Culto.

1.3 Características Generales

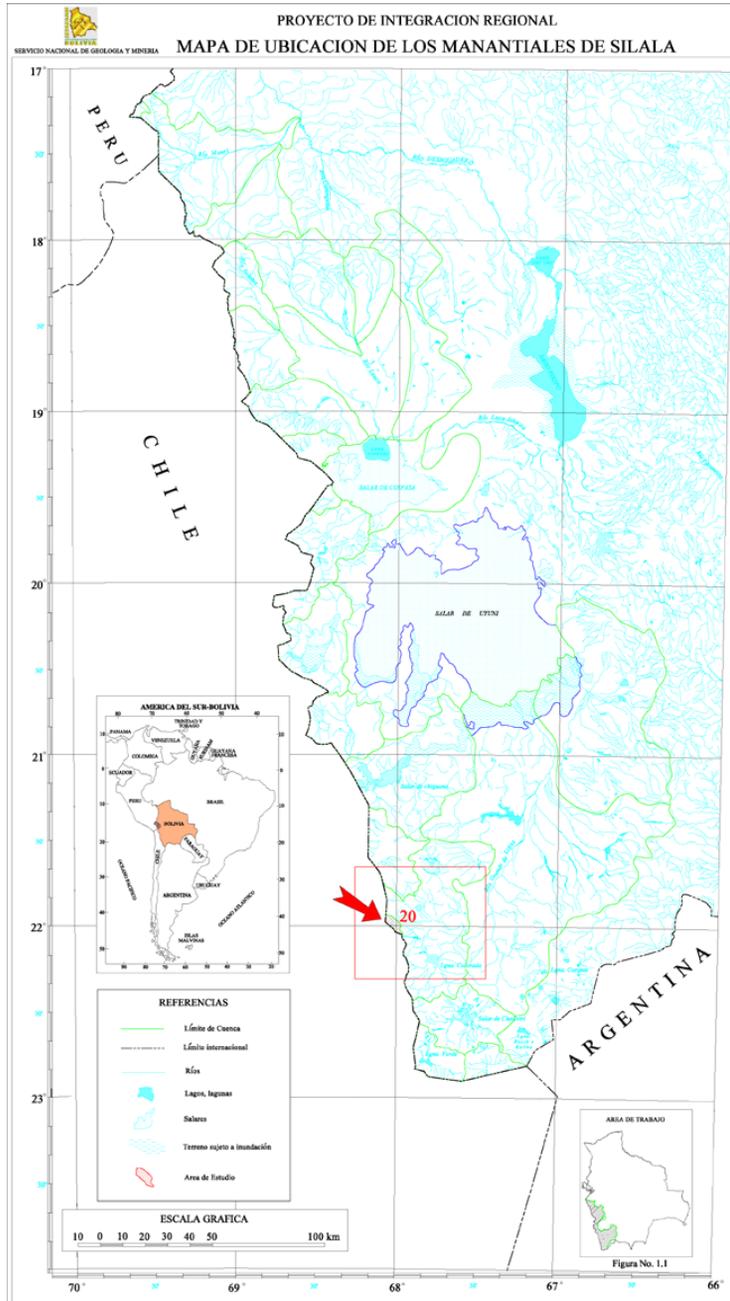
El área de estudio se caracteriza por tener una topografía plana-ondulada, ligeramente inclinada hacia el oeste rodeada de domos y estratovolcanes (Fotografía No. 1). Las altitudes dentro del área varían desde los 4278 metros sobre el nivel del mar (msnm), en el límite fronterizo que cruza en la Quebrada Principal de Silala, hasta los 5701 msnm, cumbre del Volcán Silala (Imagen Satelital 1).

Tiene un clima típico de una zona desértica de alta montaña con variaciones extremas diurnas y nocturnas. La flora y la fauna es muy limitada y característica de la Cordillera Occidental y Altiplano Boliviano. Los bofedales de alta altura de Silala tienen una flora y fauna típica de los

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

mismos. Es una región deshabitada con la población más cercana de Laguna Colorada (22 habitantes) ubicada a 38 Km al SE del área de estudio.

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL



PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

2. GEOLOGIA REGIONAL

El área de los Manantiales de Silala se halla localizada en el bloque sur de la Cordillera Occidental y forma parte de la Zona Volcánica Central de los Andes. La geología regional está dominada por los productos de una actividad volcánica del Mioceno al Reciente y el paisaje fue modelado por procesos resultantes de las glaciaciones Pleistocénicas-Holocénicas. El Mapa No. 1 muestra el mapeo geológico realizado en el área en una escala 1:50,000 y la Tabla No. 2.1 el detalle de la columna estratigráfica. Los procesos de meteorización, erosión y deposición están representados por sedimentos no consolidados Cuaternarios y Recientes que cubren superficies extensas del área. Los materiales depositados forman los depósitos glaciales, fluvio-glaciales, coluviales y aluviales constituidos por bloques o bolones poligénicos, clastos de diferentes rocas y tamaños, y sedimentos finos como arena y limo.

El tectonismo del área de estudio está influenciado por el solevantamiento y fallamiento del bloque regional de Lipez, conocida como la Cuña Occidental. La mayor manifestación de éste tectonismo en el área es el sistema de Fallamiento de Khenayani que cruza el área con un rumbo regional ENE, y por fallas de ajuste con el mismo rumbo y por fallas transversales de ajuste con rumbos EW y WNW. Estas últimas tienen una extensión limitada pero profunda, que facilitaron la efusión de los volcanes con la consiguiente deposición de rocas ígneas efusivas y debris piroclástico (Imagen Satelital No. 1) y la fracturación de las rocas ignimbríticas basales.

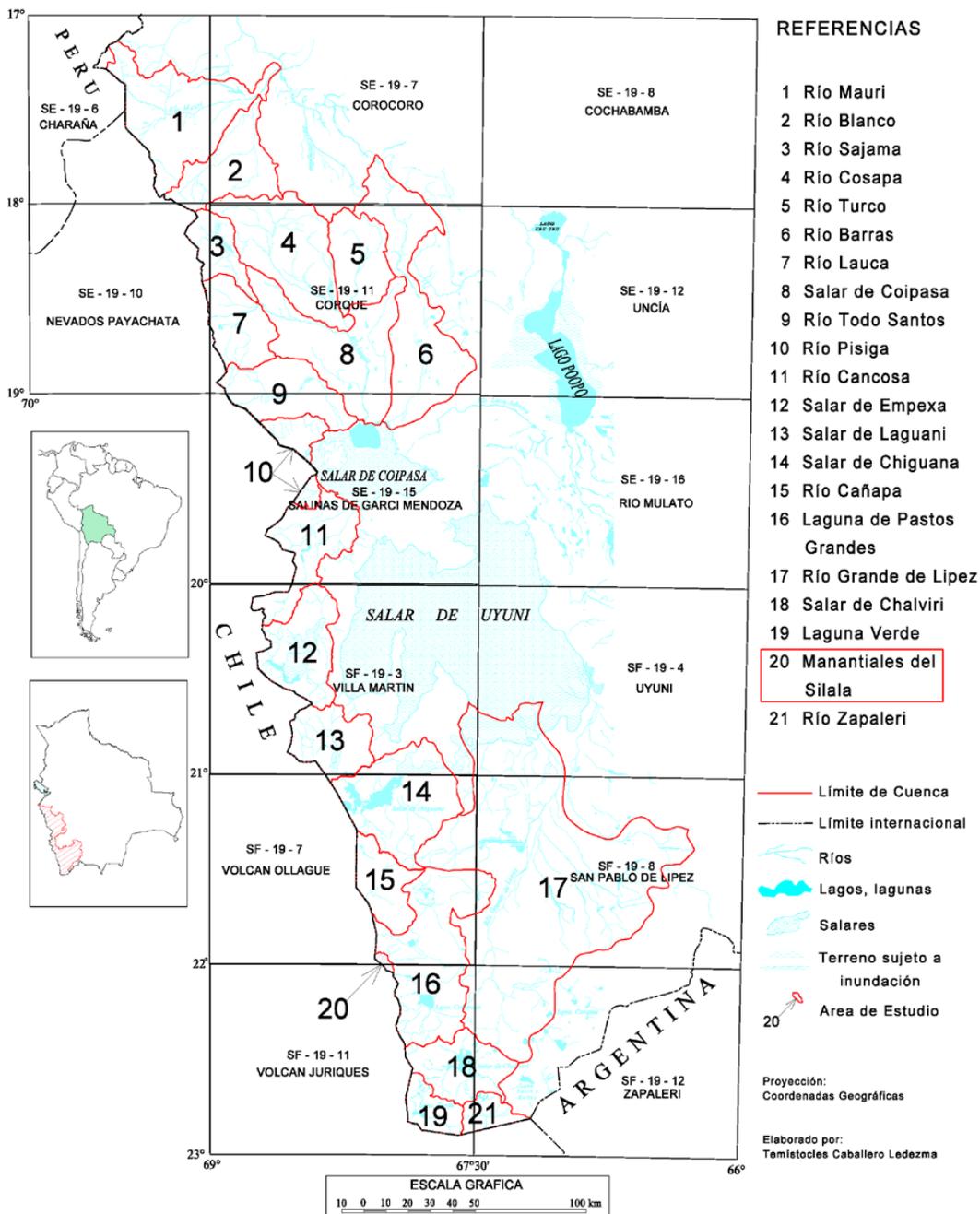
El tectonismo, manifestado como fallamiento y diaclasamiento de las rocas efusivas del área, es de suma importancia en cuanto a la ubicación de los afloramientos de los manantiales o vertientes de Silala.

2.1 Actividad Volcánica

La actividad volcánica en el área es muy importante y se inicia en el Ciclo Andino del Mioceno Superior. Durante éste ciclo se edificaron varias calderas, centros y domos volcánicos, entre ellos el de Agua de Perdiz (ubicado fuera del área de estudio) que se manifiesta con la erupción y deposición de un manto ignimbrítico regionalmente extenso denominado Ignimbritas Silala. Estas ignimbritas están muy bien expuestas en el área y se encuentran parcialmente cubiertas por flujos de lavas de los estratovolcanes intruidos a través de las mismas (Fotografía No. 2). Esta es la primera fase efusiva en el área de estudio. Las estructuras volcánicas más evidentes, dentro y circundando el área, son los domos volcánicos del Cerro Silala Chico y Torito, y los estratovolcanes Inacaliri y Silala desarrollados por la acumulación de productos de fases extrusiva y efusivas. La primera fase extrusiva está representada por la formación de los domos volcánicos. La segunda fase efusiva está representada por coladas de lavas andesíticas y lavas de composición andesíticas-dacíticas.

A fines del Pleistoceno se inicia la edificación de otros centros volcánicos como el Volcán Cerro Negro, cuyo volcanismo efusivo desarrolló depósitos de lavas andesíticas, las cuales llegan a cubrir relieves preexistentes.

Figura 2.1
Mapa de Ubicación
Cuenca 20 – Manantiales del Silala



PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

2.1.1 Ignimbritas Silala

El basamento regional está conformado por los mantos de tobas consolidadas denominadas Ignimbritas Silala de color rosado claro a violáceo, de composición dacítica constituidas por plagioclasas, cuarzo, biotita y hornblenda. Corresponden a las series calcoalcalinas ricas en K_2O y su contenido de SiO_2 varía entre 63 y 66 %. La matriz de vidrio volcánico incluye fragmentos líticos de diversos tipos de roca, principalmente fragmentos de piedra pómez hasta 10 cm de tamaño. Su índice de aplastamiento es de 3 a 1. No se tiene su espesor total en el área, ya que no se observa su contacto basal, ni se conoce el tipo de roca sobre la que yacen. Son tobas parcialmente soldadas y se hallan fuertemente fracturadas y diaclasadas con dos juegos definidos, uno con una dirección de buzamiento predominante $N40^\circ E$ y el otro $N50^\circ W$. Estos mantos ignimbríticos tienen una inclinación hacia el W. Según datos radiométricos extrapolados de áreas aledañas, éstas ignimbritas tienen una edad de 7.8 ± 0.3 millones de años (Ma) ó sea del Mioceno Superior (Choque, 1996; Lema & Ramos, 1996; Richter, et. al., 1992).

2.2.2 Domos Volcánicos**Domo Volcánico Cerro Silala Chico**

Al noroeste del volcán Silala, emerge un cuerpo volcánico de dimensiones reducidas, el domo del Cerro Silala Chico, que intruye a la Ignimbritas Silala. Tiene un diámetro de alrededor de 3 Km y culmina a una altura de 4849 msnm. Está cubierto por lavas de composición andesítica-dacítica porfídica, de color gris oscuro con 88 a 90% de plagioclasas (andesina-labradorita) y 4 a 10% de piroxeno. Datación realizada en muestras recolectadas por el PIR, muestran una edad de 6.04 ± 0.07 Ma para el Domo del Cerro Silala Chico (PMA, en prep.).

Domo Volcánico del Cerro Negro

Este cuerpo volcánico se encuentra al margen del área de estudio en el sector noroeste. Tiene un diámetro basal de 2 Km y una altura aproximada de 5200 msnm. Está compuesto por rocas andesíticas de color gris claro.

Domo Volcánico Torito

El domo volcánico Torito está localizado en el sector oriental del área de estudio. Tiene una composición dacítica y andesítica y una altura aproximada de 4900 msnm. Su diámetro basal es de aproximadamente de 1.6 Km.

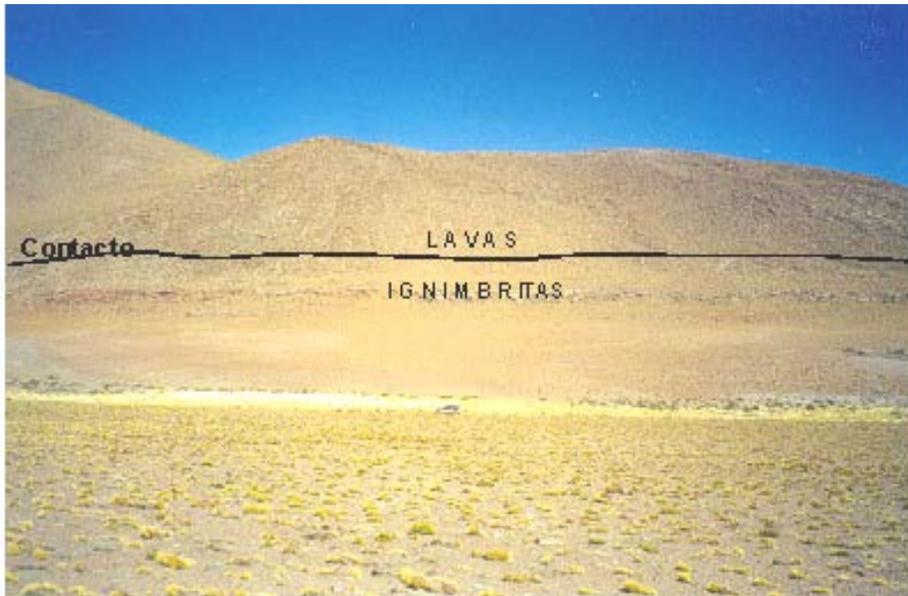
PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

COLUMNA ESTRATIGRAFICA DEL AREA DE LOS MANANTIALES DEL SILALA

TABLA 2.1

ERA	EDAD	PERIODO	LITOLOGIA	DESCRIPCION DE PROCESOS GEOMORFICOS	AÑOS
C E N O Z O O I C O	C U A T E R N A R I O	H O L O C E N O		ESTABILIDAD DE RELIEVE CLIMA SECO	
			DEPOSITOS ALUVIALES DEPOSITOS COLUVIALES DEPOSITOS FLUVIOGLACIALES	RELIEVES TIPICOS DE SEDIMENTOS CUATERNARIOS BOFEDALES AFLORAMIENTOS DE MANANTIALES	10.000 años BP
		P L E I S T O C E N O	DEPOSITOS ALUVIALES	FORMACION DE VALLES Y QUEBRADAS	
			DEPOSITOS COLUVIALES	RELIEVES ALUVIALES	14.000 años BP
			DEPOSITOS FLUVIO - GLACIALES	RELIEVES MORRENICOS	
	P L I O C E N O	LAVAS ANDESITICAS BASICAS	FORMACION DE ESTRATOVOLCANES LEVES MODIFICACIONES DE PALEORELIEVES	< 1.0 Ma.	
			Superficie de erosión	1.6 Ma	
		LAVAS ANDESITICAS A DACITICAS	FORMACIONES DE ESTRATOVOLCANES INACALIRI Y SILALA MODIFICACION DE PALEORELIEVE	1.9 Ma	
		N E O G E N O		ESTABILIDAD TECTONICA FORMACION DE PALEOSUELOS DISECTACION Y FORMACION DE VALLES PROCESOS DE EROSION	
			Superficie de erosión	5.3 Ma	
M I O C E N O	LAVAS ANDESITICAS - DACITICAS (5.94 Ma)	VOLCAN INACALIRI (Fase I)			
	LAVAS ANDESITICAS (6.04 Ma)	DOMOS VOLCANICOS SILALA CHICO, VOLCAN NEGRO Y CERRO TORITO			
		IGNIMBRITAS SILALA (sumamente fracturadas) (7.8 Ma)			

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL



Fotografía 2 – Contacto geológico entre el manto ignimbrítico y lavas, al centro panorama de bofedales del canal Sur



Fotografía 3 – Volcán Inacaliri vista al Noroeste con sus flujos de lavas andesíticas y a la derecha el Cerro Negro

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

La edad para estos dos domos volcánicos es estimada del Mioceno Superior similar a la del domo volcánico del Cerro Silala Chico y al primer evento extrusivo del volcán Inacaliri.

2.2.3 Estrato Volcanes

Volcán Inacaliri

El volcán Inacaliri tiene aproximadamente 10 Km de diámetro basal y culmina a una altura de 5570 msnm. En este volcán se observa dos eventos efusivos.

El primer evento volcánico está representado por la efusión y deposición de lavas andesíticas de color gris oscura, similares ó algo posteriores, pero dentro del mismo evento volcánico, a las rocas del domo del Cerro Silala Chico, con una edad radiométrica determinada por el PIR de 5.84 ± 0.09 Ma (Uribe, Com. Per.). La edad radiométrica para el segundo evento es similar a la del volcán Silala del Plioceno Superior entre 1.9 Ma (Lema & Ramos, 1996) y 1.48 ± 0.02 Ma (PMA, en prep.).

El segundo evento efusivo enmascara el cono volcánico del primer evento. En la parte superior del volcán se observa un cráter bien conservado. Esta última actividad volcánica emitió un flujo de lava andesítica, algo más básica que la del volcán Silala, que cubre los relieves preexistentes (Fotografía No. 3). La composición de la lava muestra 80% de plagioclasas y 18 a 19% de hornblendas.

Volcán Silala

El volcán Silala está ubicado en el límite sudeste del área de estudio. Tiene 14 Km de diámetro y una altura de 5700 msnm. Su pendiente varía, de la base a la cúspide, entre 12% a más de 40%. Las rocas que forman el volcán son lavas andesíticas-dacíticas porfídicas, de color gris oscuro a gris celeste con 70% de plagioclasas (andesina-labradorita) y 28% de piroxeno. Descansan sobre los flujos piroclásticos de Silala. Presenta un paleo-drenaje radial típico poco profundo. La edad determinada por el Proyecto PIR para el volcán Silala es de 1.74 ± 0.02 Ma (PMA, en prep.).

2.3 Depósitos Cuaternarios y Recientes

Depósitos no consolidados o suelos Cuaternarios y Recientes cubren aproximadamente un 30 a 40 % de la superficie del área, y por productos de procesos de meteorización, erosión y deposición muy bien definidos. Las características y composición de los suelos muestreados y analizados de la Quebrada Principal y las Quebradas Norte y Sur de Silala son presentadas en forma resumida en el presente informe.

2.3.1 Actividad Glacial

La actividad glacial, conjuntamente con la actividad volcánica y meteorización, es la que moldeó las formas geomorfológicas actuales en la región y está representada por geofomas de erosión y acumulación en la parte sur del volcán Inacaliri. Presenta las

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

formas principales de erosión glacial como circos, la profundización, alargamiento y ensanchamiento de valles preexistentes. Además, de construir potenciales nuevos cursos de aguas, como el de las Quebradas de Silala. Mientras que las formas de acumulación secundaria son las morrenas laterales y terminales, y los depósitos fluvio-glaciales. Por las características geomorfológicas de los depósitos glaciales del área de estudio se los puede correlacionar a la última glaciación en las Cordilleras y el Altiplano Boliviano (Argollo et al., 1987 y Argollo, 1991), que se inicia hace alrededor de 65,000 años BP.

Se observan tres grupos de morrenas encajonadas en valles glaciales. La más externa o distal está localizada a una altura aproximada a los 4500 msnm, y correspondería al Último Máximo Glaciar, que en los Andes Centrales ocurrió hace 14,500 años BP (Argollo, J., 1991). Esta edad fue determinada en otros estudios por métodos radio-carbónicos, principalmente en turbas y conchillas, tanto para la Cordillera Occidental como para la Oriental. La segunda morrena está situada a 4670 msnm y la última a 4800 msnm, correspondiendo a un tardi-glaciar.

Simultáneamente, en zonas donde no existe actividad glacial, por encima de los 4700 msnm, se formaron lenguas de flujos criogénicos, de grandes dimensiones con alturas de sus frentes de lóbulos que pueden alcanzar hasta 4 m de altura. Estos procesos no están activos en la actualidad.

Otras formas intermedias o combinadas son los sedimentos fluvio-glaciales, que se presentan en forma de acumulaciones mas o menos heterogéneas en su composición granulométrica. Se extiende a la salida de los valles glaciales que circundan los estrato volcanes y en las Quebradas de Silala.

Los sedimentos fluvio-glaciales que se encuentran en el piso de las Quebradas Principal, Norte y Sur están detallados en el Estudio de Suelos en las Quebradas del Area de Silala.

2.3.2 Procesos Coluviales

Los sedimentos o depósitos coluviales se sitúan en distintas zonas del área cubriendo pendientes suaves. Estos depósitos presentan una estructura sedimentaria muy incipiente, son heterométricos y frecuentemente poligénicos.

2.3.3 Actividad Aluvial

La actividad aluvial está representada por el escurrimiento de aguas fluvio-glaciales que dieron lugar a formas de erosión y de acumulación de hace 10,000 años BP. Se observan abanicos aluviales de grandes dimensiones, reflejando condiciones climáticas y cantidades de agua de escurrimiento totalmente diferentes a las actuales. Otras formas de acumulación aluvial en el área de estudio son las llanuras aluviales con paleosuelos de color rojo desarrollados sobre las ignimbritas de 7.8 Ma y sobre las lavas andesíticas-dacíticas de 1.7 Ma. En los casos donde afloran manantiales u ojos de agua, se presentan como bofedales desarrollados por la influencia de las aguas estancadas sobre material arenoso-arcilloso fino a medio, particularmente en la parte superior de las

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

depresiones topográficas, donde la pendiente es mucho más suave o inexistente. Son los bofedales típicos de altura.

2.4 Rasgos Geomorfológicos

Los rasgos geomorfológicos actuales del área de Silala están modelados desde hace 7.8 Ma. Se inicia con la deposición de las tobas de las Ignimbritas Silala en el Mioceno Superior sobre rocas presumiblemente del basamento Paleozoico o rocas del Mioceno Inferior, construyendo mesetas típicas con paredes verticales y con sistemas de drenaje que no son perceptibles en la actualidad. Estas mesetas sufrieron bruscas alteraciones geomorfológicas, por el intenso diaclasamiento y el grado de soldadura de las ignimbritas, y por supuesto, por la acción meteorizante de los agentes de movimiento y deshielo de glaciares, cambios extremos de temperatura y viento. Esto dio lugar a la formación de farallones que regionalmente en algunos casos pasan de 100 m de altura. También dieron lugar a la formación de paleosuelos de color rojizo. Estas mesetas fueron posteriormente cubiertas por flujos de lavas que enmascaran algunos rasgos originales de las ignimbritas y paleosuelos. Todo el paquete estructural regional fue posteriormente levemente solevado hace aproximadamente 1.7 a 1.9 Ma (Lema & Ramos, 1996) inclinándolo suavemente hacia el oeste, paralelamente a la intrusión de conos volcánicos y a la formación de estratos volcanes. Por las edades obtenidas por el PIR estos rasgos geomorfológicos alterados pudieron haberse realizado hace 1.4 Ma.

Durante las glaciaciones de hace 14,500 años BP, Último Máximo Glaciar de la Cordillera de Central de los Andes, los rasgos geomorfológicos fueron fuertemente alterados por el movimiento y deshielo de los glaciares que dieron lugar a la formación de lagos, lagunas y salares en todo el Altiplano Boliviano, así como a la formación de valles profundos, entre ellos el de Silala.

La actividad del deshielo de la glaciación es uno de los rasgos geomorfológicos más notorios sobre la formación de la Quebrada de Silala. Rasgos que se formaron hace 10,000 años BP o más. A fines de éste episodio glacial (tardi glacial) se formaron las quebradas que son un ejemplo típico de la acción del agua de deshielo aprovechando zonas de debilidad en la roca aflorante, en este caso la Falla Silala y las fallas transversales E-W de ajuste. Sin embargo, el diseño actual de la Quebrada Principal con un corte transversal geomorfológico en "U" con paredes laterales verticales (15 a 100 m de altura y 40 m de ancho) y un piso plano es la combinación de varios factores de meteorización y no solo a la acción fluvio-glacial. Es importante señalar que desde el Holoceno, la Quebrada de Silala no tiene ninguna proporción entre la profundidad y ancho del mismo con la cantidad de agua que podría fluir en él, o sea que existe una desproporción geomorfológica notable.

Es importante indicar que el agua de deshielo fue también la carga principal de las actuales aguas subterráneas alojadas en las rocas ignimbríticas Miocénicas dando lugar a la formación de un acuífero que podría ser confinado o no, que ahora brota en los manantiales u ojos de agua de Silala.

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

Durante el Holoceno, el clima se hace árido y desértico muy similar al actual. Los caudales y escurrimientos de aguas superficiales se reducen paulatinamente o desaparecen. Los rasgos geomorfológicos modelados durante este periodo hasta nuestros días son más por la acción eólica y por diferencial térmica diaria y casi nulos por acción fluvial.

Solamente podrían escurrir en la superficie o en las quebradas, aguas originadas de un acuífero subterráneo y que afloran como manantiales o vertientes, cuando el volumen del caudal de descarga fuese suficientemente alto para vencer la alta evaporación, la infiltración sobre los distintos tipos de suelos sobre los cuales el agua escurriría y la relativamente baja pendiente.



Fotografía 4 – Cobertura cuaternaria en el canal Sur, vista hacia el Este

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

3. GEOLOGÍA SUPERFICIAL DE LAS QUEBRADAS DEL AREA DE LOS MANANTIALES DE SILALA

Se realizó un trabajo en detalle de los suelos y del diaclasamiento de los farallones ignimbríticos (Mapa No. 2) a lo largo de las quebradas donde fueron construidos los canales para coleccionar y portar las aguas de los Manantiales de Silala. Los suelos son arenosos con algo de limo y con clastos y bolones de rocas de diferente tamaño típicos de depósitos fluvio-glaciales. Los perfiles de los suelos en las Quebradas de Silala no tienen horizontes definidos y no se observa ninguna gradación o niveles deposicionales visibles (Fotografía 4). No se tiene evidencias visibles de deposición secuencial aluvial.

En las partes planas de las quebradas, donde afloran los manantiales u ojos de agua superficiales, los suelos son hidromórficos y tienden a formar bofedales con un horizonte superior de 10 a 15 cm de espesor, compuesto por material orgánico. En algunos lugares están infrayacentes a reducidos paquetes arenosos-limosos.

En la base de los suelos de la Quebrada Principal a una profundidad promedio de 3 metros; se evidencian gran cantidad de clastos o bolones de 30 cm de diámetro y muchos de mayor tamaño. Se pudo observar en algunos de estos bolones estrías glaciares mostrando un transporte y erosión fluvio-glacial. También se evidencian rasgos de meteorización eólica y mecánica en los farallones de las quebradas con la acumulación de pedregones y bolones de roca ignimbrítica de conformación angular y sub-angular depositados en la superficie de las quebradas.

3.1 Formación de las Quebradas de Silala

Las Quebradas de Silala son un ejemplo típico de quebradas formadas por la acción de fallas dando lugar a una zona de debilidad y la acción erosiva combinada de aguas fluvio-glaciales y de meteorización mecánica en esta zona de debilidad. El flujo fluvio-glacial es derivado del deshielo ocurrido al final de la era glacial hace más de 10,000 años BP.

La quebrada del Canal Principal y las quebradas de los Canales Sur y Norte (con una dirección N50°E y N40°W) fueron originalmente depresiones no muy profundas en la roca ignimbrítica Silala, formadas a lo largo de fallas y de planos de debilidad de la roca fuertemente diaclasada. El rumbo coincidente de éstas depresiones es confirmado por el estudio del sistema de diaclasamiento realizado en el área. Los planos de debilidad fueron erosionados y ahondados por una posterior fuerte erosión fluvio-glacial y ensanchados en su base por una fuerte meteorización causada por la gran diferencia de temperatura diaria, llegándose a formar valles en "U".

En la actualidad no se manifiesta ninguna actividad fluvial activa natural, al contrario, se observa que la superficie de los suelos de las quebradas están cubiertos con clastos de rocas ignimbríticas de varios tamaños que no han sido removidos por falta de un flujo de agua natural. Todos los clastos observados son sub-redondeados, angulares y subangulares, y hay muy poca presencia de clastos redondeados. Esto indica notoriamente que las quebradas no han recibido desde su formación, ningún flujo natural notorio de escurrimiento de agua superficial.

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

3.2 Quebradas en Formación Por Procesos de Intemperismo

Los cambios bruscos y marcados de temperatura entre el día y la noche en el área de estudio, provocan un segundo fuerte fracturamiento en los afloramientos de los mantos ignimbríticos en sus zonas de menor debilidad por el diferencial termal (procesos mecánicos de dilatación y contracción) que complementan el ya fuerte diaclasamiento. A este proceso, se adiciona la erosión por actividad eólica. Todos estos procesos de intemperismo, llegan a formar pequeñas quebradas perpendiculares a las quebradas principales sin o con limitada participación de procesos aluviales. Se observaron por lo menos doce de estas quebradas en formación en la Quebrada del Canal Principal (Fotografía No. 5) y algunas otras en las dos quebradas de los Canales Norte y Sur.

3.3 Suelos en las Quebradas de Silala

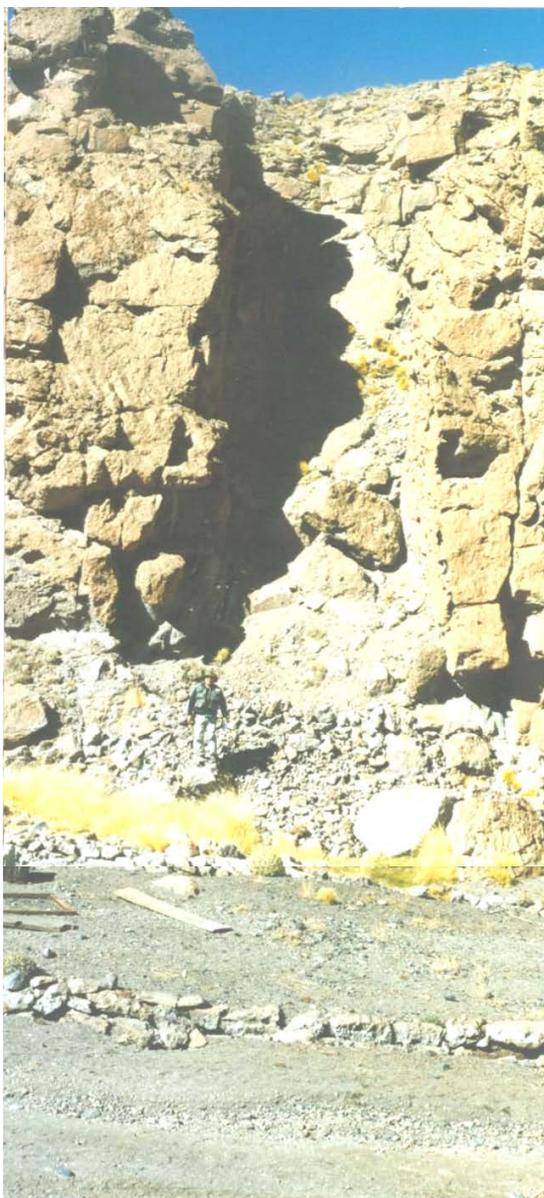
Por la importancia en conocer los perfiles de suelo, la textura, composición y constitución de los suelos de las Quebradas de Silala, se realizó un estudio específico del mismo. Se excavaron cuatro pozos en la Quebrada Principal con el muestreo respectivo cada 10 cm de profundidad. Otros cuatro pozos fueron excavados en las Quebradas Norte y Sur y en los bofedales respectivos. El estudio en detalle, incluyendo los resultados granulométricos obtenidos, son parte del Estudio de Suelos de la Quebrada de Silala.

Los resultados del estudio de granulometría muestran que los granos de los clastos y arenas de los suelos se presentan con bordes sub-redondeados y con muy pocos clastos redondeados. Esto indicaría que no hubieron flujos de escurrimiento superficial notorios posterior al movimiento y deposición de los sedimentos fluvio-glaciales.

El análisis de los perfiles de los suelos en la Quebrada de Silala muestra que son hidromórficos con una secuencia no gradada de clastos angulares de roca madre, arena de grano medio angular, limo y algunos horizontes delgados de material orgánico. No se tiene un perfil desarrollado de suelo, siendo el mismo un suelo típico de alta montaña de origen fluvio-glacial sin rasgos de movimiento fluvial reciente. No se observó una deposición nítida gradada de los materiales que conforman el suelo.

El estudio granulométrico muestra una granulometría típica de suelos formados por sedimentos fluvio-glaciales con clastos y granos angulares y una ausencia de clastos, grava y arena de granos redondeados.

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL



Fotografía 5 - Quebrada en formación por procesos de intemperismo

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

4. HIDROLOGIA

Un sistema hidrológico en el área de estudio es prácticamente inexistente, debido fundamentalmente a los grandes cambios climáticos registrados hace 10,000 años BP. El clima se torna extremadamente seco y la precipitación pluvial fue altamente escasa o casi nula (Risacher, 1976; Argollo, 1995). Los paisajes y estructuras observadas en toda el área de estudio y principalmente en la Quebrada de Silala no presentan una erosión fluvial activa. Las quebradas son depresiones topográficas notorias que pueden ser observadas tanto en las fotografías aéreas, como en las imágenes satelitales, con paredes casi verticales y pisos horizontales pero sin cursos ni cauces activos naturales de agua.

El área no cuenta con una estación meteorológica. Sin embargo, los parámetros hidrológicos que a continuación se describen, corresponden a la estación meteorológica de Laguna Colorada, que tiene un historial de registro de 13 años (1985 – 1997). Esta estación se encuentra localizada a 38 Km al SE del área de estudio.

Por información verbal de los guarda bosques, existían en el Silala, pluviómetros portátiles instalados por la empresa FCAB. Durante el presente trabajo, no se ubicó ninguno de ellos ni tampoco se pudo obtener los datos pluviométricos históricos de los mismos.

4.1 Precipitación

La distribución mensual de las precipitaciones medias es unimodal (Figura No. 4.1). El periodo de precipitación se inicia en el mes de diciembre y dura hasta el mes de marzo. Este periodo representa el 80 % de la precipitación total anual, con un máximo de 21.4 mm en el mes de enero. El periodo de sequía, se presenta entre los meses de abril a noviembre, con una mínima en el mes de julio de 0.0 mm. La precipitación promedio anual para el periodo 1983-1995 es de 59.1 mm.

No se cuenta con datos meteorológicos de precipitación nival, pero se estima que éstas podrían aumentar entre un 10 a 15 % los datos de precipitación pluvial .

4.2 Temperatura

La distribución mensual de las temperaturas medias mensuales es también unimodal (Figura No. 4.2). Las máximas temperaturas se registran en los meses de diciembre a marzo; siendo la media más elevada en el mes de diciembre con 3.9° C. Los valores más bajos se observan entre los meses de abril a agosto con temperaturas medias que fluctúan entre 0 a - 4.0° C. El promedio máximo anual es de 14.2° C y el promedio anual de las mínimas es de -15° C., dando estos dos extremos promedios un rango de variación aproximado de 29° C.

4.3 Evaporación

La distribución mensual de la evaporación también es unimodal (Figura No. 4.3), con los registros de evaporación promedio más altos entre los meses de septiembre a marzo, con valores que varían de 78 mm en el mes de septiembre y 113 mm en el mes de diciembre.

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

El periodo con las evaporaciones promedio más bajas se presenta entre los meses de abril a agosto; habiéndose registrado la más baja evaporación promedio en el mes de junio con 36 mm.

En términos generales, los meses de altas evaporaciones coinciden con los meses de altas temperaturas y los meses con bajos registros de evaporación con los meses de temperaturas bajas. En algunos meses la relación de la evaporación con la precipitación es directa. Así por ejemplo, en los meses de abril a agosto, cuando se observan las más bajas precipitaciones, las evaporaciones también son bajas; en cambio entre los meses de diciembre a marzo, cuando las precipitaciones son altas, también las evaporaciones son más altas. Esto permite concluir, que en la época de altas precipitaciones pluviales la evaporación es más fuerte.

En el área de estudio, la evaporación promedio para los años 1985 a 1997 es de 914 mm, lo que significa que la evaporación es quince veces mayor que la precipitación registrada. Por lo que es necesario considerar este aspecto para los cálculos de balance hídrico.

4.4 Aforo de Caudales

Los Manantiales de Silala en Bofedal Sur afloran sobre una meseta casi plana conformada por suelos hidromórficos arenosos, carentes de un perfil definido, que yacen sobre las Ignimbritas Silala formando bofedales. Se tiene también afloramiento de manantiales en las tres quebradas, en la Quebrada Principal que continúa hacia Chile y en las otras dos quebradas, poco profundas, denominadas Quebrada Norte y Quebrada Sur. Los bofedales y las quebradas han sido canalizados después de la Concesión de Aguas de 1908 a la FCAB con canales aductores y recolectores abiertos revestidos con piedra y argamaza. Estos canales atraviesan las quebradas y han sido denominados Canal Principal, Canal Norte y Canal Sur respectivamente.

El Canal Norte sigue un curso de N-S drenando el Bofedal Norte o Cajones. El Canal Sur sigue un curso en dirección E-W-SW drenando el Bofedal Sur u Oriental. Estos dos canales forman a lo largo de las quebradas un diseño en forma de "*palca*" que se une formando un solo canal que drena hacia la frontera internacional con Chile (Mapa No. 2) formando el Canal Principal construido en la Quebrada Principal de Silala.

Los manantiales que afloran en la pared norte de la Quebrada Sur han sido canalizados para aprovechar sus aguas; sin embargo, los afloramientos de agua en la pared sur de la misma, han sido sellados y cubiertos con barro y paja brava, presumiblemente por empleados de la Empresa de Ferrocarriles Antofagasta Bolivia (FCAB) cuando cuidaban los canales, a fin de evitar la erosión de la senda paralela al canal. Los afloramientos de agua en la pared izquierda (aguas abajo) o sur de la Quebrada Principal no están canalizados y han sido también cubiertos y sellados con barro y paja brava para evitar su escurrimiento. No se observan afloramientos de agua en la pared norte o derecha (aguas abajo) de la Quebrada Principal.

Es importante indicar que, la mayoría de los afloramientos de manantiales en la Quebrada Principal en el lado Chileno, se encuentran en la pared norte de la misma y tan solo dos en la pared sur.

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

Se ha realizado el aforo de los caudales en diferentes meses del año en tres sitios: a) Canal Norte, b) Canal Sur y c) Canal Principal, para lo cual se utilizó los vertederos tipo Cipolletti construidos por la Empresa de Ferrocarriles en los canales y una medición se la realizó con molinete con los valores que son presentados en la Tabla No. 4.1.

TABLA 4.1

AFORO DE CAUDALES EN LOS CANALES DE SILALA

	Caudales en litros por segundo (l/seg)				
	Julio	Septiembre	Octubre	Noviembre	Promedio
Canal Norte	38	40	43	47	42
Canal Sur	82	110	176	91	115
Canal Principal	120	164	219	153	164

Nota: Los meses indicados corresponden al año 2000

Por secciones de los tres canales, se tienen los siguientes aforos:

El caudal promedio medido en la principal sección del Canal Sur hasta antes de la caída de agua es de 40 L/seg. (medición realizada en la intersección del canal y el camino).

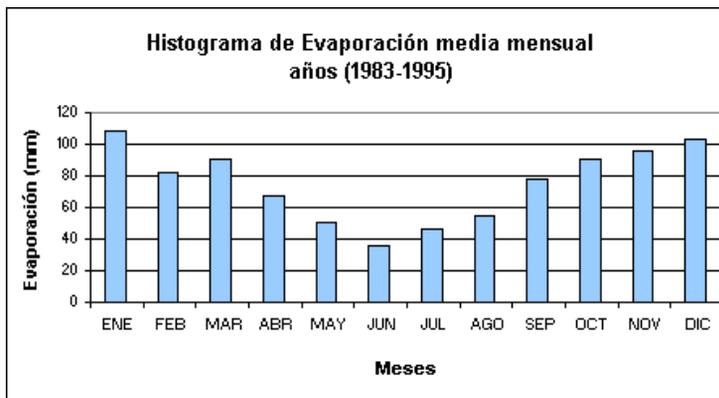
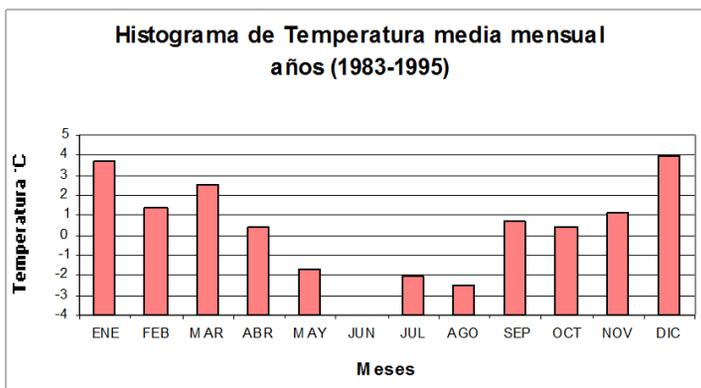
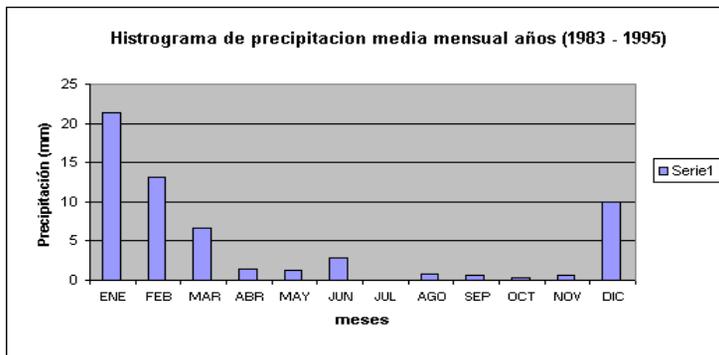
El caudal promedio medido en la segunda sección del Canal Sur antes de la intersección del Canal Sur y Canal Norte es de 129 L/seg.

El caudal promedio medido en el Canal Norte es de 42 L/seg.

El caudal promedio medido a la salida de la frontera, Canal Principal, es de 164 L/seg.

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

Estación : Laguna Colorada Lat. Sur : 22°13'
 Provincia : Sur LÍpez Long. Oeste: 67°42'
 Período de registro: años 1983-1995 Altura : 4278 msnm



PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Aguas Superficiales

Básicamente, no existen flujos de aguas superficiales en toda el área de estudio. El único flujo determinado es el que es transportado en los canales construidos a principios del Siglo XX, después de la firma de la Concesión de Uso de Aguas a la Empresa de Ferrocarriles Antofagasta Bolivia. La escasa precipitación no permite la formación de escurrimientos que podrían dar lugar a la formación de ríos, riachuelos u otros, ya sea perennes o temporales. La poca cantidad de agua que se genera del deshielo de las nieves caídas y depositadas en los volcanes es evaporada o parcialmente insumida en los sedimentos coluviales y aluviales que cubren sus flancos sin permitir el flujo de escorrentias.

Las denominadas Laguna Blanca y Laguna Chica no son cuerpos de agua, sino depresiones topográficas secas sin agua superficial. La Laguna Blanca está cubierta en su superficie por clastos de 2 a 20 cm de *chert* o cuarzo amorfo, que dan lugar a ese tono blanquecino que se observa en la imagen satelital y fotografías aéreas.

5.2 Inventario de Fuentes de Aguas Subterráneas

Con el objeto de evaluar la cantidad y la calidad de la fuente del agua subterránea, se ha realizado un inventario detallado del número de manantiales (Fotografías No. 6, 7 y 8). La ubicación de los manantiales que afloran en los bofedales y las quebradas del área de estudio fue realizada por técnicos de SETMIN mediante un levantamiento topográfico a detalle y es presentado en el Mapa 2. Para su respectiva ubicación geográfica, SETMIN ha utilizado un sistema GPS con precisión de primer orden.

Para la medición en el campo de los parámetros físicos del agua se han utilizado conductivímetros y equipos de pH digitales. Además, se realizaron aforos con pequeños molinetes en casi todos los manantiales o vertientes inventariados.

Uno de los propósitos de este estudio es el de establecer el número, localización, origen y todas las características físicas e hidroquímicas de las aguas de los manantiales o vertientes de aguas subterráneas que afloran en el área de Silala.

Se ha podido evidenciar que existen por lo menos 70 manantiales o vertientes, que están concentrados geográficamente en cuatro zonas, y que han sido canalizados mediante canales abiertos recolectores revestidos de piedra. Se han determinado algunos ojos de agua, que no han sido canalizados, que tienen flujos naturales muy lentos que van en distintas direcciones o que tienen aguas estancadas pero limpias. Durante el invierno estos ojos se cubren de hielo, no así, los manantiales canalizados. Los manantiales y ojos de agua crean zonas de humedad superficial que da lugar a la formación de bofedales.

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

La superficie total actual de los bofedales en el área de Silala es de 108,700 m². Se detalla la localización, caudales y otras características físicas de 44 manantiales en la Tabla No. 5.1



REGIONAL INTEGRATION PROJECT

The total surface of the wetlands in the Silala area is currently 108,700 m². The location, flow and other physical features of 44 springs is indicated in Table No. 5.1.

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

Se tiene una concentración de manantiales en el área en cuatro zonas principales o bofedales (Figura No. 5.1), que son detalladas a continuación de este a oeste:

5.2.1 Canal Sur – Bofedal Sur u Oriental

En el extremo este u oriental del Canal Sur, los manantiales emergen de las ignimbritas subyacentes hacia sedimentos o suelos Recientes. El agua aflorante satura los sedimentos superficiales no consolidados formando el Bofedal Sur u Oriental que tiene una superficie de 65,200 m² y es el más grande de todos los bofedales de Silala. Se han inventariado un total de 19 manantiales que han sido canalizados mediante la construcción de una estructura de ingeniería simple (mampostería de piedra) de canales abiertos orientados hacia un canal colector abierto que forma el denominado Canal Sur. Este canal discurre en una dirección general de este a oeste hasta su intersección con el Canal Norte.

El primer manantial canalizado aflora a una altura de 4450 msnm. Los caudales de los manantiales canalizados en este bofedal varían de 0.25 L/seg a 2 L/seg. La conductividad eléctrica del agua subterránea varía de 240 a 350 μ S/cm, y la temperatura varía de 14° C a 16° C. Existen además, otros ojos de agua en la superficie del bofedal que no han sido canalizados.

5.2.2 Canal Sur – Segundo Bofedal

Una segunda zona de concentración de cuatro manantiales en el Canal Sur surge de pequeños afloramientos en la base de la Ignimbrita Silala y también forma un pequeño bofedal, que en su mayor extensión se encuentra casi seco.

5.2.3 Canal Sur – Tercer Bofedal

El tercer bofedal del Canal Sur se inicia al pie de la primera caída de agua (Segunda Sección). La caída tiene una altura aproximada de 3 m y ha sido formada por la falla E-W que cruza el área. Este bofedal tiene una superficie de 3,600 m² y se inicia a una altura de 4,410 msnm y tiene total de 18 manantiales todos ellos canalizados. Las características de ocurrencia y físicas son similares a las del Bofedal Sur u Oriental.

En este tercer bofedal, al igual que en los anteriores bofedales, la ocurrencia de manantiales está controlada por el diaclasamiento y fallamiento en la roca ignimbrítica, observándose en algunos casos hasta el afloramiento de 3 manantiales por metro lineal, una densidad alta por espacio de longitud. Los caudales de estos manantiales varían de 0.5 a 2.0 L/seg, la temperatura es de 14° C a 15° C, el pH es 8 y una conductibilidad que varía entre 230 y 350 μ S/cm. Se construyó un canal colector abierto principal que pasa por el centro del bofedal. Los canales que coleccionan las aguas de los afloramientos o manantiales están en forma perpendicular a éste.

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

N°	UBICACION	ESTE	NORTE	FECHA	Conduc. (mm/cm)	Tem. (°C)	pH	Caudal (l/s)	Procedencia
M-1	Silala Norte	601195	7566790	5/26/00	94	13.00	7.86	0.5	Cuaternario
M-2	Silala Norte	601075	7566700	5/26/00	121	15.40	8.15	2.4	Cuaternario
M-3	Silala Norte	601043	7566740	5/26/00	127	15.90	8.28	3.5	Cuaternario
M-4	Silala Norte	601010	7566735	5/26/00	124	16.10	8.59	12	Cuaternario
M-5	Silala Norte	600950	7566750	5/26/00	122	16.00	8.45	7.1	Cuaternario
M-6	Silala Norte	601060	7566640	5/26/00	125	15.90	8.12	0.25	Ignimbrita Silala
M-7	Silala Norte	600920	7566780	5/26/00	107	15.00	8.11	3.5	Cuaternario
M-8	Silala Norte	600900	7566710	5/26/00	118	16.00	7.87	1.5	Cuaternario
M-9	Silala Norte	600840	7566650	5/26/00	124	16.10	8.16	10	Cuaternario
M-10	Silala Norte	600830	7566640	5/26/00	126	16.20	8.05	5.8	Ignimbrita Silala
M-11	Silala Norte	600875	7566675	5/26/00	111	16.50	7.97	16	Ignimbrita Silala
M-12	Silala Norte	600885	7566670	5/26/00	102	16.80	7.25	0.5	Cuaternario
M-13	Silala Norte	600865	7566665	5/26/00	95	17.50	7.02	1	Cuaternario
M-14	Silala Norte	600900	7566550	5/26/00	116	15.40	8.30	0.25	Cuaternario
V-1	Silala Sur	601050	7566460	5/27/00	129	15.80	8.23	2	Ignimbrita Silala
V-2	Silala Sur	601055	7566462	5/27/00	130	15.50	8.39	1	Ignimbrita Silala
V-3	Silala Sur	601057	7566463	5/27/00	130	15.50	8.39	0.5	Ignimbrita Silala
V-4	Silala Sur	601100	7566500	5/27/00	128	15.70	8.35	0.5	Ignimbrita Silala
V-5	Silala Sur	601105	7566504	5/27/00	126	15.60	8.34	0.5	Ignimbrita Silala
V-6	Silala Norte	601140	7566730	5/27/00	145	14.90	8.50	1	Ignimbrita Silala
V-7	Silala Norte	601145	7566733	5/27/00	145	14.90	8.50	0.5	Ignimbrita Silala
V-8	Silala Sur	601185	7566570	5/27/00	167	14.60	8.23	0.5	Ignimbrita Silala
V-9	Silala Sur	601190	7566570	5/27/00	167	15.00	8.20	0.25	Ignimbrita Silala
V-10	Silala Sur	602900	7566187	5/29/00	260	13.70		0.25	Cuaternario
V-11	Silala Sur	602900	7566188	5/29/00	255	15.70		2	Cuaternario
V-12	Silala Sur	602900	7566189	5/29/00	253	16.00		1.5	Cuaternario
V-13	Silala Sur	602875	7566200	5/29/00	251	15.90		0.5	Cuaternario
V-14	Silala Sur	602874	7566200	5/29/00	250	15.40		0.25	Cuaternario
V-15	Silala Sur	602823	7566200	5/29/00	240	15.70		0.25	Cuaternario
V-16	Silala Sur	602822	7566200	5/29/00	237	15.70		0.25	Cuaternario
V-17	Silala Sur	602800	7566215	5/29/00	248	15.20		0.5	Cuaternario
V-18	Silala Sur	602800	7566225	5/29/00	258	14.20		2	Cuaternario
V-19	Silala Sur	602820	7566250	5/29/00	230	15.30		2	Cuaternario
V-20	Silala Sur	602815	7566249	5/29/00	230	15.10		0.25	Cuaternario
V-21	Silala Sur	602805	7566251	5/29/00	225	14.10		0.5	Cuaternario
V-22	Silala Sur	602790	7566254	5/29/00	218	12.10		0.5	Cuaternario
V-23	Silala Sur	602710	7566130	5/29/00	350	7.10		0.5	Cuaternario
V-24	Silala Sur	602695	7566129	5/29/00	370	5.00		0.5	Cuaternario
V-25	Silala Sur	602673	7566127	5/29/00	412	16.00		0.5	Cuaternario
V-26	Silala Sur	602595	7566180	5/29/00	278	14.80		0.25	Cuaternario
V-27	Silala Sur	602000	7566470	5/29/00	357	13.80		0.2	Cuaternario
V-28	Silala Sur	601975	7566450	5/29/00	370	14.00		0.5	Cuaternario
V-29	Silala Sur	601974	7566450	5/29/00	365	13.80		0.25	Cuaternario
V-30	Silala Sur	601930	7566495	5/29/00	364	14.00		0.5	Cuaternario

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

El bofedal tiene un promedio de 12 m de ancho y se encuentra entre paredes o farallones de roca ignimbrítica (Ignimbrita Silala) de 20 a 60 m de alto. La pared o farallón sur de la quebrada es la más alta. A lo largo de esta pared y a unos 2 a 3 m del piso de la quebrada, se tiene una senda con algunos afloramientos de agua que han sido cubiertos y sellados con barro y paja brava, seguramente para preservar la misma.

Por falta de mantenimiento, faltan algunas piedras en las paredes laterales del Canal Sur y el agua se halla desparramada y dispersa formando extensos charcos o espejos de agua

Cerca de la segunda caída de agua, en la pared o farallón norte de la Quebrada Sur se pueden observar rasgos típicos de erosión causados por flujos de agua en rápido movimiento. Estos rasgos están a una altura de 2 m del nivel actual de flujo y pueden ser interpretados como erosión causada por fuertes flujos fluvio-glaciales ocurridos hace miles de años atrás y no como una erosión reciente (menos de 200 años) causada por un flujo fluvial reciente.

5.2.4 Canal Norte – Bofedal Norte o Cajones

La cuarta zona de concentración de manantiales y ojos de agua se encuentra en el Bofedal Norte o Cajones con 26 manantiales canalizados e inventariados. Los manantiales han sido canalizados con canales abiertos formado el Canal Norte. La superficie total de éste bofedal es de 40,900 m² y el primer manantial aflora a los 4404 msnm. La conductividad eléctrica medida en los manantiales varía de 95 a 120 µS/cm, la temperatura es de 13° C a 16° C y tienen un pH de 7.70 a 8.35.

En el Bofedal Norte también se encuentran 4 pozos piezométricos de 10 m de profundidad entubados con tubería de hierro de 2 1/2 pulgadas. Estos pozos fueron instalados por la Empresa de Ferrocarriles Antofagasta-Bolivia hace varios años atrás. Mediciones en estos pozos indican niveles piezométricos entre 0.40 y 0.67 m sobre la superficie

5.3 Acuífero de Silala

5.3.1 Caracterización del Acuífero

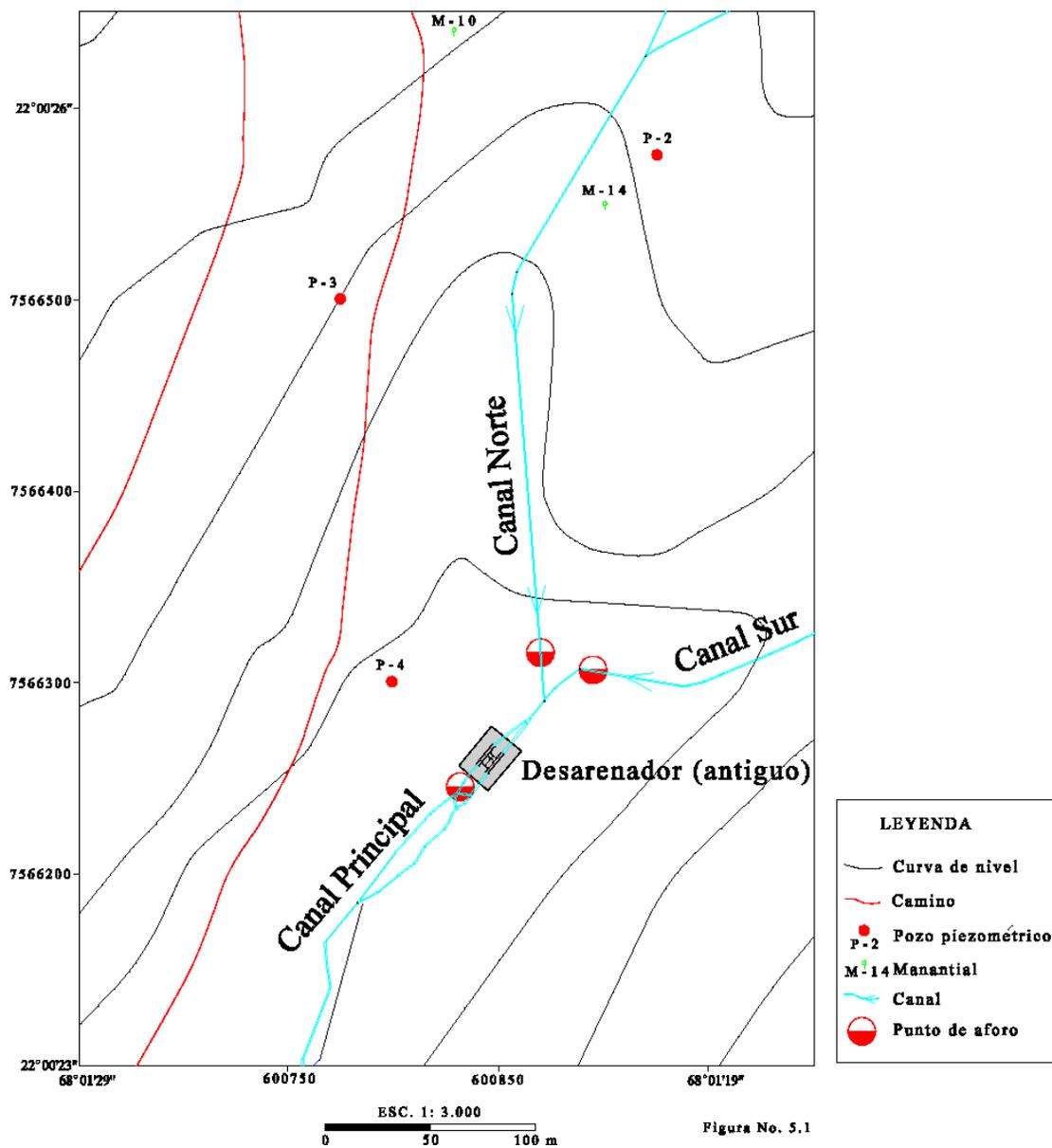
Con toda la información geológica, hidrológica, hidrogeológica y geofísica, sin contar con el beneficio de información de pozos exploratorios, podremos colegir las siguientes conclusiones de caracterización del acuífero de Silala:

El acuífero en el área de Silala está constituido por las Ignimbritas Silala y probablemente por formaciones geológicas infrayacentes que no afloran en el área de estudio, ni en la región. Las Ignimbritas Silala están altamente fracturadas y diaclasadas. Afloran en varios lugares del área debido a una erosión diferenciada de las rocas volcánicas y a fallas que han dado lugar a la formación de quebradas ensanchadas por procesos fluvio-

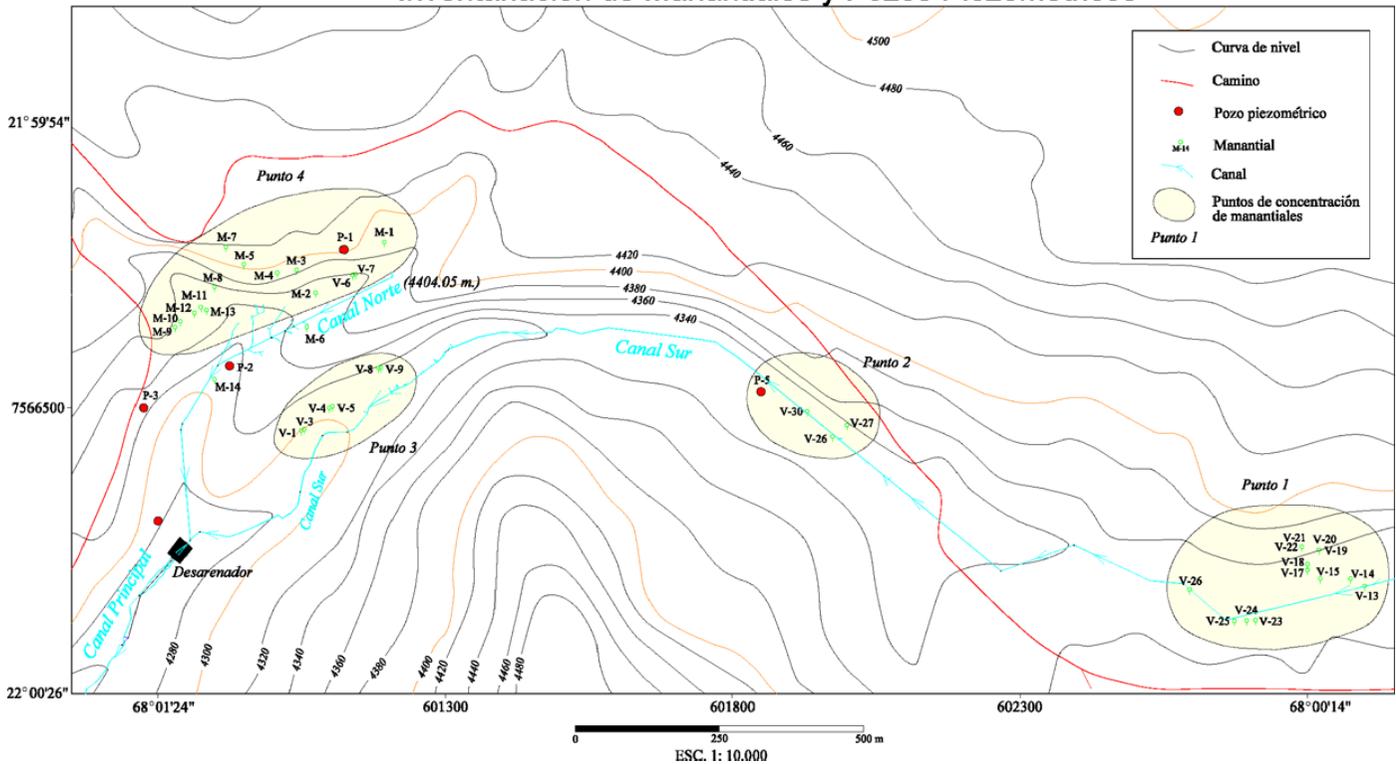
PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

glaciales. Las ignimbritas, por su bajo grado de soldadura, y su alta fracturación, permiten una buena transmisividad y permeabilidad.

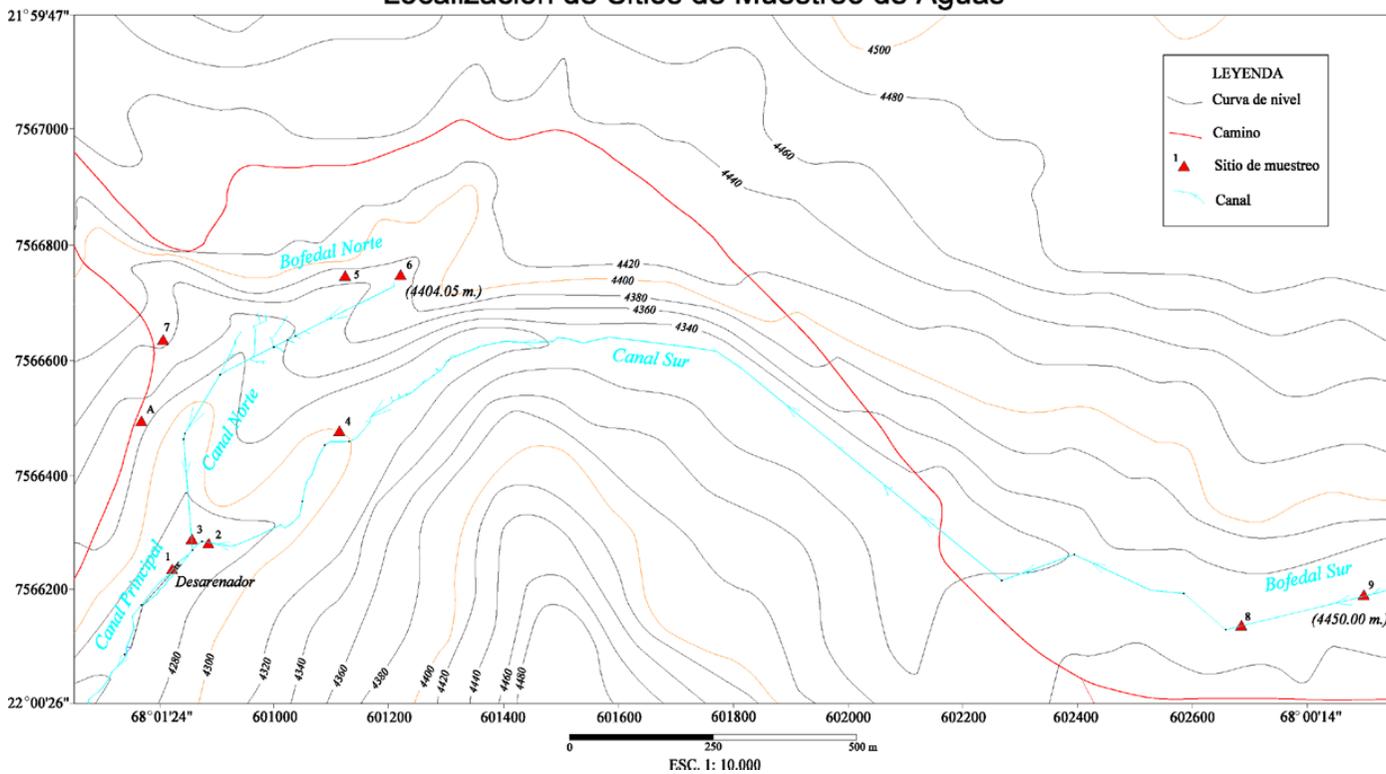
Localización de Puntos de Aforo



Inventariación de Manantiales y Pozos Piezométricos



Localización de Sitios de Muestreo de Aguas



PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

INVENTARIO DE POZOS PIEZOMETRICOS

N°	Ubicación	Este	Norte	Fecha	Prof. (m)	Diámetro (pul.)	N.E. (m.)	m.s.b.p.	Conduc. (mS/cm.)	Temp. (°C)	P.H.	Caudal (l/s)	Observ.
P-1	Silala Norte	601125	7566775	5/26/00	10.27	2 1/4"	surgent	0.67	88	15.7	8.03	0.25	Muestra N° 5
P-2	Silala Norte	600925	7566575	5/26/00	10.15	2 1/4"	0.19	0.45	78	17	8.48		
P-3	Silala Norte	600775	7566500	10/24/00	9.75	2 1/4"	2.17	0.75	227	7	8	0.1	Silala Chile 7
P-4	Silala Norte	600800	7566300	5/26/00	10	2 1/4"	0.20	0.40	115	9.1	8.4		
P-5	Silala Sur	601850	7566530	5/29/00	5.95	2 1/4"	0.46	0.46	342	6.2			



Fotografía 8 – Bofedales con ojos de agua delimitado por el manto Ignimbrítico

del acuífero. Se han determinado dos sistemas principales de juegos de diaclasas; el 67 por ciento de ellas tienen un rumbo NE-SW y un 23 por ciento restante un rumbo NW-SE.

La totalidad de los manantiales que afloran en forma artesiana en el área de Silala son descargas del acuífero de las Ignimbritas Silala. En muchos casos se observan manantiales surgentes directamente de las diaclasas y fisuras (Fotografía No. 9). Los sedimentos finos Cuaternarios y Recientes que cubren las ignimbritas son alimentados y saturados por el agua del acuífero ignimbrítico subyacente formando bofedales.

El acuífero de Silala es tipo regional que aflora en forma artesiana, pudiendo ser un acuífero confinado o no-confinado. Faltaría la perforación de por lo menos de dos pozos

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

exploratorios para definir su real origen, el espesor de las ignimbritas y las rocas infrayacentes. Así como la determinación del nivel ó niveles de los acuíferos y el bombeo necesario para determinar los niveles de descarga permisibles.

Por la hidroquímica y parámetros físicos de las aguas pareciese que existirían dos niveles de acuíferos ignimbríticos. Uno superior que forma el bofedal del Sur u Oriental con afloramientos a los 4450 msnm con una conductividad promedio de 257 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y mayor contenido de Ca, Li y S04. El segundo nivel acuífero inferior, aflora a los 4400 msnm y tiene una conductividad promedio de 109 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y mayor contenido de Na. Este nivel es el que aflora en el Bofedal Norte o Cajones.

No se detectó ningún tipo de contaminación en las aguas surgentes del acuífero.

5.3.2 Niveles Piezométricos

Los niveles piezométricos estáticos del acuífero varían de 0.40 a 0.67 metros sobre el nivel superficial, pudiendo considerarse a los mismos como pozos artesianos, los cuales están confinados por capas impermeables infrayacentes. Estas medidas han sido tomadas en los pozos piezométricos instalados hace varios años atrás en el Bofedal Norte. La Tabla 5.2 muestra la ubicación y el detalle de los parámetros medidos en los cinco pozos piezométricos encontrados en el Silala. El piezómetro del Tercer Bofedal de la Quebrada Sur tiene una profundidad de 6 m y muestra un nivel freático estático de 0.80 metros por encima de la superficie. Por toda la información obtenida, concordante con la información geofísica, se concluye que la dirección predominante del flujo subterráneo es de este a oeste y que el acuífero tiene una alta presión aumentando en la misma dirección.

El flujo ascendente permanente muestra una alta evidencia de una conexión hidráulica dentro de las Ignimbritas Silala o con una capa permeable inferior.

El piezómetro No. 3 del Bofedal Norte no muestra agua aflorante y está ubicado en una zona del bofedal (seco) que no muestra ojos o manantiales. La profundidad del agua medida en éste piezómetro esta a 2 m de la superficie. Esto podría indicar cierto tipo de compartimiento del acuífero debido posiblemente a que las ignimbritas en ésta zona no estén altamente fracturadas, como en otras zonas de la región de Silala o están al otro lado de la Falla Silala.

5.3.3 Recarga

Considerando que la precipitación pluvial en el área es del orden de 60 mm/año y el área de recarga del acuífero es de unos 79 Km^2 (ver Mapa No. 1), se tendría un volumen aproximado de 5.5 millones de metros cúbicos disponibles para infiltración hacia el acuífero. Considerando otros parámetros como:

Un factor de 20 % de infiltración, que es sumamente alto, como el parámetro de recarga del acuífero.

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

A pesar de que se conoce que la evaporación es 15 veces superior a la precipitación, se puede asumir que el restante 80 % de la precipitación es el parámetro de pérdida total por evaporación y evapotranspiración.

Con estos parámetros se puede determinar que el volumen actual de descarga de 164 L/seg, no podría sostenerse con el volumen de infiltración calculado, que daría una descarga de alrededor de 38 L/seg. Por lo que se determina que es totalmente improbable que exista una recarga/descarga por aguas meteóricas al acuífero ignimbrítico en el Silala.

Se necesitaría un área de recarga 4.3 veces mayor al tamaño del área de recarga de Silala, asumiendo que toda la recarga viene de precipitación pluvial.

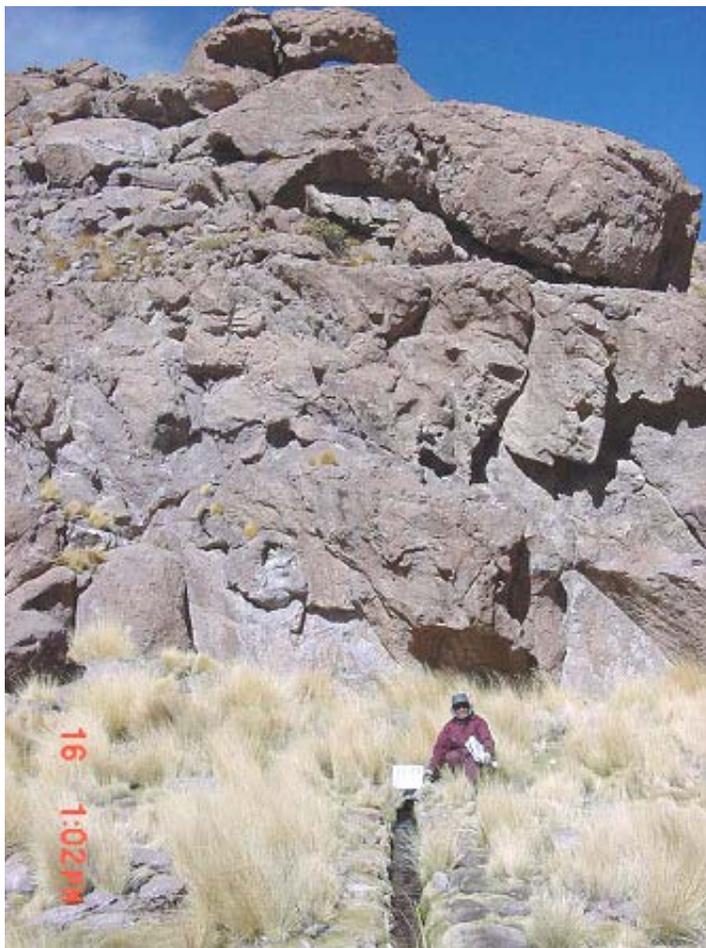
En principio se analizó como una posible fuente de recarga a la Laguna Khara ubicada a 17 Km al NE de Silala. La cota del borde de la laguna coincide con la cota de los afloramientos de los manantiales en la cabecera del Canal Sur. Siendo por lo tanto, improbable que el acuífero reciba recarga de la laguna. En cambio, se podría considerar que la laguna sea probablemente una manifestación superficial del acuífero de Silala drenando hacia el este. La laguna podría también ser el resultado de la descarga combinada de otros acuíferos, además de Silala.

5.3.4 Descarga

En el área de Silala, el acuífero se descarga a través de las diaclasas y fisuras de las rocas ignimbríticas a lo largo de zonas de fallamiento, formando manantiales u ojos de agua. La mayoría de los manantiales afloran a sedimentos Cuaternarios (Recientes) de grano fino compuestos por limo, arena y material orgánico depositados en zonas planas, impregnándolos completamente y formando bofedales.

Las suaves pendientes, la alta evaporación y evapotranspiración, la baja precipitación, la composición y constitución de los suelos de las quebradas hacen totalmente improbable el escurrimiento de un flujo libre de agua por las quebradas, ya sea formando riachuelos o ríos continuos. En la actualidad el flujo de descarga promedio del acuífero que sale del territorio boliviano y que se dirige hacia la República de Chile, mediante los canales abiertos construidos por la FCAB específicamente para este propósito, es de 164 L/seg en un rango de mediciones entre 120 L/Seg y 179 L/Seg.

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL



Fotografía 9 – Manantial que aflora en el Canal Norte (canal secundario de aducción), al fondo el manto Ignimbrítico

6. HIDROQUÍMICA DE LAS AGUAS SUPERFICIALES

6.1 Muestreo de Aguas

Con el objeto de caracterizar la calidad hidroquímica de las aguas que afloran en la región de Silala, se realizó un muestreo sistemático de nueve puntos de muestreo cubriendo toda el área de los manantiales (Mapa No. 2). Algunos de éstos puntos fueron muestreados en sucesivas visitas al área de estudio. La ubicación y características de los puntos muestreados se presentan en la Tabla No. 6.1. Las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Aguas del Departamento de Minería y Medio Ambiente de SERGEOMIN en la ciudad de Oruro.

6.2 Clasificación del Tipo de Agua

El rango de la conductividad eléctrica del agua aflorando en la región de Silala varía de 95 a 340 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Estos valores corresponden a aguas de baja mineralización de acuerdo a las Normas y Estándares Bolivianos del Ministerio de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente (MDSMA), las cuales están vigentes en nuestro país desde 1997.

Según el Diagrama de Piper (Figura No. 6.1) y los Diagramas de Stiff (Figuras 6.4 al 6.14) las aguas analizadas son del tipo bicarbonatadas sódicas. La normativa del MDSMA, señala que las aguas aptas para consumo doméstico del Tipo "A" deben contener como máximo 500 mg/L de bicarbonato y las aguas analizadas de Silala no superan los 208 mg/L. Respecto al contenido de sodio, el MDSMA norma como aguas del Tipo "A" a aquellas con un contenido máximo de 200 mg/L; las aguas analizadas de Silala no superan los 95 mg/L. Por lo tanto, se puede concluir que las aguas analizadas de la región de Silala son Tipo "A" aptas para todo uso, incluyendo el consumo humano.

Las aguas con fines de riego son clasificadas en el Diagrama de Wilcox (Figura No. 6.2). La mayoría de las aguas son del tipo C1S1, correspondiendo a baja salinidad y baja relación de absorción de sodio (RAS). Las aguas de Silala son aptas para riego de todo tipo de suelos sin restricción alguna. La muestra M-8 es del tipo C2S1 con ligero incremento de salinidad (salinidad media) y un bajo valor de RAS. El agua de éste punto de muestreo tiene cierta restricción para suelos pesados. Existe la posibilidad de que ésta muestra podría haber sido algo contaminada en el momento de muestreo o análisis.

El Diagrama de Schoeller (Figura No. 6.3) indica que las aguas muestreadas del acuífero de Silala son esencialmente de un solo tipo, bicarbonatadas sódicas, con pequeñas variaciones hidroquímicas y con variaciones de parámetros físicos dentro de rangos muy estrechos.

Los Diagramas de Stiff (Figuras Nos. 6.4 al 6.14) confirman el tipo de agua de los Manantiales de Silala como bicarbonatada sódica.

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

TABLA 6.1

UBICACIÓN DE SITIOS DE MUESTRAS DE AGUAS

Nº	Ubicación	Fecha	Hora	Tipo de fuente	UTM Este	UTM Norte	Conduc. (mS/cm.)	Temp. (°C)	Caudal (L/s)	Observaciones
1	Silala	06/01/2000	11:15	Boca toma (canal)	600810	7566000	187	13	150	Caudal total de la cuenca
2	Silala Sur	06/01/2000	11:15	Canal Sur	600890	7566300	218	12.5	90	Caudal total brazo sur
3	Silala Norte	06/01/2000	11:15	Canal Norte	600863	7566310	120	14.6	60	Caudal total brazo Norte
4	Silala Sur	06/01/2000	11:40	Vertiente	601105	7566504	199	13.7	0.5	Vertiente de fractura (V-5)
5	Silala Norte	06/01/2000	12:10	Pozo	601125	7566775	88	15.3	0.25	Pozo piezométrico (P-1)
6	Silala Norte	06/01/2000	12:25	Vertiente	601195	7566790	101	10	0.5	Cabecera brazo Norte (M-1)
7	Silala Norte	06/01/2000	12:40	Vertiente	600830	7566640	127	16	5	Vertiente de fractura (M-10)
8	Silala Sur	06/01/2000	13:00	Bofedal	602685	7566130	360	13.7		Bofedal
9	Silala Sur	06/01/2000	13:30	Vertiente	602900	7566189	251	15.9		Cabecera brazo sur (V-12)
M	Silala Norte	24/10/2000	10:30	Pozo	600775	7566500	233	16	0.º	Pozo piezométrico (P-3)

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

TABLA 6.2

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS AGUAS DE SILALA

No	pH	Conduc. μ S/cm	TSD Mg/L	Sól. Susp. mg/L	Dureza T. mg/L CaCO ₃	HCO ₃ mg/L	CO ₃ mg/L	SO ₄ mg/L	Cl mg/L	Na mg/L	K mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L	Mn mg/L	Li mg/L	Fe mg/L
1	7.65	176.00	149.00	6.00	46.94	106.00	0.00	9.05	7.16	23.00	2.50	10.80	4.85	0.04	0.09	0.04
2	7.70	112.00	111.00	5.00	20.97	68.93	0.00	7.82	7.16	20.00	1.90	6.60	1.09	0.05	0.06	0.05
3	7.90	207.00	177.00	5.00	58.43	131.76	0.00	9.47	8.95	25.80	2.90	12.80	6.43	0.11	0.12	0.11
4	7.70	124.00	111.00	5.00	23.97	69.93	0.00	11.11	7.16	20.00	1.90	6.60	1.82	0.06	0.07	0.06
5	8.35	95.00	114.00	9.00	22.97	50.02	0.00	4.12	7.16	15.00	2.00	6.40	1.70	0.01	0.02	0.04
6	7.40	96.00	119.00	8.00	18.48	56.12	0.00	9.05	7.10	18.00	2.00	5.40	2.00	0.01	0.03	0.37
7	7.70	120.00	118.00	4.00	23.47	75.03	0.00	9.47	7.16	23.00	2.00	6.40	1.82	0.01	0.06	0.06
8	7.50	340.00	277.00	13.00	119.85	218.99	0.00	13.99	7.16	30.00	5.10	25.40	13.71	0.01	0.15	0.25
9	7.55	237.00	192.00	8.00	62.92	150.06	0.00	11.94	7.52	29.00	3.10	11.40	4.12	0.02	0.16	0.10
M	7.50	227.00	114.00	8.00	34.87	137.25	0.00	11.11	8.90	38.00	9.00	8.97	2.42	0.20	0.00	0.06

TABLA 6.3

UBICACIÓN DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA PARA ANÁLISIS DE TRITIO

No	Ubicación	Datos de campo					Obs.
		Fecha de Muestreo	Conduct. MS/cm	Temp. °C	pH	Caudal L/s	
1	Silala	5/27/01	209	12	8.39	150.0	Canal principal
4	Silala Sur	5/27/01	132	14	8.67	0.5	Vertiente
5	Silala Norte	5/27/01	132	15.3	8.99	0.5	Vertiente
7	Silala Norte	5/27/01	131	16.1	9.21	5.0	Vertiente
9	Silala Sur	5/27/01	304	16	8.8	1.0	Vertiente
10	Silala Sur	6/27/01	187	13	8.4	35.0	Vertiente

Los Diagramas de Stiff así como los valores de conductividad para las aguas del Bofedal Sur u Oriental muestran una pequeña diferencia con respecto a las aguas del Bofedal Norte o Cajones. Estas pequeñas diferencias más la diferencia de altura de alrededor de 50 m, con relación a los puntos de muestreo, permite suponer la posible existencia de diferentes niveles de agua dentro del acuífero. Esta suposición sólo podría ser confirmada con la perforación de pozos, mediciones geofísicas "down hole" y análisis hidroquímicos detallados.

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

Por su hidroquímica y parámetros físicos, las aguas del Bofedal Norte son aún más limpias y puras que las del Bofedal Sur, a pesar de que aparentemente provienen de un nivel más profundo dentro del acuífero del Silala.

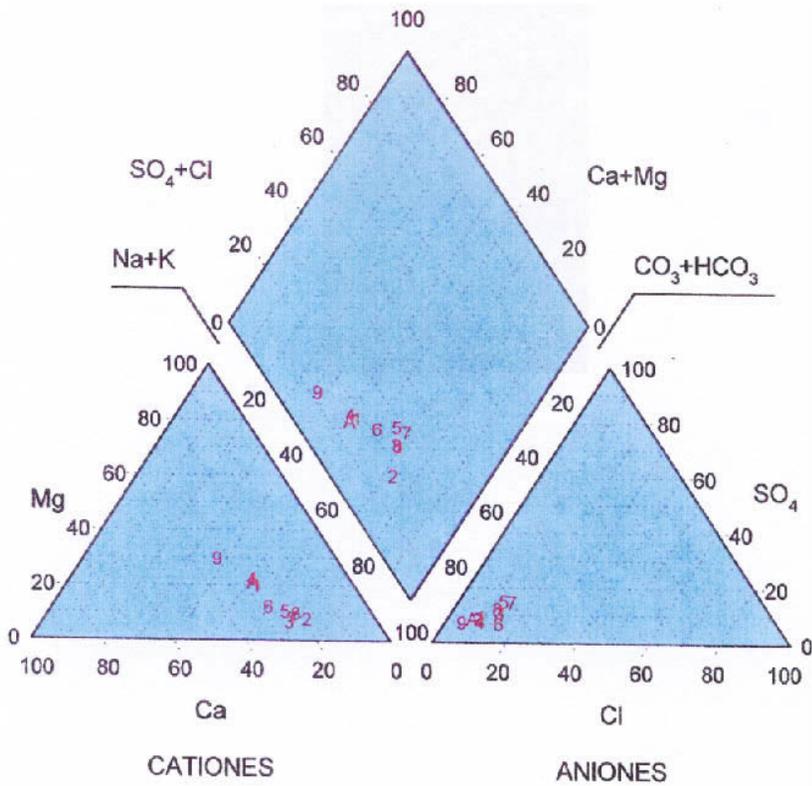
Otra interpretación a esta pequeña diferencia con relación a la calidad de agua es que el bloque sudeste de la Falla Silala haya subido con relación al bloque noroeste. Las aguas del bofedal Sur vendrían de un nivel algo más profundo del acuífero que se encontraría en el bloque sudeste de la falla y las aguas del Bofedal Norte de un nivel de agua superior que se encontraría en el bloque noroeste de la misma.

6.3 Edad del Agua

Con la finalidad de determinar la edad del agua del acuífero del Silala se tomaron nueve muestras (Tabla No. 6.3) que fueron analizadas en los laboratorios de la Budensanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe de Hannover, Alemania, quienes informaron lo siguiente: “Lamentablemente las investigaciones realizadas con las muestras de agua de los Manantiales de Silala, solamente han demostrado que la edad de dichas aguas es de por lo menos 40 años. Para una determinación más exacta de la edad de esta agua, tendrían que haberse tomado muestras para el análisis de Carbón 14, el cual es muy moroso y no puede ser realizado en Bolivia actualmente.” Además indican que “Sin embargo sabemos que los análisis de tritio, que el tiempo de recarga y el nacimiento de las aguas en los manantiales es mínimamente 40 años. La conclusión es que las aguas de los Manantiales de Silala muy probablemente provienen de un tiempo pluvial como por ejemplo el que tuvo lugar durante la fase Tauca aprox. 8,500 años atrás.”

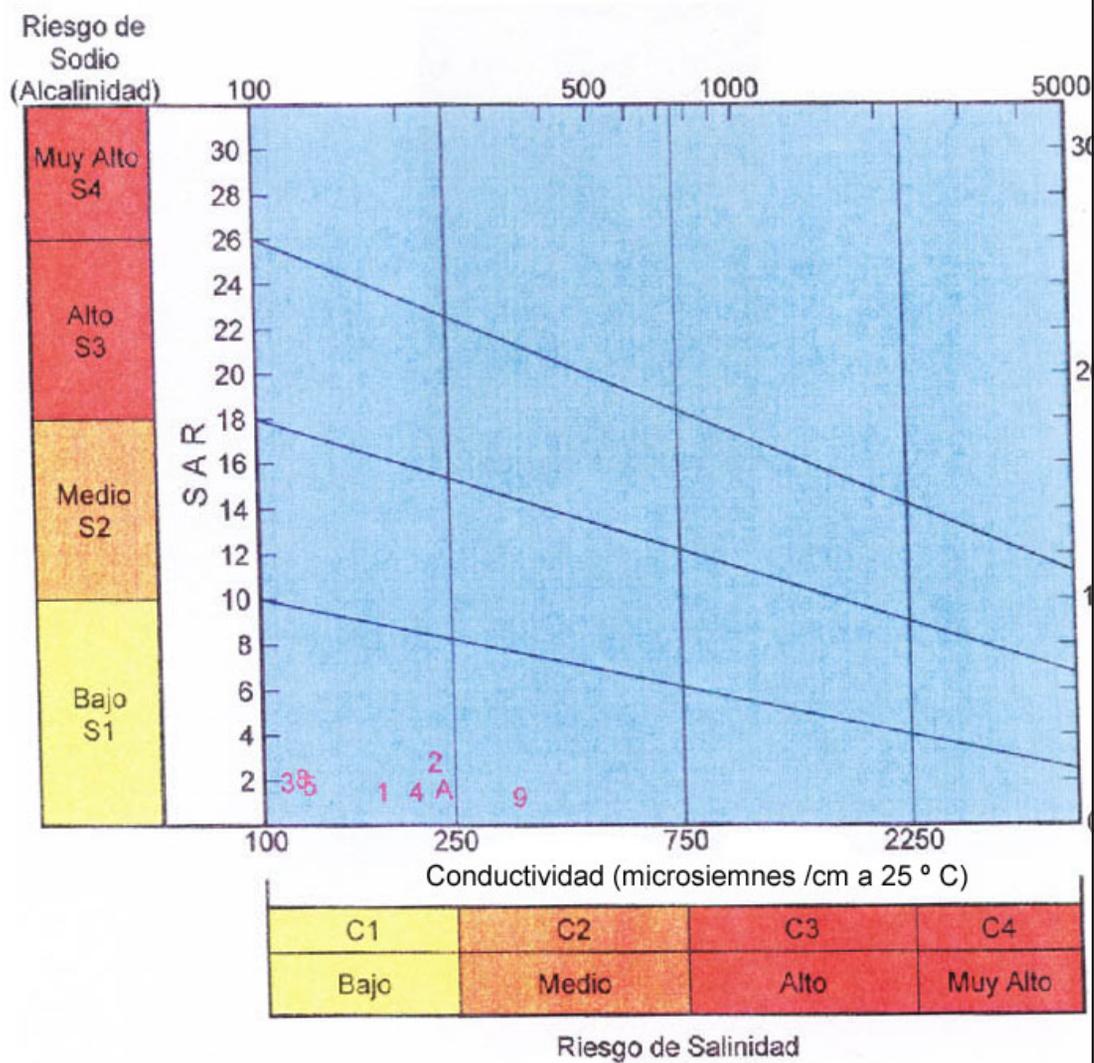
PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

DIAGRAMA DE PIPER



- | | |
|-------------|-------|
| 1 M-1 | 9 M-8 |
| 2 M-10-(P3) | A M-9 |
| 3 M-2 | |
| 4 M-3 | |
| 5 M-4 | |
| 6 M-5 | |
| 7 M-6 | |
| 8 M-7 | |

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

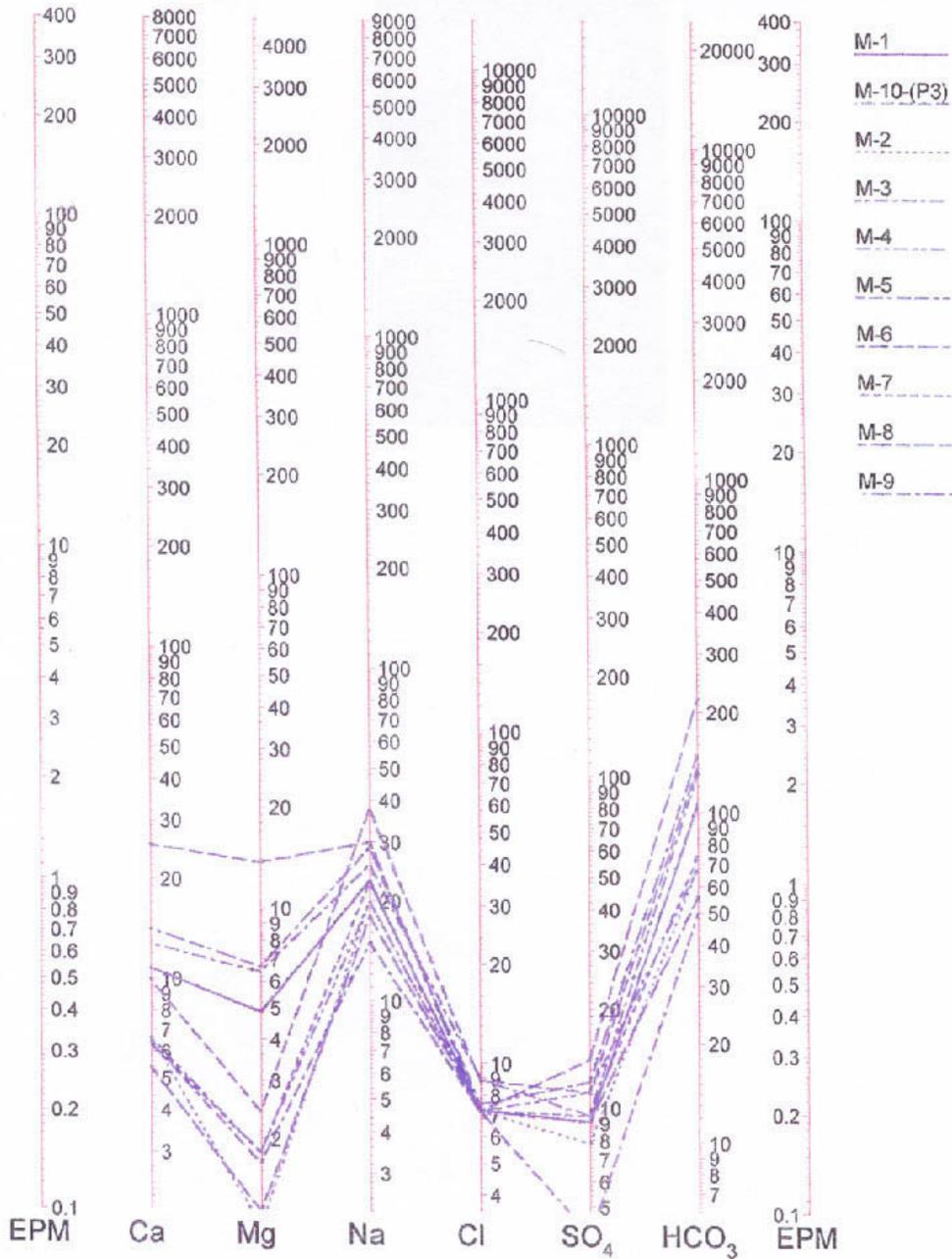
DIAGRAMA DE WILCOX

1 M-1
 2 M-10-(P3)
 3 M-2
 4 M-3
 5 M-4
 6 M-5

7 M-6
 8 M-7
 9 M-8
 A M-9

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

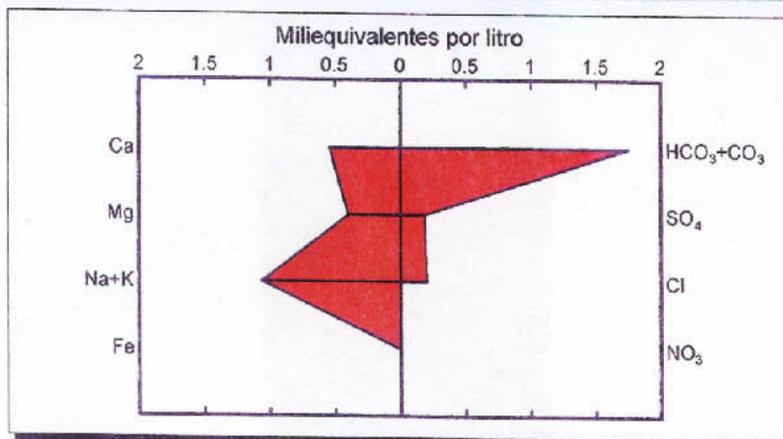
DIAGRAMA DE SCHOELLER



PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

DIAGRAMA DE STIFF

Código M-1 Silala



Cationes					
	Ca	Mg	Na	K	Fe
Milieuivalentes por litro	0.5389	0.3990	1.0005	0.06393	0.0021
Miligramos por litro	10.80	4.85	23.00	2.50	0.04

Aniones					
	HCO3	CO3	SO4	Cl	NO3
Milieuivalentes por litro	1.74390	0.0000	0.18842	0.20198	
Miligramos por litro	106.40	0.00	9.05	7.16	

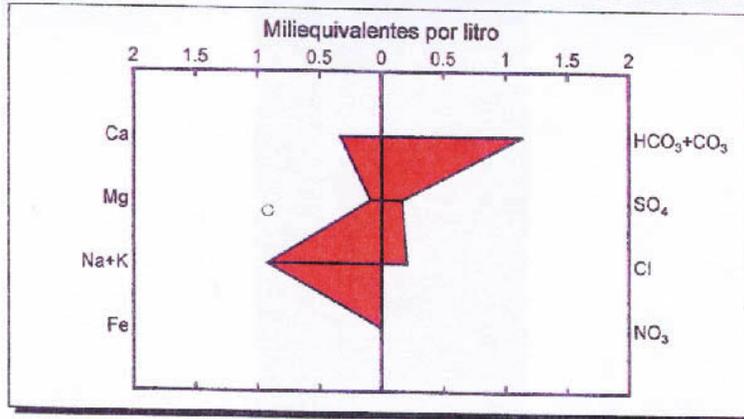
Mn 0.0000	NO2	PO4	F	B	SiO2
TDS 149.00	Dureza 46.9	Alcalinidad 1.7	Conductividad 176.00	pH 7.65	SAR 1.4610

Tipo de Agua Sodium Bicarbonate

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

DIAGRAMA DE STIFF

Código **M-2 Silala**



Cationes					
	Ca	Mg	Na	K	Fe
Milieuivalentes por litro	0.3293	0.0897	0.8700	0.04858	0.0027
Miligramos por litro	6.60	1.09	20.00	1.90	0.05

Aniones					
	HCO3	CO3	SO4	Cl	NO3
Milieuivalentes por litro	1.12976	0.0000	0.16281	0.20198	
Miligramos por litro	68.93	0.00	7.82	7.16	

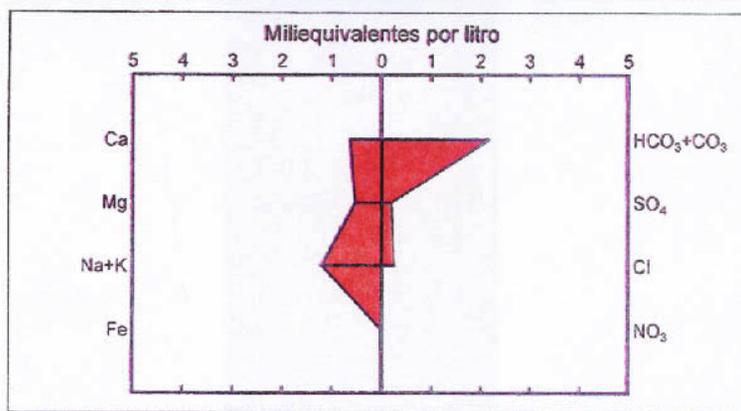
Mn 0.0000	NO2	PO4	F	B	SiO2
TDS 111.00	Dureza 21.0	Alcalinidad 1.1	Conductividad 112.00	pH 7.70	SAR 1.9008

Tipo de Agua **Sodium Bicarbonate**

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

DIAGRAMA DE STIFF

Código M-3 Silala



Cationes					
	Ca	Mg	Na	K	Fe
Miliequivalentes por litro	0.6387	0.5289	1.1223	0.07415	0.0064
Miligramos por litro	12.80	6.43	25.80	2.90	0.12

Aniones					
	HCO3	CO3	SO4	Cl	NO3
Miliequivalentes por litro	2.15955	0.0000	0.19717	0.25248	
Miligramos por litro	131.76	0.00	9.47	8.95	

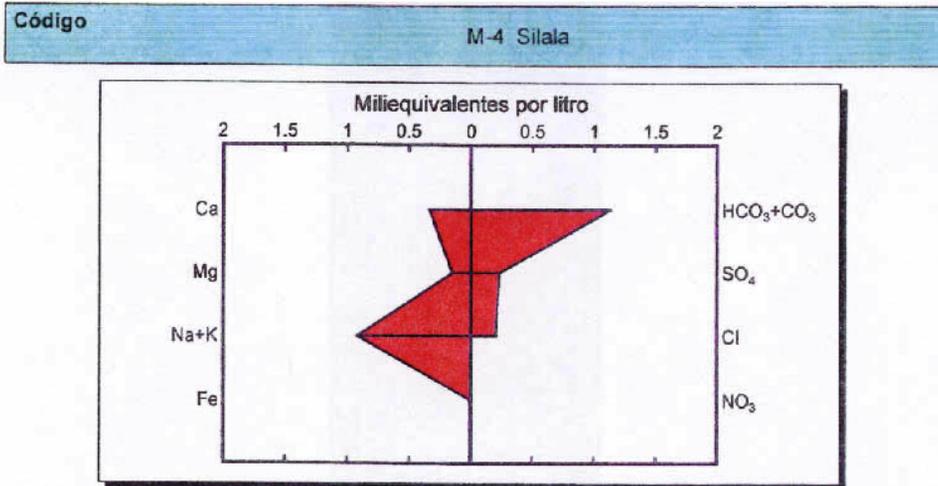
Mn 0.0000	NO2	PO4	F	B	SiO2
TDS 177.00	Dureza 58.4	Alcalinidad 2.2	Conductividad 207.00	pH 7.90	SAR 1.4688

Tipo de Agua

Sodium Bicarbonate

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

DIAGRAMA DE STIFF



<i>Cationes</i>					
	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>Na</i>	<i>K</i>	<i>Fe</i>
<i>Miliequivalentes por litro</i>	0.3293	0.1497	0.8700	0.04858	0.0032
<i>Miligramos por litro</i>	6.60	1.82	20.00	1.90	0.06

<i>Aniones</i>					
	<i>HCO3</i>	<i>CO3</i>	<i>SO4</i>	<i>Cl</i>	<i>NO3</i>
<i>Miliequivalentes por litro</i>	1.12976	0.0000	0.23131	0.20198	
<i>Miligramos por litro</i>	68.93	0.00	11.11	7.16	

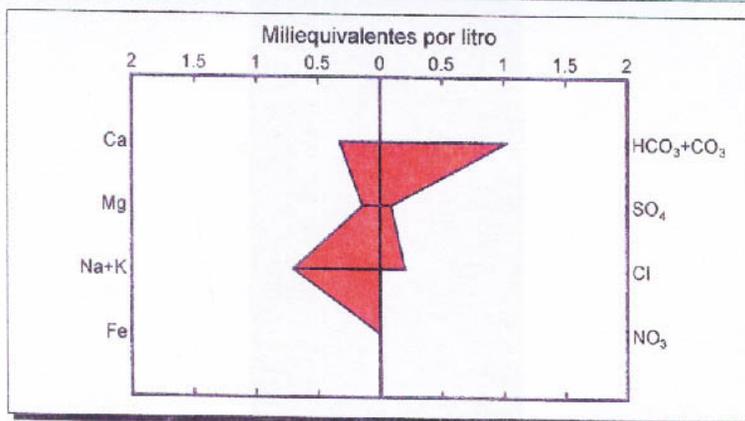
Mn 0.0000	NO2	PO4	F	B	SiO2
TDS 111.00	Dureza 14.0	Alcalinidad 1.1	Conductividad 124.00	pH 7.75	SAR 1.7776

Tipo de Agua Sodium Bicarbonate

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

DIAGRAMA DE STIFF

Código M-5 Silala



Cationes					
	Ca	Mg	Na	K	Fe
Miliequivalentes por litro	0.3194	0.1398	0.6525	0.05114	0.0021
Miligramos por litro	6.40	1.70	15.00	2.00	0.04

Aniones					
	HCO3	CO3	SO4	Cl	NO3
Miliequivalentes por litro	0.81983	0.2000	0.08578	0.20198	
Miligramos por litro	50.02	6.00	4.12	7.16	

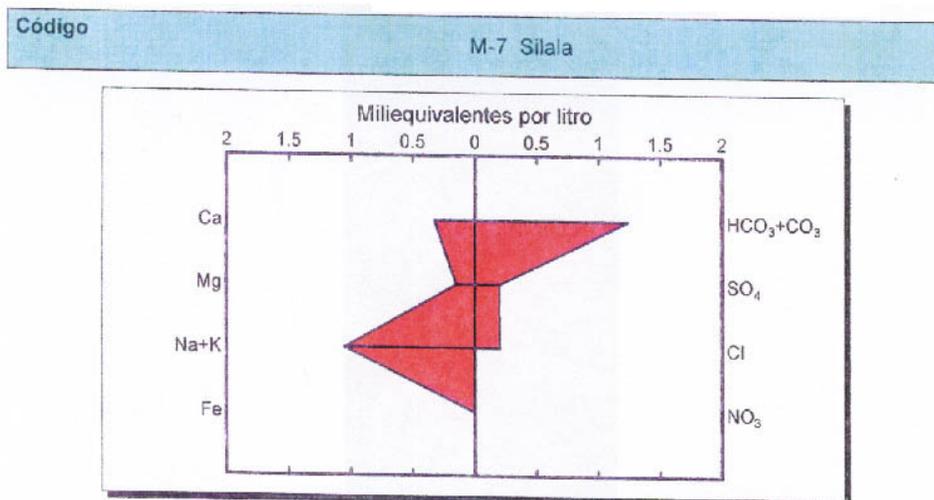
Mn 0.0000	NO2	PO4	F	B	SiO2
TDS 114.00	Dureza 23.0	Alcalinidad 0.8	Conductividad 95.00	pH 8.35	SAR 1.3617

Tipo de Agua Sodium Bicarbonate

FALTA DIAGRAMA 6

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

DIAGRAMA DE STIFF



<i>Cationes</i>					
	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>Na</i>	<i>K</i>	<i>Fe</i>
<i>Miliequivalentes por litro</i>	0.3194	0.1497	1.0005	0.05114	0.0032
<i>Miligramos por litro</i>	6.40	1.82	23.00	2.00	0.06

<i>Aniones</i>					
	<i>HCO3</i>	<i>CO3</i>	<i>SO4</i>	<i>Cl</i>	<i>NO3</i>
<i>Miliequivalentes por litro</i>	1.22974	0.0000	0.19717	0.20198	
<i>Miligramos por litro</i>	75.03	0.00	9.47	7.16	

Mn 0.0000	NO ₂	PO ₄	F	B	SiO ₂
TDS 118.00	Dureza 23.5	Alcalinidad 2.0	Conductividad 120.00	pH 7.70	SAR 2.0659

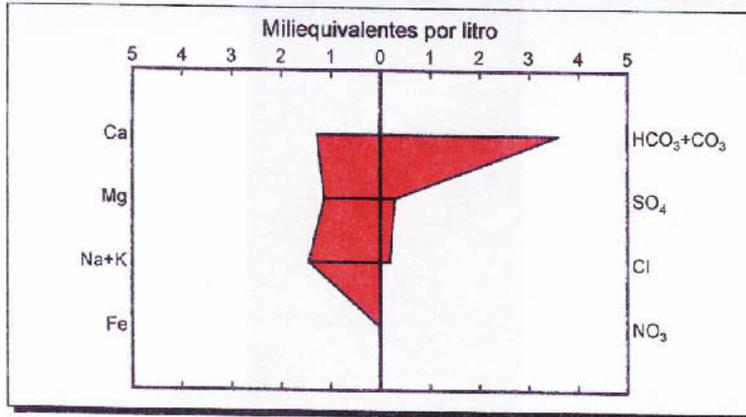
Tipo de Agua Sodium Bicarbonate

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

DIAGRAMA DE STIFF

Código

M-8 Silala



Cationes

	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>Na</i>	<i>K</i>	<i>Fe</i>
<i>Miliequivalentes por litro</i>	1.2675	1.1278	1.3050	0.13041	0.0134
<i>Miligramos por litro</i>	25.40	13.71	30.00	5.10	0.25

Aniones

	<i>HCO3</i>	<i>CO3</i>	<i>SO4</i>	<i>Cl</i>	<i>NO3</i>
<i>Miliequivalentes por litro</i>	3.58925	0.0000	0.29127	0.20198	
<i>Miligramos por litro</i>	218.99	0.00	13.99	7.16	

Mn 0.0000	NO2	PO4	F	B	SiO2
TDS 277.00	Dureza 119.9	Alcalinidad 3.6	Conductividad 340.00	pH 7.50	SAR 1.1925

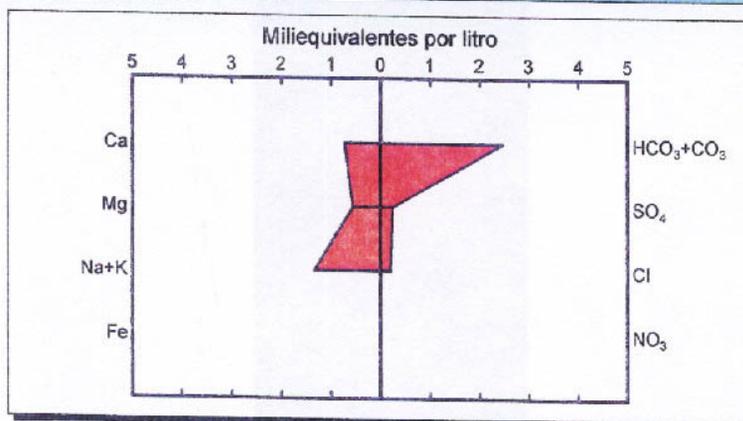
Tipo de Agua

Sodium Bicarbonate

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

DIAGRAMA DE STIFF

Código M-9 Silala



Cationes					
	Ca	Mg	Na	K	Fe
Miliequivalentes por litro	0.7086	0.5487	1.2615	0.07927	
Miligramos por litro	14.20	6.67	29.00	3.10	

Aniones					
	HCO3	CO3	SO4	Cl	NO3
Miliequivalentes por litro	2.45948	0.0000	0.24859	0.21214	
Miligramos por litro	150.06	0.00	11.94	7.52	

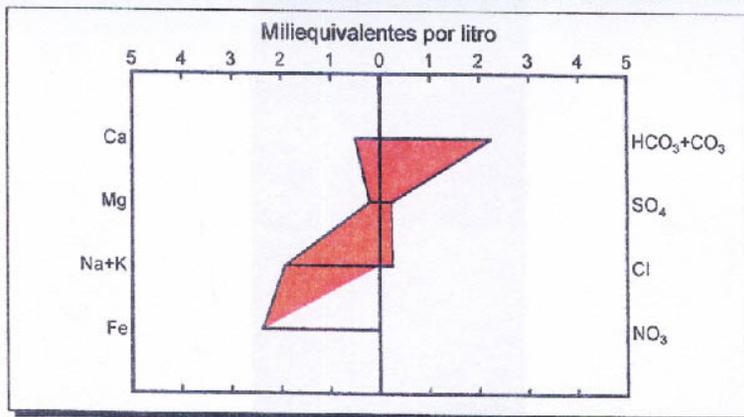
Mn	NO2	PO4	F	B	SIO2
TDS 192.00	Dureza 62.9	Alcalinidad 2.5	Conductividad 237.00	pH 7.55	SAR 1.5911

Tipo de Agua Sodium Bicarbonate

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

DIAGRAMA DE STIFF

Código 7-Silala-P3



<i>Cationes</i>					
	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>Na</i>	<i>K</i>	<i>Fe</i>
<i>Millequivalentes por litro</i>	0.4975	0.1991	1.6530	0.25570	2.3637
<i>Miligramos por litro</i>	9.97	2.42	38.00	10.00	44.00

<i>Aniones</i>					
	<i>HCO3</i>	<i>CO3</i>	<i>SO4</i>	<i>Cl</i>	<i>NO3</i>
<i>Millequivalentes por litro</i>	2.24953	0.0000	0.23131	0.25107	
<i>Miligramos por litro</i>	137.25	0.00	11.11	8.90	

Mn 0.0073	NO2	PO4	F	B	SIO2
TDS 159.00	Dureza 34.9	Alcalinidad 2.3	Conductividad 227.00	pH 7.50	SAR 2.8009

Tipo de Agua Sodium Bicarbonate

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

7. OBRAS HIDRAULICAS

A solicitud de SERGEOMIN, el Servicio Técnico Minero (SETMIN) midió y mapeo un total de 3,695 m de canales abiertos colectores y secundarios de aducción con un ancho promedio del canal colector de 0.8 m y una profundidad promedio de 0.5 m.

La diferencia de altura medida por SETMIN desde el extremo oriental del Canal Sur hasta el punto de coincidencia del Canal Principal con la línea de la frontera internacional es de 114.21 metros. También se observan lugares, donde afloran las Ignimbritas Silala en los farallones de la Quebrada Sur del Canal Sur, que fueron probablemente voladas con perforaciones y explosivos seguramente para mejorar la descarga y flujo del agua subterránea.

Como estructuras de conducción primaria se han construido canales colectores abiertos que convergen en un canal principal. Estos canales de sección rectangular tienen dimensiones—base por altura—que varían de 0.60 m por 0.60 m en los Canales Norte y Sur y 1.00 m por 0.60 m en el Canal Principal que corre hasta la línea fronteriza. Todos los canales son abiertos con una base revestida con mampostería de piedra, sus muros laterales son también de mampostería de piedra canteada de la localidad unidas en ciertas partes con argamasa. En algunos lugares se observa que la unión entre piedras ha sido posteriormente cementada.

No se tiene un factor de eficiencia hidráulica de los canales construidos, pero se estima que la misma está en alrededor del 40 %.

7.1 Canal Sur

Es un canal abierto colector de 2,305 m de longitud (Fotografía No. 10). Este canal colector está conectado con dos sistemas ramificados de canales de aducción secundaria en la zona del Bofedal Sur u Oriental (Mapa No. 2). Estos inician el aprovechamiento sistemático de las aguas de los manantiales de los bofedales hasta su unión con el Canal Norte.

7.2 Canal Norte

El Canal Norte es también un canal abierto de 662 m de longitud con las mismas características de construcción del Canal Sur. Fue construido para recolectar y conducir el agua que aflora en los manantiales del Bofedal Norte o Cajones (Fotografía No. 11).

7.3 Canal Principal

Ambos canales convergen hacia el oeste y se juntan en un solo canal, el Canal Principal, que drena en la Quebrada Principal (Fotografía No. 12). El Canal Principal tiene una longitud de 712 m desde la confluencia de los dos canales, Norte y Sur, hasta la línea



PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

Fotografía 10 – Vista panorámica del canal Sur, al fondo se observa la formación de bofedales

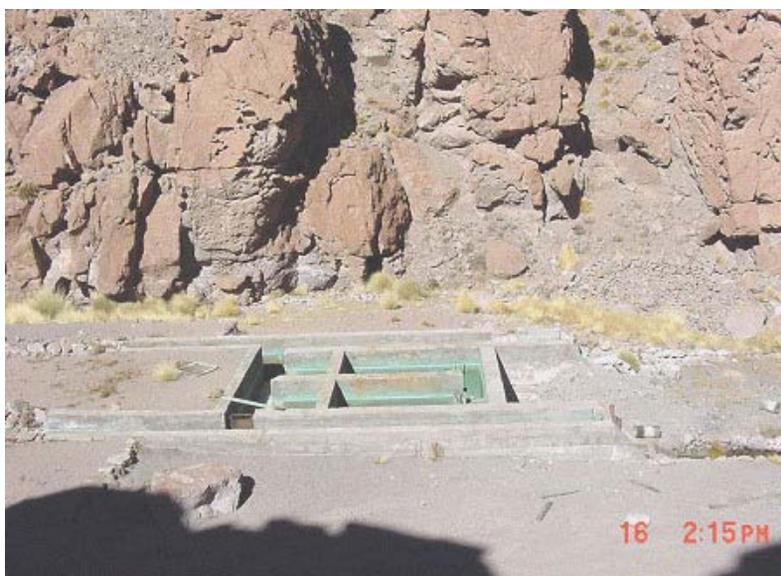


Fotografía 11 – Canal Norte, principal colector

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL



Fotografía 12 – Canal Principal con vista al desarenador



Fotografía 13 – Obra hidráulica construida para el tratamiento físico primario del agua (decantador y desarenador)

de la frontera. En las salidas de los Canales Norte y Sur, antes de su unión, así como en el Canal Principal, se aforaron sus caudales que se presentan en la Tabla 4.1.

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

7.4 Desarenador

Hacia el oeste y a 31 m aguas debajo de la convergencia de los dos canales, en territorio Boliviano y formando parte del Canal Principal, se encuentra una estructura en desuso que era alimentada por dos canales construidos en las paredes laterales del mismo (Fotografía No. 13). Esta estructura de piedra revestida con cemento y con cuatro celdas cumplía simultáneamente las funciones de: a) desarenador o decantador de sedimentos, o planta de tratamiento primario del agua, b) cámara de carga para las tuberías de acero de 10 y 12 pulgadas que salían de la misma y c) funciones de dique de control para la descarga al Canal Principal. Por coloraciones verdosas en sus paredes, se pudo evidenciar que se utilizó sulfato de cobre posiblemente como tratamiento primario del agua. La estructura tiene dos canales de cemento abiertos pegados a sus paredes externas que *by-pasean* las celdas centrales. En la actualidad, se utiliza el canal abierto de cemento que pasa pegado a la pared NW de la estructura haciendo un *by-pass* del mismo y formando parte del Canal Principal.

De la estructura descrita como desarenador, sobreponiéndose al actual canal abierto de piedra, salen dos tuberías de acero de 10 y 12 pulgadas de diámetro que están parcialmente enterradas y cortadas. Estas dos tuberías están en total desuso.

7.5 Pozos Piezométricos

Además de las obras hidráulicas mencionadas, existen otras como los 5 pozos piezométricos en tubería de acero de 2 ¼ pulgadas de diámetro y de una profundidad media de 10 m. Cuatro de ellos están localizados en el Bofedal Norte y uno en el Tercer Bofedal de la Quebrada Sur. Estos pozos fueron utilizados probablemente para el control piezométrico de las aguas subterráneas durante los diferentes meses del año ó para mejorar el caudal de las aguas subterráneas.

Es importante mencionar que todas estas obras hidráulicas fueron realizadas por técnicos y personal chileno de la empresa ferroviaria hasta muchos años atrás y no se tiene datos ó planos de los mismos. Circulaban rumores entre los lugareños que existía tubería perforada de hierro enterrada en los bofedales para incrementar la descarga del agua subterránea. Esta suposición fue desmentida por los resultados obtenidos con el levantamiento geofísico superficial de conductividad realizado en los bofedales y la Quebrada Principal.

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

8. ASPECTOS MEDIO AMBIENTALES

8.1 Introducción

Los resultados del estudio preliminar de la Línea Base Ambiental del área de Silala que se presenta en éste capítulo, son una recopilación de la información medio ambiental obtenida hasta el presente durante las varias visitas efectuadas al área de estudio.

Según M. Libermann (1986) y al Mapa Simplificado de las Ecoregiones de Bolivia, el área de estudio pertenece a la ecoregión denominada como la Región de Tierras Altas o Cordilleras que corresponde a las Praderas o Piso Altoandino Semiárido y Arido sin Cultivo, conocido también como "Puna Desértica".

El Ministerio de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente tiene disposiciones establecidas en el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (D.S. 24176 de 8 de diciembre de 1995) que permiten comparar las condiciones ambientales existentes o línea base de los actuales recursos hídricos del área de Silala con las reglamentadas por la legislación Boliviana.

8.2 Agua Superficial

No existen cuerpos de agua superficial en el área de estudio de Silala, excepto aquellas que afloran de los manantiales en los bofedales descritos en el Capítulo 5. Las denominadas Laguna Blanca y Laguna Chica son depresiones topográficas secas sin agua. La Laguna Blanca está cubierta en su superficie por clastos de 2 a 20 cm de *chert* o cuarzo amorfo, que dan lugar a ese tono blanquecino que se observa en la imagen satelital y fotografías aéreas.

El cuerpo de agua superficial más cercano al área es la Laguna Khara que se encuentra a 5.5 Km al NE. Los Manantiales de Silala, la Laguna Blanca y la Laguna Khara pareciesen estar alineados con el rumbo del Lineamiento Khenayani. Otro espejo de agua superficial es la Laguna Colorada, que también se encuentra fuera del área de estudio, está localizada a 38 Km al sur del área de Silala.

No existe ningún efluente contaminante en toda el área de estudio.

8.3 Aguas Subterráneas

Todo el agua que fluye en el área de estudio es de origen subterráneo que aflora a la superficie mediante manantiales u ojos de agua. De acuerdo a sus propiedades físicas y químicas, el agua de Silala se clasifica como Tipo "A" del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica. Es agua potable apta para consumo humano con una simple desinfección bacteriológica.

No existe ningún tipo de monitoreo de las aguas fluentes en el área de estudio.

Para la futura explotación de los recursos hídricos subterráneos de la región de Silala se deberá cumplir estrictamente lo estipulado en el Capítulo IV, Conservación de las Aguas

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

Subterráneas del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica de la Ley de Medio Ambiente y a una administración o manejo sustentable de acuíferos subterráneos, aguas arriba y aguas abajo del mismo.

8.4 Suelos

Regionalmente los suelos del área de Silala presentan dos formas fisiográficas muy marcadas. Las zonas cubiertas por mesetas ignimbríticas, conos, domos y flujos de lavas tienen suelos muy poco profundos, de color pardo a pardo rojizo y de textura liviana entre franco arenosos a franco arcillosos, generalmente entremezclados con grava y bolones de rocas. Son suelos muy susceptibles a la erosión y con altas y marcadas limitaciones en su uso agropecuario.

Las llanuras aluviales y los piedemontes se caracterizan por constituir suelos poco profundos, de color pardo, pardo rojizos a gris verdusco, constituidos por sedimentos franco arenosos, franco limosos y franco arcillo-arenosos. Tienen muy poca influencia salina, en aquellos lugares donde son influenciados por esta acción tiene una reacción que varía de neutra a fuertemente alcalina.

No existen suelos o planicies cultivadas. Sus principales limitaciones en el posible uso agropecuario están relacionadas a la falta de la formación y desarrollo de suelos con la ausencia total de un horizonte orgánico y al clima extremadamente frío con heladas severas.

La descripción detallada de los suelos de las Quebradas Norte, Sur y Principal y de los Bofedales Norte y Sur se presenta en el Capítulo 3.

8.5 Flora

La flora o cubierta vegetal presente en la región de Silala es pobre, típica del ecosistema de la región y esta representada por bofedales de altura y por una comunidad de matorrales de Puna desértica. A su vez, la flora es típica de la Cordillera Occidental y del Altiplano Boliviano.

Los bofedales se definen como praderas permanentemente húmedas formando amplios cojines compactos, ligeramente convexos de composición botánica variable según la altitud a que se encuentren y a la calidad, cantidad y persistencia del agua. Son ecosistemas de muy alta fragilidad y muy sensibles ante cualquier cambio, principalmente al elemento agua. La flora en el área de estudio está dominada fundamentalmente por especies juncáceas representadas por *Oxichloe Andina* y *Distichia Muscoides*. Tienen características de crecimiento bajo y compacto, clásicos de zonas con un nivel freático alto.

En la región de Silala se confirma con toda claridad la existencia de un nivel de correspondencia absoluta entre el crecimiento o desaparición de la cubierta vegetal o recurso botánico con el grado de presencia del recurso hídrico.

Los bofedales de la región de Silala han sido altamente afectados con la construcción de los canales recolectores de agua. En la actualidad quedan tan solo resabios de los

8.5 Flora

The flora or vegetation currently present in Silala region is poor, and typical of the ecosystem of the region: it is constituted by high wetlands and the bushes of the desert-like plateau. Likewise, flora is typical of the Western Mountain Range and of the Bolivian High Plateau.

The wetlands are defined as permanently humid meadows that form wide, slightly convex and compact cushions of variable botanical composition according to the altitude at which they are found, and to the quality, quantity and persistence of the water. These are very fragile ecosystems that are very sensitive to any changes and notably of the water element. The flora in the study area is mainly dominated by juncaceous species represented by *Oxichloe Andina* and *Distichia Muscoides*. They are low and compact in growth [and are] typical of zones with a high phreatic level.

In the Silala region, the existence of a level of absolute correlation between the growth or disappearance of the flora layer or botanical resource and the degree of presence of the hydric resource is clearly confirmed.

The wetlands of the Silala region have been highly affected by the construction of the canals for water collection. Nowadays, there are only remnants of the

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

bofedales originales que cubrían un área de cerca de 141,200 m² ó 14.1 hectáreas. La superficie actual de bofedales es tan sólo de alrededor de 6,000 m² ó 0.6 Ha. que se ubican en el entorno de las captaciones de agua y canales artificiales. Como resultado de esta devastación iniciada en 1908, se observa que la especie floral que predomina es la paja brava (*Festuca Orthophylla*) también conocida como “iru ichu”. El pasto alto que se tiene junto a la paja brava es el *Stypa* y *Festuca spp.*

Los matorrales de Puna Desértica, incluyen varios tipos de thola (*Parastrephia*, *Adesmia*, y *Baccharis spp.*). Se tiene también yareta (*Azorella compacta*) que crece esporádicamente en las pendientes de los volcanes Inacaliri y Silala. La yareta parece haber sido sobre-explotada en el área. Es una especie listada como vulnerable en la lista internacional de especies en peligro de extinción.

8.6 Fauna

Durante las varias visitas al área de estudio, se observaron unas 14 especies de animales que habitan el área de estudio. Todas las especies observadas son comunes a hábitats del Altiplano Boliviano y a la Cordillera Occidental, ninguna de ellas endémicas o en peligro de extinción. Entre ellas tenemos a las siguientes:

- Vicuña (*Vicugna vicugna*) – Huari – Sawalla
- Viscacha o chinchillón andino (*Lagidum viscaccia cuvieri*)

Entre las especies de aves, se observaron las siguientes:

- Avestruz Cordillerano (*Pterocnemia pennata*) – Suri
- Perdiz de la Puna (*Nothoprocta ornata*) – Pisaka
- Gaviota andina (*Larus serranus*)
- Pato de la Puna, pico azul (*Ana puna*) – Chirokankana
- Pato piojoso, pico amarillo (*Anas flavirostris*) – Uncayllu
- Golondrina andina (*Petrochelidon andecola*)

Entre reptiles y anfibios, se observaron lagartijas del género *Liolaemus* y entre los anfibios que fueron observados en la Quebrada Sur, tenemos el batracio (sapo) del tipo *Telmatobius marmoratus*

Entre insectos que habitaban los bofedales se observaron:

- Mariposas
- Tábano
- Mosca común
- Abejas pequeñas

No se ha encontrado ninguna especie piscícola en el hábitat acuático del área de estudio.

original wetlands that covered an area of 141,200 m² or 14.1 hectares. The current area of wetlands is only about 6,000 m² or 0.6 Ha. located in the surroundings of the water catchments and artificial canals. As a result of the devastation that began in 1908, it is observed that the predominant floral species is the wild straw (*Festuca Orthophylla*) also known as “iru ichu”. The high grass that exists next to the wild straw is the *Stypa* and *Festuca spp.*

The bushes of the Desert-like Plateau include several types of thola (*Parastrephia*, *Adesmia*, and *Baccharis spp.*). There is also yareta (*Azorella compacta*) that grows sporadically on the slopes of the Inacaliri and Silala volcanoes. The yareta seems to have been overexploited in the area. It is a species listed as vulnerable on the international list of endangered species.

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

8.7 Paisaje

El modelaje del paisaje de la región y del área de estudio está íntimamente relacionado con las diferentes fases orogénicas expresadas en la intrusión y deposición de rocas volcánicas en el Mioceno y Plioceno, y en la diversa actividad glacial y climática, que actuaron como agentes de erosión y deposición, en el Pleistoceno. El paisaje fisiográfico del área puede ser descrito como de mesetas onduladas formadas por rocas ignimbríticas cubiertas por sedimentos sueltos arenosos interrumpidas por serranías formadas por volcanes, conos volcánicos y flujos volcánicos alineados regionalmente de norte-sur que aparecen como formas irregulares positivas.

Por la belleza paisajística dominada por la exposición de rocas de diferentes tonalidades y texturas; por las diversas estructuras modeladas por fenómenos atmosféricos, especialmente el viento y la gravedad, así por una ausencia casi total de vegetación, denominamos el paisaje de la región como de “Jardín Japonés Natural”.

8.8 Recursos Históricos y Arqueológicos

No se han encontrado recursos históricos ni arqueológicos en el área de estudio. Se han ubicado dos viviendas rústicas deshabitadas de construcción reciente (Siglo XX), posiblemente de llameros o pastores. Las mismas están cercadas con paredes de piedra formando corrales. Dentro de las viviendas se han encontrado utensilios domésticos contemporáneos.

Se pueden observar caminos de tierra de trocha angosta subiendo las pendientes de los volcanes Inacaliri, Silala y Silala Chico con paredes de piedra apircadas a lo largo de los mismos. Estos caminos fueron supuestamente utilizados por los “yareteros” a mediados del siglo pasado para la explotación de la yareta como fuente de energía.

Durante el reconocimiento de campo no se ha tenido ningún hallazgo casual ni de artefactos superficiales aislados.

8.9 Recursos Humanos

El área no cuenta con presencia humana, teniendo un total de población igual a cero. El núcleo humano más cercano se encuentra en la población de Laguna Colorada a 38 Km al sur del área y que cuenta con una población flotante de 22 personas de residencia no permanente, entre las que se cuentan los guarda parques de la Reserva Natural del parque Eduardo Abaroa, cuidadores de las instalaciones de ENDE y de servicios a las caravanas turísticas que pernoctan en la localidad. En Octubre del 2000, siete eran mujeres entre 18 y 45 años y 15 eran varones de 20 a 56 años entre los residentes en Laguna Colorada. El conocimiento o preocupación de la población de Laguna Colorada sobre los Manantiales de Silala, con excepción de los ejecutivos de la Reserva, es casi nula o desinteresada. Sin embargo, los ejecutivos de la Reserva Natural Eduardo Abaroa expresaron una alta preocupación por la falta de control y vigilancia en Silala.

Laguna Colorada es un puesto de pernocte y alimentación a caravanas turísticas que pasan de Uyuni hacia Laguna Verde (frontera con Chile) y viceversa. Hay días que el número de turistas en Laguna Colorada sobrepasa el de cincuenta personas. La mayoría

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

de los pobladores de Laguna Colorada trabajan 30 días seguidos en la localidad, con siete días de descanso en la ciudad de Uyuni.

No existe ningún registro de nacimiento o defunción en el área de estudio.

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del estudio de la evolución geológica y de la caracterización de la hidrológica, hidrogeológica y medio ambiente del área de Silala, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

9.1 Geología Regional

El área de los Manantiales de Silala se estructura geológicamente durante el Mioceno Superior (7.5 a 8 Ma) cuando se depositan las Ignimbritas Silala. Estas son fuertemente fracturadas y diaclasadas por movimientos tectónicos causados por el sistema de Fallamiento de Khenayani este sistema es de 27 – 17 Ma o sea anterior a las ignimbritas. Una segunda y fuerte actividad volcánica se manifiesta por la intrusión de conos volcánicos (de 5.8 a 6.2 Ma) (Volcán Inacaliri, Cerro Silala Chico, Cerro Negro y Torito). Una tercera actividad volcánica es la formación de estratovolcanes (Volcanes Inacaliri y Silala) de una edad aproximada de 1.5 a 1.7 Ma que modifica el paisaje de las mesetas ignimbríticas. La composición química de las rocas resultantes de los dos últimos eventos volcánicos son del tipo andesítico-dacítico., siendo el tercer evento el más básico en composición química que los eventos previos.

Estos rasgos volcánicos son modificados por la posterior deposición, formación y acción de grandes masas glaciares que se inicia hace 65,000 años BP hasta el Último Máximo Glaciar de hace aproximadamente 14,500 años BP. Regionalmente, el movimiento y deshielo de los glaciares modifica en gran forma la geomorfología regional dando paso al paisaje actual de una llanura ondulada y la formación de valles típicos glaciares en las faldas de los conos volcánicos. La deposición de grandes volúmenes de sedimentos Cuaternarios y Recientes es el resultado de esta actividad glacial y del agua resultante del deshielo de las masas glaciares.

Los suelos regionalmente son arenosos, areno-limosos y de arena con granos sub-redondeados en la parte superior de los mismos y arena con clastos o bolones de hasta 40 cm de diámetro. Localmente, los suelos muestran una deposición en la superficie y en su secuencia no gradada de deposición de bloques y clastos de distinto tamaño de roca madre, arena de grano medio sub-angular y limo. Algunos suelos muestran rasgos de acción eólica sobre ellos. En los lugares donde se tiene afloramiento de manantiales se presentan bofedales sobre suelos hidromórficos con horizontes delgados de material orgánico sobre material fino arenoso-arcilloso.

9.2 Geología de la Quebrada de Silala

La acción del agua del deshielo de los glaciares es uno de los rasgos geomorfológicos locales más notorios sobre las rocas en la Quebrada de Silala, la misma que es un ejemplo típico de una quebrada formada por la acción erosiva de aguas fluvio-glaciares derivadas del deshielo de hace más de 10,000 años BP que aprovecharon zonas de debilitamiento causadas por fallas.

La quebrada del Canal Principal y las Quebradas Sur y Norte, con una dirección N 50° a 65° E, fueron depresiones en la Ignimbrita Silala formadas a lo largo de planos de debilidad formados por la Falla Silala y el alto diaclasamiento con ese rumbo y

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

buzamiento. El rumbo coincidente es confirmado por el estudio del sistema de diaclasamiento realizado en el área. La erosión fluvio-glacial de las quebradas es complementada posteriormente con una fuerte meteorización en las rocas ignimbríticas causada por el alto diferencial de temperatura diaria formando una quebrada en "U" con paredes verticales y ensanchamiento de la quebrada, hasta 40 m en la Quebrada Principal. Esta última acción dio lugar a la deposición de bloques y clastos de diferente tamaño en la superficie plana de las quebradas. Desde éste último periodo glacial hasta el presente no se tiene una manifestación activa fluvial. Al contrario, se observa que la quebrada del Canal Principal y las otras quebradas están cubiertas con bloques, clastos y sedimentos de varios tamaños que no han sido removidos por falta de un flujo de agua natural. Todos los bloques y clastos observados son angulosos y hay una total ausencia de grava o clastos redondeados, y sub-redondeados.

Es también importante indicar que a lo largo de las paredes de la Quebrada de Silala, se observa diferentes etapas de formación de quebradas en forma perpendicular a la misma, por la simple acción de procesos de meteorización mecánica sin la intervención de procesos fluviales o acción del agua.

9.3 Suelos en la Quebrada de Silala

Los suelos en la Quebrada de Silala, como en toda la región, no son maduros y están conformados por sedimentos fluvio-glaciales depositados con una secuencia no gradada de clastos angulares de roca madre, arena de grano medio angular, limo y algunos horizontes delgados de material orgánico. Durante el estudio granulométrico se observó que no se tiene un perfil desarrollado de suelo, siendo el mismo un suelo de alta montaña de origen fluvio-glacial sin rasgos de movimiento fluvial reciente. No se observó una deposición nítida gradada de éstos materiales. Estos mismos suelos, de menor espesor, fueron observados en los bofedales.

El análisis de los perfiles de suelos y las muestras recolectadas y analizadas muestran una granulometría típica de suelos fluvio-glaciales con clastos y granos angulares y la limitada presencia de clastos, grava y arena de granos redondeados o sub-redondeados. Esto indica notoriamente que las quebradas no han recibido desde su formación hace 10,000 años, ningún flujo significativo de agua natural en forma de río o riachuelo.

9.4 Hidrología e Hidrogeología

Básicamente, no existen cuerpos ni cursos activos de aguas superficiales en toda el área de estudio. El único curso activo determinado es el que actualmente transporta agua mediante los canales construidos a principios del Siglo XX. El aparente diseño actual hidrológico del área fue modelado por el avance y retroceso de los glaciales y por las aguas de su deshielo. No existe una evidencia sólida geológica a la modificación o formación de una red hidrológica reciente.

La precipitación promedio anual, con un registro de 12 años, es de menos de 60 mm y una evaporación 15 veces mayor. Esto prueba la ausencia de un escurrimiento de aguas superficiales que formen corrientes de agua como ríos, o riachuelos aún intermitentes. Existiendo en el área, por lo tanto, un notable desequilibrio hídrico totalmente negativo.

9.4 Hydrology and Hydrogeology

Basically, there are no bodies of water or active courses of surface waters in the whole study area. The only active course is the one that currently runs through channels that were built at the beginning of the 20th century. The current hydrological design of the area is the result of the advance and retreat of the glaciers and the waters [resulting] of their thawing. There is no solid geological evidence of the modification or formation of a recent hydrological network.

The average annual rainfall, according to a 12-year record, is less than 60 mm, with an evaporation 15 times greater. This demonstrates the absence of a flow of surface waters that could create rivers or intermittent streams. Therefore, there is a notable, completely negative water imbalance in the area.

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

Las únicas fuentes de agua en el área son los 70 pequeños manantiales o vertientes de aguas subterráneas que afloran con flujos muy lentos formando pequeños ojos de aguas estancadas. Se tiene una concentración de manantiales en cuatro zonas principales, dos de ellas forman bofedales. Los bofedales en el área de estudio cubren una superficie de 108,700 m². Los caudales en los manantiales varían de 0.25 L/seg a 2 L/seg, y tienen una temperatura entre 5 y 16° C. Son aguas de buena calidad y sin contaminación de clasificación Tipo "A" (Estándares Bolivianos).

El acuífero principal de aguas subterráneas en el área de estudio está constituido en las Ignimbritas Silala y posiblemente en rocas infrayacentes no aflorantes. El acuífero podría ser de origen confinado o no confinado y podría estar alimentado por aguas fósiles no contaminadas almacenadas mínimamente hace 40 años. Sin embargo, a la conclusión que se llega es que las aguas de los Manantiales de Silala muy probablemente provienen de un tiempo pluvial como por ejemplo el que tuvo lugar durante la fase Taucá aproximadamente 8,500 años atrás. Este acuífero posiblemente recibe solo una mínima recarga de aguas pluviales actuales, ya que las mismas son prácticamente inexistentes. No existe otra fuente de recarga.

Por sus propiedades hidroquímicas y físicas, las aguas que afloran en el Bofedal Sur u Oriental son algo diferentes a las aguas del Bofedal Norte o Cajones, siendo éstas últimas algo más puras.

La mayoría de los manantiales en los bofedales han sido captados, canalizados y orientados mediante la construcción de una estructura de ingeniería simple de aducción a dos canales principales colectores abiertos, que se unen a otro canal principal, también abierto, antes de drenar hacia la frontera internacional. El promedio de caudal medido en el Canal Sur hasta antes de la caída de agua es de 40 L/seg. El caudal promedio medido en el Canal Sur, antes de la intersección con el Canal Norte, es de 129 L/seg. El flujo en el Canal Norte es de 42 L/seg, y en el Canal Principal es de 164 L/seg.

Sin las construcciones de ingeniería sería muy difícil y ciertamente improbable que el agua aflorante en los Manantiales de Silala tengan un flujo natural hacia las quebradas del equivocadamente denominado "Río Silala".

9.5 Medio Ambiente

Un resumen de la línea base ambiental preliminar de Silala es el siguiente:

- No existen cuerpos de agua superficial en el área de estudio excepto aquellas que afloran de los manantiales en los bofedales.
- Las aguas aflorantes en los bofedales de Silala son del Tipo "A" sin ningún tipo de contaminación.
- No existen suelos o planicies cultivadas. Regionalmente los suelos de Silala presentan dos formas fisiográficas muy marcadas tanto en las mesetas ignimbríticas como en las llanuras aluviales y los piedemontes con suelos muy poco profundos de color pardo a pardo rojizo y de textura liviana entre franco arenosos a franco arcillosos.

The only sources of water in the area are the 70 small springs or creeks of groundwater that emerge with very slow flows that form small pools of stagnant water. There is a concentration of springs in four main zones, two of which are wetlands. The wetlands in the study area cover a surface of 108,700 m². The flow of the springs varies from 0.25 L/sec to 2 L/sec, and their temperature ranges between 5 and 16° C. They are waters of good quality and unpolluted, Type "A" (Bolivian Standards).

The main aquifer of groundwater in the study area is found in the Silala Ignimbrites and possibly in non-outcropped subjacent rocks. The aquifer could be confined or non-confined in its origin, and could be fed by unpolluted fossil waters that have been stored therein for at least 40 years. However, the conclusion reached is that the waters of the Silala Springs most likely come from a pluvial period such as the one that took place during Tauca phase approximately 8,500 years ago. This aquifer likely receives only minimal recharge by current rain water, as it is practically non-existent. There is no other source of recharge.

Due to their hydro-chemical and physical properties, the waters that outcrop in the Southern or Oriental Wetland are somewhat different from the waters of the Northern or Cajones Wetland, the latter being somewhat purer.

Most of the springs in the wetlands have been collected, canalized and directed through the construction of a simple structure of adduction engineering to two main open collecting channels that are joined to another main channel that is also open, before crossing the international border. The average flow measured in the South channel before the waterfall is 40 L/sec. The average flow in the South channel, before the intersection with the North channel, is 129 L/sec. The flow in the North channel is 42 L/sec, and in the Main channel is 164 L/sec.

Without the engineering works, it would be very difficult and certainly unlikely that the water in the Silala Springs would have a natural flow towards the ravines of the mistakenly called "Silala River".

PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL

- La flora o cubierta vegetal presente en el área de estudio es pobre, típica del ecosistema de la región y esta representada por bofedales de altura y por una comunidad de matorrales de Puna desértica.
- Se observaron unas 14 especies de animales que habitan el área de estudio. Todas las especies observadas son comunes a hábitats del Altiplano Boliviano y de la Cordillera Occidental, ninguna de ellas endémica o en peligro de extinción.
- Por su belleza paisajística, denominamos el paisaje de la región de “Jardín Japonés Natural.”
- No se han encontrado recursos históricos ni arqueológicos en el área de estudio de Silala.
- El área no cuenta con presencia humana, teniendo un total de población igual a cero.

Para completar y complementar el presente estudio de los Manantiales de Silala, son necesarias las siguientes acciones y trabajos complementarios:

- Se debe programar la perforación de por lo menos cuatro pozos exploratorios de circulación reversa. Dos de los pozos estarían en las inmediaciones del Bofedal Sur (Oriental). Uno de estos pozos sería el de observación y determinaría los parámetros de producción actuales y potenciales sobre la base de la cuantificación de las características hidráulicas, y el segundo los parámetros de pruebas de bombeo.
- La profundidad estimada de los pozos estaría entre 300 y 400 m con un diámetro mínimo de taladro de 5¼ de pulgadas. Se deberá usar revestimiento en los primeros metros de perforación para evitar posibles contaminaciones.



Servicio Nacional de Geología y Minería
Departamento de Geología y Recursos Minerales
PROYECTO DE INTEGRACIÓN REGIONAL (PIR)

10. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Argollo, J., Gouze, P., Saliege J.F., & Servant, M., 1987. Fluctuations des Glaciers de Bolivie au Quaternaire Récent.- (in Seminaire "Paléolacks-Paléoclimats en Amérique Latine et an Afrique" (20.000 ans B.P.- Actuel). ORSTOM, Bondy, Vol. 1: 15 - 17 - Géodynamique, 2 (2) : 103 - 104.

Argollo, J., 1991. El Cambio global del clima y sus eventuales efectos en Bolivia. Boletín de la Sociedad Geológica de Bolivia, v. 26: p. 33 - 44, Agosto 1991, La Paz.

Argollo, J., Mourguirat, P., 1995. Paleohidrología de los últimos 25,000 años en los Andes Bolivianos. Bull. Indt. Fr. Etudes Andinos. No. 24 (3). Pag. 551 – 562. Paris, France.

Choque M. N. 1996. Hoja Volcán Putana. Escala 1:100.000. Publicación SGM SERIE 1-CGB-41.

Instituto Geográfico Militar (IGM) Hojas 5927-I; 5928-II; 6028-III; 6027-IV en escala 1:50,000.

Instituto Geográfico Militar (IGM) Hojas SF-19-7 y SF-19-11 en escala 1:250,000.

Lema, J. &, Ramos, C. W. 1996. Hoja Sanabria. Escala 1:100.000. Publicación SGM I-CGB-43.

Libermann, M., 1986. Mapa Simplificado de las Ecoregiones de Bolivia. Ministerio de Planificación. La Paz, Bolivia.

Montes de Oca, Ismael, 1997. Geografía y Recursos Naturales de Bolivia. Offset Boliviana Ltda. "EDOBOL". La Paz, Bolivia.

PMA, en prep. Base de Datos Radiométricos (DataRad) de Bolivia. Proyecto Andino: Geociencias para la Comunidad Andina. SERGEOMIN. La Paz, Bolivia.

Richter, D. H., Ludington, &, Soria-Escalante, E. 1992. Geologic Setting of the Geology and Mineral Resources of Altiplano and Cordillera Occidental, Bolivia. U.S. Geological Survey Bulletin 1975, p. 14 - 24.

Risacher, F., 1976. Reconocimiento de algunos salares del Altiplano Boliviano: La Paz, Universidad Mayor de San Andrés y l'Office de la Reserche Scientifique et Technique.

SERGEOMIN, 1966 – 2001. Informes, Boletines, Mapas y Estudios.

Uribe, H., Per. Com. Datos Radiométricos de Rocas Volcánicas, Programa Multiandino, junio de 2001, SERGEOMIN.

Annex 95

National Report on the Implementation of the Ramsar Convention on Wetlands Submitted by the Plurinational State of Bolivia to the 12th Meeting of the Conference of the Contracting Parties, 2 January 2015

(Original in Spanish, English translation)



**INFORME NACIONAL SOBRE LA APLICACIÓN DE LA
CONVENCIÓN DE RAMSAR SOBRE LOS HUMEDALES**

Informes Nacionales que se presentarán a la 12ª Reunión
de la Conferencia de las Partes Contratantes,
Uruguay, 2015

Se debe enviar el Informe Nacional debidamente completado, en Microsoft Word (.doc),
800-20033 al correo electrónico: informes@ramsar.org o al Sr.
Dufour, Oficial de Asuntos Regionales, Secretario de Ramsar (dufour@ramsar.org) antes
del 1 de septiembre de 2014.

Modelo de Informe Nacional para la COP12 de Ramsar, página 2

La estructura del Modelo de Informe Nacional de la COP12

El Modelo de Informe Nacional de la COP12 se estructura en cuatro secciones.

En la **Sección 1** se proporciona información institucional sobre la Autoridad Administrativa y los Coordinadores Nacionales con respecto a la aplicación nacional de la Convención.

La **Sección 2** es una sección de 'texto libre' en la que se invita a las Partes a incluir un resumen de los distintos aspectos de los progresos realizados en la aplicación nacional y recomendaciones de cara al futuro.

La **Sección 3** incluye las 66 preguntas sobre los indicadores de la aplicación, agrupadas según las Estrategias de aplicación de la Convención contenidas en el Plan Estratégico 2009-2015, así como una sección facultativa de "texto libre" para cada pregunta sobre el indicador en la que las Partes Contratantes pueden, si lo consideran oportuno, añadir información adicional sobre la aplicación nacional de esa actividad.

La **Sección 4** es un anexo facultativo que permite a las Partes Contratantes que lo consideren oportuno ofrecer información adicional por separado en relación con alguno o todos sus Humedales de Importancia Internacional (Sitios Ramsar).

Orientaciones generales para rellenar y presentar el Modelo de Informe Nacional de la COP12

IMPORTANTE – SÍRVASE LEER ESTA SECCIÓN DE ORIENTACIONES ANTES DE RELLENAR EL MODELO DE INFORME NACIONAL

1. Todas las Secciones del Modelo de Informe Nacional de la COP12 deben completarse en uno de los idiomas oficiales de la Convención (español, francés o inglés).
2. El plazo para la presentación del Modelo de Informe Nacional debidamente cumplimentado es el **1 de septiembre de 2014**. La información de los Informes Nacionales de las Partes recibida a partir de esa fecha no se podrá incluir en el análisis ni en el informe sobre la aplicación de la Convención que se presentará a la COP12.
3. Se deben rellenar todas las casillas con fondo en amarillo pálido .
4. Las casillas con fondo en verde pálido son espacios de texto libre para incluir información adicional si la Parte Contratante lo considera oportuno. Aunque rellenar esos espacios es opcional, se emplaza a las Partes Contratantes a proporcionar esa información adicional siempre que sea posible y pertinente, ya que ayuda a entender más plenamente el progreso y actividad de las Partes Contratantes, y preparar lo mejor posible para la COP los informes sobre la implementación global y regional.
5. El Modelo se ha creado como un 'formulario' en Microsoft Word. Sólo se puede responder y dar información en las casillas amarillas o verdes; todo el resto del formulario está bloqueado a fin de garantizar que la estructura y el texto de los indicadores permanecerán uniformes y comparables para todas las Partes.

Modelo de Informe Nacional para la COP12 de Ramsar, página 3

6. Para ir a la casilla amarilla o verde en la que se desee escribir, hay que mover el cursor sobre la casilla en cuestión y pulsar el botón izquierdo del ratón. El cursor se moverá automáticamente a la siguiente casilla disponible.
7. Para pasar de una casilla a otra también puede usarse la tecla 'Tab' del teclado del computador.
8. Las casillas de 'texto libre' se pueden rellenar con cualquier tipo de información que se considere oportuna. Tenga en cuenta que hay limitaciones en los documentos Microsoft Word en formato de 'formulario' para hacer cambios editoriales en las casillas de 'texto libre' una vez que se ha introducido el texto. Por lo tanto, si se quiere modificar el texto introducido en las casillas amarillas o verdes de 'texto libre', se recomienda cortar y pegar ese texto en un documento distinto, hacer todas las enmiendas y luego cortar y pegar el texto revisado nuevamente dentro de la casilla.
9. Existen ciertos caracteres del teclado que perturban el registro automático de datos de la base de datos de la Secretaría. Por ese motivo, le rogamos que **no utilice las comillas dobles " "** en las casillas de 'texto libre'. Sólo **utilice comilla simple ' ' . Por el mismo motivo, le rogamos que utilice texto sencillo sin formato en las casillas de 'texto libre': estas casillas no pueden aceptar formato especial, colores u objetos tales como tablas e imágenes.**
10. En cada una de las 'preguntas sobre los indicadores' de la Sección 3 hay un menú desplegable con opciones de respuesta. Estas varían según los indicadores, dependiendo de la pregunta, pero generalmente son: 'Sí', 'No', 'Parcialmente', 'En curso'. Esto es necesario para poder realizar comparaciones estadísticas basadas en las respuestas.
11. Solo puede darse una única respuesta a cada pregunta sobre el indicador. Si se desea añadir información adicional o hacer alguna aclaración, puede hacerse en la casilla verde correspondiente situada en la parte inferior a la pregunta. Sea lo más conciso posible en las casillas de texto libre (**máximo 500 palabras** en cada una de ellas).
12. Para seleccionar una respuesta a una pregunta sobre el indicador, se puede usar la tecla 'Tab' o bien mover el cursor sobre la casilla amarilla correspondiente y pulsar el botón izquierdo del ratón. Entonces aparecerá el menú desplegable de opciones de respuesta. Al pulsar el botón izquierdo del ratón sobre la opción elegida, esta aparecerá en el centro de la casilla amarilla.
13. Un Modelo de Informe Nacional generalmente no es completado por una sola persona: es aconsejable para muchos indicadores que el recopilador principal de la información consulte sus colegas en su delegación y otros servicios dentro del gobierno y, cuando proceda, con ONG pertinentes y otros interesados directos que puedan tener una visión de conjunto más amplia de distintos aspectos sobre cómo la Parte en cuestión está aplicando la Convención. El recopilador principal puede grabar el formulario con las respuestas dadas hasta ese momento y volver a él más tarde, tanto para continuar como para corregir las respuestas anteriores. También se aconseja remitirse al Informe Nacional presentado para la COP11 a fin de mantener la continuidad y coherencia de la información suministrada.
14. Después de cada sesión, recuerde de guardar el archivo en Microsoft Word .doc, formato 97-2003. Una forma recomendable de nombrar el archivo del formulario es: COP12NRF [País] [fecha]; por ejemplo: COP12NRFSpain13July2014.doc.

Modelo de Informe Nacional para la COP12 de Ramsar, página 4

15. Después de haber completado el Modelo de Informe Nacional, **sírvase enviarlo en este formato a Alexia Dufour, Oficial de Asuntos Regionales, Secretaría de la Convención de Ramsar, preferiblemente por correo electrónico (dufour@ramsar.org).**
16. **El Informe Nacional completado debe ir acompañado de una carta o un mensaje de correo electrónico en nombre del Jefe de la Autoridad Administrativa, confirmando que dicha copia es el Informe Nacional de la COP12 que esa Parte Contratante presenta oficialmente.**
17. Para cualquier consulta o problema, sírvase contactar con la Secretaría de Ramsar (mediante el correo electrónico que figura *supra*).

INFORME NACIONAL A LA COP12 DE RAMSAR

SECCIÓN 1: INFORMACIÓN INSTITUCIONAL

Nota importante: las siguientes respuestas serán consideradas por la Secretaría de Ramsar como la lista definitiva de los coordinadores, y se recurrirá a ellas para actualizar la información en poder de la Secretaría. La información actual de la Secretaría acerca de los coordinadores se puede consultar en www.ramsar.org/contacts_sp

NOMBRE DE LA PARTE CONTRATANTE: ESTADO PLURINACIONAL DE BOLIVIA

AUTORIDAD ADMINISTRATIVA DE RAMSAR DESIGNADA

Nombre de la Autoridad Administrativa:	VICEMINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, BIODIVERSIDAD, CAMBIOS CLIMÁTICOS Y DE GESTIÓN Y DESARROLLO FORESTAL
Jefe de la Autoridad Administrativa – nombre y título:	Lic. Roberto Salvatierra Zapata VICEMINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, BIODIVERSIDAD, CAMBIOS CLIMÁTICOS Y DE GESTIÓN Y DESARROLLO FORESTAL
Dirección postal:	Calle Capitan Castrillo No. 434
Teléfono/Fax:	Telefono: 2115571 - Fax: 2115571, La paz - Bolivia
Correo electrónico:	rsalvatierra8@gmail.com

COORDINADOR NACIONAL DESIGNADO PARA LOS ASUNTOS DE LA CONVENCION DE RAMSAR

Nombre y título:	Ing. Teresa Araleny Chávez Pérez - Directora General de Biodiversidad y Areas Protegidas
Dirección postal:	Plaza España Edif. Barcelona Piso 6 - Sopocachi
Teléfono/Fax:	Teléfonos: - (591) - 2124221
Correo electrónico:	teresaaralenypervez@gmail.com

COORDINADOR NACIONAL DESIGNADO PARA LOS ASUNTOS RELACIONADOS CON EL GRUPO DE EXAMEN CIENTÍFICO Y TÉCNICO (GECT)

Nombre y título del coordinador:	Ing. Teresa Araleny Chávez Pérez - Directora General de Biodiversidad y Areas Protegidas.
Nombre del organismo:	Dirección General de Biodiversidad
Dirección postal:	Plaza España Edif. Barcelona Piso 6 - Sopocachi
Teléfono/Fax:	Teléfonos: - (591) - 2124221
Correo electrónico:	teresaaralenypervez@gmail.com

COORDINADOR GUBERNAMENTAL NACIONAL DESIGNADO PARA LOS ASUNTOS RELACIONADOS CON EL PROGRAMA DE COMUNICACIÓN, EDUCACIÓN, CONCIENCIACIÓN Y PARTICIPACIÓN (CECoP)

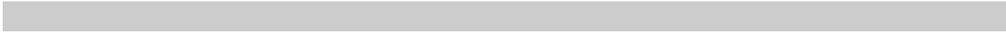
Nombre y título del coordinador:	Ing. Teresa Araleny Chávez Pérez - Directora General de Biodiversidad y Areas Protegidas.
Nombre del organismo:	Plaza España Edif. Barcelona Piso 6 - Sopocachi.
Dirección postal:	Plaza España Edif. Barcelona Piso 6 - Sopocachi
Teléfono/Fax:	Teléfonos: - (591) - 2124221
Correo electrónico:	teresaaralenypervez@gmail.com

COORDINADOR NACIONAL NO GUBERNAMENTAL DESIGNADO PARA LOS ASUNTOS RELACIONADOS CON EL PROGRAMA DE COMUNICACIÓN, EDUCACIÓN, CONCIENCIACIÓN Y PARTICIPACIÓN (CECoP)

Nombre y título:	Ing. Teresa Araleny Chávez Pérez - Directora General de Biodiversidad y Areas Protegidas
-------------------------	--

Modelo de Informe Nacional para la COP12 de Ramsar, página 6

Nombre del organismo:	VICEMINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, BIODIVERSIDAD, CAMBIOS CLIMÁTICOS Y DE GESTIÓN Y DESARROLLO FORESTAL MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y AGUA
Dirección postal:	Plaza España Edif. Barcelona Piso 6 - Sopocachi
Teléfono/Fax:	Teléfonos: - (591) - 2124221
Correo electrónico:	teresaaralenyperéz@gmail.com



SECCIÓN 2: RESUMEN GENERAL DE LOS PROGRESOS Y DIFICULTADES EN LA APLICACIÓN NACIONAL

Recordatorio: Le rogamos que no utilice comillas dobles " ": utilice comillas simples ' ' en su lugar.

En su país, durante el pasado trienio (es decir, desde el informe a la COP11):

A. ¿Cuáles son los cinco aspectos de la aplicación de la Convención que han obtenido mejores resultados?

- 1) Compromiso de Autoridades de las Entidades Territoriales Autónomas Descentralizadas para promover la gestión de los humedales.
- 2) Valoración de la importancia de la conservación y el uso racional de los humedales por la sociedad boliviana.
- 3) Reconocimiento del valor del agua como derecho fundamental vital para la vida por el Estado Plurinacional de Bolivia.
- 4) Posicionamiento en la agenda política de la importancia de los Humedales de interés nacional e internacional.
- 5) Conformación de Comites de Gestión de Humedales en Sitios Ramsar.

B. ¿Cuáles han sido las cinco principales dificultades encontradas en la aplicación de la Convención?

- 1) Gestión financiera de los Sitios Ramsar.
- 2) Articulación del desarrollo con la conservación
- 3) Insuficiente involucramiento de actores locales y subnacionales en la temática
- 4) Insuficiente articulación de la gestión de los Sitios Ramsar con los Planes, Programas y Proyectos (PPP) locales, departamentales y nacionales
- 5) Ausencia de lineamientos estratégicos para guiar la gestión de Sitios Ramsar.

C. ¿Cuáles son las cinco prioridades para la aplicación futura de la Convención?

- 1) Diagnostico y bases para establecer el inventario de humedales de tierras altas y bajas.
- 2) Desarrollar instrumentos de gestión y planificación de los Sitios Ramsar
- 3) Socializar y sensibilizar a la población civil e instituciones públicas y privadas sobre la importancia de los Sitios Ramsar
- 4) Elaborar la base normativa para la gestión integral de Sitios Ramsar
- 5) Elaborar la Estrategia Nacional de gestión integral de Sitios Ramsar

D. ¿Desea usted (Autoridad Administrativa) realizar alguna recomendación con respecto a la asistencia que presta la Secretaría de Ramsar en la aplicación?

SI. mayores gestiones de recursos para fortalecimiento de capacidades gubernamentales

E. ¿Desea usted (Autoridad Administrativa) realizar alguna recomendación con respecto a la asistencia que prestan las Organizaciones Internacionales Asociadas (OIA) de la Convención en la aplicación? (incluyendo asociaciones de colaboración actuales y que conviene desarrollar)

Modelo de Informe Nacional para la COP12 de Ramsar, página 8

Si. Canalizar recursos para atender las necesidades de los países en cuanto a proyectos para los humedales

F. ¿Cómo se puede mejorar la vinculación entre la aplicación nacional de la Convención de Ramsar y la aplicación de otros acuerdos multilaterales sobre el medio ambiente (AMMA), especialmente los del 'grupo de acuerdos relacionados con la diversidad biológica' (Ramsar, Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB), Convención sobre las Especies Migratorias (CMS), CITES, y Convención sobre la protección del patrimonio mundial cultural y natural), la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación y la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático?

Coordinación de las acciones de forma integral entre la Convención de Ramsar y otros acuerdos multilaterales identificando puntos comunes para realizar agendas compartidas.

G. ¿Cómo se puede mejorar la vinculación entre la aplicación de la Convención de Ramsar y la aplicación de las políticas/estrategias sobre el agua y otras estrategias en el país (por ejemplo, en materia de desarrollo sostenible, energía, industrias extractivas, reducción de la pobreza, sanidad, seguridad alimentaria y diversidad biológica)?

La vinculación efectiva surge desde la formulación y /o ajuste de las estrategias o políticas en la que se debe tomar como referencias los convenios suscritos como país

H. ¿Desea usted (Autoridad Administrativa) realizar alguna observación general sobre la aplicación de la Convención?

NO.

I. Escriba los nombres de las organizaciones que se han consultado o que han contribuido a la información suministrada en el presente informe:

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y AGUA

Modelo de Informe Nacional para la COP12 de Ramsar, página 9

SECCIÓN 3: PREGUNTAS SOBRE LOS INDICADORES E INFORMACIÓN SOBRE LA APLICACIÓN

Recordatorio: Orientaciones para rellenar esta sección

1. Sírvase seleccionar una respuesta del menú desplegable en la casilla amarilla para cada 'pregunta sobre el indicador'.
2. Si se considera oportuno añadir información adicional sobre algún indicador concreto, sírvase incluir dicha información en la casilla verde de 'texto libre' situada debajo de las preguntas sobre los indicadores.
3. Si se quiere corregir el texto introducido en una casilla verde de 'texto libre', se recomienda copiar y pegar ese texto en un archivo distinto, hacer las correcciones necesarias y pegar nuevamente el texto corregido en la casilla verde.
4. Hay caracteres que si se utilizan en la casilla de texto libre impiden el registro automático de datos en nuestra base de datos de Informes Nacionales. Por ese motivo, le rogamos que **no utilice las comillas dobles " "** en las casillas de texto libre. **No obstante, puede utilizar comillas simples ' '.** **El texto de las casillas de 'texto libre' debe ser únicamente texto sencillo : estas casillas no pueden aceptar formato especial, colores u objetos tales como tablas e imágenes.**
5. A fin de ayudar a las Partes Contratantes a consultar la información proporcionada en su Informe Nacional a la COP11, a cada indicador se le ha añadido una referencia (cuando procede) del indicador o los indicadores equivalentes del Modelo de Informe Nacional de la COP11, con la forma siguiente: {x.x.x}
6. Cuando resulta conveniente, también se hace referencia al Área de Resultados Clave (ARC) pertinente correspondiente a la ejecución por las Partes Contratantes en el Plan Estratégico 2009-2015.
7. Tan solo se incluyen en el presente modelo de informe las Estrategias y ARC del Plan Estratégico 2009-2015 para las cuales las Partes Contratantes tienen asignadas importantes actividades de ejecución; se omiten las partes del Plan Estratégico que no atañen directamente a las Partes.

OBJETIVO 1. USO RACIONAL DE LOS HUMEDALES

ESTRATEGIA 1.1 Inventario y evaluación de los humedales. *Describir, evaluar y monitorear la extensión y el estado de todos los tipos de humedales, según la definición de la Convención de Ramsar, y de los recursos de los humedales en la escala pertinente, con el fin de influir en la ejecución de la Convención y de secundarla, en particular con respecto a la puesta en práctica de las disposiciones relativas al uso racional de todos los humedales.*

1.1.1 ¿Cuenta el país con un Inventario Nacional de Humedales completo? {1.1.1} ARC 1.1.i

C - En progreso

1.1.1 Información adicional:

Se tiene la información descriptiva de la ecología y las bases cartograficas con base SIG de los humedales de la Cuenca del Plata.

Modelo de Informe Nacional para la COP12 de Ramsar, página 10

1.1.2 ¿Se conservan los datos y la información y son estos accesibles a todos los interesados directos? {1.1.2} ARC 1.1.ii	D - Planificado
--	-----------------

1.1.2 Información adicional:
Se coordina con instituciones del sector público para el acceso gratuito a la información y se atiende a las solicitudes de la sociedad civil.

1.1.3 ¿Se ha modificado, en general, la condición* de los humedales de su país en el trienio precedente?{1.1.3}	
---	--

- a) Sitios Ramsar
b) Humedales en general

- a) - Sin cambios
b) - Sin cambios

Sírvase describir las fuentes de la información en que se basa su respuesta en la casilla verde de texto libre que figura más adelante. Si existen diferencias entre las situaciones de los humedales costeros y continentales, sírvase describirlas. Si conoce cuáles son los principales factores causantes del cambio, descríbalos.

* Por 'condición' se entienden las características ecológicas, según la definición de la Convención

1.1.3 Información adicional sobre a) y/o b):

ESTRATEGIA 1.3 Política, legislación e instituciones. *Diseñar y aplicar políticas, leyes y prácticas, inclusive la creación y fomento de las instituciones adecuadas, en todas las Partes Contratantes a fin de lograr que se apliquen eficazmente las disposiciones de la Convención relativas al uso racional.*

1.3.1 ¿Se cuenta con una Política Nacional de Humedales (o un instrumento equivalente)? {1.3.1} ARC 1.3.i (Si la respuesta es 'Sí', sírvase dar el título y la fecha de la política en cuestión en la casilla verde de texto)	C - En preparación
--	--------------------

1.3.1 Información adicional:
Esta prevista la formulación de la Estrategia de Gestión Integral de los Sitios Ramsar y Humedales de interés Nacional bajo los pilares del vivir bien.

Modelo de Informe Nacional para la COP12 de Ramsar, página 11

1.3.2 ¿Se han incluido las cuestiones relativas a los humedales en otras estrategias nacionales y procesos de planificación, entre ellos los siguientes?:	
a) Estrategias de erradicación de la pobreza	a) B - No
b) Planes de manejo de los recursos hídricos y de aprovechamiento eficiente del agua	b) B - No
c) Planes de manejo de los recursos costeros y marinos	c) B - No
d) Programas forestales nacionales	d) B - No
e) Estrategias nacionales de desarrollo sostenible	e) A - Sí
f) Políticas o medidas agrícolas nacionales	f) B - No
g) Estrategia y planes de acción nacionales sobre diversidad biológica elaborados en el marco de la CDB	g) A - Sí
{1.3.3} ARC 1.3.i	

1.3.2 Información adicional:
Estrategia de Gestión Integral de Ecosistemas de la Zona Andina incluye en sus líneas de acción estratégicas la gestión de Sitios Ramsar y humedales altoandinos.

1.3.3 ¿Se han aplicado prácticas de Evaluación Ambiental Estratégica al revisar las políticas, los programas y los planes que pueden tener repercusiones en los humedales? {1.3.4} ARC 1.3.ii	A - Sí
---	--------

1.3.3 Información adicional:
Estudio de Evaluación Ambiental Estratégica del Pantanal boliviano (EEAE) - 2013

1.3.4 ¿Se realizan Evaluaciones del Impacto Ambiental para cada nuevo proyecto de desarrollo (nuevos edificios, nuevas carreteras, industrias extractivas) que pueden afectar a los humedales? {1.3.5} ARC 1.3.iii	A - Sí
--	--------

1.3.4 Información adicional:

.....

1.3.5 ¿Se han introducido enmiendas en la legislación en vigor a fin de reflejar los compromisos suscritos en el marco de Ramsar? {1.3.6}	D - Planificado
---	-----------------

1.3.5 Información adicional:

ESTRATEGIA 1.4 Reconocimiento intersectorial de los servicios de los humedales. *Reconocer en mayor medida y prestar más atención en los procesos de adopción de decisiones a la importancia de los humedales con respecto a cuestiones como la conservación de la biodiversidad, el abastecimiento de agua, la protección de las costas, el manejo integrado de las zonas costeras, la defensa frente a las inundaciones, la mitigación del cambio climático y/o la adaptación a él, la seguridad alimentaria, la erradicación de la pobreza, el turismo, el patrimonio cultural y la investigación científica, mediante la concepción y la difusión de metodologías apropiadas para conseguir el uso racional de los humedales.*

Modelo de Informe Nacional para la COP12 de Ramsar, página 12

1.4.1 ¿Se ha realizado una evaluación de los beneficios/servicios de los ecosistemas proporcionados por los Sitios Ramsar? {1.4.1} ARC 1.4.ii	C - Parcialmente
---	------------------

1.4.1 Información adicional:

1.4.2 ¿Se han aplicado programas o proyectos de humedales que contribuyan a los objetivos en materia de reducción de la pobreza o planes de seguridad alimentaria y de abastecimiento de agua? {1.4.2} ARC 1.4.i	D - Planificado
--	-----------------

1.4.2 Información adicional:

.....

1.4.3 ¿Se han incluido los valores socioeconómicos y culturales de los humedales en la planificación del manejo de los Sitios Ramsar y de otros humedales? {1.4.4} ARC 1.4.iii	D - Planificado
--	-----------------

1.4.3 Información adicional (Si la respuesta es 'Sí' o 'Parcialmente', sírvase indicar de cuántos Sitios Ramsar se trata y sus nombres):

.....

ESTRATEGIA 1.5 Reconocimiento del papel de la Convención. *Potenciar el relieve público de la Convención destacando su capacidad de mecanismo único para el manejo de los ecosistemas de humedales a todos los niveles; dar a conocer la utilidad de la Convención como posible mecanismo de aplicación con miras a cumplir los objetivos y metas de otros convenios, convenciones y procesos mundiales*

1.5.1 Desde la COP11, ¿ha señalado la 'Declaración de Changwon' (Resolución X.3) a la atención de su:	
a) jefe de Estado?	a) A - Sí
b) parlamento?	b) A - Sí
c) sector privado?	c) A - Sí
d) sociedad civil?	d) A - Sí
{1.5.2}	

1.5.1 Información adicional:

ESTRATEGIA 1.6 Manejo de los humedales sobre una base científica. *Promover la aplicación eficaz del concepto de uso racional garantizando que los planes de manejo de humedales y las políticas nacionales se basen en la mejor información científica disponible, incluidos conocimientos técnicos y tradicionales.*

Modelo de Informe Nacional para la COP12 de Ramsar, página 13

<p>1.6.1 ¿Se ha llevado a cabo en su país investigación dirigida a orientar las políticas y los planes de humedales relacionados con:</p> <p>a) la interacción entre la agricultura y los humedales?</p> <p>b) el cambio climático?</p> <p>c) la valoración de los servicios de los ecosistemas?</p> <p>{1.6.1} ARC 1.6.i</p>	<p>a) B - No</p> <p>b) D - Planificado</p> <p>c) B - No</p>
<p>1.6.1 Información adicional:</p>	

<p>1.6.2 ¿Se han basado todos los planes de manejo de los humedales en estudios científicos sólidos, en particular en estudios sobre las amenazas potenciales a los humedales? {1.6.2} ARC 1.6.ii</p>	<p>Z - No se aplica</p>
<p>1.6.2 Información adicional:</p> <p>.....</p>	

ESTRATEGIA 1.7 Manejo integrado de los recursos hídricos. *Garantizar que las políticas y la aplicación del Manejo Integrado de los Recursos Hídricos (MIRH), conforme a un enfoque por ecosistemas, queden integradas en las actividades de planificación de todas las Partes Contratantes así como en sus respectivos procesos de adopción de decisiones, particularmente en lo tocante al manejo de las aguas subterráneas, el manejo de las cuencas de captación/hidrográficas, la planificación de las zonas costeras y marinas cercanas a las costas y las actividades de mitigación del cambio climático y/o de adaptación a él.*

<p>1.7.1 En el marco de la gobernanza y el manejo de los recursos hídricos, ¿se administran los humedales como infraestructura del agua natural integrada en el manejo de los recursos hídricos a escala de cuenca hidrográfica? {1.7.2} ARC 1.7.ii</p>	<p>D - Planificado</p>
<p>1.7.1 Información adicional:</p> <p>.....</p>	

<p>1.7.2 ¿Se ha incluido la competencia técnica y los instrumentos de la Comunicación, Educación, Concienciación y Participación (CECoP) en la planificación y ordenación de las cuencas de captación/hidrográficas (véase la Resolución X.19)? {1.7.3}</p>	<p>D - Planificado</p>
<p>1.7.2 Información adicional:</p> <p>.....</p>	

<p>1.7.3 ¿Se han establecido en su país políticas o directrices nacionales que refuercen la función que desempeñan los humedales en la mitigación del cambio climático y/o la adaptación a él? {1.7.5} ARC 1.7.iii</p>	<p>C - Parcialmente</p>
<p>1.7.3 Información adicional:</p> <p>.....</p>	

Modelo de Informe Nacional para la COP12 de Ramsar, página 14

1.7.4 ¿Ha formulado su país planes o proyectos para mantener y reforzar la función de los humedales en el sustento y mantenimiento de sistemas agrícolas viables? {1.7.6} ARC 1.7.v	B - No
1.7.4 Información adicional:	

ESTRATEGIA 1.8 Restauración de los humedales. *Determinar los humedales y sistemas de humedales prioritarios cuya restauración o rehabilitación sería provechosa y reportaría beneficios ambientales, sociales o económicos a largo plazo, y aplicar las medidas necesarias para restablecerlos.*

1.8.1 ¿Se han identificado sitios de humedal cuya restauración sea prioritaria? {1.8.1} ARC 1.8.i	A - Sí
1.8.1 Información adicional: Se han identificado para el diseño de acciones de remediación y recuperación de los Sitios Ramsar Altoandinos Lagos Poopó y Uru Uru, y Lago Titicaca, en el Marco de las acciones planificadas de la Estrategia de Gestión Integral de Ecosistemas de la Zona Andina y la Estrategia de Humedales Altoandinos.	

1.8.2 ¿Se han aplicado programas o proyectos de restauración/rehabilitación de humedales? {1.8.2} ARC 1.8.i	D - Planificado
1.8.2 Información adicional:	

ESTRATEGIA 1.9 Especies invasoras exóticas. *Alentar a las Partes Contratantes a que elaboren un inventario nacional sobre especies invasoras exóticas que afectan o podrían afectar a las características ecológicas de los humedales, en particular los sitios Ramsar, y velar por la complementariedad entre el inventario nacional y el Registro Mundial sobre Especies Invasoras (GRIS) de la Unión Mundial para la Naturaleza (UICN); elaborar orientaciones y promover la adopción de protocolos y medidas para evitar, controlar o erradicar las especies invasoras exóticas de los sistemas de humedales.*

1.9.1 ¿Dispone su país de un inventario nacional exhaustivo de especies invasoras exóticas que afectan o podrían afectar a las características ecológicas de los humedales? {1.9.1} ARC 1.9.i	B - No
1.9.1 Información adicional:	

Modelo de Informe Nacional para la COP12 de Ramsar, página 15

1.9.2 ¿Se aplican políticas o lineamientos nacionales de lucha contra las especies invasoras o de manejo de ellas en los humedales? {1.9.2} KRa 1.9.iii	B - No
---	--------

1.9.2 Información adicional:
.....

ESTRATEGIA 1.10 Sector privado. *Promover la participación del sector privado en la conservación y el uso racional de los humedales.*

1.10.1 ¿Se ha alentado al sector privado a aplicar el principio de uso racional y las orientaciones de Ramsar (Manuales Ramsar para el uso racional de los humedales) en sus actividades e inversiones que afectan a los humedales? {1.10.1} ARC 1.10.i	D - Planificado
---	-----------------

1.10.1 Información adicional:
.....

1.10.2 ¿Ha llevado a cabo el sector privado actividades o acciones dirigidas al uso racional y el manejo de: a) los Sitios Ramsar? b) los humedales en general? {1.10.2} ARC 1.10.ii	a) B - No b) B - No
---	------------------------

1.10.2 Información adicional:
.....

ESTRATEGIA 1.11 Incentivos. *Promover medidas que fomenten la aplicación de las disposiciones de la Convención relativas al uso racional.*

1.11.1 ¿Se han tomado medidas para promover incentivos que alienten la conservación y el uso racional de los humedales? {1.11.1} ARC 1.11.i	B - No
---	--------

1.11.1 Información adicional:
.....

1.11.2 ¿Se han tomado medidas para suprimir los incentivos perversos que desalientan la conservación y el uso racional de los humedales? {1.11.2} ARC 1.11.i	B - No
--	--------

1.11.2 Información adicional:
.....

OBJETIVO 2. LOS HUMEDALES DE IMPORTANCIA INTERNACIONAL

Nota: Se ofrece un Anexo facultativo (la sección 4) al presente Modelo de Informe Nacional para la COP12 que permite a las Partes Contratantes suministrar, si lo consideran oportuno, otra información por separado acerca de cada uno de sus Humedales de Importancia Internacional (Sitios Ramsar) designados.

Recordatorio: Le rogamos que en las casillas de 'texto libre' no utilice comillas dobles " ": utilice comillas simples ' ' en su lugar.

ESTRATEGIA 2.1 Designación de sitios Ramsar. *Poner en práctica el 'Marco estratégico y lineamientos para el desarrollo futuro de la Lista de Humedales de Importancia Internacional' (Manual de Ramsar N° 14, 3ª edición).*

2.1.1 ¿Se ha establecido una estrategia y las prioridades para designar nuevos Sitios Ramsar aplicando el <i>Marco estratégico para la Lista de Ramsar</i> ? {2.1.1} ARC 2.1.i	B - No
2.1.1 Información adicional:	
2.1.2 ¿Cuántas designaciones de Sitios Ramsar están previstas para el próximo trienio (2015-2018)? {2.1.4} ARC 2.1.iii	0 sitios
2.1.2 Información adicional (de ser posible, sírvase indicar el nombre del Sitio o los Sitios y el año de designación previsto):	

ESTRATEGIA 2.2 Servicio de Información sobre Sitios Ramsar. *Garantizar la disponibilidad y un mejor funcionamiento del Servicio de Información sobre Sitios Ramsar . . . como herramienta para guiar las designaciones de humedales para la Lista de Humedales de Importancia Internacional, y su administración eficaz por la Secretaría.*

2.2.1 ¿Se utiliza el Servicio de Información sobre Sitios Ramsar y sus herramientas en la identificación nacional de nuevos Sitios Ramsar que puedan ser designados? {2.2.1} ARC 2.2.ii	B - No
2.2.1 Información adicional:	

ESTRATEGIA 2.3 Planificación del manejo – nuevos sitios Ramsar. *Aun reconociendo que la designación de sitios Ramsar puede ser un estímulo para la elaboración de planes eficaces de manejo de sitios, conviene propugnar en general el principio de que, antes de que se designen nuevos sitios Ramsar, habría que poner en funcionamiento una planificación eficaz del manejo de todos ellos y contar con los recursos necesarios para llevar a cabo ese manejo.*

Modelo de Informe Nacional para la COP12 de Ramsar, página 17

2.3.1 ¿Se han establecido procesos adecuados de planificación del manejo para todos los sitios que se están preparando para la designación de Ramsar (2.1.2 <i>supra</i>)? {2.3.1} ARC 2.3.i	B - No
2.3.1 Información adicional:	

ESTRATEGIA 2.4 Características ecológicas de los sitios Ramsar. *Mantener las características ecológicas de todos los sitios Ramsar designados mediante actividades de planificación y manejo.*

2.4.1 ¿Cuántos Sitios Ramsar cuentan con un plan de manejo? {2.4.1} ARC 2.4.i	0 sitios
2.4.2 ¿Para cuántos de los Sitios Ramsar donde se elaboro un plan de gestión, dicho plan se aplica? {2.4.2} ARC 2.4.i	0 sitios
2.4.3 ¿En cuántos Sitios Ramsar se está preparando un plan de manejo? {2.4.3} ARC 2.4.i	0 sitios
2.4.1 – 2.4.3 Información adicional:	

2.4.4 ¿Cuántos Sitios Ramsar disponen de un comité de manejo intersectorial? {2.4.6} ARC 2.4.iv	2 sitios
2.4.4 Additional information (En caso de que haya uno o más sitios, sírvase indicar sus nombres y números oficiales): Sitio Ramsar Cuenca de Tajzara - 1030 Sitio Ramsar Lagos Poopó y Uru Uru - 1181	

2.4.5 ¿Para cuántos Sitios Ramsar se ha preparado una descripción de las características ecológicas? {2.4.7} ARC 2.4.v	0 sitios
2.4.5 Información adicional (En caso de que haya uno o más sitios, sírvase indicar sus nombres y números oficiales):	

ESTRATEGIA 2.5 Eficacia del manejo de los sitios Ramsar. *Examinar todos los sitios Ramsar existentes para determinar la eficacia de los acuerdos sobre manejo, de conformidad con lo dispuesto en el "Marco estratégico y lineamientos para el desarrollo futuro de la Lista de Humedales de Importancia Internacional".*

2.5.1 ¿Se ha realizado alguna evaluación de la efectividad del manejo de los Sitios Ramsar? {2.5.1} ARC 2.5.i	B - No
2.5.1 Información adicional (Si la respuesta es 'Sí' o "Algunos sitios", sírvase indicar en qué año se realizó la evaluación y en dónde o de quién se puede obtener esa información):	

Modelo de Informe Nacional para la COP12 de Ramsar, página 18

ESTRATEGIA 2.6 Estado de los sitios Ramsar. *Monitorear el estado de los sitios Ramsar y hacer frente a los cambios adversos que se hubieran producido en sus características ecológicas, notificar a la Secretaría de Ramsar cualesquiera cambios que se hubieren producido en ellos y utilizar, cuando proceda, el Registro de Montreux y las Misiones Ramsar de Asesoramiento como instrumentos para resolver los problemas.*

2.6.1 ¿Existen disposiciones para informar a la Autoridad Administrativa de los cambios o probables cambios negativos en las características ecológicas de los Sitios Ramsar provocados por la acción humana, de conformidad con el Artículo 3.2? {2.6.1} ARC 2.6.i

A - Sí

2.6.1 Información adicional (Si la respuesta es 'Sí' o 'Algunos sitios', sírvase resumir el mecanismo o los mecanismos establecidos):

2.6.2 ¿Se ha informado a la Secretaría de Ramsar de todos los casos de cambios o probables cambios negativos en las características ecológicas de los Sitios Ramsar provocados por la acción humana, de conformidad con el Artículo 3.2? {2.6.2} ARC 2.6.i

Z - No cambio negativo

2.6.2 Información adicional (Si la respuesta es 'Sí' o 'Algunos casos', sírvase indicar cuáles son los Sitios Ramsar sobre los que la Autoridad Administrativa ha elaborado informes, de conformidad con el Artículo 3.2, que se han remitido a la Secretaría, y cuáles son los sitios cuyos informes sobre cambios o probables cambios todavía no se han elaborado):

.....

2.6.3 Si procede, ¿se han tomado medidas para encarar las cuestiones que dieron lugar a la inscripción de Sitios Ramsar en el Registro de Montreux, incluida la petición de una Misión Ramsar de Asesoramiento? {2.6.3} ARC 2.6.ii

Z - No se aplica

2.6.3 Información adicional (Si la respuesta es 'Sí', sírvase añadir más información sobre las medidas adoptadas):

.....

ESTRATEGIA 2.7 Manejo de otros humedales de importancia internacional. *Se habrá logrado el manejo adecuado y uso racional para los humedales de importancia internacional que no hayan sido designados sitios Ramsar oficialmente pero hayan sido identificados aplicando a nivel nacional el Marco Estratégico o siguiendo un procedimiento equivalente.*

2.7.1 ¿Se han conservado las características ecológicas de los humedales de importancia internacional que aún no han sido designados Sitios Ramsar? {2.7.1} ARC 2.7.i

C - Algunos sitios

2.7.1 Información adicional:

.....

2.6.2 Have all cases of negative human-induced change or likely change in the ecological character of Ramsar Sites been reported to the Ramsar Secretariat, pursuant to Article 3.2? {2.6.2} KRA 2.6.i	Z - No negative change
2.6.2 Additional information (If 'Yes' or 'Some cases', please indicate for which Ramsar Sites the Administrative Authority has made Article 3.2 reports to the Secretariat, and for which sites such reports of change or likely change have not yet been made):	

OBJETIVO 3. COOPERACIÓN INTERNACIONAL

Recordatorio: Le rogamos que en las casillas de 'texto libre' no utilice comillas dobles " ": utilice comillas simples ' ' en su lugar.

ESTRATEGIA 3.1 Asociaciones de colaboración y sinergias con acuerdos multilaterales sobre el medio ambiente internacionales y regionales y otros organismos intergubernamentales. *Trabajar en asociación con acuerdos multilaterales sobre el medio ambiente (AMMA) internacionales y regionales y otros organismos intergubernamentales.*

3.1.1 ¿Se ha invitado a participar en el Comité Nacional Ramsar/de Humedales a los coordinadores nacionales de otros AMMA? {3.1.2} ARC 3.1.i y 3.1.iv	B - No
3.1.1 Información adicional:	

3.1.2 ¿Existen mecanismos en vigor a nivel nacional para la colaboración entre la Autoridad Administrativa de Ramsar y los coordinadores de los órganos y organismos mundiales, regionales y de las Naciones Unidas (por ejemplo, PNUMA, PNUD, OMS, FAO, CEPE, OIMT)? {3.1.3} ARC 3.1.iv	A - Sí
3.1.3 Información adicional:	

ESTRATEGIA 3.2 Iniciativas regionales. *Respaldar los arreglos regionales vigentes en el marco de la Convención y promover la concertación de nuevos arreglos.*

3.2.1 ¿Ha participado usted (Autoridad Administrativa) en el desarrollo y ejecución de una iniciativa regional en el marco de la Convención? {3.2.1} ARC 3.2.i	A - Sí
3.2.1 Información adicional (Si la respuesta es 'Sí' o 'Planificado', sírvase indicar cuáles son esas iniciativas regionales y los países que han colaborado en cada una de ellas): Iniciativa Regional de Conservación y Uso Sostenible de los Humedales Altoandinos (HAA). Iniciativa para la Conservación y Uso Sustentable de los Humedales Fluviales de la Cuenca del Plata.	
3.2.2 ¿Ha prestado su país apoyo, o ha participado en el desarrollo de otros centros de formación e investigación sobre los humedales a nivel regional (es decir, que abarcan más de un país)? {3.2.2}	B - No

Modelo de Informe Nacional para la COP12 de Ramsar, página 20

3.2.2 Información adicional (Si la respuesta es 'Sí', sírvase indicar los nombres de esos centros):

.....

ESTRATEGIA 3.3 Asistencia internacional. *Promover la asistencia internacional en apoyo de la conservación y el uso racional de los humedales, velando al mismo tiempo por que todos los proyectos de desarrollo que afecten a los humedales, comprendidas las inversiones extranjeras y nacionales, prevean salvaguardas y evaluaciones del impacto sobre el medio ambiente.*

3.3.1 [Para las Partes Contratantes que tienen un organismo de asistencia para el desarrollo solamente ('países donantes')] ¿Este organismo ha proporcionado financiamiento para apoyar la conservación y el manejo de humedales en otros países? {3.3.1} ARC 3.3.i

Z - No se aplica

3.3.1 Información adicional (Si la respuesta es 'Sí', sírvase indicar qué países recibieron esa asistencia desde la COP10):

.....

3.3.2 [Para las Partes Contratantes que tienen un organismo de asistencia para el desarrollo solamente ('países donantes')] ¿Se han incluido cláusulas de salvaguarda y evaluaciones ambientales en los proyectos de desarrollo propuestos por el organismo? {3.3.2} ARC 3.3.ii

Z - No se aplica

3.3.2 Información adicional:

.....

3.3.3 [Para las Partes Contratantes que han recibido asistencia para el desarrollo ('países receptores')] ¿Se ha recibido apoyo financiero de organismos de asistencia para el desarrollo específicamente para la conservación y el manejo de humedales dentro del país? {3.3.3}

Z - No se aplica

3.3.3 Información adicional (Si la respuesta es 'Sí', sírvase indicar de qué organismos se ha recibido esa asistencia desde la COP11):

ESTRATEGIA 3.4 Intercambio de información y conocimientos especializados. *Promover el intercambio de información y conocimientos especializados en relación con la conservación y el uso racional de los humedales.*

3.4.1 ¿Se han concertado redes, incluidos acuerdos de hermanamiento, a nivel nacional o internacional, de humedales con rasgos comunes, para compartir conocimientos y con fines de capacitación? {3.4.1}

D - Planificado

3.4.1 Información adicional (Si la respuesta es 'Sí', sírvase indicar cuáles son las redes y los humedales en cuestión):

Modelo de Informe Nacional para la COP12 de Ramsar, página 21

.....

3.4.2 ¿Se ha puesto en conocimiento del público la información relativa a los humedales nacionales y/o los Sitios Ramsar y a su estado (por ejemplo, por medio de publicaciones o de un sitio web)? {3.4.2} ARC 3.4.iv	D - Planificado
--	-----------------

3.4.2 Información adicional:
.....

3.4.3 ¿Se ha transmitido a la Secretaría de Ramsar información sobre los humedales y/o Sitios Ramsar del país para que pueda ser difundida? {3.4.3} ARC 3.4.ii	A - Sí
--	--------

3.4.3 Información adicional:
.....

ESTRATEGIA 3.5 Especies migratorias, cuencas hidrográficas y humedales compartidos.
Promover la realización de inventarios y la colaboración para el manejo de los humedales y las cuencas hidrográficas compartidos, incluidos el monitoreo y el manejo conjunto de las especies que dependen de humedales compartidos.

3.5.1 ¿Se han identificado todos los sistemas de humedales transfronterizos? {3.5.1} ARC 3.5.i	D - Planificado
--	-----------------

3.5.1 Información adicional:
Se han identificado dos Sitios Ramsar transfronterizos Lago Titicaca y el Pantanal y el Sistema de Humedales de la Cuenca del Plata compartido entre los países que forman parte de de la Cuenca

3.5.2 ¿Se ha establecido una cooperación efectiva en el manejo de los sistemas de humedales compartidos (por ejemplo, en las cuencas hidrográficas y zonas costeras compartidas)? {3.5.2} ARC 3.5.ii	A - Sí
--	--------

3.5.2 Información adicional (Si la respuesta es 'Sí' o 'Parcialmente', sírvase indicar para qué sistemas de humedales existe ese tipo de manejo):
El Estado Plurinacional de Bolivia forma parte de dos iniciativas regionales de la Convención de Ramsar: la Iniciativa para la Conservación y Uso Sustentable de los Humedales Fluviales de la Cuenca del Plata conformada por Argentina, Brasil, Bolivia, Paraguay y Uruguay y la Iniciativa Regional de Conservación, y la Iniciativa de Uso Sostenible de Humedales Altoandinos con participación de Autoridades Administrativas Nacionales Ramsar de Argentina, Bolivia, Chile, Colombia, Costa Rica, Ecuador, Perú y Venezuela.

Modelo de Informe Nacional para la COP12 de Ramsar, página 22

3.5.3 ¿Participa su país en redes o iniciativas regionales relativas a especies migratorias dependientes de humedales? {3.5.3} ARC 3.5.iii	A - Sí
3.5.3 Información adicional: Especies migratorias: Convención sobre la conservación de las especies migratorias de animales silvestres suscrita y ratificada por el Estado Plurinacional de Bolivia el 2002.	

OBJETIVO 4. CAPACIDAD DE EJECUCIÓN

Recordatorio: Le rogamos que en las casillas de 'texto libre' no utilice comillas dobles " ": utilice comillas simples ' ' en su lugar.

ESTRATEGIA 4.1 CECOP. *Respaldar el Programa de la Convención sobre Comunicación, Educación, Concienciación y Participación (Resolución X.8) y prestar asistencia para su ejecución a todos los niveles, cuando proceda, a fin de fomentar la conservación y el uso racional de los humedales gracias a actividades de comunicación, educación, concienciación y participación (CECoP), y trabajar para lograr una mayor concienciación sobre los objetivos, los mecanismos y las principales conclusiones de la Convención.*

4.1.1 ¿Se ha elaborado un Plan, o más de un Plan, Nacional de CECOP sobre los humedales? {4.1.1} ARC 4.1.i

- a) A nivel nacional
- b) A nivel subnacional
- c) A nivel de cuenca
- d) A nivel local/de sitio

- a) A - Sí
- b) B - No
- c) B - No
- d) D - Planificado

(Si aún no se ha elaborado un Plan Nacional de CECOP, pero sí se han establecido objetivos generales en materia de CECOP, sírvase indicarlo a continuación en el apartado dedicado a la información adicional)

4.1.1 Información adicional (Si la respuesta es 'Sí' o 'En progreso' a uno o varios de los cuatro apartados anteriores, sírvase describir el mecanismo y señalar quién es responsable del Plan y si han participado Coordinadores Nacionales de CECOP):

4.1.2 ¿Cuántos centros (centros de visitantes, centros de interpretación, centros de educación) se han establecido en Sitios Ramsar y otros humedales? {4.1.2} ARC 4.1.ii

- a) en Sitios Ramsar
- b) en otros humedales

- a) 0 centros
- b) 0 centros

4.1.2 Información adicional (Si los centros en cuestión forman parte de una red nacional o internacional, sírvase describir la red o redes de que se trata):

.....

Modelo de Informe Nacional para la COP12 de Ramsar, página 24

<p>4.1.3 La Parte Contratante:</p> <p>a) ¿Promueve la participación de los interesados directos en la adopción de decisiones con respecto a la planificación y el manejo de humedales?</p> <p>b) ¿Promueve específicamente la participación de los interesados locales en la selección de nuevos Sitios Ramsar y en el manejo de los existentes?</p> <p>{4.1.3} ARC 4.1.iii</p>	<p>a) A - Sí</p> <p>b) D - Planificado</p>
---	--

4.1.3 Información adicional (Si la respuesta es 'Sí' o 'Parcialmente', sírvase suministrar información sobre el modo en que participan los interesados directos):

.....

<p>4.1.4 ¿Se ha realizado una evaluación de las necesidades nacionales y locales de capacitación en materia de aplicación de la Convención? {4.1.4} ARC 4.1.iv y 4.1.viii</p>	<p>D - Planificado</p>
---	------------------------

4.1.4 Información adicional:

<p>4.1.5 ¿Cuántas oportunidades de formación se han ofrecido a los administradores de humedales desde la celebración de la COP11? {4.1.5} ARC 4.1.iv</p> <p>a) en Sitios Ramsar</p> <p>b) en otros humedales</p>	<p>Número de oportunidades:</p> <p>a) 0</p> <p>b) 0</p>
--	---

4.1.5 Información adicional (incluyendo si en la formación se han utilizado los Manuales Ramsar para el Uso Racional):

.....

<p>4.1.6 ¿Está operativo en el país un Comité Nacional Ramsar/de Humedales transectorial o un órgano equivalente? {4.1.6} ARC 4.3.v</p>	<p>A - Sí</p>
---	---------------

4.1.6 Información adicional (Si la respuesta es 'Sí', sírvase indicar a) los miembros que lo componen; b) el número de veces que se ha reunido desde la COP11; y c) cuáles son sus responsabilidades):

Existen dos Comités de Gestion conformados en los Sitios Ramsar Cuenca de Tajzara y Lagos Poopó y Uru Uru. El primero constituido por las Comunidades de Viscarra, Viñacuyo, Copacabana y Muñaya, Asociación de Productores y en el segundo conformado por las Comunidades de Vilañeque, Llapallapani y Puñaca de la Nación Originaria Urus Lago Poopó. En ambos comites participan Instituciones del Sector Público del Estado Plurinacional de Bolivia.

Modelo de Informe Nacional para la COP12 de Ramsar, página 25

<p>4.1.7 ¿Existen en el país otros mecanismos de comunicación instaurados (aparte del comité nacional) que se puedan utilizar para compartir los lineamientos de Ramsar sobre la aplicación y otras informaciones entre la Autoridad Administrativa y</p> <p>a) los administradores de los Sitios Ramsar?</p> <p>b) otros coordinadores nacionales de AMMA?</p> <p>c) otros ministerios, departamentos y organismos?</p> <p>{4.1.7} ARC 4.1.vi</p>	<p>a) B - No</p> <p>b) B - No</p> <p>c) B - No</p>
--	--

4.1.7 Información adicional (Si la respuesta es 'Sí' o 'Parcialmente', sírvase describir los tipos de mecanismos instaurados):

.....

<p>4.1.8 ¿Se han realizado actividades en el país bajo el estandarte de Ramsar, desde la celebración de la COP11, en relación con el Día Mundial de los Humedales (el 2 de febrero o en algún otro momento del año), ya sea encabezadas por el Gobierno, por ONG o en colaboración entre ambos? {4.1.8}</p>	<p>A - Sí</p>
---	---------------

4.1.8 Información adicional:

Con motivo de la celebración anual del Día Mundial de los Humedales el 2013 , el Estado Plurinacional de Bolivia ha designado a los Llanos de Moxos como humedales de Importancia Internacional, con una superficie de 6,9 millones de hectáreas.

Celebrando el Día Mundial de los Humedales, el 3 de febrero el Ministerio de Asuntos Exteriores del Estado Plurinacional de Bolivia fue galardonado con "Regalo a la Tierra" de WWF; premio por sus logros en el campo de la conservación y, especialmente por la designación de tres humedales de importancia internacional en el Departamento del Beni con 14.8 millones de hectáreas, asimismo, el Secretario General de la Convención Ramsar, el Sr. Christopher Briggs, reconoció el liderazgo y el progreso del Estado Plurinacional de Bolivia en la implementación de la Convención y entregó certificados que reconocen este logro al Ministro de Relaciones Exteriores, el Embajador David Choquehuanca Céspedes y el Ministro de Medio Ambiente D. José Antonio Gutiérrez Zamora.

<p>4.1.9 ¿Se han llevado a cabo campañas, programas y proyectos (distintos de las actividades relacionadas con el Día Mundial de los Humedales), desde la celebración de la COP11, para aumentar la conciencia sobre la importancia de los humedales para las personas y la vida silvestre y los beneficios/servicios de los ecosistemas proporcionados por los humedales? {4.1.9}</p>	<p>D - Planificado</p>
--	------------------------

4.1.9 Información adicional (sírvase indicar asimismo si otras organizaciones han realizado

Modelo de Informe Nacional para la COP12 de Ramsar, página 26

estas u otras actividades de CECOP):

ESTRATEGIA 4.2 Capacidad financiera de la Convención. *Facilitar los recursos financieros necesarios para que los mecanismos y los programas de gobernanza de la Convención respondan a las expectativas de la Conferencia de las Partes Contratantes, dentro de los límites de los recursos disponibles y gracias a la administración eficaz de esos recursos; estudiar y habilitar opciones y mecanismos para movilizar recursos nuevos y adicionales para la aplicación de la Convención.*

4.2.1	
a) ¿Se han abonado todas las contribuciones a Ramsar correspondientes a 2012, 2013 y 2014? {4.2.1} ARC 4.2.i	A - Sí
b) Si la respuesta a la pregunta 4.2.1 a) es 'No', sírvase aclarar qué medidas se han adoptado para asegurar la puntualidad de los pagos en el futuro:	

4.2.2 ¿Se han aportado otras contribuciones adicionales en forma de contribuciones voluntarias destinadas a recursos complementarios para la realización de otras actividades de la Convención? {4.2.2} ARC 4.2.i	A - Sí
4.2.2 Información adicional (Si la respuesta es 'Sí', sírvase detallar las cantidades y actividades en cuestión):	
Se comprometió contraparte nacional para el financiamiento de dos propuestas de proyecto presentadas al Fondo de Humedales para el Futuro (FHF), que son:	
a) Restauración de Humedales del Sitio Ramsar Lagos Poopó y Uru Uru con el uso de totorales en la Comunidad Indígena Urus Muratos y	
b) Capacitación al Comité de Gestión del Sitio Ramsar Cuenca de Tajzara en monitoreo de amenazas en humedales.	

ESTRATEGIA 4.3 Eficacia de los órganos de la Convención. *Velar por que la Conferencia de las Partes Contratantes, el Comité Permanente, el Grupo de Examen Científico y Técnico y la Secretaría de Ramsar desempeñen sus respectivas misiones con un elevado grado de eficiencia y eficacia en apoyo de la aplicación de la Convención.*

4.3.1 ¿Ha utilizado usted (Autoridad Administrativa) su Informe Nacional de Ramsar anterior para monitorear la aplicación de la Convención? {4.3.1} ARC 4.3.ii	A - Sí
4.3.1 Información adicional (Si la respuesta es 'Sí', sírvase indicar en qué forma se ha utilizado el Informe para el monitoreo):	
Contrastación y/o verificación de la información.	

Modelo de Informe Nacional para la COP12 de Ramsar, página 27

ESTRATEGIA 4.4 Colaboración con las OIA y otras entidades. Maximizar las ventajas que reporta colaborar con las Organizaciones Internacionales Asociadas (OIA*) de la Convención y otras entidades.

* Las OIA son: BirdLife International, el Instituto Internacional para el Manejo del Agua (IWMI), la UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza), Wetlands International, y WWF International.

4.4.1 ¿Ha recibido su país asistencia destinada a la aplicación de la Convención procedente de una o varias de las OIA de la Convención? {4.4.1} ARC 4.4.iii	A - Sí
--	--------

4.4.1 Información adicional (Si la respuesta es 'Sí', sírvase incluir el nombre o los nombres de las OIA que le han prestado asistencia y la naturaleza de la asistencia recibida):

WWF, con las siguientes acciones:

- Programa Buenas Practicas Ganaderas de la Porción del Pantanal Boliviano – Municipio de San Matías –Provincia Ángel Sandoval.

- Sistema de monitoreo de las poblaciones de ciervo del pantano (*Blastocerus dichotomus*) en el Área Protegida Pantanal de Otuquis, Santa Cruz de la Sierra-Bolivia.

4.4.2 ¿Ha prestado su país asistencia a una o varias de las OIA de la Convención? {4.4.2} ARC 4.4.iii	B - No
---	--------

4.4.2 Información adicional (Si la respuesta es 'Sí', sírvase incluir el nombre o los nombres de las OIA a las que ha prestado asistencia y la naturaleza de la asistencia ofrecida):

Annex 96

Ministry of the Environment and Water of Bolivia,
*Characterization of Water Resources in the Southwest
of the Department of Potosí – Municipality of
San Pablo de Lipez “Wetlands of Silala Valley and
Adjacent Sectors”* (Volume II), July 2016

(Original in Spanish, English translation)



MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE Y AGUA

VICEMINISTERIO DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BASICO
Dirección General de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario
Unidad de Pre inversión y Gestión de Financiamiento

Tomo II

CARACTERIZACION DE LOS RECURSOS HIDRICOS EN EL SUDOESTE DEL DEPARTAMENTO DE POTOSÍ - MUNICIPIO DE SAN PABLO DE LIPEZ

“BOFEDALES DEL VALLE DE SILALA Y SECTORES COLINDANTES”

VERSION FINAL

Autor: Ph.D. Ing. Abel Sangueza Antezana
Consultor VAPSB

Julio de 2016

Contenido

CARACTERIZACION DE LOS RECURSOS HIDRICOS EN EL SUDOESTE DEL DEPARTAMENTO DE POTOSÍ - MUNICIPIO DE SAN PABLO DE LIPEZ.....	1
“BOFEDALES DEL VALLE DE SILALA Y SECTORES COLINDANTES”	1
1.- INTRODUCCIÓN.....	1
2.- OBJETIVO GENERAL.....	2
2.1.- Objetivos Específicos	2
3.- ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS.....	2
3.1.- Geología de Subsuperficie	4
4.- METODOLOGIA EMPLEADA	6
4.1.- Trabajo de Gabinete	6
4.2.- Trabajo de Campo.....	7
Trabajo de Campo – Primera Intervención	7
Trabajo de Campo – Segunda Intervención	8
Trabajo de Campo – Tercera Intervención.....	9
Trabajo de Campo – Cuarta Intervención	9
4.3.- Instituciones participantes.....	9
5.- ESTUDIO HIDROGEOLOGICO	10
5.1.- Planteamiento del Problema desde el punto de vista hidrogeológico.....	11
5.2.- Hidrogeología y Dirección de Flujos Regional.....	12
5.2.1.- Unidades hidrogeológicas del área de estudio	17
5.3.- Características hidrogeológicas del área de estudio	21
5.3.1.- Aforos y Caudales.....	23
5.3.2.- Diagrama de Dispersión y Ajuste de Tendencia Lineal	24
5.3.3.- Análisis de las recargas.....	25
5.3.4.- Análisis de las descargas	27
5.3.5.- Calidad del agua	28
6.- ESTUDIO DE BOFEDALES	30
6.1.- Introducción.....	30
6.2.- Identificación, cuantificación y caracterización de los bofedales en el área.....	32
6.2.1.- Bofedales Sector Norte	33

6.2.2.- Bofedales Sector Sur	35
6.2.3.- Proceso de pérdida y degradación de bofedales	37
7.- EL PAPEL ESTRATEGICO DE LAS AGUAS DE LOS BOFEDALES DEL SILALA.....	44
8.- ALTERNATIVAS DE CAPTACION Y EXPLOTACION DE AGUA DE LOS BOFEDALES DE LA DIGNIDAD Y AREAS ADYACENTES PARA USO HUMANO	45
8.1.- Captación a Partir de un Cárcamo de Bombeo (Alternativa 1).....	47
8.2.- Captación a Partir de una Batería de pozos ubicados en el sector Silala (Alternativa 2)	54
8.3.- Captación a Partir de una Batería de pozos ubicados en el sector de la Laguna Natural de Almacenamiento (Alternativa 3).....	56
8.4.- Trazos de la Red de Impulsión hacia Uyuni – Tupiza – Potosí a Partir de la Laguna Natural de Almacenamiento.....	57
8.4.1.- Trazo de la Red de Impulsión hacia la población de Tupiza.....	58
8.4.2.- Trazo de la Red de Conducción por gravedad hacia Uyuni.....	61
8.4.3.- Trazado de la Red de Impulsión hacia la ciudad de Potosí	63
9.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	66
10.- BIBLIOGRAFÍA.....	68



CARACTERIZACION DE LOS RECURSOS HIDRICOS EN EL SUDOESTE DEL DEPARTAMENTO DE POTOSÍ - MUNICIPIO DE SAN PABLO DE LIPEZ “BOFEDALES DEL VALLE DE SILALA Y SECTORES COLINDANTES”

1.- INTRODUCCIÓN

Los estudios sobre los recursos hídricos en el sudoeste de Potosí comienzan a tomar importancia a partir del año 2005, con el fin de plantear soluciones de abastecimiento de agua para consumo humano en varias poblaciones de esa región. Durante esta primera década los principales trabajos se llevaron a cabo en ciudades intermedias con mayor población como Uyuni o centros mineros como San Cristóbal.

La principal actividad que se desarrolla en la zona de interés, es el turismo. Sin embargo, dada la situación de descuido en que se encuentra la zona de estudio, se hace imprescindible la presencia de Estado para cuantificar los recursos hídricos existentes, además, se presenta una oportunidad para la elaboración y evaluación de planes de gestión y aprovechamiento del agua de manera sostenible y sustentable.

Por otra parte, el desabastecimiento de agua potable en ciudades intermedia, diferentes comunidades y el creciente desarrollo de actividades agrícolas en especial de la quinua en esta región, ha generado un fuerte interés sobre los recursos hídricos subterráneos, debido a que las principales fuentes superficiales se encuentran con descenso en sus caudales. Bajo este contexto, el Ministerio de Medio Ambiente y Agua – Viceministerio de Agua Potable y Alcantarillado ha decidido estudiar a escala local estos recursos hídricos en el Valle de Silala y áreas colindantes, para determinar inicialmente la profundidad y geometría de los acuíferos, ocurrencia de las aguas subterráneas y en lo posterior realizar la construcción de pozos profundos para evaluar los volúmenes totales.

Los resultados de este estudio básico de caracterización será un soporte técnico para las autoridades del MMAyA como cabeza del sector y otras instituciones estatales en sus planes de crear un polo de desarrollo y sentar soberanía.

Los planteamientos del presente documento, en cuanto a la selección de zonas y las acciones para llevarlas a cabo, responden a la participación positiva de las entidades y expertos convocados por el MMAyA – VAPSB a las mesas de trabajo organizados para identificar las obras prioritarias sobre las cuales avanzará en este programa.

Se presenta en los contenidos una breve descripción de la geomorfología, hidrología, geología, hidrogeología e hidroquímica del área de los “Bofedales del Valle de Silala”, además, un análisis de las recargas y descargas.



Por último, se realiza una evaluación de los "Bofedales del Valle de Silala" sur y norte, en especial la degradación que vienen sufriendo al ser perturbado su mecanismo de transferencia de agua original acuífero-bofedal.

2.- OBJETIVO GENERAL

Evaluar el estado actual de los recursos hídricos en el sudoeste del departamento de Potosí - Municipio de San Pablo de Lipez "bofedales del Valle de Silala y sectores colindantes", de manera que permita proporcionar información suficiente sobre las fuentes de agua existente, la explotación actual, su condicionamiento geológico, las formas de captación y las posibilidades futuras de explotación y/o aprovechamiento de las aguas subterráneas del área.

2.1.- Objetivos Específicos

Realizar una descripción general de las principales Formaciones acuíferas con información geofísica relevante, que permita realizar una clasificación de los distintos tipos de acuíferos existentes en el lugar de estudio.

Realizar una descripción somera de la ubicación, geometría y profundidad de cada nivel de agua subterránea, de modo a determinar en qué forma y en qué medida se puede explotar este almacenamiento de agua, además, y si es posible trasladar y explotar en otras regiones del sudoeste potosino.

Describir las características estratigráficas del acuífero, incluyendo; identificación y potencia de los reservorios más importantes, con diferenciación de los diferentes estados en que se encuentra en el subsuelo.

Analizar y describir la relación existente entre el basamento geológico, aguas congeladas subterráneas y el estado actual de funcionamiento de los bofedales norte y sur.

Definir el cuadro hidrogeológico local, que en función de la estructura geológica, permitirá identificar los acuíferos, acuitardos, acuífugos y acuíclusos presentes, para establecer su posible relación con los bofedales norte y sur.

Estudiar alternativas para el aprovechamiento sostenible y sustentable de las aguas como un factor de desarrollo de la región y zonas colindantes.

3.- ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS

Se analizan los efectos de los diferentes procesos y agentes geomorfológicos que modelaron el relieve del área de estudio desde hace 7.8 Ma.

Además, este capítulo es complementado con el Mapa Geomorfológico, que incluye su respectiva leyenda y las diversas unidades geomorfológicas reconocidas en el área del



Estado Plurinacional de Bolivia

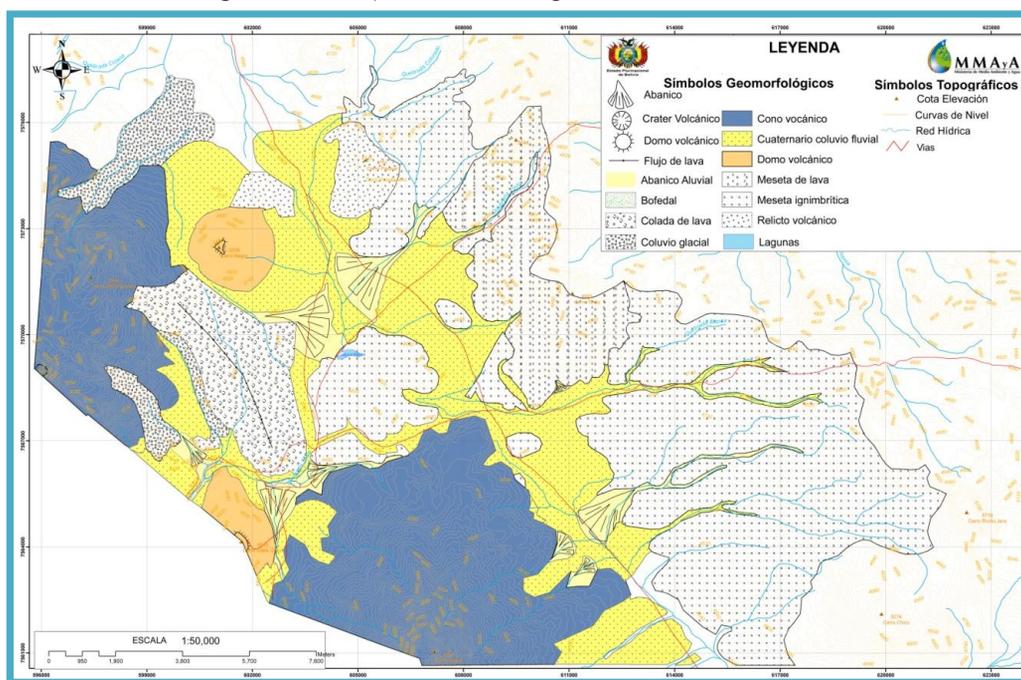
MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE Y AGUA

Proyecto. Los rasgos geomorfológicos descritos se apoyan en observaciones de terreno, fotografías representativas tomadas durante las visitas de terreno, imágenes satelitales y el estudio de SERGEOMIN, 2001. Destacan notablemente dentro de las características geomorfológicas de esta área:

Mesetas ignimbríticas, es una de las características más notables, se inicia con la deposición de las tobas de las Ignimbritas Silala, posiblemente, ha tenido lugar durante el Mioceno Superior sobre rocas presumiblemente del basamento Paleozoico o rocas del Mioceno Inferior, construyendo mesetas típicas con paredes verticales y con sistemas de drenaje que no son perceptibles en la actualidad. Estas mesetas sufrieron bruscas alteraciones geomorfológicas, por el intenso diaclasamiento y el grado de soldadura de las ignimbritas, y por supuesto, por la acción meteorizante de los agentes de movimiento y deshielo de glaciares, cambios extremos de temperatura y viento. Esto dio lugar a la formación de farallones que regionalmente en algunos casos pasan de 100 metros de altura. También dieron lugar a la formación de paleosuelos de color rojizo.

Fujos de lava, son las que cubrieron las mesetas ignimbríticas y a toda geoforma original creada por las ignimbritas y paleosuelos.

Figura N° 1: Mapa Geomorfológico del área de estudio



Fuente: MMAyA



Todo el paquete estructural regional fue posteriormente levemente solevantado hace aproximadamente 1.7 a 1.9 Ma (Lema & Ramos, 1996) inclinándolo suavemente hacia el oeste, paralelamente a la intrusión de conos volcánicos y a la formación de estratos volcanes. Por las edades obtenidas por el PIR estos rasgos geomorfológicos alterados pudieron haberse realizado hace 1.4 Ma.

Durante las glaciaciones de hace 14.500 años BP, Último Máximo Glaciar de la Cordillera de Central de los Andes, los rasgos geomorfológicos fueron fuertemente alterados por el movimiento y deshielo de los glaciales que dieron lugar a la formación de lagos, lagunas y salares en todo el Altiplano Boliviano, así como a la formación de valles profundos, entre ellos el Valle de Silala.

La actividad del deshielo de la glaciación es otro de los rasgos geomorfológicos más notorios sobre la formación de la Quebrada de Silala. Rasgos que se formaron hace 10,000 años BP o más. A fines de éste episodio glaciar (tardí glaciar) se formaron las quebradas que son un ejemplo típico de la acción del agua de deshielo aprovechando zonas de debilidad en la roca aflorante, en este caso la Falla Silala y las fallas transversales E-W de ajuste. Sin embargo, el diseño actual de la Quebrada Principal con un corte transversal geomorfológico en "U" con paredes laterales verticales (15 a 100 m de altura y 40 m de ancho) y un piso plano es la combinación de varios factores de meteorización y no solo a la acción fluvio-glacial. Es importante señalar que desde el Holoceno, la Quebrada de Silala no tiene ninguna proporción entre la profundidad y ancho del mismo con la cantidad de agua que podría fluir en él, o sea que existe una desproporción geomorfológica notable.

Los rasgos geomorfológicos modelados durante el Holoceno hasta nuestros días son más por la acción eólica y por diferencial térmica diaria y casi nulos por acción fluvial.

3.1.- Geología de Subsuperficie

La información de subsuperficie se ha generado a partir de los Perfiles Bidimensionales obtenidos durante las prospecciones geofísicas con equipo Profiler, con lo que se ha explorado profundidades máximas de hasta 200 metros, cuyas ubicaciones e interpretaciones se encuentran en el Estudio de Prospección Geofísica por el Método de Tomografía Eléctrica en el Sudoeste del Departamento de Potosí - Municipio de San Pablo de Lipez "Bofedales del Valle de Silala y Sectores Colindantes".

Por otra parte, se evaluaron los pozos perforados por lo chileno en el bofedal norte. A pesar de la escasa información obtenida al respecto, estas han sido utilizadas en el presente estudio.

Analizando la litología de estos, se infiere hacia sitios, en los cuales se presenta materiales depositados que forman los depósitos glaciales, fluvio-glaciales, coluviales y aluviales constituidos por bloques o bolones poligénicos, clastos de diferentes rocas y tamaños, y sedimentos finos como arena y limo, acumulados sobre ignimbritas, pertenecientes a la Formación Silala.



Estado Plurinacional de Bolivia

MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE Y AGUA

Según esta interpretación litológica, en los pozos del bofedal norte los sedimentos son principalmente limo y arena fina con espesores desde 0,90 a 1,50 metros, y los materiales depositados con espesores de 2,0 a 8,0 metros, como se confirma en los Perfiles Tomográficos. Por tanto, la producción como reservorio de agua, es variable y está limitado por el espesor y extensión.

Figura N° 2: Columna Litológica del área de estudio

ERA	EDAD	PERIODO	LITOLOGIA	DESCRIPCIÓN DE PROCESOS GEOMORFICOS	AÑOS
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO		ESTABILIDAD DE RELIEVE CLIMA SECO	10.000 años BP 14.000 años BP 65.000 años BP < 1.0 Ma. 1.6 Ma. 1.9 Ma. 5.3 Ma. 5.94 Ma. 6.04 Ma. 7.8 Ma.
			DEPOSITOS ALUVIALES DEPOSITOS COLUVIALES DEPOSITOS FLUVIO-GLACIALES	RELIEVES TIPICOS DE SEDIMENTOS CUATERNARIOS ALUMBRAMIENTO DE AGUA – BOFEDALES ESTATICOS	
		PLEISTOCENO	DEPOSITOS ALUVIALES DEPOSITOS COLUVIALES DEPOSITOS FLUVIO-GLACIALES	FORMACION DE VALLES Y QUEBRADAS RELIEVES ALUVIALES RELIEVES MORRENICOS GLACIACION	
			LAVAS ANDESITICAS BASICAS	FORMACION DE ESTRATOVOLCANES LEVES MODIFICACIONES DE PALEORELIEVES	
			Superficie de erosión		
		NEOGENO	PLIOCENO	LAVAS ANDESITICAS A DACITICAS	
	Superficie de erosión			ESTABILIDAD TECTONICA FORMACION DE PALEOSUELOS DISECTACION Y FORMACION DE VALLES PROCESOS DE EROSION	
	MIOCENO		LAVAS ANDESITICAS – DACITICAS	VOLCAN INACALIRI (FASE – I)	
			LAVAS ANDESITICAS IGNIMBRITAS SILALA (altamente fracturada)	DOMOS VOLCANICOS SILALA CHICO VOLCAN NEGRO Y CERRO TORITO	

Fuente: MMAyA



La roca base, está formada por ignimbritas de edad Miocénica, que tienen una gran distribución al este y norte de los bofedales estáticos y afloran en las laderas del área de estudio, cuyo espesor no se logró determinar con los estudios geofísicos; estas ignimbritas buzan generalmente de este a oeste y en algunos sectores se encuentran fuertemente diaclasadas.

4.- METODOLOGIA EMPLEADA

La metodología de trabajo como suele ser habitual en este tipo de estudios, fue dividida en dos partes: trabajo de gabinete y trabajo de campo.

El desarrollo del estudio fue realizado de forma secuencial, operacional e investigativa, según una serie de pasos o etapas aplicados de manera metodológica, desde la recopilación y revisión de antecedentes disponibles, tanto a nivel local como regional. También se desarrolló una serie de entrevistas a instituciones a fin de obtener información e intercambiar opiniones sobre los recursos hídricos del área de estudio.

4.1.- Trabajo de Gabinete

El desarrollo del trabajo de gabinete fue enmarcado en tres etapas sucesivas, que son las siguientes:

Etapas 1: Entrevistas a Instituciones

Se programó y realizó una serie de visitas a instituciones públicas (a nivel nacional), privadas, instituciones de cooperación, y ONG, a fin de recabar estudios e informes que pudieran aportar al desarrollo del estudio.

Etapas 2: Recopilación y síntesis de antecedentes bibliográficos

Una vez recabado informes técnicos, estos fueron organizados según la naturaleza de su contenido, es así, como se han agrupado en las siguientes categorías: cartografía, estudios geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos, estudios geofísicos, información climática y tesis de grado, tanto digital e impreso.

Etapas 3: Elaboración programación de primera visita al terreno

Una vez que fueron analizados los antecedentes y todo el material disponible, además, realizada una evaluación preliminar hidrogeológica del lugar, se programó una primera visita de reconocimiento y trabajo por el lapso de cinco días.



4.2.- Trabajo de Campo

Con el objetivo de llevar a cabo estudios in situ, se programaron diversas intervenciones de campo, para visitar los lugares identificados preliminarmente como Bofedales del Valle de Silala, y estudiar desde el punto de vista hidrogeológico y el tipo de recarga que los alimentan. Pero también, está básicamente destinado a verificar y prospeccionar aspectos de carácter morfológico, geológico y vegetación que permitan lograr una adecuada identificación de estos bofedales alimentados por aguas subterráneas y del acuífero del cual se sustentan. Esta labor, permitió corregir o modificar delimitaciones de acuíferos identificados en estudios anteriores.

Los distintos trabajos de campo se desarrollaron divididos en dos grupos, cada grupo compuesto por profesionales afines al tipo de investigación a realizar.

La razón fundamental de realizar el trabajo de campo en diferentes campañas, fueron:

- La geomorfología de la zona; que no permitía movilizarse con facilidad junto a los equipos trasladados.
- Lo extenso del área y la gran cantidad de lugares a estudiar; que requirió realizar los estudios por sectores.
- Las temperaturas extremas que no permitieron el funcionamiento correcto de los equipos y medios de transporte.
- La falta de logística como: hospedaje, saneamiento básico, comunicación, y otros que restringen quedarse por un tiempo mayor.

Trabajo de Campo – Primera Intervención

El desarrollo del trabajo de campo fue planificado para ser llevado a cabo en tres etapas, siendo estas las siguientes:

Etapa 1: Reconocimiento y trabajo de Terreno

Se realizó en fecha 25/04/2013 al 30/04/2013, con la participación de profesionales de la Gobernación de Potosí y del Ministerio de Medio Ambiente y Agua, cuya finalidad fue hacer un reconocimiento preliminar de la zona e intercambiar en terreno opiniones técnicas sobre el desarrollo del estudio.

Posteriormente, se inició con la identificación y priorización de sitios, seguido del estudio geofísico e hidrogeológico para profundizar los criterios de delimitación de acuíferos y



planificar las futuras campañas de terreno. Este aspecto fue coordinado con técnicos del Gobierno Autónomo del Departamento de Potosí.

Etapa 2: Identificación Preliminar de bofedales

Esta etapa estuvo básicamente destinada a observar, verificar y evaluar desde el punto de vista hidrogeológico, tanto en el bofedal norte y sur aspectos de carácter morfológico, hidrogeológico y vegetacional que permitirían lograr una adecuada identificación de bofedales alimentados por aguas subterráneas y del acuífero del cual se alimentan.

Etapa 3: Procesamiento de la Información.

Durante esta etapa se logró la identificación clara de ambos bofedales, además, se logró verificar que efectivamente son alimentados por aguas subterráneas. Motivo por el cual, se programó estudios de tomografía en cada uno de ellos.

Trabajo de Campo – Segunda Intervención

El desarrollo del trabajo de campo fue enmarcado en dos etapas sucesivas, llevada a cabo en fecha 06/06/2013 hasta el 12/06/2013, con las actividades siguientes:

Fotografía N° 1: Mediciones realizadas en campo



Fuente: MMAyA

Etapa 1: Trabajo Terreno

En base al trabajo realizado durante la primera intervención con la identificación preliminar de los bofedales, se realizó estudios de Tomografía Eléctrica en diferentes sectores del bofedal sur, ubicado en una hondonada. Por otra parte, reconocimiento de la vegetación que contiene cada uno de los bofedales.



Estado Plurinacional de Bolivia



Es importante hacer notar que las temperaturas extremas en la fecha de intervención, no permitieron llevar a cabo estudios de prospección geofísica en el bofedal norte según se tenía programado.

Etapa 2: Procesamiento de la Información

Los datos obtenidos en base a resistividades del subsuelo y otros permitieron validar la información obtenida en la primera intervención.

Trabajo de Campo – Tercera Intervención

Llevada a cabo en fecha 25/09/2013 al 28/09/2013. El desarrollo del trabajo de campo fue enmarcado en dos etapas sucesivas, que son las siguientes:

Etapa 1: Trabajo Terreno

Permitió completar los trabajos geofísicos e hidrogeológicos no realizados a causa de las temperaturas extremas anteriores, además, aprovechar de manera satisfactoria la experiencia de anteriores intervenciones.

Por otra parte, en esta campaña se logró realizar estudios de Tomografía Eléctrica (T. E.) en el bofedal norte, que se presumía más compleja en lo relacionado al mecanismo de transferencia de agua hacia el bofedal, identificación de lo acuífero, dirección de flujo, degradación del bofedal y obras hidráulicas realizadas por los chilenos.

Etapa 2: Procesamiento de la Información

Sobre la base de toda la información analizada y la generada en gabinete y terreno durante las tres intervenciones, se contó con los antecedentes necesarios para definir la geometría, profundidad y característica de los acuíferos. Por otra parte, la relación existente bofedales-agua subterránea y la existencia de una determinada vegetación en ambos bofedales.

Trabajo de Campo – Cuarta Intervención

En esta etapa de terreno se logró la identificación clara de aquellas geofomas indicios naturales de la existencia de suelos congelados y en sectores contiguos a los bofedales, y se han verificado e identificado con claridad los sectores degradados, además se logró realizar la clasificación hidrogeológica.

4.3.- Instituciones participantes

Para la realización de la Caracterización de los Recursos Hídricos en el Sudoeste del Departamento de Potosí - Municipio de San Pablo de Lipez "Bofedales del Valle de Silala y Sectores Colindantes" el personal estuvo compuesto por:



Nº	INSTITUCIÓN	PERSONAL/PARTICIPACIÓN EN EL ESTUDIO
1	MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y AGUA	Lic. José Antonio Zamora Gutiérrez Ministro de Medio Ambiente y Agua
2	MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y AGUA Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico	Ing. Rubén Méndez Estrada Viceministro de Agua Potable y Saneamiento Básico
3	MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y AGUA Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego Dirección de General de Cuencas y Recursos Hídricos	Ing. Oscar W. Céspedes Montaña Coordinador del Estudio
4	MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y AGUA Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico	Ing. Abel Sangüeza Antezana Geofísico – Hidrogeólogo
5	MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y AGUA Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico	Ing. Veimar Vásquez Bazalito Hidrología e Hidráulica
6	MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y AGUA Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego Cuencas Transfronterizas	Ing. Julio Montesinos Paredes Evaluación de bofedales
7	GOBIERNO AUTÓNOMO DEL DEPARTAMENTO DE POTOSÍ Secretaría de Minería y Metalurgia	Ing. Ceferino Gonzales Geofísico - Hidrogeólogo
8	GOBIERNO AUTÓNOMO DEL DEPARTAMENTO DE POTOSÍ Secretaría de Madre Tierra	Ing. Julio Montero Rojas Geofísico Junior
9	FUERZAS ARMADAS DEL ESTADO NAVAL ARMADA BOLIVIANA Servicio Nacional de Hidrografía Naval	Cap. Guillermo R. Linares Chumacero Logística
10	REGIMIENTO LOA	Tcnl. DEM Augusto Arévalo Oblitas Comandante Regimiento Logística
11	REGIMIENTO LOA	Conscriptos Apoyo

5.- ESTUDIO HIDROGEOLOGICO

En las VII Jornadas de Investigación IDICSO, realizada en fecha 14 de octubre de 2009 en Buenos Aires, el Instituto de Investigaciones en Ciencias Sociales – ODICSO interviene con el tema: Silala, ¿Curso de Agua Internacional o Manantial Nacional?, en su Ponencia, manifiesta de manera categórica: Si nos guiamos por las necesidades, tendríamos que decir que Chile lo necesita más que Bolivia, ya que, como vimos en el punto de



aprovechamiento de los recursos hidrográficos compartidos, los factores a tener en cuenta en estas circunstancias favorecen al país costero. Población, uso potencial, desarrollo económico y actividad industrial lo posee todo Chile ya que del lado boliviano es casi desierto. ¿Se podría pensar que es por esta situación que el Estado boliviano no le ha dado importancia a la zona?

Como sea, aquí, no nos estamos guiando por las necesidades o por la desidia, sino por el Derecho Internacional. El Silala es un río artificial creado por canalizaciones hechas por la mano del hombre. El cantón Quetena que le da origen nace y queda en suelo Boliviano, a 7.0 km de la frontera. De manera subterránea no existe interconexión de nuestras aguas con territorio chileno, superficialmente el agua no podría haber llegado jamás de forma natural a suelo Chileno.

5.1.- Planteamiento del Problema desde el punto de vista hidrogeológico

Los recursos naturales, incluidos los hídricos, superficiales y subterráneos del Estado Plurinacional de Bolivia, han despertado, desde hace mucho tiempo atrás, la ambición extralimitada de los países vecinos, para aprovechar nuestras aguas en el regadío de extensas zonas desérticas de sus territorios, para saciar la sed de ciudades altamente pobladas y para la buena marcha de diferentes industrias como está sucediendo actualmente con las aguas de los "Bofedales del Valle de Silala" del sudoeste del departamento del Potosí.

Ante tal situación, el Ministerio de Medio Ambiente y Agua como cabeza de sector, programó una serie de visitas al Valle de Silala y proximidades, donde se llevaron a cabo diferentes evaluaciones, estudios e implementaciones, entre estos: geológicos, geofísicos, hidrogeológicos, hidrológicos, hidrometeorológicos, otros.

Con los estudios de prospección geofísica (T. E.) se ha identificado presencia de bastante agua subterránea almacenada en la porosidad secundaria de rocas y suelos congelados subterráneos en distintos sectores y profundidades en el área de estudio.

La mayor importancia práctica de las aguas congelados subterráneas, reside en su capacidad de almacenamiento de agua en estado sólido y de su liberación lenta por efectos de la onda térmica estacional, la cual es responsable del descongelamiento anual de los suelos congelados y por efecto del flujo geotérmico local que produce un lento derretimiento en la base de los suelos congelados, dando origen al agua que alumbra en los bofedales.

Por tanto, el año 1904, una vez realizada las canalizaciones mediante excavaciones en cada uno de los bofedales, los suelos congelados subsuperficiales sufrieron una estimulación al ser expuestos a temperaturas más elevadas (por radiación solar),



provocando derretimiento del agua congelada, por ende, originando escurrimiento de agua por los canales artificiales construidos.

Por otra parte, en la actualidad, la existencia de algunos alumbramientos de agua, que no fueron canalizados, tienen flujos naturales muy lentos y cortos, que van en distintas direcciones o que forman medios lenticos con aguas limpias. Durante el invierno estos pequeños espejos se cubren de hielo, no así, los alumbramientos de agua que fueron canalizados. Estos alumbramientos de agua crean zonas de humedad superficial que da lugar a la formación de bofedales o medios lenticos.

Por tanto, la región sudoeste del departamento de Potosí presenta una riqueza envidiable en recursos hídricos, pero no así, en su distribución espacial y temporal, razón por la que su aprovechamiento es casi nulo por el Estado Plurinacional de Bolivia y en escala muy elevada por la República de Chile.

Sin duda, este aspecto conlleva a una pérdida del "capital natural", debido al descuido y dejadez, malas negociaciones de autoridades anteriores y principalmente la falta de presencia de Estado. Por tanto, las futuras acciones deben encuadrarse en una visión estratégica e integrada de los acuíferos en la gestión global de los recursos hídricos, aplicando una política de protección, conservación y explotación del patrimonio aguas y suelos en el área de estudio.

5.2.- Hidrogeología y Dirección de Flujos Regional

El área es poco explorado desde el punto de vista de los recursos hídricos subterráneos y superficiales, geomorfológicamente con variadas geoformas, corresponden a sectores donde existen: depresiones (lagunas), planicies y zonas con imponentes elevaciones y temperaturas extremas, donde se encuentra el mayor potencial hidrogeológico. A todos estos aspectos, sumado razones de tipo logístico y técnico como la distancia, vías de acceso deterioradas, dificultades en la operatividad de los métodos de trabajo y falta de interés de los gobernantes anteriores y las instituciones relacionadas, han impedido realizar estudios a detalle para cuantificar de manera precisa los recursos hídricos subterráneos y sus flujos de agua.

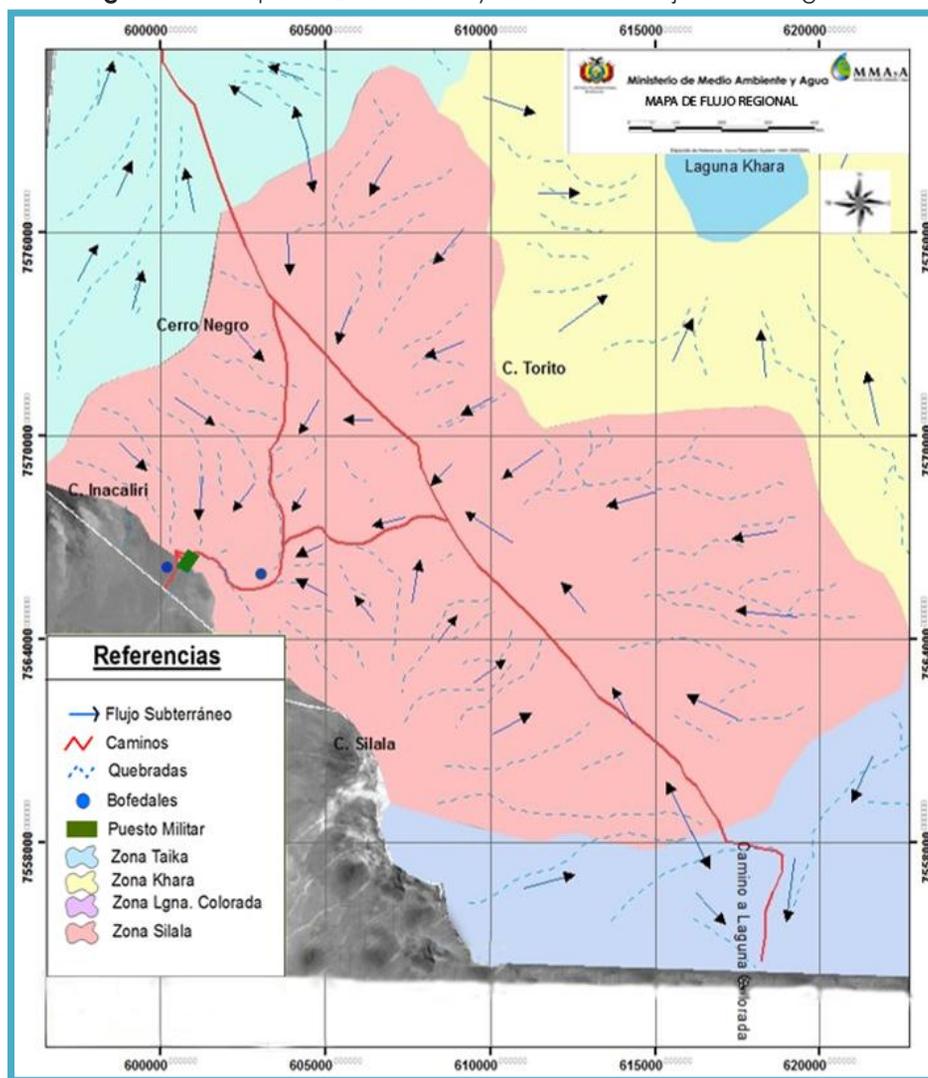
De manera general, los recursos hídricos subterráneos se alojan mayoritariamente en rocas fracturadas, compuestas por ignimbritas, con intercalaciones menores de depósitos no consolidados, originadas durante periodos de poca o nula actividad del volcanismo. Esto ha condicionado una zonificación con flujos de agua superficial y subterránea de carácter regional que se extienden fuera de sus límites.



Estado Plurinacional de Bolivia

MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE Y AGUA

Figura N° 3: Mapa de zonificación y dirección de flujo a nivel regional



Fuente: MMAyA

La región de estudio se ha zonificado en cuatro zonas con sus posibles direcciones de flujo subterráneo, en base a una clasificación Hidrogeológica e hidrológica y geológica de las rocas y depósitos que conforman los perfiles estratigráficos. Los acuíferos están condicionados por la permeabilidad primaria y secundaria de las rocas y capas de poco espesor de material no consolidado, sin embargo, es preponderante la permeabilidad



secundaria del sistema, debida al alto grado de fracturamiento. Se conoce que el basamento no fue detectado con los pozos que se han perforado en el sector de Sol de Mañana (proyecto Geotérmico), así como tampoco con los sondeos geofísicos. Se hace notar, que para realizar el presente trabajo no se logró adquirir resultados de los pozos perforados, motivo por el cual, no se realiza una descripción litoestratigráfica.

En varias zonas se desarrollan salares y lagunas, donde se observan afluentes superficiales, debido a afloramientos de manantiales y vertientes de agua subterránea que alimentan a una diversidad de bofedales.

Sin duda, la figura N° 3 muestra que la problemática del agua en la región gira en torno a la paradoja de la "escasez en medio de la abundancia". La Tabla N° 1, muestra las características superficiales de cada una de las zonas identificadas en los diferentes recorridos realizados por la región.

Tabla N° 1: Características superficiales de las zonas identificadas

ZONA	CARACTERISTICAS	CAUDAL (lt/seg.)	USO ACTUAL DE LAS AGUAS
Taika	No existen bofedales potenciales, pero en el sector donde se encuentra emplazado el Hotel Taika, el Nivel Freático se encuentra a los 30 cm de profundidad, cuya agua es de muy buena calidad.	El pozo perforado (10 mt) en el Taika, aporta 5.	Agua trasladada por bombeo (paneles solares) para consumo y aseo de los visitantes turistas al Hotel Taika.
Khara	En la zona existen glaciares de escombros importantes como el Llankhor, en cuyas faldas existen ojos de agua que fluye a través del valle del Suri. Por otra parte, por el Valle Huanaco también fluye agua.	Valle del Suri = 100. Pampa del Huanaco = 40.	Ambos flujos alimentan con escurrimiento subsuperficial a la laguna Khara, por el flanco este. Se infiltra hacia el subsuelo por material cuaternario en el flanco este de la laguna Khara.
Laguna Colorada	Existen bofedales y ojos de agua, entre los principales aportantes a la laguna Colorada tenemos a los ojos de agua del Sector Mirador al norte, Río Solor al Noreste y Río Huayllajara al Sud este	Mirador = 240. Solor = 25. Huayllajara aguas arriba del embalse = 40.	Los tres flujos de agua alimentan a la Laguna Colorada. Las aguas del Mirador alimentan de manera directa a la Laguna Colorada. Las aguas del Valle de



Estado Plurinacional de Bolivia

MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE Y AGUA

ZONA	CARACTERISTICAS	CAUDAL (lt/seg.)	USO ACTUAL DE LAS AGUAS
		Huayllajara aguas abajo del embalse = 10.	Huayllajara y Solor alimentan con escurrimiento subsuperficial. Sin embargo, un pequeño embalse de agua construido por comunarios de San Pablo de Lipez en el Valle de Huayllajara disminuye el caudal de entrada a la laguna. El agua se utiliza para consumo de un Hotel y la población de Huayllajara.
Silala	El agua fluye superficialmente a partir de la estimulación de bofedales estáticos mediante el excavado de zanjas realizado por trabajadores de la Empresa Antofagasta Railway. Inicialmente en ninguno de los bofedales existían escurrimiento o flujos de agua.	Bofedal Norte Bofedal Sur	El Estado Plurinacional de Bolivia no se beneficia con estas aguas. En cambio, la República de Chile utiliza para el consumo de la población de Calama, Sierra Gorda, Minería en Chuquicamata y otras industrias en diferentes sectores en franca violación de la soberanía boliviana, por la manera en que fueron desviadas.

Fuente: MMAyA

Fotografía N° 2: Flujo de agua en Pampas del Huanaco y Valle del Suri



Fuente: MMAyA



La Recarga de los acuíferos en las diferentes zonas identificadas provienen de diversos factores. Existe alguna recarga proveniente de los llamados glaciares de escombros. Estos son sistemas dinámicos bastante complejos en donde los fragmentos de roca (detrito) se hallan mezclado en diferentes proporciones con hielo y en poca proporción agua. Básicamente constan de un núcleo permanentemente congelado y una capa que sufre descongelamiento estacional o capa activa, aunque localmente su funcionamiento es más complejo (Croce y Milana 2002a). Estos glaciares de escombros, ocupan una superficie muy modesta en la región de los Lipez, se considera probable que reciban alguna recarga, proveniente de la nieve que cae en las cumbres de las montañas. Se supone que al derretirse pueden recargar los acuíferos cercanos. Sin embargo, es poco probable que el derretimiento de la nieve y de los glaciares de escombros aporte con un volumen de agua significativo al escurrimiento que se observa en cada una de las diferentes zonas mencionadas.

Por otra parte, se tiene a los suelos congelados cuya mecánica interna de estos cuerpos no se conoce aún en forma completa. Sin embargo, son numerosos los estudios de la dinámica térmica a la que se encuentran sujetos estas aguas congeladas en la región, lo que ha permitido levantar la hipótesis de que son fuente de recarga al sufrir descongelamiento por el efecto térmico del subsuelo. Por ello, se les denomina reservas sólidas de agua. La figura N° 4 muestra con claridad la existencia de permafrost en las diferentes zonas del sudoeste potosino. Según las imágenes tomadas por los científicos suizos, se puede comprobar que gran parte del sudoeste potosino se encuentran en zona de suelos congelados.

Figura N° 4: Índice de Zonificación Permafrost (PZI) de la región



Fuente: Universidad de Zúrich - Alemania



El Índice de Zonificación Permafrost (PZI) o el correspondiente mapa con código de colores indica, en qué medida existe Permafrost en la región y el área de estudio. Como puede apreciarse en la figura N° 4, las zonas azuladas y púrpuras denotan congelamiento permanente de suelos, las amarillas indican suelos permanentemente congelados en condiciones favorables. Estas condiciones locales que afectan al permafrost, la ocurrencia será en parte exponer las tendencias regionales (por ejemplo, significa que la cubierta de nieve o características continentalidad), varían en parte a través de distancias típicas del orden de varios kilómetros (por ejemplo, lado con sombra o expuesta al sol de una montaña), y en parte a lo largo de decenas cientos de metros (por ejemplo, deriva de la nieve, vegetación, material del suelo). Estas condiciones deben ser evaluadas durante la interpretación, en función de la finalidad de utilizar el mapa PZI. Este producto es probable que sea más valioso en regiones remotas donde existe información fiable.

La recarga por precipitación meteórica fue descartado, debido a que en la región el promedio de lluvia es inferior a los 100 mm/año. Sin embargo, no se descarta alguna interconexión con cuencas colindantes.

Las Descargas en la región se producen a través de tres medios:

Medios loticos; durante la escorrentía superficial, de vertientes, manantiales y bofedales, (Sulor, Aguaditas, Pabellon, Huayllajara, otros), por lo general, alimentan o se escurren hacia cuencas vecinas y depresiones en las que existe evaporación elevada.

Medios lenticos; forman masas de agua casi estáticos, cuya evaporación y sublimación es muy elevada debido a la radiación solar, tenemos a las lagunas y salares (Laguna Kara, Laguna Colorada, Laguna Verde, Laguna Salada, Salar Challviri, otras).

Sectores con napas someras, en la mayoría de estos sectores se forman bofedales (Agüita Brava, bofedales Silala, otros), sus aguas por lo general tienen movimientos lentos y cortos (evaporación), sufren congelamiento (sublimación), por otra parte, la vegetación muy diversa da origen a la evapotranspiración: Los vientos fuertes de la región se encargan de trasladar la humedad atmosférica.

5.2.1.- Unidades hidrogeológicas del área de estudio

La definición de las Unidades Hidrogeológicas para el área de estudio se apoyan en función de las características de las rocas, la historia tectónica de la zona, de su capacidad para almacenar y transmitir agua, es decir, considerando la capacidad que tienen las rocas y depósitos no consolidados de almacenar y transportar el agua subterránea. En todo caso, es importante aclarar que las definiciones no son un sentido estricto, sino relativo a la zona bajo estudio.



Por consiguiente, se han identificado cuatro Unidades Hidrogeológicas denominadas aquí: Acuífero (Formación geológica que almacena agua y permite su movimiento), Acuitardo (Almacena agua y la transmite lentamente), Acuicludo (Almacena agua pero no la transmite), acuífugo (Ni almacena ni transmite). Al realizar descripciones hidrogeológicas, en algunas ocasiones se utiliza el término "impermeable", en la realidad, no existen Formaciones geológicas completamente impermeables. Por lo tanto, es más correcto referirse a los Acuífugos y Acuicludos como formaciones de baja o muy baja permeabilidad en lugar de Formaciones impermeables.

Acuíferos: Identificados en la unidad de ignimbritas diaclasadas y fracturadas, con importancia hidrogeológica media a alta, dependiendo de la porosidad secundaria de las rocas que afloran en el área, se clasifican como acuíferos fisurados, es decir, el agua se encuentra en las fracturas y diaclasas de las ignimbritas. Estas por sus características de alta porosidad secundaria, fracturación y potencia, se constituyen en el principal reservorio de agua subterránea en el área. Es así, que según el estudio geofísico realizado en el SEB-338 (Segunda Unidad Hidrogeológica) a mayor profundidad la ignimbrita presenta una alta densidad de fracturas, a través de las cuales fluye el agua que alimenta al bofedal norte. En este acuífero el nivel de agua es muy variable, pues, cuando existen horizontes o zonas susceptibles de presentar problemas de circulación de agua subterránea, se originan alumbramientos temporales o permanentes a diferentes profundidades. Lo anterior está muy relacionado con una de las cualidades del medio fisurado, que es la predominancia de la conducción de un fluido sobre el almacenamiento. Esta propiedad hidráulica explica la existencia de muchos alumbramientos en el bofedal norte.

Por otra parte, el SEB-377 en todo el perfil muestra abundante presencia de agua en profundidades cercanas a la superficie del terreno y en profundidad, constituyéndose en un acuífero de gran potencial.

Ciertas Unidades Hidrogeológicas de los SEB-381, SEB-242, SEB-115, SEB-259 y SEB-256 muestran acuíferos potenciales aptos para la explotación mediante la construcción de pozos.

Acuitardo: en unidades formadas por depósitos coluviales (Qc) (bloques, clastos, arenas y arcilla), abanico aluvial (Qaa) (clastos y arenas), coluvio-fluvial (Qcf) (bloques, clastos y arenas) y cenizas volcánicas de caída libre del tamaño de las arcillas. Estos depósitos forman en algunos casos suelos congelados temporales o permanentes, por tanto, una unidad confinante para el acuífero con porosidad primaria o secundaria que les infrayacen.

Como se mencionó anteriormente, las características litoestratigráficas del acuitardo constan de una secuencia rítmica de sedimentos bloques-clastos y arenas finas, arcillas que en algunos casos, a bajas profundidades se inter-estratifican con flujos de lava. La



mayor potencia identificada de acuitardo durante el estudio geofísico, alcanza una profundidad de 80.0 metros (ver: estudio geofísico SEB-241, Primera Unidad Hidrogeológica), ubicado en el centro de la laguna Blanca. Los datos geofísicos permiten suponer que esta secuencia se repite a diferentes profundidades.

Por otra parte, este acuitardo se encuentra en contacto con el acuífero del SEB-115, por lo que, se supone que intercambian importantes cantidades de agua.

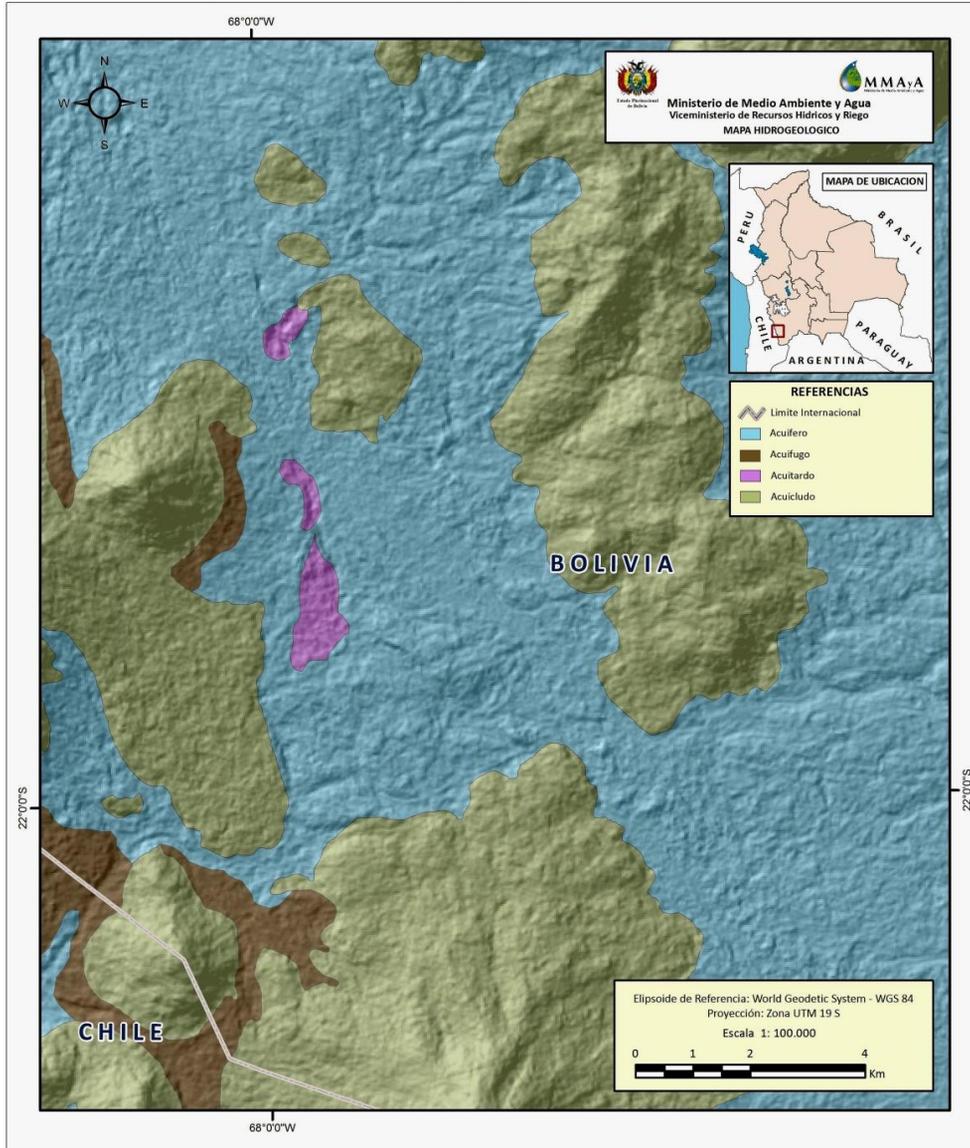
Acuicludo: Considerados como formación geológica de baja permeabilidad; es decir que, en comparación con un acuífero, transmite pocas cantidades de agua, pese a su porosidad, con importancia hidrogeológica baja o nula, constituidas por lavas Miopliocénicas (andesitas-dacitas), presentan permeabilidades bajas a muy bajas (1 mt/día), en situaciones especiales se comportan como acuíferos (no es el caso en la roca del área de estudio).

En esta litología, la ausencia de agua es casi completa, pues el carácter masivo y el escaso fracturamiento de las rocas influyen para que el agua fluya por superficie y en pequeñas fracturas. Por otra parte, la ausencia de vegetación no coadyuva en la existencia de escurrimiento superficial. No obstante, en todas las lavas (andesitas-dacitas) existen diferentes niveles de saturación temporal, que forman las descargas subterráneas, las cuales pueden ser asociadas a escurrimientos hipodérmicos temporales con caudales insignificantes.

El SEB-261 fue realizado sobre una meseta de Lavas recientes, cubierto por depósitos no consolidados Pleistocénicos. En el Perfil la Segunda Unidad Hidrogeológica se convierte en un ejemplo de este tipo de Formaciones geológicas.



Figura N° 5: Mapa Hidrogeológico del área de estudio



Fuente: MMAyA

En el SEB-238 la Segunda Unidad Hidrogeológica en su parte central, el acuícludo (lavas) cubre como techo al acuífero (ignimbrita) ubicado en las progresivas 80.0 hasta 140.0 (Tercera Unidad Hidrogeológica) originando condiciones hidráulicas confinadas.



Se puede decir que este tipo de formación geológica o roca aporta una mínima parte de la recarga para el agua subterránea del bofedal sur (ver estudio geofísico: SEB-106 Segunda Unidad Hidrogeológica y SEB-378 Segunda Unidad Hidrogeológica).

Acuífugos: son formaciones impermeables que no almacenan ni transmiten el agua. En el área de estudio la unidad de ignimbritas, tiene una porosidad y permeabilidad variable, ya que existen sectores con una porosidad aparente alta.

Por lo estudios geológicos, geofísicos e hidrogeológicos realizados en el área, existen dos condiciones que generan la porosidad. Dentro de los bloques de forma columnar el nivel de soldadura es tan alto que no permite el paso efectivo del agua (porosidad primaria) y las fracturas entre las columnas proporcionan vías para el flujo del agua (porosidad secundaria).

Por tal motivo, las ignimbritas con porosidad primaria no propician un almacenamiento ni flujo efectivo de agua. Por lo tanto, este tipo de ignimbritas es considerado como un acuífugo.

Como ejemplo de este tipo de formación geológica, se menciona a la Segunda Unidad Hidrogeológica del SEB-235 y del SEB-236.

5.3.- Características hidrogeológicas del área de estudio

El propósito del estudio hidrogeológico, es determinar los parámetros que se requieren para establecer una clasificación de acuerdo a los antecedentes disponibles, que han sido revisados y sintetizados exponiendo los resultados más relevantes en relación a los acuíferos existentes. Previamente se han realizado estudios geológicos, geofísicos e hidrológicos, que permiten tener un cierto conocimiento de las características geológicas del subsuelo y de los suelos congelados superficiales y subterráneos.

Según el Mapa Hidrogeológico de Bolivia (SERGEOTECMIN. año 2011) Esc: 1:2000.000, desde un punto de vista Geológico, Geomorfológico, Hidrogeológico y Climático, el Valle de Silala, se engloba dentro la Cordillera Occidental y el área de ignimbritas del Río Grande de Lipez (IRG), con una Capacidad Específica igual a 250 lt/seg, y Sólidos Disueltos Totales (SDT) igual a 50 mg/lt.

Por su parte, Chaffaut (1998), manifiesta que en las ignimbritas y riolitas del área son comunes las permeabilidades del orden de 1 a 10 m²/día. En cambio, ciertas ignimbritas y piroclastos no solidificados alcanzan los 100 m²/día, clasificándose como Formaciones (Fm) de alta permeabilidad.

La diferencia de los datos, se debe a que muchos de los depósitos de ignimbritas se encuentran fuertemente fracturados y diaclasados. Por otra parte, dentro de los bloques de forma columnar el nivel de soldadura es alto que no permite el paso efectivo del agua.



Por su parte las fracturas entre las columnas proporcionan vías para el tránsito expedito del agua, por otra parte, las condiciones de confinamiento y orientación de las fracturas también propician un almacenamiento efectivo.

Entre otras características hidrogeológicas de las ignimbritas que menciona Chaffaut, se refiere a la porosidad, que varía entre 15 y 30% y los no solidificados, más recientes, alcanzan porosidades muy altas de hasta 80%. En cuanto a la datación de las aguas, empleando isótopos, le asigna una edad entre 940 y 2800 años, dependiendo de si la actividad inicial A_0 es de 80 o 100%.

En estudios realizados por La Prefectura del departamento de Potosí (2006) se indica de una forma no muy clara y precisa que se han podido detectar zonas donde el acuífero funciona como acuífero libre y en otras zonas que funciona como confinada, y que en ambos casos es posible que los acuíferos tengan aportes de las ignimbritas fracturadas y diaclasadas. No mencionan nada sobre el origen del agua.

Los estudios realizados por la Universidad de Zúrich (2008), manifiestan la probable existencia de suelos congelados (permafrost) en toda el área (Figura N° 4).

En los diferentes reconocimientos y estudios geofísicos efectuados en el área, se han observado dos tipos principales de suelos congelados: en las que la pendiente es escasa y el otro tipo son los suelos congelados con pendiente.

Por lo que, la fuente principal de escorrentía subterránea de agua es el deshielo de los suelos congelados gota a gota debido al efecto térmico del subsuelo ante la casi nula ocurrencia de precipitación en el área. Es decir, los suelos congelados ejercen una influencia directa en la hidrogeología del área.

Jorge Molina C. en el estudio Agua y Recurso Hídrico en el Sudoeste de Potosí (2007), manifiesta; existe la posibilidad que exista alguna recarga proveniente de los llamados "glaciares de escombros".

Estos, son pequeños depósitos de hielo mezclados con rocas que se encuentran en depresiones situadas en montañas altas, donde el agua de deshielo recorre a través de fracturas, grietas y otras aberturas para finalmente alcanzar los reservorios de agua.

Existen numerosas características adicionales, las cuales pueden ser consultadas en textos dedicados al tema. Dado que nuestro interés se centra en las condiciones de estructura del acuífero, del volumen contenido de agua, de su calidad y acopio a sectores con problemas de sequía, nos referiremos más a las características internas de estos cuerpos, utilizando métodos indirectos (geofísicos). Nótese que la mejor forma de conocer estas características es mediante la ejecución de perforaciones, pero estas presentan la desventaja de ser puntuales. Sin embargo, es prioridad es la construcción de pozos.



Estado Plurinacional de Bolivia



5.3.1.- Aforos y Caudales

Los aforos realizados en los bofedales ubicados en el Valle de Silala fueron realizados por diversas instituciones o profesionales independientes. Cabe aclarar que las condiciones y equipos de aforo utilizados fueron distintos, así, SENAMHI utilizó un Molinete para realizar aforos por abadeo. Actualmente, tiene instalado un Vertedero en V (triangular) para realizar las mediciones de los caudales.

En los datos que se muestran en la Tabla N° 2, se ha visto conveniente separar las muestras según correspondan al bofedal sur, bofedal norte y canal principal (confluencia de las dos anteriores). Los primeros corresponden exclusivamente a aquellas muestras de agua obtenidas en el punto exacto donde se inicia la escorrentía hacia cotas inferiores. Las segundas corresponden a la escorrentía y unión de varios flujos lentos en el bofedal incluyendo pozos piezométricos perforados por los chilenos. La tercera es la confluencia de las dos anteriores, que directamente desemboca mediante un canal artificial en la República de Chile.

Tabla N° 2: Caudales medidos en fechas diferentes

MEDICIONES DE CAUDAL (lt/sg)					
INSTITUCION	FECHA	CANAL N	CANAL S	CONFLUENCIA CANALES	FRONTERA
HAROLD BLAKEMORE	1913	-	-	-	76.0
SENAMHI	01/06/96			155.0	88.5
SENAMHI	02/06/96	46.1	109.0		
PREFECTURA POTOSI	06/11/97	-	-	164.4	-
SENAMHI	10/06/98	55.4	132.0	191.0	-
SNHM	11/04/99	109.8	170.2	279.7	
SUPERINTENDENCIA DE SANEAMIENTO BASICO	12/06/99	-	-	270.0	-
SENAMHI	24/10/99	-	-	195.0	-
SENAMHI	/07/00	38.0	82.0	120.0	-
SENAMHI	09/00	40.0	110.0	164.0	-
SENAMHI	10/00	43.0	176.0	219.0	-
SENAMHI	11/00	47.0	91.0	153.0	-
SERGEOTECMIN	18/12/00	60.0	143.0	210.0	-
SENAMHI	06/01/02	-	-	159.0	151.0
SNHN	17/12/04	58.6	141.8	202.6	-
SNHN	24/04/08	70.5	175.5	239.2	-
SENAMHI	25/11/08	49.7	106.0	-	-



Estado Plurinacional de Bolivia

MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE Y AGUA

MEDICIONES DE CAUDAL (lt/sg)					
INSTITUCION	FECHA	CANAL N	CANAL S	CONFLUENCIA CANALES	FRONTERA
SENAMHI	26/11/08	-	-	173.8	168.2
SENAMHI	04/12/08	50.7	101.7	133.3	126.2
SENAMHI	05/12/08	49.1	104.5	134.1	122.8
SENAMHI	06/12/08	45.5	108.4	114.2	114.7
SENAMHI	15/01/09	55.6	129.4	179.3	175.0
SENAMHI	16/01/09	57.4	137.2	196.2	138.0
SENAMHI	09/06/13	67.1	118/4	148.7	-
SENAMHI	11/06/13	46.0	126.4	138.6	-

Fuente: Diferentes instituciones

En la actualidad, el flujo de descarga promedio de los "Bofedales del Valle de Silala" que sale del territorio boliviano y que se dirige hacia la República de Chile, es de 193.90 l/seg., siendo el promedio de los caudales medidos por varias instituciones, la siguiente grafica muestra el Historial de Caudales:

Figura N° 6: Fechas y Aforos de Caudales



Fuente: Consultoría: Diagnóstico y Análisis de los Recursos Hídricos Superficiales y Subterráneos en la Provincia Sud Lípez del Departamento de Potosí (Russo - 2013).

5.3.2.- Diagrama de Dispersión y Ajuste de Tendencia Lineal

Con los caudales mostrados en la Tabla N° 2, se elaboró un Diagrama de Dispersión relacionando los caudales medidos en invierno vs caudales medidos en otras estaciones:

La media para el caudal de la estación de invierno de los años 1997 al 2013, en color rojo en el gráfico es 170,55 lt/seg, y la desviación típica 54,04 se ajusta a una línea de tendencia $y = -10,25x + 206,4$ cuya pendiente negativa permite predecir el comportamiento del caudal en invierno para los venideros años, mostrándonos un descenso significativo



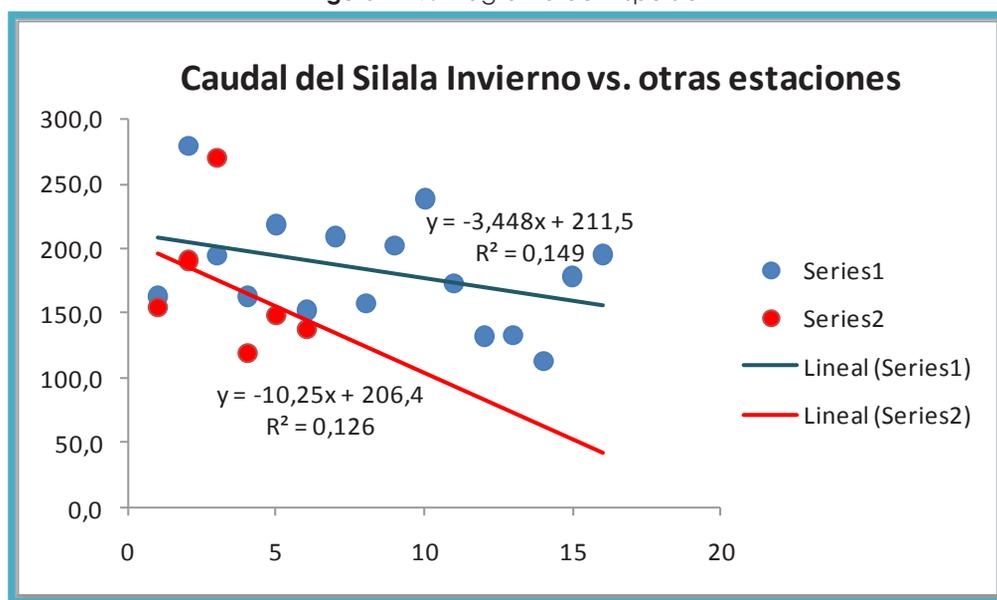
Estado Plurinacional de Bolivia

MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE Y AGUA

caudal de invierno es menor al de las otras estaciones; para las otras estaciones, en el gráfico en color azul, aumenta a un promedio de 182,3 lt/seg, con una desviación típica 42,5, como se puede apreciar, existe menor variabilidad respecto a los datos de invierno y también la línea de tendencia tiene pendiente negativa, lo que significa que el caudal disminuirá los próximos años, pero en menor proporción respecto a invierno.

En la actualidad, SENAMHI viene tomando datos de caudales y temperaturas en forma continua, por lo que hace importante realizar un nuevo análisis al respecto.

Figura N° 7: Diagrama de Dispersión



Fuente: MMAyA

5.3.3.- Análisis de las recargas

Para conocer los procesos de recarga en la región de San Pablo de Lipez, es fundamental evaluar la forma en que las reservas hídricas se formaron y se distribuyen en toda la región. Para lo cual, los científicos intentan explicar mediante dos teorías, denominadas Hipótesis Fría y Húmeda. Sin embargo, la gran mayoría de los investigadores coinciden en que al final del Pleistoceno, alrededor de 13500 años AP, se produjo un periodo húmedo menos frío, que coincidió con el máximo nivel (3760 m) del lago Tauca y con el máximo avance de los glaciares andinos. La mayor precipitación y la existencia de grandes lagos al final de la fase Tauca significa que muy probablemente hubo una muy importante recarga de los acuíferos del Altiplano en esa época. A ese periodo húmedo siguió uno seco (se



estima precipitaciones 40% inferiores a las actuales) y cálido, entre 10,500 y 7,000 años AP, que produjo una gran reducción de la superficie y volumen de los lagos andinos. Esta hipótesis fue validada por Chaffaut (1998) empleando isótopos para estudiar la antigüedad de las aguas.

En los diferentes reconocimientos geofísicos (tomografía eléctrica) efectuados en el sector del Valle de Silala (2013) se identificaron suelos congelados en baja y alta y profundidad. Los primeros caracterizan los fondos de los valles en donde la pendiente es escasa, caso bofedal sur: ver Estudio Geofísico: SEB-111 (Primera Unidad Hidrogeológica) y sectores planos: ver Estudio geofísico: SEB-384 (Primera Unidad Hidrogeológica).

La característica más evidente de estos, ligados a congelamiento y descongelamiento estacional, es la existencia de agrietamientos por contracción térmica, generando líneas de flujo que luego suelen ser utilizadas por el agua de fusión del suelo congelado. La existencia de estos suelos sugiere que debe existir esporádicas capas de permafrost en profundidad dadas las condiciones térmicas reinantes, lo que ha permitido levantar la hipótesis de que son fuente de recarga al sufrir descongelamiento lento por efectos de la onda térmica estacional, la cual es responsable del descongelamiento anual de los suelos congelados y por efecto del flujo geotérmico local que produce un lento derretimiento (gota a gota) en la base de los suelos congelados.

Fotografía N° 3: Indicios superficiales de la existencia de aguas congeladas



Fuente: MMAyA

Desde el punto de vista geológico, la existencia de ignimbritas a lo largo de toda la cordillera Occidental y en particular en el Valle de Silala, indica una continuidad hidrogeológica. Por tanto, es probable de que algunos de esos depósitos estén interconectados. Es decir, que la cuenca hidrogeológica no coincida con la cuenca topográfica (superficial) y que haya flujo de agua subterránea de una cuenca a otra. Sin



embargo, las diferentes mediciones de temperatura y conductividad de las aguas, tanto en el bofedal sur y norte descartan la posibilidad de recibir recarga proveniente del Altiplano boliviano (ver Tabla N° 3).

Por otra parte, existe alguna recarga proveniente de los llamados "Glaciares de Escombros" identificado en el estudio geofísico con el SEB-237, en el cerro Inacaliri (Segunda Unidad Hidrogeológica). Estos son pequeños depósitos de hielo mezclados con rocas que se encuentran en depresiones situadas en montañas altas. Si bien, la mayor parte parece haberse formado entre 4000 y 3000 años atrás, se considera probable que reciban alguna "recarga" actualmente, proveniente de la nieve que cae en las cumbres de las montañas, donde llueve más que en el Altiplano circundante (Francou et al, 1999). Se supone que al derretirse pueden recargar en mínimas cantidades los acuíferos.

Otra recarga de menor importancia corresponde a los aportes de la precipitación, que en promedio, baja un poco más de 100 mm/año, además, es muy variable de un año a otro: hay años en que ha superado los 250 mm, mientras que en otros está por debajo de 50 mm. En cualquier de los casos, la recarga neta al acuífero es casi nula, debido a pérdidas por evaporación y sublimación.

Por otra parte, existe la hipótesis de que las aguas del Valle de Silala son producto de los procesos magmáticos ocurridos en el lugar. Esta afirmación, no cuenta con una base científica, ya que las aguas de los Bofedales del Valle de Silala, tienen temperaturas bajas y el contenido de sulfatos (Prefectura de Potosí, 7.0 mg/lit. Agosto, 2009, Chaffaut: Bofedal sur 6.2 mg/lit y bofedal norte 5.3 mg/lit. Septiembre, 1994 y CIMA-JICA: 6.9, 7.0 y 6.4 mg/lit. Mayo, 2008) y otros, se encuentran dentro los límites permisibles.

Por último, es importante indicar que el agua de deshielo (hace 10,000 años BP o más) fue también la carga principal de las actuales aguas subterráneas alojadas en las rocas ignimbríticas Miocénicas dando lugar a la formación de un acuífero que podría ser confinado o no, que ahora alumbraba en los bofedales del Valle de Silala.

5.3.4.- Análisis de las descargas

En la actualidad, la descarga en los bofedales norte y sur se produce en la forma de escurrimiento superficial, sublimación, así como por evaporación desde los canales empedrados construidos para encauzar las aguas que alumbraban en los bofedales.

En el bofedal sur, el agua que alumbraba es a través de material no consolidado (tubificación) y en muy baja proporción a través porosidad secundaria, sin ninguna capacidad de saturar en forma areal el bofedal.

En el Bofedal norte alumbran aguas de distintos niveles acuíferos, es posible observar descargas a través de las diaclasas y fisuras de las rocas ignimbríticas a lo largo de zonas de fallamiento y desde material no consolidado, con un proceso de funcionamiento



superficial original: alumbrar, formar flujos muy lentos y cortos, evaporarse, congelarse, sublimarse y arrastre de vapores de agua por la fuerza del viento hacia las partes altas.

Fotografía N° 4: Diferentes flujos, según la litología



Fuente: MMAyA

Otra forma de descarga del agua subterránea es por evaporación cuando la superficie freática o los suelos congelados están muy cerca de la superficie del terreno como para que existan ascensos por capilaridad. También la vegetación de los bofedales puede transpirar agua subterránea de la zona capilar o la zona saturada. Por último, existe sublimación del agua congelada y la precipitación sólida.

5.3.5.- Calidad del agua

La base de datos sobre la calidad del agua recopilada, se ha construido con datos generados en proyectos de entidades públicas, aquellos cedidos por parte de la empresa privada y profesionales independientes y finalmente complementados con nuevas muestras en el marco del presente estudio.

Las muestras tomadas en los bofedales del Silala, por su pureza y bajísimo contenido de sales, están consideradas de muy alta calidad físico-química.

Según el Servicio Nacional de Geología y Minería (2000) por los parámetros físicos de las aguas, pareciese que existirían dos niveles de acuíferos ignimbríticos. Uno superior que forma el bofedal del Sur u Oriental con afloramientos a los 4450 msnm con una conductividad promedio de 257 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y mayor contenido de Ca, Li y SO_4 . El segundo nivel acuífero inferior, aflora a los 4400 msnm y tiene una conductividad promedio de 109 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y mayor contenido de Na. Este nivel es el que aflora en el bofedal Norte.



Estado Plurinacional de Bolivia

MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE Y AGUA

Estos valores corresponden a aguas de baja mineralización de acuerdo a las Normas y Estándares Bolivianos del Ministerio de Medio Ambiente y Agua, las cuales están vigentes en nuestro país desde 1997.

Tabla N° 3: Datos de análisis físico-químico realizado en distintas fechas

ANÁLISIS QMC IN SITU												
MUESTRAS	INSTITUCION	SITIO	COORDENADAS			FECHA	TEMP (°)	PH	COND (s/m)	TURB.(NYU)	SALINIDAD	PROCEDENCIA
			ESTE	NORTE								
	PREFECTURA FOTOSÍ	CANAL PRINCIPAL	-----	-----		12/08/2009	-	8.23				S/ESPECIFICAR
SIL003	CIMA-JICA	BOFEDAL S	-----	-----		5/09/2008	14.60	8.13	0.02	0.00	0.10	CUATERNARIO
SIL002	CIMA-JICA	BOFEDAL S	-----	-----		5/09/2008	16.00	8.09	0.02	----	----	CUATERNARIO
SIL001	CIMA-JICA	BOFEDAL N	-----	-----		5/09/2008	15.10	8.56	0.01	----	----	CUATERNARIO
-----	SERGIOMIN	BOFEDAL S	600890	7566300		1/06/2000	12.50	----	218.00	----	----	S/ESPECIFICAR
-----	SERGIOMIN	BOFEDAL N	600863	7566310		1/06/2000	14.60	----	120.00	----	----	IGNIMBRITA
M-1	SERGIOMIN	BOFEDAL N	601105	7566790		5/26/00	13.00	7.86	94.00	----	----	CUATERNARIO
M-2	SERGIOMIN	BOFEDAL N	601075	7566700		5/26/00	15.40	8.15	121.00	----	----	CUATERNARIO
M-3	SERGIOMIN	BOFEDAL N	601043	7566740		5/26/00	15.90	8.28	127.00	----	----	CUATERNARIO
M-4	SERGIOMIN	BOFEDAL N	601010	7566735		5/26/00	16.10	8.59	124.00	----	----	CUATERNARIO
M-5	SERGIOMIN	BOFEDAL N	600950	7566755		5/26/00	16.00	8.45	122.00	----	----	CUATERNARIO
M-6	SERGIOMIN	BOFEDAL N	601060	7566640		5/26/00	15.90	8.12	125.00	----	----	IGNIMBRITA
M-7	SERGIOMIN	BOFEDAL N	600920	7566780		5/26/00	15.00	8.11	107.00	----	----	CUATERNARIO
M-8	SERGIOMIN	BOFEDAL N	600900	7566710		5/26/00	16.00	7.87	118.00	----	----	CUATERNARIO
M-9	SERGIOMIN	BOFEDAL N	600840	7566650		5/26/00	16.10	8.16	124.00	----	----	CUATERNARIO
M-10	SERGIOMIN	BOFEDAL N	600830	7566640		5/26/00	16.20	8.05	126.00	----	----	IGNIMBRITA
M-11	SERGIOMIN	BOFEDAL N	600875	7566675		5/26/00	16.50	7.97	111.00	----	----	IGNIMBRITA
M-12	SERGIOMIN	BOFEDAL N	600885	7566670		5/26/00	16.80	7.25	102.00	----	----	CUATERNARIO
M-13	SERGIOMIN	BOFEDAL N	600865	7566665		5/26/00	17.50	7.02	95.00	----	----	CUATERNARIO
M-14	SERGIOMIN	BOFEDAL N	600900	7566550		5/26/00	15.40	8.30	116.00	----	----	CUATERNARIO
V-1	SERGIOMIN	BOFEDAL S	601050	7566460		5/27/00	15.80	8.23	129.00	----	----	IGNIMBRITA
V-2	SERGIOMIN	BOFEDAL S	601055	7566462		5/27/00	15.50	8.39	130.00	----	----	IGNIMBRITA
V-3	SERGIOMIN	BOFEDAL S	601057	7566463		5/27/00	15.50	8.00	130.00	----	----	IGNIMBRITA
V-4	SERGIOMIN	BOFEDAL S	601100	7566500		5/27/00	15.70	8.35	128.00	----	----	IGNIMBRITA
V-5	SERGIOMIN	BOFEDAL S	601105	7566504		5/27/00	15.60	8.34	126.00	----	----	IGNIMBRITA
V-6	SERGIOMIN	BOFEDAL N	601140	7566730		5/27/00	14.90	8.50	145.00	----	----	IGNIMBRITA
V-7	SERGIOMIN	BOFEDAL N	601145	7566733		5/27/00	14.90	8.50	145.00	----	----	IGNIMBRITA
V-8	SERGIOMIN	BOFEDAL S	601185	7566570		5/27/00	14.60	8.23	167.00	----	----	IGNIMBRITA
V-9	SERGIOMIN	BOFEDAL S	601190	7566570		5/27/00	15.00	8.20	167.00	----	----	IGNIMBRITA
V-10	SERGIOMIN	BOFEDAL S	602900	7566187		5/29/00	13.70	S.D.	260.00	----	----	CUATERNARIO
V-11	SERGIOMIN	BOFEDAL S	602900	7566188		5/29/00	15.70	S.D.	255.00	----	----	CUATERNARIO
V-12	SERGIOMIN	BOFEDAL S	602900	7566189		5/29/00	16.00	S.D.	253.00	----	----	CUATERNARIO
V-13	SERGIOMIN	BOFEDAL S	602875	7566200		5/29/00	15.90	S.D.	251.00	----	----	CUATERNARIO
V-14	SERGIOMIN	BOFEDAL S	602874	7566200		5/29/00	15.40	S.D.	250.00	----	----	CUATERNARIO
V-15	SERGIOMIN	BOFEDAL S	602823	7566200		5/29/00	15.70	S.D.	240.00	----	----	CUATERNARIO
V-16	SERGIOMIN	BOFEDAL S	602822	7566200		5/29/00	15.70	S.D.	237.00	----	----	CUATERNARIO
V-17	SERGIOMIN	BOFEDAL S	602800	7566215		5/29/00	15.20	S.D.	248.00	----	----	CUATERNARIO
V-18	SERGIOMIN	BOFEDAL S	602800	7566225		5/29/00	14.20	S.D.	258.00	----	----	CUATERNARIO
V-19	SERGIOMIN	BOFEDAL S	602820	7566250		5/29/00	15.30	S.D.	230.00	----	----	CUATERNARIO
V-20	SERGIOMIN	BOFEDAL S	602815	7566249		5/29/00	15.10	S.D.	230.00	----	----	CUATERNARIO
V-21	SERGIOMIN	BOFEDAL S	602805	7566251		5/29/00	14.10	S.D.	225.00	----	----	CUATERNARIO
V-22	SERGIOMIN	BOFEDAL S	602790	7566254		5/29/00	12.10	S.D.	218.00	----	----	CUATERNARIO
V-23	SERGIOMIN	BOFEDAL S	602710	7566130		5/29/00	7.10	S.D.	350.00	----	----	CUATERNARIO
V-24	SERGIOMIN	BOFEDAL S	602695	7566129		5/29/00	5.00	S.D.	370.00	----	----	CUATERNARIO



ANÁLISIS QMC IN SITU											
MUESTRAS	INSTITUCION	SITIO	COORDENADAS		FECHA	TEMP (°)	PH	COND (s/m)	TURB.(NYU)	SALINIDAD	PROCEDENCIA
			ESTE	NORTE							
V-25	SERGIOMIN	BOFEDAL S	602673	7566127	5/29/00	16.00	S.D.	412.00	----	----	CUATERNARIO
V-26	SERGIOMIN	BOFEDAL S	602595	7566180	5/29/00	14.80	S.D.	278.00	----	----	CUATERNARIO
V-27	SERGIOMIN	BOFEDAL S	602000	7566470	5/29/00	13.80	S.D.	357.00	----	----	CUATERNARIO
V-28	SERGIOMIN	BOFEDAL S	601975	7566450	5/29/00	14.00	S.D.	370.00	----	----	CUATERNARIO
V-29	SERGIOMIN	BOFEDAL S	601974	7566450	5/29/00	13.80	S.D.	365.00	----	----	CUATERNARIO
V-30	SERGIOMIN	BOFEDAL S	601930	7566495	5/29/00	14.00	S.D.	364.00	----	----	CUATERNARIO
S17	CHAFFAUT	BOFEDAL S	68°01'26"	22°00'30"	15/07/1994	14.9	8.2	154.00	----	----	S/ESPECIFICAR
S18	CHAFFAUT	BOFEDAL N	68°01'24"	22°00'17"	15/07/1994	16.7	8.6	112	----	----	S/ESPECIFICAR
S47	CHAFFAUT	BOFEDAL N	68°01'16"	22°00'13"	21/12/1994	15.9	7.3	85	----	----	----

Fuente: Diferentes instituciones

6.- ESTUDIO DE BOFEDALES

Es de vital importancia que toda evaluación del estado actual de los bofedales asociados a aguas subterráneas incluya también la evaluación de los impactos, separados y combinados del mecanismo de transferencia y el alumbramiento de aguas subterráneas.

Es igualmente importante estudiar cómo los cambios antrópicos en la cubierta superficial (en nuestro caso material no consolidado) y las características de las rocas pueden afectar el mecanismo de transferencia hacia el bofedal y su alumbramiento.

6.1.- Introducción

El Estado Plurinacional de Bolivia cuenta con aproximadamente 260 humedales. En el Diagnóstico de la Biodiversidad (MDSP, 2001). La incorporación de Bolivia a la Convención de los Humedales de Importancia Internacional (Ramsar 1971) tuvo su primer intento en 1987, pero no fue hasta 1990, con la entrega de la ficha informativa de la Laguna Colorada, que se pudo inscribir a Bolivia como Parte Contratante de la Convención.

El secretario general de la convención Ramsar (Ecosistemas de humedales de importancia internacional), Christopher Briggs, indicó que el reconocimiento a Bolivia es muy importante por ser el primer país en el mundo que tiene la mayor cantidad de sitios Ramsar, donde se encuentran ubicados la mayor cantidad de sistemas de vida, ya que cuenta con aproximadamente 14.842,405 ha (148.424,05 km²), que representa el 13,51 % de territorio nacional con importancia mundial.



Estado Plurinacional de Bolivia

MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE Y AGUA

Tabla N° 4: Sitios Ramsar en Bolivia (2014)

SITIO	FECHA DE DESIGNACIÓN	UBICACIÓN (DEPARTAMENTO)	ÁREA (Ha)	COORDENADAS
Los Lipez	27/06/90	Potosí	1,427,717	22°10'S 067°24'W
Lago Titicaca (Sector Boliviano)	26/08/98	La Paz	800,000	16°10'S 068°52'W
Cuenca de Tajzara	13/06/00	Tarija	5,500	21°47'S 065°06'W
Bañados del Izozog y el río Parapetí	17/09/01	Santa Cruz	615,882	18°27'S 061°49'W
Palmar de las Islas y las Salinas San José	17/09/01	Santa Cruz	856,754	19°15'S 061°00'W
Pantanal Boliviano	17/09/01	Santa Cruz	3,189,888	18°00'S 058°30'W
Laguna Concepción	06/05/02	Santa Cruz	31,124	17°31'S 061°24'W
Lagos Poopó y Uru Uru	11/07/02	Oruro	967,607	18°46'S 067°07'W
Río Blanco	02/02/13	Beni	2,404,916	13°37'59''S 063°23'35''W
Río Matos	02/02/13	Beni	1,729,788	14°48'54''S 066°12'00''W
Río Yata	02/02/13	Beni	2,813,229	12°18'32''S 066°06'11''W

Fuente: The Wisconsin Wetlands Association (WWA)

Por otra parte, luego de más de diez años, el Honorable Congreso Nacional, mediante Ley N° 2357 de 2002, en artículo único aprueba la Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional como Hábitat de Aves Acuáticas, Ramsar 1971. Siendo esta Ley, la única que regula de manera concreta a los Humedales o Sitios Ramsar bolivianos.

Los bofedales son áreas de transición entre ecosistemas acuáticos o terrestres. En términos de arreglo espacial, son de transición, porque usualmente son encontrados entre tierras altas y sistemas acuáticos subterráneos y también debido a la cantidad de agua que almacenan y procesan (Mitsch et al, 1993), juegan un papel primordial en la región altiplánica del país.

Estos ecosistemas ofrecen y almacenan agua permitiendo el desarrollo de una diversidad vegetal en ambientes donde las condiciones climáticas no son favorables, haciendo de los bofedales hábitat y fuente alimenticia de diferentes especies, son centros de endemismo, espacios para actividades turísticas y ámbitos de vida para comunidades locales, por lo que, la Convención Ramsar, reconoce a estos bofedales como ecosistemas estratégicos.



El gran potencial que ofrecen los bofedales se ven afectados por un indebido uso y manejo del agua o carencia del mismo, observándose zonas considerables que inician un proceso de degradación con una disminución en su extensión y un aumento de áreas secas y áridas donde se hace imposible cualquier actividad productiva, además las poblaciones de fauna son desplazadas de su hábitat, las mismas que en el lapso de búsqueda de nuevas áreas de refugio, ven amenazada su vida y de sus generaciones.

Entre los principales factores que influyen el mal uso, manejo y deterioro, se encuentra la acción antrópica, donde el hombre ocasiona cambios drásticos y altera la interacción dentro de estos ecosistemas. Otro factor que facilita la pérdida de biomasa y deterioro ecológico de los bofedales es la sobrecarga animal en determinados sectores por falta de un manejo adecuado y sostenido.

6.2.- Identificación, cuantificación y caracterización de los bofedales en el área

En los dos bofedales estudiados, las medidas realizadas al respecto han sido efectuadas por estudios geofísicos, realizados sobre los bofedales y en las inmediaciones de cada uno, debido a que no existe una infraestructura diseñada específicamente para obtener datos piezométricos.

Pese a las limitaciones, a lo largo del estudio se ha tratado de subsanar esta carencia de información básica sobre las relaciones hidrogeológicas entre las masas de agua superficial y subterránea mediante datos indirectos: resistividad, hidroquímicos, morfológicos y litológicos.

Los bofedales ubicados en el Valle de Silala están hidrogeológicamente interconectados a masas adyacentes de aguas subterráneas, aunque este grado de interacción varía de un bofedal a otro. Dicho de otro modo, ambos bofedales (norte y sur) son completamente dependientes del mecanismo de transferencia de agua y del tipo de alumbramiento de las aguas subterráneas en cualquier condición climática.

En los sectores que no fueron canalizados se observa que los alumbramientos naturales de descarga son muy lentos, forman flujos cortos de agua limpia en distintas direcciones, de esta manera van saturando el suelo, evitando su degradación. Este tipo de vínculo entre aguas subterráneas y bofedal, hace que estos ecosistemas frágiles en el Valle de Silala estén clasificados como "bofedales estáticos".

En cambio en los sectores donde el agua ha sido encauzado mediante canales abiertos hacia un canal recolectores revestidos de piedra, se observa que los alumbramientos de descarga son rápidos, drenan en una sola dirección por el canal construido, sin saturar a los suelos adyacentes, originando degradación de estos suelos.

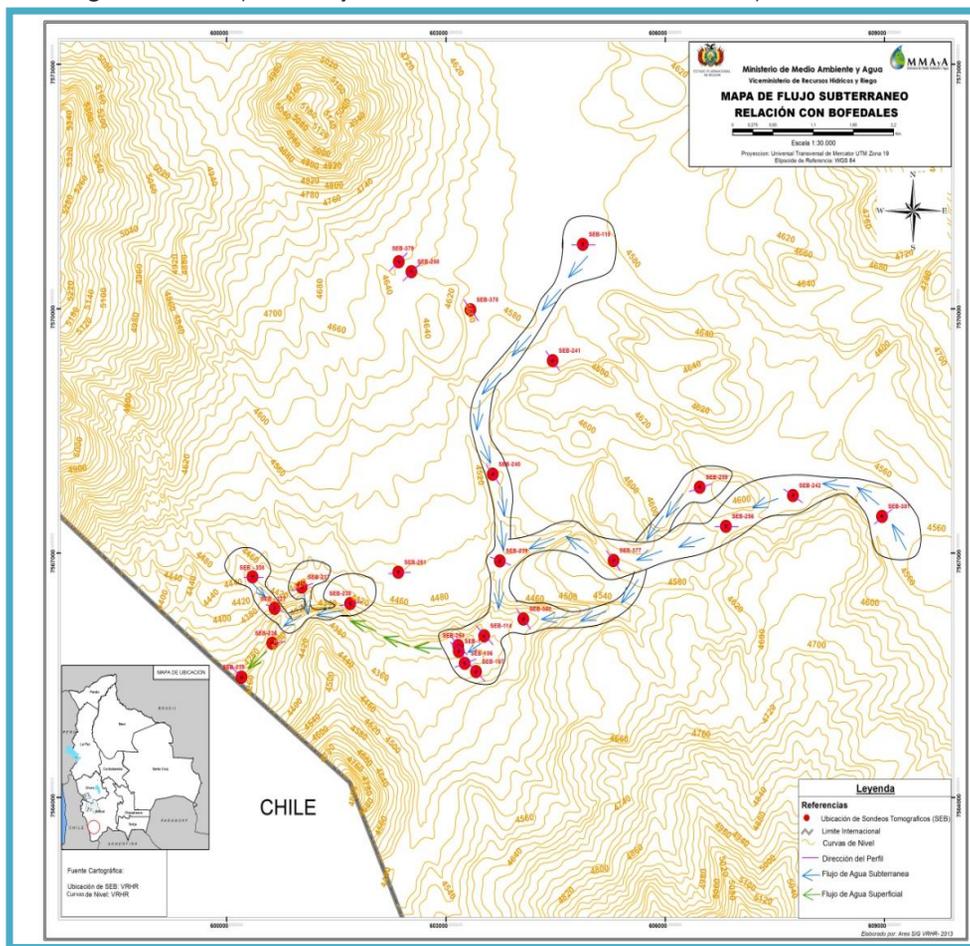
Esta intervención antrópica, dio origen a la degradación de suelos y de los ecosistemas, debido a que los suelos pasaron de un estado de alto contenido de materia orgánica, hacia un estado de bajo contenido de materia orgánica, siendo este proceso unidireccional e irreversible (específicamente en el bofedal sur).



Estado Plurinacional de Bolivia

MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE Y AGUA

Figura N° 8: Mapa de flujos subterráneos: relación de los SEB y los bofedales



Fuente: MMAyA

El inventario de fuentes de agua subterráneas y bofedales realizado por el Servicio Nacional de Geología y Minería el año 2000, verificó por lo menos 70.0 alumbramientos de agua, concentrados geográficamente en cuatro zonas, por otra parte, la superficie total de los bofedales alcanzaba a 108,700 mt². A la fecha este último dato, presentan alguna variación, producto del encauzamiento del agua mediante un canal de mampostería.

6.2.1.- Bofedales Sector Norte

En la quebrada norte afloran rocas ignimbríticas siguiendo un rumbo de N - S, en algunos sectores cubiertos por flujos de lava de los estratovolcanes procedentes del cerro Inacaliri,



Estado Plurinacional de Bolivia

MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE Y AGUA

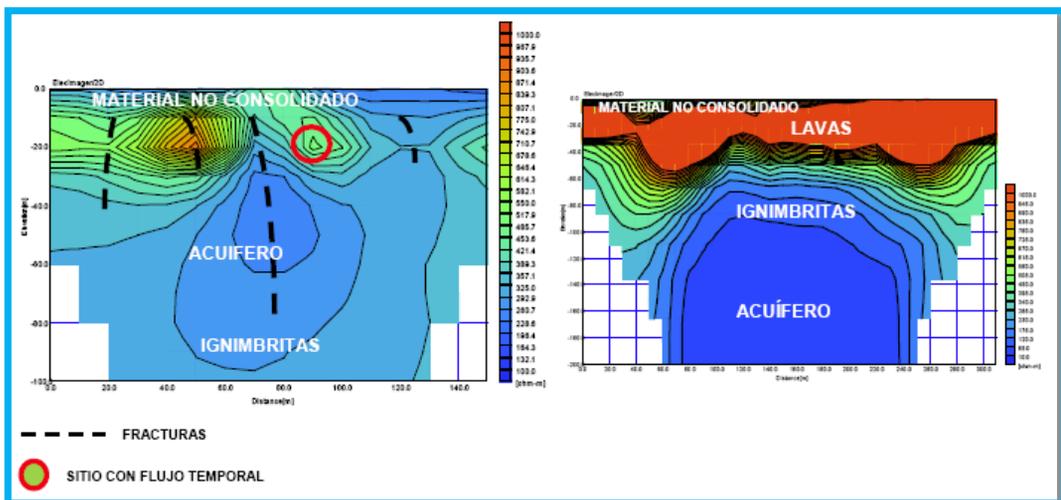
Silala Chico y Torito. Inicialmente ésta quebrada era una depresión no poco profunda, formada a lo largo de fallas y planos de debilidad de la roca fuertemente diaclasada, las cuales fueron erosionados y ahondados por una erosión fluvio-glacial y ensanchada en su base por una fuerte meteorización física, causada por la diferencia de temperaturas entre el día y la noche.

Mediante estudios geofísicos, en el sector y proximidades se identificó bastante agua subterránea en las fracturas de las ignimbritas, pero también, suelos congelados en el material no consolidado (coluvio-fluvial) y consolidado (porosidad secundaria).

En la parte superior del Perfil izquierdo (figura N° 9) se observa la presencia de depósitos no consolidados, marcado por las anomalías de resistividad, que indican la presencia de suelos congelados, que al entrar en fusión dan origen a flujos lentos de agua subsuperficial (cantidad moderada) que alumbran lentamente en el bofedal.

La parte inferior está representada por ignimbritas fuertemente fracturadas y diaclasadas, en cuya porosidad secundaria se encuentra el agua. El techo del acuífero principal se encuentra a una profundidad aproximada de 25.0 mt, desde donde emerge hacia la superficie por diferencia de presiones (hidrostática – atmosférica) hasta alumbrar.

Figura N° 9: Perfiles Tomográficos



Fuente: MMAyA

En el Perfil de la derecha (ubicado a 1.0 km al norte), se identifica que el techo del acuífero principal se encuentra a una profundidad aproximada de 90.0 metros, desde donde emerge hacia la superficie por diferencia de presiones (hidrostática – atmosférica) hasta alumbrar con flujo NW - SE. Además, está cubierto por una capa de menor permeabilidad.



Estas características de los acuíferos identificados en las cercanías del bofedal norte, constatan que existen diferentes niveles de agua que alumbran en superficie, inclusive, existen alumbramientos de agua temporales.

Por su mecanismo de transferencia de agua, este ecosistema frágil se clasifica como "bofedal de fondo de valle", porque se encuentra separado del acuífero principal por una capa de menor permeabilidad.

Por su régimen Hídrico se clasifica como Hidromórfico o Údico con presencia de agua permanente.

Desde el punto de vista ecológico forma un ecosistema léntico con vegetación acuática emergente.

6.2.2.- Bofedales Sector Sur

La secuencia de los Perfiles Tomográficos (2000-2013) muestra que las aguas que alumbran en este bofedal, provienen de bajas profundidades, pero de distancias largas, mediante flujos muy lentos y difundidos saturando los sedimentos recientes. Con anterioridad a las obras hidráulicas realizadas por los chilenos, esta saturación era de forma areal.

Por otra parte, existen dos sectores, separados por una barrera hidrogeológica (Cresta hidrogeológica), que dio origen a dos zonas de alumbramiento (izquierdo y derecho). En la actualidad, el bofedal derecho se encuentra completamente degradado, las causas son las obras hidráulicas que fueron realizadas por técnicos y personal chileno de la empresa ferroviaria hace muchos años atrás (ver figura N° 10 y fotografía N° 5).

En el Perfil Tomográfico realizado el año 2000, se observa, que el bofedal derecho contiene humedad (menor resistividad: 391.9 Ohm-m), en cambio en el Perfil del año 2013 el mismo bofedal derecho se encuentra seco (mayor resistividad: 615.0 Ohm-m). Lo que hace suponer, que las obras de canalización, fueron realizadas casi desde el límite del bofedal derecho, encauzando a un canal principal, ubicado en el sector donde aún existe flujo de agua (bofedal izquierdo). Para atravesar la barrera hidrogeológica, se tuvieron que hacer excavaciones, hasta nivelar las dos zonas.

Con el transcurso del tiempo, el bofedal derecho se fue deteriorando poco a poco, hasta entrar en un proceso de salinización superficial y erosión del suelo al no existir interacción de sus componentes, y el no poder compartir el agua necesaria para la supervivencia de la biota del sector. Por tanto, hoy en día es un resabio del original por efecto del encauzamiento del agua a un canal principal, que impide el drenaje superficial lento y corto difundido para saturar los suelos de todo el sector.

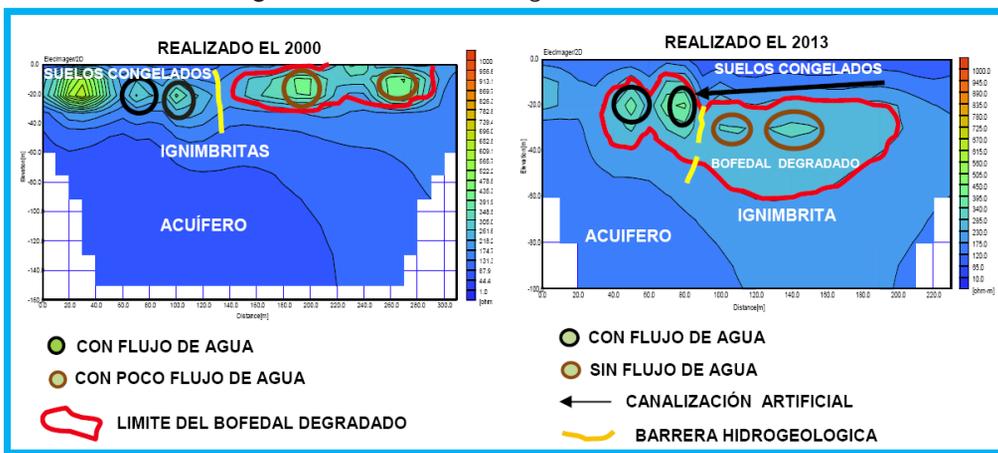
Por otra parte, Los suelos congelados temporales que se encuentran en los depósitos no consolidados, de alguna manera, evitan la erosión.



En la actualidad, este bofedal perdió toda capacidad de ser una fuente almacenadora y reguladora de agua. Estas situaciones son una más, de las tantas pruebas que demuestra que los bofedales desde su origen tienen un carácter estático, de esta manera, dando origen a medios lenticos.

Las consecuencias de estos aspectos se pueden observar en los Perfiles Tomográficos e imágenes satelitales siguientes.

Figura N° 10: Perfiles Tomográficos del Bofedal sur



Fuente: MMAyA

Fotografía N° 5: Vista del área degradado en el bofedal



Fuente: MMAyA



Estado Plurinacional de Bolivia

MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE Y AGUA

Por su mecanismo de transferencia de agua, este ecosistema frágil se clasifica como "bofedal de ladera", aunque solo una parte se encuentra en contacto directo con el acuífero principal.

Por su régimen Hídrico se clasifica como Hidromórfico o Údico con presencia de agua permanente.

Desde el punto de vista ecológico, por su génesis, formaban un medio con ecosistema léntico con vegetación acuática emergente. Lamentablemente, por los trabajos de canalización sufrida pasaron a ser considerados como un medio con ecosistema lótico.

6.2.3.- Proceso de pérdida y degradación de bofedales

En los Bofedales del Valle de Silala la vegetación está dominada por juncáceas (*Distichia*, *Oxychloe*), ciperáceas (*Cyperus* sp., *Scirpus* sp.) y gramíneas (*Deyeuxia* sp, *Puccinellia* sp.), que forman cojines compactos o densos tapetes de césped (Rocha-Olivio 2013).

Fotografía N° 6: Vegetación y fauna en los Bofedales de la Dignidad



Fuente: Diario El Potosí

Sin embargo, estos bofedales en los últimos años van sufriendo un proceso de degradación, situación que se estableció a partir del procesamiento de imágenes del sensor LandSat TM51 de dos fechas contemporánea coincidente con el ciclo vegetativo de la vegetación natural y que corresponden a la temporada estival de 1986 y 2010.

¹ Las imágenes LandSat (Land=Tierra y Sat=Satélite) se caracterizan por la variedad de bandas que las componen. Estas imágenes se separan en 2 tipos: LandSat 7 (sensor ETM+) y LandSat 5 (sensor TM); ambas poseen 7 bandas multiespectrales que van desde el visible hasta el infrarrojo medio, con una resolución de 30 metros, en la mayoría de ellas. Sin embargo, la diferencia entre ellas radica en que las LandSat 7 poseen una banda pancromática de 15 metros y en el caso de la banda termal, aumenta la resolución de 120 a 60 metros. Cada escena cubre 180*175 Km². Las principales aplicaciones de estas imágenes se centran en la identificación y clasificación de las distintas cubiertas que existen en la superficie terrestre, determinación de humedad del suelo, clasificación de la vegetación, mapas hidrotermales y estudios multitemporales. Existen imágenes de archivo desde 1982.



Tabla N° 5: Fechas de adquisición imágenes LandSat

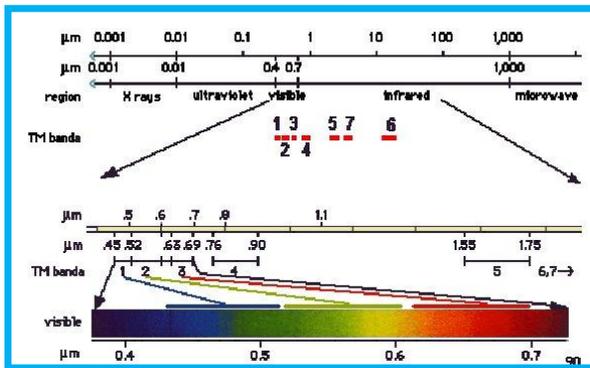
IMAGEN SATELITAL	FECHA SATELITAL	IMAGEN	PATH/ROW
Land Sat TM5	5/6/1986		233/075
Land Sat TM5	7/6/2010		233/075

Fuente: MMAyA

Para la homogeneización de ambas imágenes se realizó la georeferenciación a partir de una imagen base ortorectificada MrSID del 2001 y su corrección radiométrica, convirtiendo los valores de niveles digitales (8 bit, 256 niveles de gris) a valores de reflectividad, porcentaje de radiación incidente que es reflejada por la superficie.

De cada imagen resultante se calculó el Índice Verde Diferenciado Normalizado (NDVI) y el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI). Ambos índices resultan del cociente normalizado entre bandas y que permite discriminar dos cubiertas con diferente comportamiento como suelo y vegetación (Chuvienco 2002). Para diferenciar masas vegetales a partir de estos índices, se utiliza la característica de la signatura espectral de la vegetación sana al mostrar un claro contraste entre las bandas visibles (0.6 a 0.7 μm) y el infrarrojo cercano (0.7 a 1.1 μm).

Figura N° 11: Espectro electromagnético – Bandas LandSat



El índice de NDVI ha sido y es ampliamente utilizado, estando basado en un intento de realzar las diferencias en la reflectividad entre las regiones espectrales de rojo y del NIR (infrarrojo cercano) para firmas espectrales características de la vegetación y atribuibles a la estructura interna de las hojas (Jensen 2000). El NDVI se formula mediante la siguiente expresión basada en las bandas 4 y 3 TM y varía entre 1 y -1:

$$NDVI = \frac{\rho_{TM4} - \rho_{TM3}}{\rho_{TM4} + \rho_{TM3}}$$



Estado Plurinacional de Bolivia

MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE Y AGUA

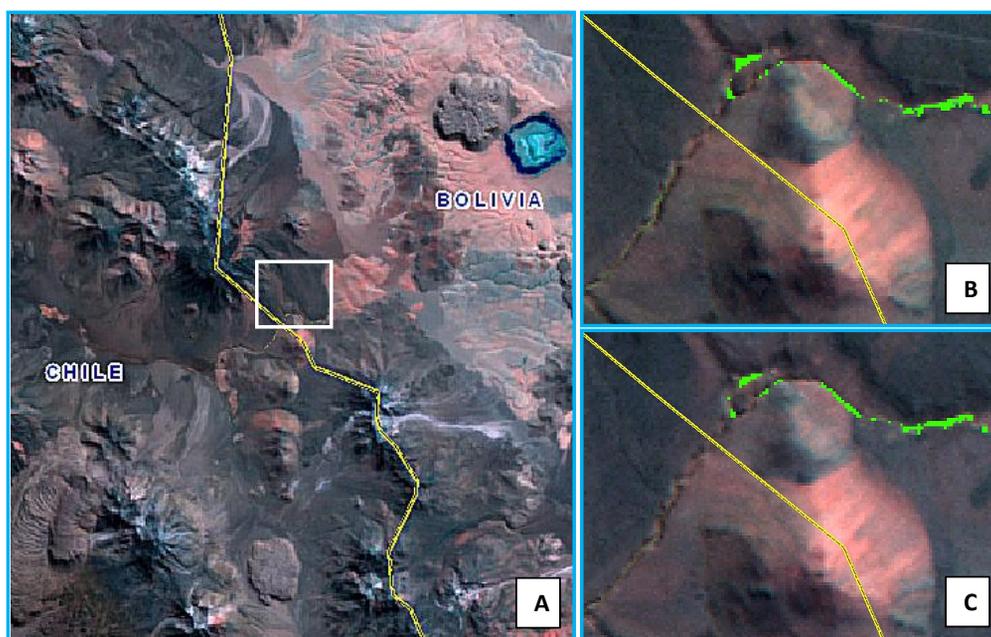
Al igual que para el caso del índice anterior, el SAVI resulta de la modificación del NDVI mediante la adición de un factor de ajuste del suelo (L) (Huete et al. 1992). El valor de L varía dependiendo de las características del suelo y es índice se formula como:

$$SAVI = \frac{\rho_{TM4} - \rho_{TM3}}{\rho_{TM4} + \rho_{TM3} + L} * (1 + L)$$

Huete (1988) sugiere un valor de L igual a 1 para áreas con poca vegetación, un valor de L igual a 0.5 para áreas intermedias, y un valor de L igual a 0.25 para áreas con vegetación densa. Llegándose a usar un valor de 0.5.

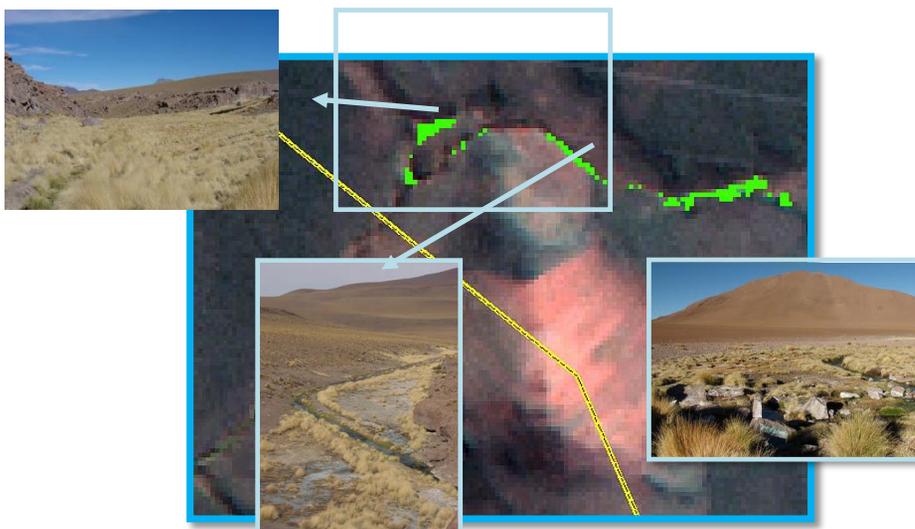
Se utilizó el NDVI para determinar el estado de la vegetación y el SAVI para mejorar la visualización y discriminación a partir de una clasificación digital en tres clases: vegetación, cuerpos de agua y salares, dando como resultado la localización espacial de los humedales existentes, que se puede apreciar en la siguiente figura.

Figura N° 12: Imagen Satelital LandSat 2010 – 1986





A. Imagen LandSat (Bandas RGB - 5, 4,3). B. Imagen LandSat 1986. C. Imagen LandSat 2010. Bofedales resaltados en color verde



Fuente: MMAyA

De la discriminación de la zona de bofedales para las dos fechas se tienen los siguientes valores:

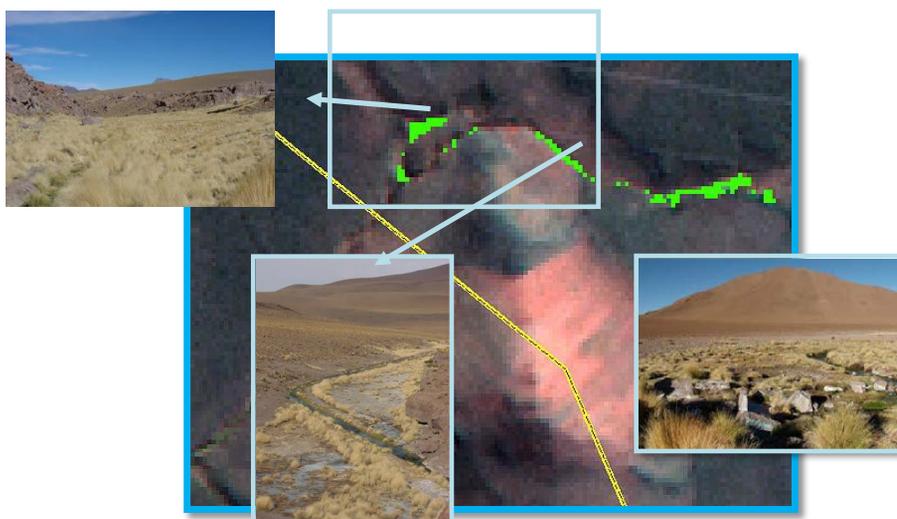
Tabla N° 6: Fechas de adquisición imágenes LandSat

IMAGEN SATELITAL	FECHA IMAGEN SATELITAL	PIXELES	ÁREA (PIXEL m ²)	TOTAL (m ²)	TOTAL (ha)
Land Sat TM5	5/6/1986	121	900	108900	10.89
Land Sat TM5	7/6/2010	109	900	98100	9.81

Fuente: MMAyA

Existiendo una disminución de 1.08 ha en bofedales entre los periodos 1986 y 2010, no obstante, se debe mencionar que dada la variabilidad establecida entre ambas fechas, se tienen áreas que difieren en cuanto a su distribución espacial como se observa a continuación.

A. LandSat Image (RGB Bands - 5, 4,3). B. LandSat Image 1986. C. LandSat Image 2010.
Wetlands are highlighted in green color



Source: MMAyA

The following values were obtained from the differentiation of the wetland areas on the two dates:

Table No. 6: Dates of acquisition of LandSat images

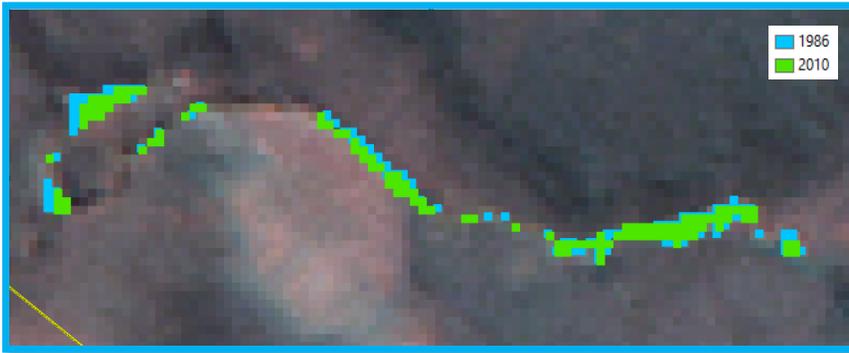
SATELLITE IMAGES	DATE OF SATELLITE IMAGE	PIXELS	AREA (PIXEL m ²)	TOTAL (m ²)	TOTAL (ha)
Land Sat TM5	5/6/1986	121	900	108900	10.89
Land Sat TM5	7/6/2010	109	900	98100	9.81

Source: MMAyA

A decrease of 1.08 ha exists in the wetlands between 1986 and 2010, however, it must be noted that given the established variation between these dates, there are areas that differ in terms of spatial distribution, as shown below.



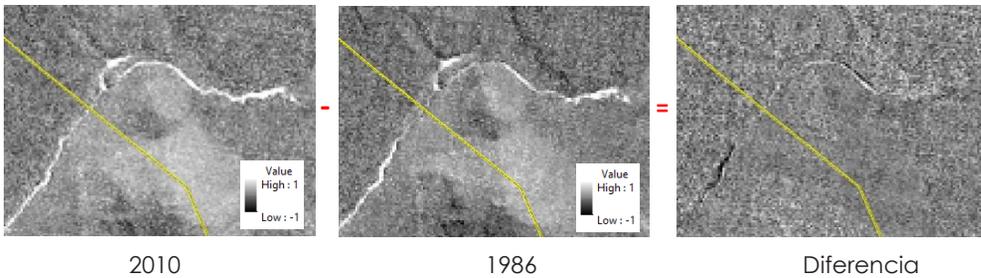
Figura N° 13: Estado superficial de los dos Bofedales los años 1986 - 2010



Fuente: MMAyA

De esta variabilidad espacial y con el fin de establecer la pérdida o ganancia de vigor vegetativo entre ambas fechas, se utilizó la diferencia de NDVI.

Figura N° 14: NDVI 2010 - 1986



Fuente: MMAyA

Una manera convencional de representar la diferencia de NDVI entre dos fechas es su organización en clases, que describan los cambios en la vegetación (independiente de su estado inicial), estableciéndose los siguientes intervalos de cambio para el Valle del Silala:

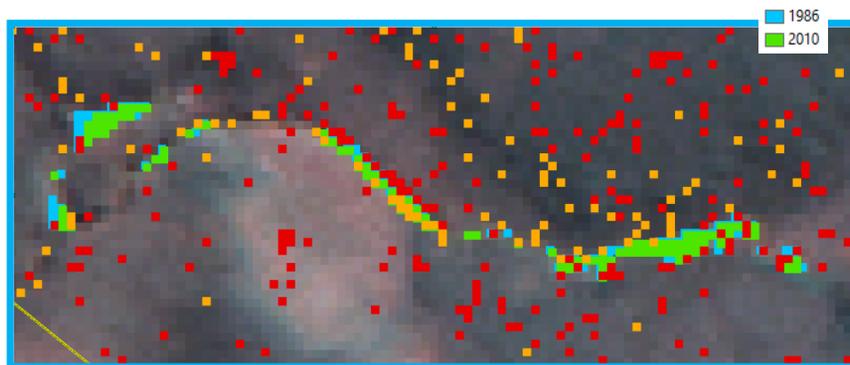


Estado Plurinacional de Bolivia

MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE Y AGUA**Tabla N° 7:** Intervalos de cambio NDVI 2010 - 1986

LIMITE	INTERPRETACIÓN: (ESTADO DE VEGETACIÓN)	COLOR
< -0.05	Deterioro	
-0.051 – 0.05	Se mantiene	no color
> 0.051	Mejoría	

Fuente: MMAyA

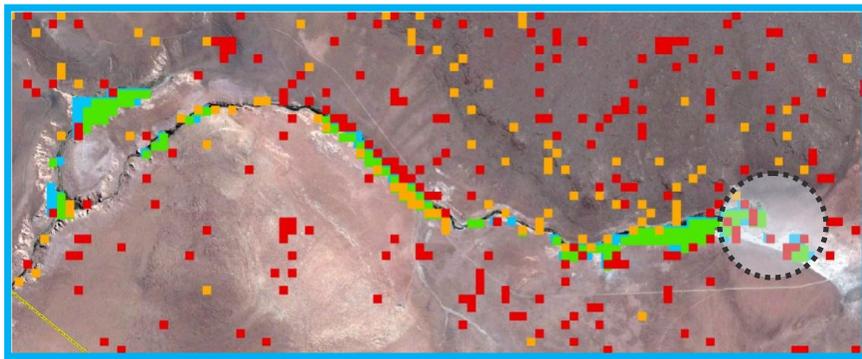
Figura N° 15: Intervalos de cambio NDVI 2010 - 1986

Fuente: MMAyA

Asimismo, los pixeles resultantes del análisis de NDVI y SAVI, se superpusieron sobre una imagen de mayor resolución derivado de Google Earth como es la imagen Digital Globe (de fecha 20/03/2011).



Figura N° 16: Imágenes Digital Globe 2011



Fuente: MMAyA

De la imagen resaltada en círculo se puede observar una disminución de área en bofedal, pero también de su vigor vegetativo (píxeles rojos), dando indicios de su degradación asociado a la presencia de afloramiento de sales en la superficie del suelo. Así, la disminución de la cobertura vegetal predispone a la pérdida de suelo por los frecuentes vientos característicos de la zona, especialmente en la época seca.

De esta forma, la disminución del agua en los bofedales, especialmente en época seca hace que las sales disueltas tengan mayor concentración, por lo tanto, se presenten afloramientos salinos en los suelos de estos bofedales (mayoritariamente en bofedal sur).

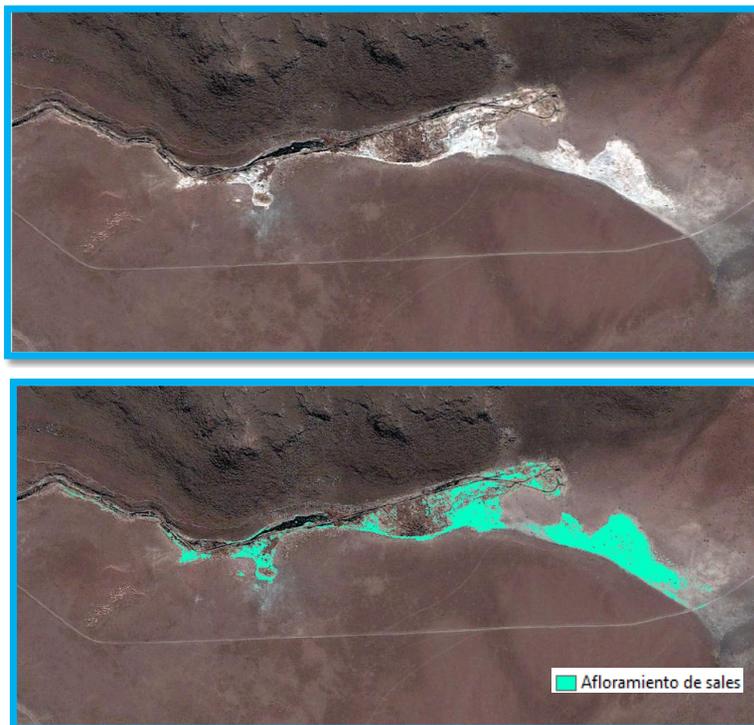
Llegándose a cuantificar el área de estos afloramientos a partir de una clasificación de una imagen Digital Globe del 2012 por el método Isodata.



Estado Plurinacional de Bolivia

MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE Y AGUA

Figura N° 17: Imágenes Digital Globe 2012



Fuente: MMAyA

Obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla N° 8: Área de afloramientos salinos – Imagen Digital Globe

IMAGEN SATELITAL	FECHA IMAGEN SATELITAL	PIXELES	ÁREA (PIXEL m ²)	TOTAL (m ²)	TOTAL (ha)
Digital Globe	26/7/2013	30040	0.81	24332.4	2.43

Fuente: MMAyA

7.- EL PAPEL ESTRATEGICO DE LAS AGUAS DE LOS BOFEDALES DEL SILALA

Según la Nueva Constitución Política del Estado, los recursos hídricos en el Estado Plurinacional de Bolivia son considerados como un recurso finito. El parágrafo III del artículo 374 señala que las aguas fósiles, glaciales, humedales, subterráneas, minerales,



medicinales y otras son prioritarias para el Estado, que deberá garantizar su conservación, protección, preservación, restauración, uso sustentable y gestión integral.

Por otra parte, la Ley N° 320 de fecha 13 de diciembre de 2012 declara a las aguas del Silala recurso natural estratégico del estado Plurinacional de Bolivia. En este sentido, es fundamental entender la explotación de las aguas subterráneas y la gestión misma de los recursos hídricos subterráneos en el Municipio de Qutena Chico como un proceso dinámico, tanto espacial como temporalmente. Indispensable para toda forma de vida existente, para el desarrollo económico y social del país y las regiones, ya que de ella depende la vida misma, la seguridad alimentaria y la salud de los ecosistemas.

A pesar del papel estratégico de los recursos hídricos subterráneos en el desarrollo socioeconómico y de su vulnerabilidad a la degradación del medio ambiente, en los informes más recientes sobre los recursos hídricos del país, se considera que el conocimiento global de esta fase del ciclo hidrológico aún está en estado de desarrollo y la información sobre la cuantificación de reservas de agua subterránea y su explotación es incompleta, por no contarse con, un adecuado control e inventario a nivel nacional.

En los últimos diez años, la necesidad de agua, produjo un notable incremento en la extracción de agua subterránea. Es así, en la región occidental se explota esencialmente diferentes acuíferos, que por lo general, corresponden a acuíferos libres, que descansan directamente sobre niveles de agua fuertemente salinizadas. Los recursos son difíciles de explotar porque cualquier sobre explotación provoca la salinización y la contaminación por diferentes minerales. Estas limitaciones han frenado el crecimiento de varias poblaciones de la región.

Por otra parte, la disponibilidad y la repartición de los recursos de agua subterránea en el Valle de Silala, Municipio de San Pablo de Lipez Provincia Sur Lipez del Departamento de Potosí están relacionadas con acuíferos congelados discontinuos contenidos en los intersticios, fisuras y diaclasas de las ignimbritas y en el material Cuaternario, donde existe una precipitación casi nula, pero, bastante caudal, con una calidad de acuerdo a NB 512 (Tipo A). Sin embargo, estas aguas fueron desviadas mediante canales artificiales hacia Chile, en donde disponen de sistemas de aprovechamiento de los recursos hídricos en el consumo humano, industria minera y agricultura en poblaciones del norte Chileno, haciendo que estas regiones sean económicamente importantes generando 42.000.000 de dólares al año (HORA 25: Periódico Quincenal N° 70 – 71 del 23 al 31 de diciembre de 2009, autor Luis Antezana Ergueta). Es decir, que es vital para el desarrollo económico de esa región, por lo tanto, tiene un valor económico y estratégico.

8.- ALTERNATIVAS DE CAPTACION Y EXPLOTACION DE AGUA DE LOS BOFEDALES DE LA DIGNIDAD Y AREAS ADYACENTES PARA USO HUMANO

El departamento de Potosí, de acuerdo a su potencial, es un departamento con vocación y dependencia económica del desarrollo minero, turístico y agricultor que están



Estado Plurinacional de Bolivia



estrechamente en dependencia con los recursos hídricos superficiales y subterráneos. Sumado a esto se debe señalar la creciente demanda por la disponibilidad y calidad del agua para consumo humano con el crecimiento de la población y demanda de otros sectores de la economía departamental.

La cobertura de agua potable en el departamento potosino permaneció prácticamente constante. Efectivamente, el año 1992, el departamento de Potosí presentó una cobertura del 40%, que se incrementó hasta el 62,7% en la gestión 2001 y se mantuvo constante hasta el año 2005. Esa situación podría ser el resultado de los bajos niveles de inversión en la habilitación de nuevas fuentes de agua y/o en el mantenimiento de los sistemas de agua existentes. Por lo que, la vida y las costumbres de la población, los bienes, los servicios y el medio ambiente, están siendo alterados, por encima de la capacidad de respuesta de los Gobiernos locales para generar soluciones, exigiendo atención estatal a nivel de planificación.

Tabla N° 9: Cobertura actual de agua en tres municipios del departamento de Potosí

MUNICIPIO	POBLACION URBANA	POBLACION RURAL	POBLACION TOTAL	COBERTURA URBANA	COBERTURA RURAL	COBERTURA TOTAL
POTOSI	174,973	14,679	189,652	98,2	61,8	95,4
TUPIZA	27,302	17,351	44,653	97,3	67,3	85,6
UYUMI	18,068	11,450	29,518	94,3	45,2	75,2

Fuente: MMAyA/VAPSB con datos Censo 2012/INE

Por otra parte, el término sequía suele referirse a un periodo prolongado de tiempo con precipitaciones por debajo de la media esperada, o también, según la metodología utilizada, cuando en más de la mitad del área considerada se producen precipitaciones inferiores al 85 % de la media, por espacio de dos o más años.

Ahora bien, considerando la Ley N° 2140 del 25 de octubre de 2000 "Para la Reducción de Riesgos y Atención de Desastres", señala que "emergencia", es la situación que se crea ante la presencia real o inminente de un fenómeno que pueda poner en peligro la normalidad de la vida en un territorio determinado.

Por otro lado, se aprobó la Ley N° 300: "Ley Marco de la Madre Tierra y Desarrollo Integral para Vivir Bien", que presenta un desarrollo integral en armonía y equilibrio con el medio ambiente, garantizando la continuidad de la capacidad de regeneración de los componentes y sistemas de vida.

En la misma línea de reformas estructurales, se establecieron metas a largo plazo, es así que se presentó la Agenda Patriótica 2025 con 13 pilares de desarrollo, y en el pilar 2 se adscribe el mandato de alcanzar la cobertura del 100% en agua y saneamiento.

Los problemas que presenta el departamento de Potosí, debido a la dispersión poblacional, encarecen los costos de conexiones de agua potable e impiden un mayor acceso al servicio. En adición a la disponibilidad o no de agua para consumo humano,



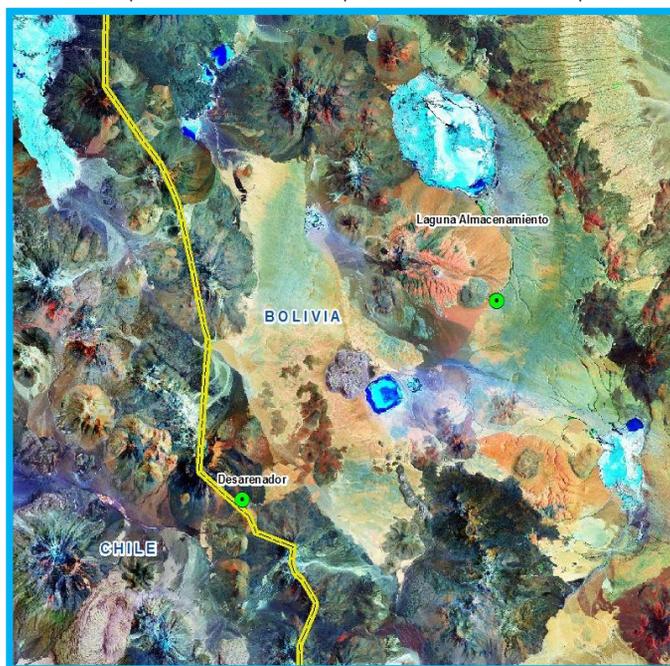
esta se agudiza aún más con la calidad de la misma. Es necesario que la calidad de las aguas sea buena, lo que no siempre ocurre con las aguas superficiales y subterráneas en el departamento, por contener concentraciones elevadas de sales que limitan su uso y presencia de residuos tóxicos de minerales pesados provenientes de las actividades mineras e industriales.

Por lo que; este estudio trata de encontrarlas alternativas de captación y uso eficiente de agua, con base en criterios aplicables a las condiciones geológicas, hidrogeológicas y socioeconómicas imperantes en la región, considerando las necesidades de los pobladores de la ciudad de Potosí, Uyuni, Tupiza y comunidades asentadas a lo largo del trazo de la tubería de impulsión y conducción.

8.1.- Captación a Partir de un Cárcamo de Bombeo (Alternativa 1)

Basado en la impulsión desde un Cárcamo de Bombeo (1), ubicado en la parte contigua al Desarenador existente (ubicado sector bofedal norte) hasta una Laguna Natural de Almacenamiento. Sin embargo, se hace notar, que para cumplir este primer tramo, es necesario realizar diferente bombeos, tal como se muestra líneas abajo.

Figura N° 18: Mapa de Resistencia: puntos referenciales para el trazado



Fuente: MMAyA

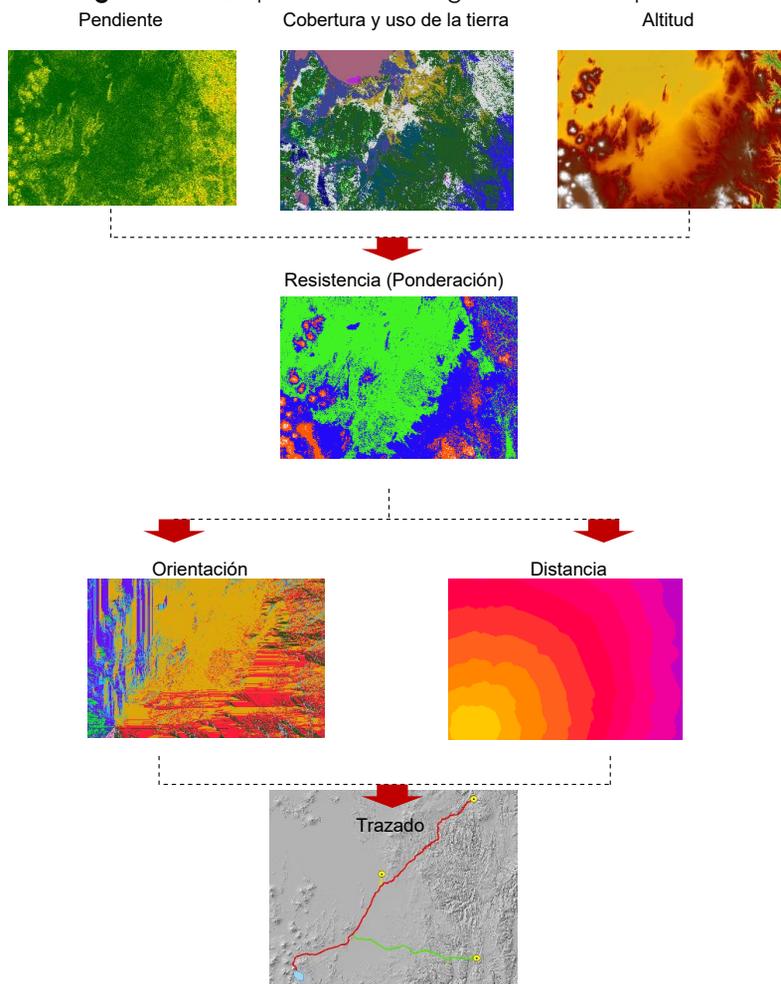


Estado Plurinacional de Bolivia

MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE Y AGUA

Con la finalidad de contar con una propuesta sobre el trazado de la Red de Impulsión, se recurrió a la aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG), a partir de la metodología del trazado óptimo, que se basa en la identificación de puntos referenciales para generar un desplazamiento (trazado) entre ellos implicando un coste de traslado (resistencia que presenta el medio para el desplazamiento).

Figura N° 19: Esquema metodológico – Trazado óptimo



Fuente: MMAyA



En este sentido, se utilizó información temática Raster disponible respecto a la pendiente, cobertura y uso de la tierra y altitud con la finalidad de generar el Mapa de Resistencia, derivándose de éste la orientación y distancia que tendrá el trazado generado.

Los puntos referenciales para el trazado fueron:

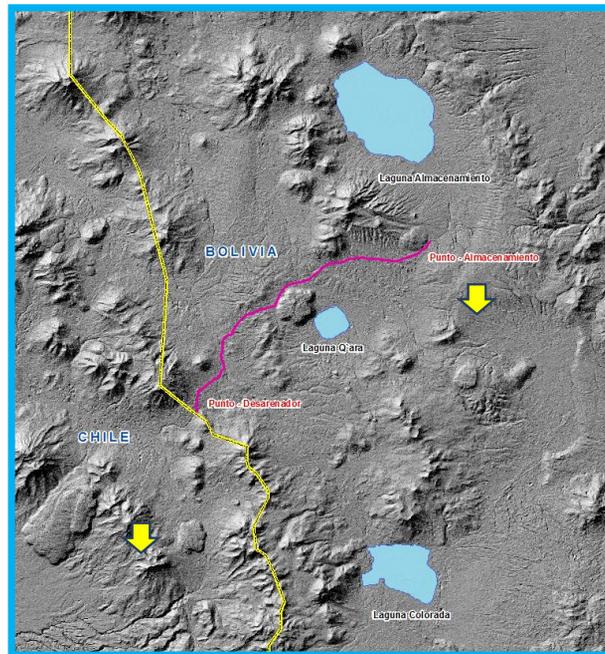
- Inicial – Respecto al Cárcamo de Bombeo (desarenador).
- Final – Respecto a la Laguna Natural de Almacenamiento.

La capa temática resultante de la ponderación entre las diferentes variables, permitió calcular el coste global de desplazarse a lo largo de la capa y a la vez, poder evaluar la mejor forma de realizar este desplazamiento minimizando el esfuerzo invertido.

Llegándose a obtener un trazado total con las siguientes características:

TRAZADO (RED DE IMPULSION)	DISTANCIA (m)	DISTANCIA (km)
Cárcamo de Bombeo (1) – Laguna Natural de Almacenamiento	43 142.87	43.14

Figura N° 20: Red de Impulsión: Cárcamo de Bombeo (desarenador) – Laguna de almacenamiento



Fuente: MMAy



Estado Plurinacional de Bolivia

MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE Y AGUA

Fotografía N° 7: Punto inicial

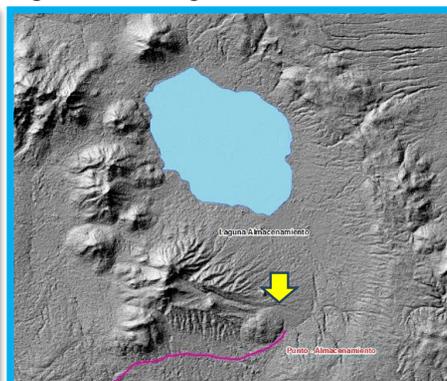
Fotografía N° 8: Desarenador
(Cárcamo)

Fuente: MMAyA

Figura N° 21: Punto final



Figura N° 22: Laguna de almacenamiento



Fuente: MMAyA

El trazo del trayecto se lo realizará por un cauce natural existente (figura N° 20: Punto final), que desemboca en la Laguna Natural de Almacenamiento, posteriormente, el agua será conducido por una Red de Conducción por gravedad hasta Uyuni, por bombeo intermedio hasta Tupiza y bombeos intermedios hasta Potosí.



Estado Plurinacional de Bolivia

MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE Y AGUA

Fotografía N° 9: Vista de la Laguna Natural de Almacenamiento



Fuente: MMAyA

El perfil derivado de la Red de Impulsión de agua propuesto se presenta en la siguiente figura:

Figura N° 23: Perfil Red de Impulsión: Cárcamo – Laguna de almacenamiento



Fuente: MMAyA

Para transportar el agua desde el área del Cárcamo de Bombeo (1) hacia la Laguna Natural de Almacenamiento se tiene previsto realizar dos bombeos, bajo las siguientes características:

Bombeo 1:

A partir del Cárcamo de Bombeo (1) ubicado contiguo al desarenador, hasta la cota máxima, donde se debe construir un Cárcamo de Bombeo (2). De acuerdo a detalle siguiente del lugar:

- Cota máxima = 4636 msnm
- Coordenadas Geográficas: 21° 58' 20.06'' LS – 68° 00' 27.42'' LW
- Cota mínima = 4369 msnm
- Coordenadas Geográficas: 22° 00' 31.15'' LS – 68° 01' 29.86'' LW
- Diferencia de cotas = 267 m
- Distancia cota máxima - cota mínima = 5 km.



Estado Plurinacional de Bolivia

MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE Y AGUA

Figura N° 24: Vista del trazo y perfil del Bombeo 1.



Fuente: MMAyA

Bombeo 2:

A partir del Cárcamo de Bombeo (2) ubicado en la cota máxima (4636 msnm) hasta una cota superior (4837 msnm) donde se debe construir un depósito para almacenar agua. De acuerdo a detalle siguiente del lugar:

- Cota máxima = 4837 msnm
- Coordenadas Geográficas: 21° 53' 22.36'' LS – 67° 57' 32.21'' LW
- Cota mínima = 4598 msnm
- Coordenadas Geográficas: 21° 57' 05.30'' LS – 67° 59' 33.70'' LW
- Diferencia de cotas = 239 m
- Distancia cota máxima - cota mínima = 8.88 km



Figura N° 25: Vista del trazo y perfil del Bombeo 2.



Fuente: MMAyA

Como se puede apreciar en el Perfil, a partir del depósito para almacenar agua ubicada en la cota máxima (4837 msnm). A partir de este punto el flujo del agua será por gravedad, hasta alcanzar la Laguna Natural de Almacenamiento, como se observa en la figura N° 24. La distancia aproximada es de 29,26 Km.

Figura N° 26: Perfil Red de Conducción por gravedad: Diferencia de cotas 4824 – 4635 (189 m)



Fuente: MMAyA

En todo el trazado anterior a partir del Cárcamo de Bombeo (1) hasta la Laguna Natural de Almacenamiento, se pretende bombear 200 lt/seg. Por tanto, las obras civiles a construirse deben estar diseñadas para este volumen de agua.



Estado Plurinacional de Bolivia

MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE Y AGUA

8.2.- Captación a Partir de una Batería de pozos ubicados en el sector Silala (Alternativa 2)

El proyecto tiene como común denominador la construcción de una batería de diez pozos profundos, con la finalidad de incrementar el caudal de los 200 lt/seg, que alumbran en los Bofedales de la Dignidad. Estos pozos deben ser ubicados en la planicie denominada Desierto del Siloli, con el equipamiento necesario y las construcciones respectivas propias de la ingeniería de pozos.

Figura N° 27: Vista del área donde se pretende construir la batería de pozos – sector Silala



Fuente: MMAyA

Los estudios de exploración geofísica realizados muestran resultados satisfactorios en cuanto a las aguas subterráneas, es así, que los Perfiles Tomográficos SEB-381, SEB-242 y SEB-115 ubicados en la planicie alta (noreste de los bofedales) indican presencia de acuíferos con mucha potencia. A manera de ejemplo:

El SEB-115 muestra un Perfil con presencia de gran cantidad de agua (según resistividades) a lo largo y ancho del Perfil. Sin embargo, el acuífero principal se encuentra a partir de los 60.0 metros de profundidad, en el tramo 50.0 hasta el tramo 170.0, con una potencia que sobrepasa los 200.0 metros de profundidad.

Con el propósito de captar bastante agua, la profundidad de perforación "teórica" recomendada es de 250.0 metros. Sin embargo, la profundidad de perforación "real" se determinará analizando las muestras litológicas obtenidas por cada metro de perforación y el Perfilaje Eléctrico.

El SEB-381, en el Perfil se observa un acuífero a la profundidad de 55.0 metros, su potencia no fue determinada, sobrepasa los 200.0 metros de profundidad, su ancho se encuentra

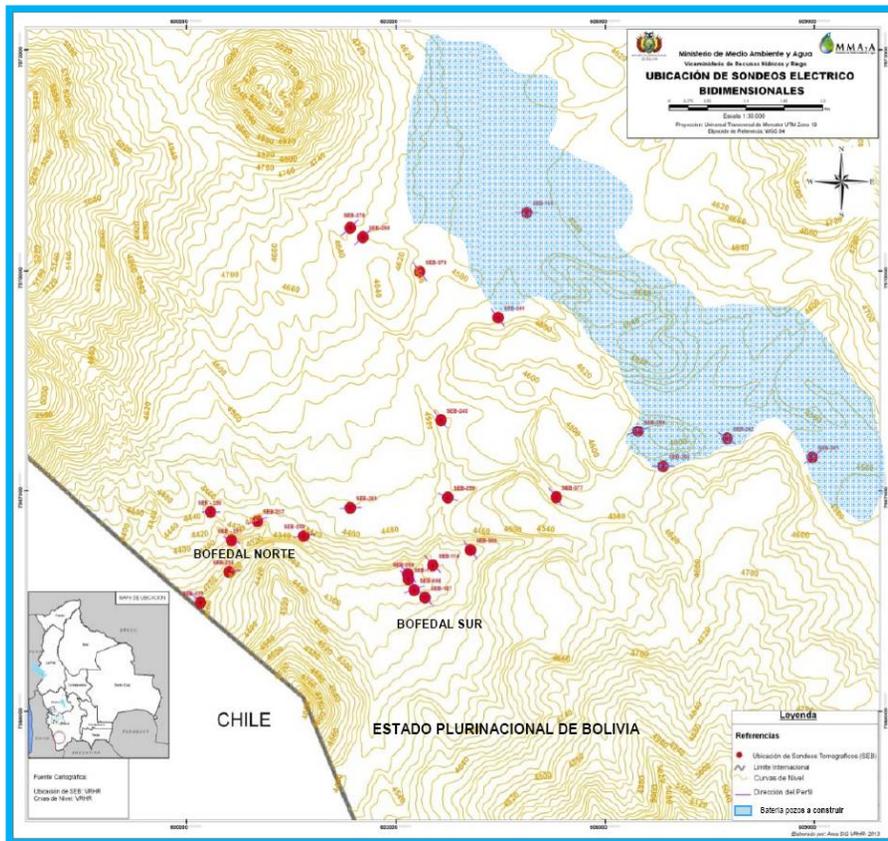


entre los tramos 60.0 a 165.0. Los estratos suprayacentes por su permeabilidad primaria confinan al acuífero.

En el contexto de captar bastante agua, la profundidad de perforación "teórica" recomendada es de 250.0 a 300.0 metros. Sin embargo, la profundidad de perforación "real" se determinará analizando las muestras litológicas obtenidas por cada metro de perforación y el Perfilaje Eléctrico.

SEB-242, en el Perfil se observan dos acuíferos, aunque sus potencias no son considerables. El acuífero principal se encuentra a los 130.0 metros de profundidad, su ancho varía entre los tramos 140.0 – 160.0, su potencia no fue determinado, sobrepasando los 200.0 metros de profundidad.

Figura N° 28: Ubicación de los SEB y el área de la batería de pozos a construir - sector Silala



Fuente: MMAyA



Estado Plurinacional de Bolivia

MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE Y AGUA

La profundidad de perforación "teórica" recomendada es de 250.0 metros. Sin embargo, la profundidad de perforación "real" se determinará analizando las muestras litológicas obtenidas por cada metro de perforación y el Perfilaje Eléctrico.

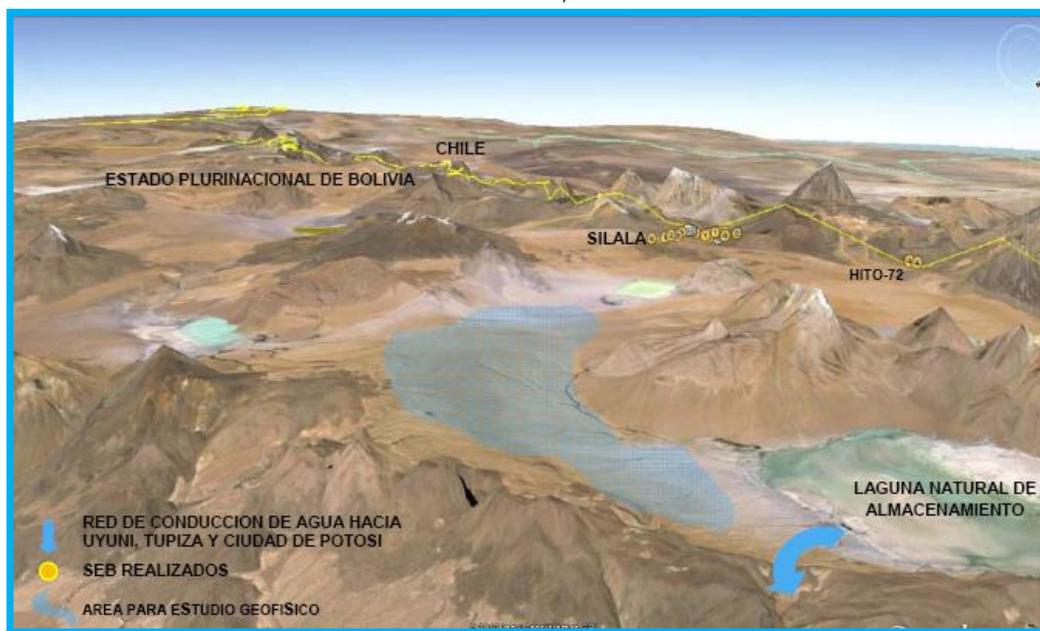
Desde el punto de vista de la soberanía nacional, se trata de un punto estratégico junto a los SEB-256 y SEB-377, debido a que con una perforación en estos sectores es posible controlar en algo el caudal de alumbramiento del bofedal del sector sur.

Se pone en conocimiento que también existen acuíferos con grandes cantidades de agua, ubicados en cotas inferiores al área donde se pretende realizar la batería de pozos, lo que significa bombeo adicional, motivo por el cual, no fueron considerados en la alternativa 2. Entre estos, SEB-237, SEB-238, SEB-239, 240, SEB-254, SEB-256, SEB-258, SEB-259, SEB-338, SEB-377 (ojo con este acuífero), SEB-378, SEB-380 y SEB-114.

8.3.- Captación a Partir de una Batería de pozos ubicados en el sector de la Laguna Natural de Almacenamiento (Alternativa 3)

El proyecto tiene como común denominador la construcción de una batería de quince pozos profundos. El objetivo del proyecto es incrementar la cantidad de agua bombeada hasta la Laguna Natural de Almacenamiento desde el Cárcamo de Bombeo (1) y la batería de pozos sector Silala.

Figura N° 29: Ubicación del área a estudiar con relación al Silala, a la Laguna Natural de Almacenamiento y al Hito-72.



Fuente: MMAyA



Sin embargo, se deben realizar estudios geofísicos de exploración (tomografía eléctrica) para establecer las características hidrogeológicas y estratigráficas del subsuelo, con el fin de ajustar con la perforación de investigación y los registros de perfilajes, para poder ubicar los sitios adecuados para realizar la explotación del agua subterránea, garantizando la calidad y cantidad del recurso hídrico.

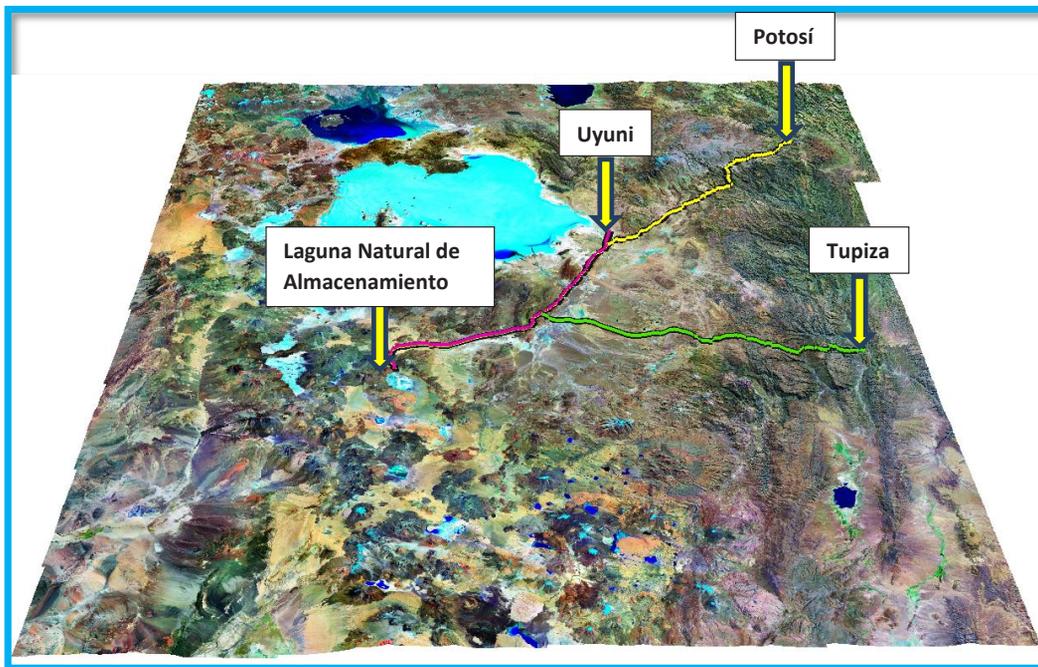
En cuanto a las obras de ampliación propiamente dichas, una vez definidos los puntos de perforación, horadar los pozos definitivos e implementar, para luego, instalar las tuberías de la Red de Impulsión necesarias, para conectar los mismos a la Laguna Natural de Almacenamiento.

Posteriormente, la incorporación a la Red de Conducción de agua potable asegurará también la calidad y la cantidad requerida para los pobladores asentados a lo largo del trazo hacia las poblaciones de Potosí, Uyuni y Tupiza.

La diferencia de cotas desde la ubicación del Cárcamo de Bombeo (2) – sector Silala hasta la Laguna Natural de Almacenamiento es aproximadamente de 365 mt.

8.4.- Trazos de la Red de Impulsión hacia Uyuni – Tupiza – Potosí a Partir de la Laguna Natural de Almacenamiento

Figura N° 30: Trazos: Laguna Natural de Almacenamiento – Tupiza – Uyuni – Potosí



Fuente: MMAyA



Estado Plurinacional de Bolivia

MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE Y AGUA

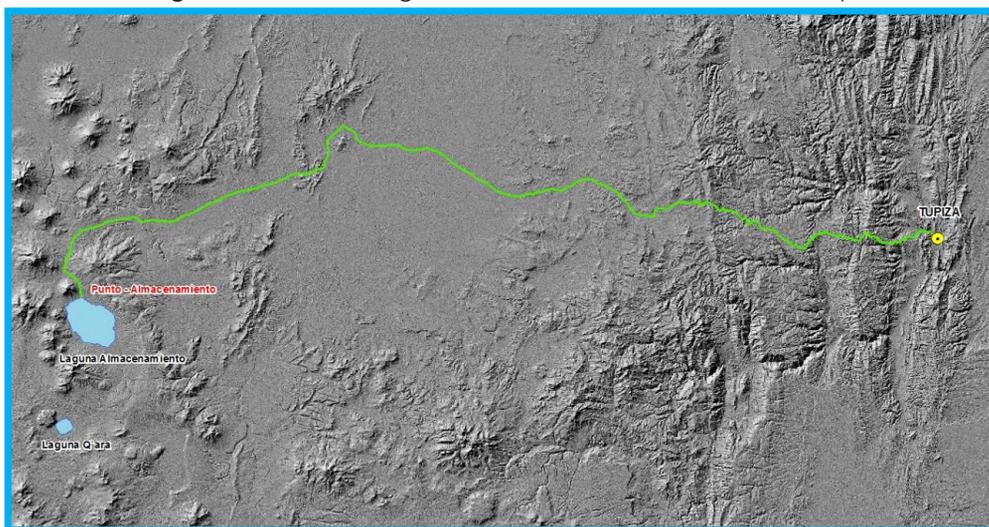
En función a las tres alternativas de captación de agua presentadas y mediante bombeo conducido hasta la Laguna Natural de Almacenamiento (Reservorio), para su posterior conducción por gravedad hasta donde la geomorfología del terreno lo permite. Bajo esos antecedentes, se propone los siguientes trazos alternos para la Red de Impulsión (conducción) hasta las poblaciones de Tupiza, Uyuni y Potosí.

Llegándose a utilizar la misma metodología anterior (información temática Raster disponible respecto a la pendiente, cobertura y uso de la tierra y altitud con la finalidad de generar el Mapa de Resistencia, derivándose de éste la orientación y distancia que tendrá el trazado generado), con la variante del uso de cartografía temática respecto a carreteras y caminos de acceso municipal que permitieron definir de mejor manera el trazado.

En el gráfico anterior se puede observar la ubicación de cada una de las poblaciones con referencia a la Laguna Natural de Almacenamiento y los trazos correspondientes para la Red de Impulsión por gravedad.

8.4.1.- Trazo de la Red de Impulsión hacia la población de Tupiza

Figura N° 31: Trazo: Laguna Natural de Almacenamiento – Tupiza



Fuente: MMAyA

El Municipio de Tupiza se encuentra localizado al Sur del departamento de Potosí, entre los paralelos 21° 21' y 21°50' de latitud Sur de la línea del Ecuador y los paralelos 65°10' y 66°22'



de longitud Oeste del Meridiano de Greenwich; es uno de los 38 Municipios del Departamento de Potosí y es la Primera Sección Municipal de la Provincia Sud Chichas.

La región es rica en recursos hídricos. Sin embargo, es necesario que la calidad de las aguas sea buena, lo que no siempre ocurre con las aguas superficiales y subterráneas de la región, por contener concentraciones elevadas de sales que limitan su uso y presencia de residuos tóxicos de minerales pesados provenientes de las actividades mineras, industriales y urbanas.

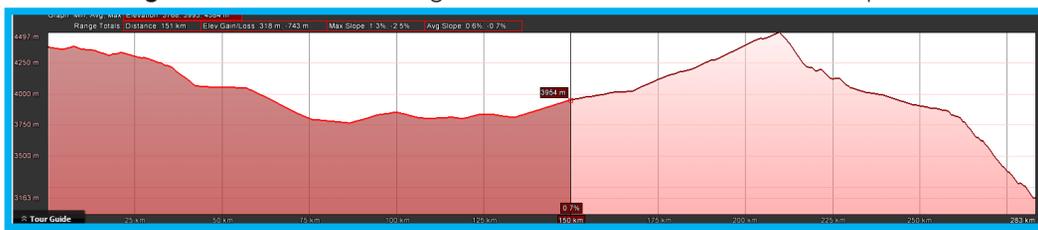
En cuanto a la situación de disponibilidad de agua potable en Tupiza, se describe en la Tabla N° 9.

El perfil derivado del trazo propuesto se presenta en la figura N° 31, donde se observa que la Red de Conducción de agua hacia la población de Tupiza, no solo es por gravedad, sino, necesita que en un tramo el agua sea impulsado por bombeo, debido a las características geomorfológicas y topográficas existentes, como son la presencia de planicies, Pie de Montes, serranías y montañas. Llegándose a obtener un trazo total con las siguientes características:

TRAZADO	DISTANCIA (m)	DISTANCIA (km)
Laguna Natural de Almacenamiento – población de Tupiza	286 189.79	286.19

El perfil superior muestra el trazo para la Red de Conducción por gravedad, hasta un sector determinado, donde se debe construir un Cárcamo de Bombeo (3).

Figura N° 32: Perfil trazo: Laguna Natural de Almacenamiento - Tupiza



Fuente: MMAyA

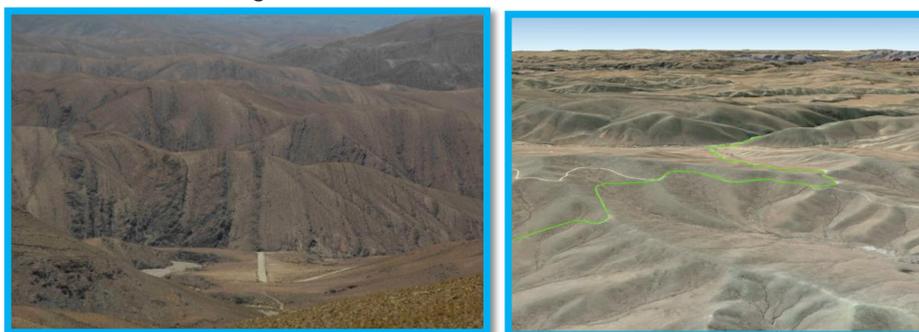
Una alternativa consecuente es seguir el cauce de los ríos. Sin embargo, de igual manera, se tiene que cruzar estas serranías y montañas puesto que no todos los cauces naturales van a desembocar en la misma población de Tupiza.



Estado Plurinacional de Bolivia

MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE Y AGUA

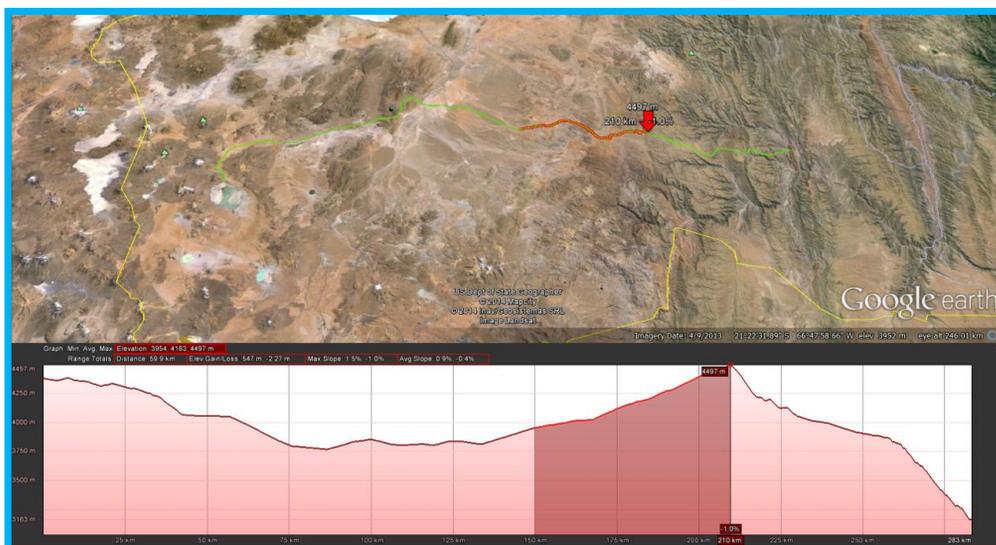
Figura N° 33: Geomorfología existentes en la ruta del trazado hacia la localidad de Tupiza



Fuente: MMAyA

Bajo las características Geomorfológicas del terreno, se tiene previsto la impulsión con bombeo a partir de un Cárcamo de Bombeo (3) para su impulsión hasta la Cota máxima (4497 m) donde debe construirse un reservorio, bajo las siguientes características:

Figura N° 34: Vista panorámica de la región y perfil para el bombeo a partir de un Cárcamo



Fuente: MMAyA



Bombeo:

- Cota máxima = 4497 m
 - o Coordenadas Geográficas: 21° 21' 35.62'' LS – 66° 16' 11.56'' LW
- Cota mínima = 3952 m
 - o Coordenadas Geográficas: 21° 22' 31.89'' LS – 66° 47' 58.66'' LW
- Diferencia de cotas = 545 m.
- Distancia cota máxima - cota mínima = 60 km.

Posteriormente, a partir del reservorio la conducción sería por gravedad hasta la población de Tupiza, según gráfico siguiente:

Figura N° 35: Perfil trazo Reservorio - Tupiza: Diferencia de cotas 4497 - 3165 (1332 m)



Fuente: MMAyA

8.4.2.- Trazo de la Red de Conducción por gravedad hacia Uyuni

El Municipio de Uyuni primera sección municipal de la provincia Antonio Quijarro del departamento de Potosí, geográficamente se encuentra ubicado entre los meridianos 66° 15' a 67° 15' de Longitud Oeste y 19° 20' a 21° 00' de Latitud Sud. La capital ciudad de Uyuni, se encuentra entre los meridianos 66° 52' de Longitud Oeste y 20° 18' de Latitud Sud.

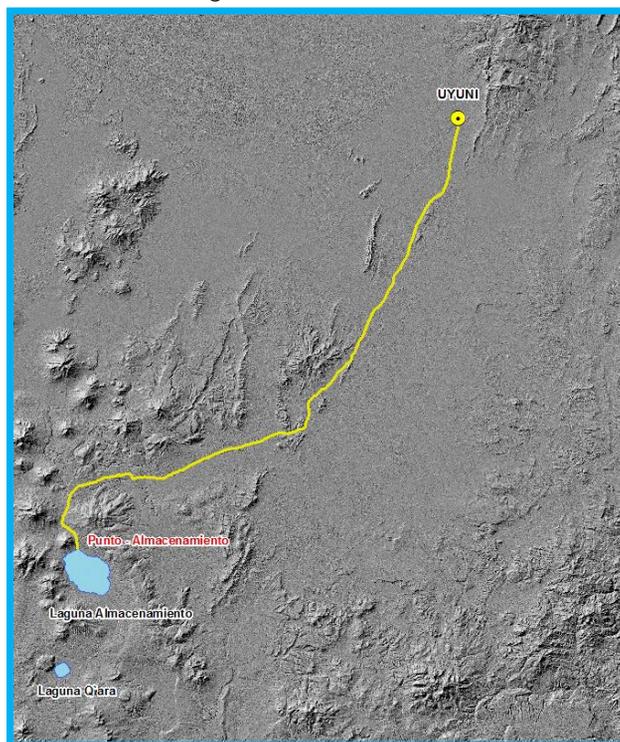
La cobertura de agua potable y de otros servicios son insumos esenciales para mantener la salud y las condiciones de higiene en los hogares. En cuanto a la situación de disponibilidad de agua potable en Uyuni, se describe en la Tabla N° 9.



Estado Plurinacional de Bolivia

MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE Y AGUA

Figura N° 36: Trazo: Laguna Natural de Almacenamiento – Uyuni



Fuente: MMAyA

Según el perfil obtenido, la conducción de agua mediante una Red de Conducción desde la Laguna Natural de Almacenamiento hasta la población de Uyuni, se realizará por gravedad, debido a que existe una diferencia de cotas de 633 m, de la cota máxima con relación a la cota mínima, siendo las características del trazado:

TRAZADO	DISTANCIA (m)	DISTANCIA (km)
Laguna Natural de Almacenamiento - Uyuni	188.502.73	188.50

La imagen siguiente muestra el perfil desde la Laguna Natural de Almacenamiento hasta la población de Uyuni:



Estado Plurinacional de Bolivia

MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE Y AGUA

Figura N° 37: Perfil trazo: Diferencia de cotas 4380 – 3747 (633 m)

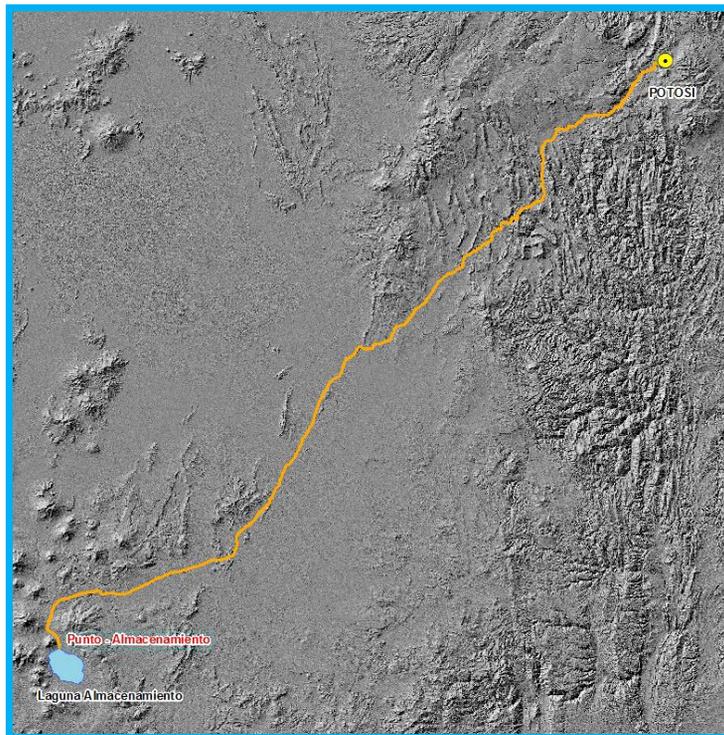


Fuente: MMAyA

8.4.3.- Trazado de la Red de Impulsión hacia la ciudad de Potosí

El crecimiento demográfico que se ha dado en los últimos tiempos en la ciudad de Potosí, ha hecho que se considere una proyección de las fuentes de agua para consumo humano, para lo cual, existe necesidad de buscar nuevas fuentes, para garantizar a la población con el líquido elemento.

Figura N° 38: Trazo: Laguna Natural de Almacenamiento – ciudad de Potosí



Fuente: MMAyA



Estado Plurinacional de Bolivia

MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE Y AGUA

Ante tal situación, una alternativa es la conducción del agua que alumbró en los Bofedales de la Dignidad y la captación y explotación de acuíferos colindantes.

El perfil obtenido sobre el trazo propuesto, denota que la conducción de agua no solo será por gravedad, también, se necesita realizar impulsión a partir de un Cárcamo de Bombeo (4), debido a las características geomorfológicas y topográficas existentes en la región.

Las características del trazo general se presentan a continuación:

TRAZADO	DISTANCIA (m)	DISTANCIA (km)
Laguna Natural de Almacenamiento - Potosí	368 472.89	368.47

Figura N° 39: Perfil trazo: Laguna Natural de Almacenamiento –ciudad de Potosí



Fuente: MMAyA

En una primera etapa la conducción del agua se realizará por gravedad (ver figura N° 38), hasta alcanzar la cota mínima (3582 m), en esta se deberá construir un Cárcamo de Bombeo (4).

Figura N° 40: Geomorfología existente en la ruta del trazo hacia la ciudad de Potosí



Fuente: MMAyA



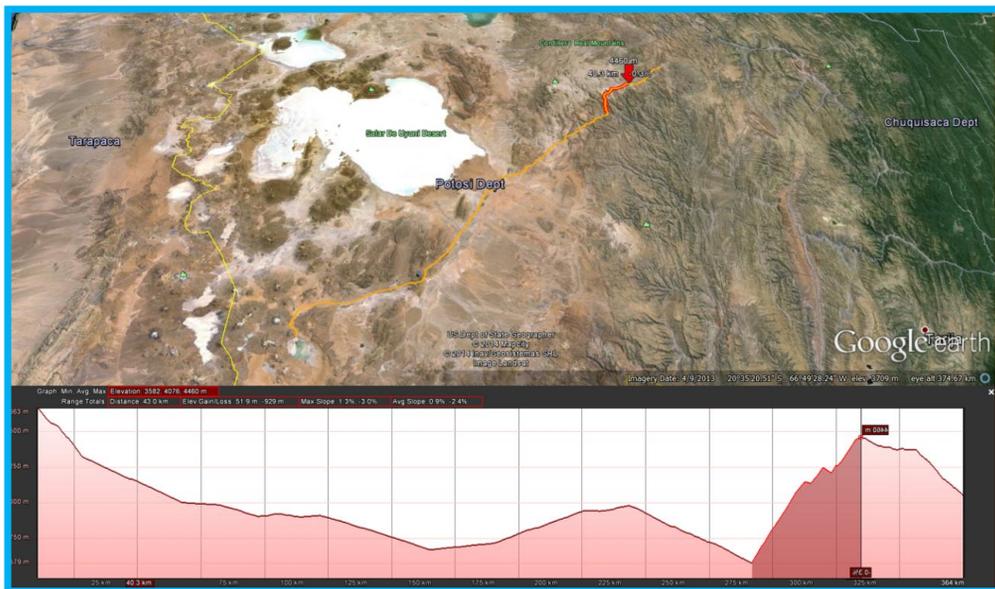
A partir del Cárcamo de Bombeo (4), se tiene previsto la impulsión mediante bombeo, hasta la máxima cota, con las siguientes características:

Bombeo:

- Cota máxima = 4460 m
 - o Coordenadas Geográficas: 19° 46' 24.69'' LS – 66° 00' 30.22'' LW
- Cota mínima = 3582 m
 - o Coordenadas Geográficas: 20° 02' 18.31'' LS – 66° 10' 02.46'' LW
- Diferencia de cotas = 878 m
- Distancia cota máxima - cota mínima = 42.7 km.

Una vez alcanzado la cota máxima (4460 m) el agua deberá ser almacenada en un reservorio.

Figura N° 41: Vista panorámica de la región y perfil para el bombeo a partir de un cárcamo



Fuente: MMAYa

A partir del Reservorio, la conducción se realizará por gravedad hasta alcanzar la ciudad de Potosí, tal como se muestra en la figura siguiente:



Estado Plurinacional de Bolivia

MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE Y AGUA

Figura N° 42: Perfil trazo: Diferencia de cotas 4460 – 4048 (412 m)



Fuente: MMAyA

9.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente informe muestra sólo un bosquejo preliminar de un temario amplio y complicado. La recopilación de la información dispersa ha sido difícil, lo cual, nos muestra que el conocimiento no está accesible de la manera más óptima. Por eso, cabe recomendar que se hagan mayores esfuerzos para recopilar, sintetizar, analizar y hacer accesible la información secundaria existente y que se hagan nuevos esfuerzos para generar información primaria confiable, para adentrarnos en una gestión holística de los recursos hídricos. Por otra parte, es necesaria la centralización y la permanente actualización de esta información, para poder elaborar políticas hídricas consistentes que tomen en cuenta la compleja realidad del país.

- Una de las principales incógnitas a resolver es el volumen de agua contenido en estos cuerpos rocosos a nivel regional, por otra parte, se desconoce con precisión la cantidad de aporte diario o anual hacia la república de Chile por los diferentes sectores fronterizos.
- En el sector de los bofedales del Valle de Silala, actualmente, existe un río artificial creado por canalizaciones hechas por la mano del hombre, superficialmente el agua no podría haber llegado jamás de forma natural a suelo Chileno. El cantón San Pablo de Lipez que le da origen nace y queda en suelo Boliviano, a 7.0 km de la frontera. De manera subterránea tampoco existe interconexión de nuestras aguas con territorio chileno,
- Mediante procesamiento de imágenes del sensor LandSat TM5 de dos fechas contemporáneas coincidentes con el ciclo vegetativo de la vegetación natural y que corresponden a la temporada estival de 1986 y 2010 se pudo establecer la disminución del agua en los bofedales del Valle de Silala, especialmente en época seca hace que las sales disueltas tengan mayor concentración, por lo tanto, se presenten afloramientos salinos en los suelos de estos bofedales (mayoritariamente en bofedal sur).



- Ante la situación de deterioro de los bofedales del Valle de Silala, hace urgente tomar medidas para revertir el daño generado por la canalización artificial, realizada por trabajadores chilenos, que ingresaron arbitrariamente a territorio boliviano y procedieron a excavar canales que puedan fluir esas aguas hacia territorio chileno. Esos canales son zanjias de tierra, en algunos tramos recubiertas de piedra, que tienen una longitud de tres kilómetros y un ancho que no pasa de un metro.
- ✓ Llevar a cabo estudios de prospección geofísica en sectores ya identificados en la región, posteriormente, realizar las perforaciones, de esta manera, completar el estudio hidrogeológico y determinar los parámetros hidráulicos, las características hidráulicas de la roca almacén y los volúmenes disponibles, este aspecto permitirá evaluar los recursos hídricos subterráneos, definir los métodos de explotación y realizar las obras hidráulicas correspondientes que permitan el aprovechamiento de los recursos hídricos.
- ✓ Realizar el Balance Hídrico y los estudios hidrogeológicos e hidrológicos complementarios, para determinar las características del recurso y los volúmenes disponibles, y así establecer la verdadera situación de los recursos hídricos en toda la región.
- ✓ Analizar las posibilidades de aprovechamiento de los recursos hídricos del sudoeste potosino en base a los trazos propuestos, y abastecer de agua para consumo de las poblaciones de Potosí, Tupiza, Uyuni y comunidades por donde pase el tendido del sistema de agua.
- ✓ Elaborar un Protocolo de Muestreo de aguas para toda la región, posteriormente, considerando toda norma científica para estos casos, llevar a cabo el muestreo de agua correspondiente en cada uno de los bofedales, manantiales, vertientes, paleocanales, otros para su análisis fisicoquímico y bacteriológico de acuerdo a NB-512.
- ✓ Elaborar un Sistema de Catastro de todas las vertientes, manantiales, bofedales y sectores con existencia de suelos congelados del área, cuya información recibida deberá ser procesada en un sistema computacional georeferenciado, lo que permitirá un mejor control de los recursos hídricos y manejo adecuado de la información.
- ✓ Generar urgentemente los marcos legales y programáticos adecuados, como una Política Nacional de Recursos Hídricos, la Ley de Aguas y un Plan Nacional de Uso y Conservación de los Recursos Hídricos.



- ✓ Antes de introducir cualquier especie animal a los bofedales norte y sur en el Valle de Silala, calcular la capacidad de carga animal y la soportabilidad de los bofedales.
- ✓ Las instituciones dedicadas a la investigación deben plantearse ahora un nuevo reto en sus estudios que conlleva el seguimiento de las variaciones en extensión y características de estos medios fríos. Aunque en el sudoeste de Potosí se ha determinado que se dan las condiciones térmicas para la existencia de los suelos congelados, queda por establecer la cantidad de agua que puede contener este suelo en estado sólido.

10.- BIBLIOGRAFÍA

SERGEOMIN, 2001b. Estudio de la Geología, Hidrología, Hidrogeología y Medio Ambiente del área de los manantiales del Silala, provincia Sur Lipez, 72 p. La Paz.

SERGEOMIN, 2001a. Estudio de las cuencas hidrográficas de la Cordillera Occidental y Altiplano, Resumen ejecutivo. La Paz, 15 p.

Chaffaut, I. 1998. Precipitations d'altitude, Eaux souterraines et changements climatiques de L'Altiplano Nord-chilien. These presente pour obtenir le grade de Docteur en Sciences, Universite Paris XI Orsay, Octubre 1998, Paris.

Knight Piesold Consulting, 2000. Proyecto San Cristóbal, Provincia de Nor Lipez, República de Bolivia, Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental.

Minera San Cristóbal – MSC, 2006. Gestión de los Recursos Hídricos, Fases de construcción y operación. Toldos, Potosí.

Bazoberry Quiroga. El Mito del Silala. 2003.

Foro Boliviano sobre Medio Ambiente y Desarrollo - FOBOMADE, marzo 2007, Agua y Recurso Hídrico en el Sudoeste de Potosí.

MDSP-JICA (1999) Estudio de evaluación del impacto ambiental del sector minero, en el departamento de Potosí. Mitsui Mineral Development Engineering Co; Ltd. Unico International Corporation.

Periódico Quincenal HORA 25 - N° 70 – 71, del 23 al 31 de diciembre de 2009, autor Luis Antezana Ergueta.

Kempf, 2006. En Conservación y Desarrollo en el suroeste de Potosí, Eds. Olivera, Ergueta y Villca, p. 189-202, La Paz.

Annex 97

Note N° VRE-Cs-58/2016 from the Ministry
of Foreign Affairs of Bolivia to the Senior Advisor
for the Americas of the Ramsar Convention
Secretariat, 27 July 2016

(Original in Spanish, English translation)



ESTADO PLURINACIONAL DE BOLIVIA
MINISTERIO DE RELACIONES EXTERIORES

La Paz, 27 JUL 2016
VRE-Cs-58/2016

Estimada Sra. Rivera

Tengo el agrado de dirigirme a usted en seguimiento a la reunión sostenida en Ginebra en fecha 6 de julio de 2016 con relación al sitio boliviano RAMSAR Los Lipez del cual el bofedal Silala forma parte.

Al respecto, de conformidad con el artículo 3.2 de la Convención de RAMSAR, el Estado Plurinacional de Bolivia desea expresar su preocupación por los cambios negativos que se observan en las características ecológicas del Sitio Los Lipes, bofedal Silala y áreas conexas causados por la canalización artificial de sus manantiales con fines de la explotación de dichas aguas por parte, en primera instancia de una empresa ferrocarrilera que operaba en Chile y actualmente por parte de las industrias mineras que operan en dicho país.

La evidencia con la que contamos nos permite observar que las aguas no renovables del Silala se han visto disminuidas, que los suelos se han visto dañados y que el sistema de aguas y de vida interconectado a dicho bofedal se ha visto negativamente afectados. Debido a que la causa de dichos cambios lastimosamente continúa, nos preocupan de sobremanera los impactos adversos en sus características ecológicas, en la sostenibilidad ambiental del sitio y áreas conexas y la conservación de las aguas fósiles del Silala, tomando en cuenta la alta vulnerabilidad de su ubicación, en una de las regiones más secas del planeta y en un ecosistema único donde las precipitaciones anuales son muy bajas.

En tal virtud, en el contexto de la Recomendación 4.7, mediante la presente deseamos oficializar la solicitud de contar con la asistencia de la Secretaría de RAMSAR a fin de llevar a cabo una Misión Ramsar de Asesoramiento en el sitio Los Lipez y particularmente en el bofedal Silala, a fin de evaluar los impactos negativos y los cambios en el carácter ecológico del sitio ocasionados por la existencia de la canalización artificial de sus aguas y el sobre-uso de las mismas por parte de las empresas mineras de Chile, asimismo solicitamos efectuar un informe que incluya recomendaciones que ayuden al Estado Plurinacional de Bolivia en la preservación y recuperación de las características ecológicas de este humedal. Desde ya nuestro país se compromete en ofrecer el apoyo económico, logístico y técnico que sea necesario para el desarrollo de esta Misión Ramsar de Asesoramiento.

PLURINATIONAL STATE OF BOLIVIA
MINISTRY OF FOREIGN AFFAIRS

La Paz, 27 July 2016
VRE-Cs-58/2016

Dear Mrs. Rivera,

I have the honour to write you, following up on the meeting held in Geneva on 6 July 2016 in connection with the Bolivian RAMSAR site Los Lipez of which the Silala wetland is part.

On this matter, according to Article 3.2 of the RAMSAR Convention, the Plurinational State of Bolivia wishes to express its concern about the negative changes observed as to the ecological characteristics of the Los Lipes Site, the Silala wetland and related areas caused by the artificial channelization of its springs for the purpose of exploiting those waters; first, by a railroad company that operated in Chile and, currently, on the part of the mining industries operating in said country.

The evidence we have allows us to note that the non-renewable waters of the Silala have decreased, that the soils have been damaged, and that the water system and way of life interconnected to said wetland have been negatively affected. Given that the cause for said changes sadly continues, we are greatly concerned about the adverse impact on its ecological characteristics, on the environmental sustainability of the site and related areas, and on the conservation of fossil waters of the Silala, considering the high vulnerability of its location, in one of the driest regions of the planet and in a unique ecosystem where annual precipitations are very low.

Consequently, in the context of Recommendation 4.7, we hereby wish to make an official request for the assistance of the RAMSAR Secretariat in order to conduct a Ramsar Advisory Mission at the Los Lipez site and, particularly, at the Silala wetland, in order to evaluate the negative impacts and changes to the ecological nature of the site caused by the existence of the artificial channelization of its waters and the overuse of the same by the mining companies of Chile. We also request the execution of a report which includes recommendations that help the Plurinational State of Bolivia in the preservation and recovery of this wetland's ecological characteristics. As of now, our country commits to offering the financial, logistical, and technical assistance necessary for executing this Ramsar Advisory Mission.



ESTADO PLURINACIONAL DE BOLIVIA
MINISTERIO DE RELACIONES EXTERIORES

Sería muy importante para nosotros poder contar con el informe de dicha Misión este año, para lo cual mucho agradeceríamos se pueda desarrollar la Misión lo antes posible, y proponemos pueda efectuarse en Octubre de este año.

En nombre del Estado Plurinacional de Bolivia, uno de los países con mayor extensión de humedales inscritos en el mundo, deseo reiterar el firme compromiso de nuestro país con la Convención sobre los Humedales RAMSAR, y en el marco de nuestra Constitución Política y nuestra Ley de la Madre Tierra, continuaremos avanzando en la defensa de la vida.

A tiempo de agradecerle por su amable disponibilidad en reunión sostenida en Ginebra y en espera de su pronta respuesta, reciba nuestros saludos más distinguidos.


Emb. Juan Carlos Alvarado Tejada
VICEMINISTRO
DE RELACIONES EXTERIORES
Ministerio de Relaciones Exteriores
del Estado Plurinacional de Bolivia

A la Señora
María Rivera
Consejera para las Américas
Convención sobre los Humedales RAMSAR
Gland - Suiza

It would be very important for us to have the report of said Mission this year, and we would greatly appreciate if the Mission could be conducted as soon as possible: we propose in October of this year.

On behalf of the Plurinational State of Bolivia, one of the countries having the largest area of registered wetlands in the world, I would like to reiterate our country's firm commitment to the RAMSAR Convention on Wetlands: in the context of our Political Constitution and our own Law of the Mother Earth, we shall continue to advance in the defence of life.

As we thank you for kindly making yourself available at the meeting held in Geneva and await your prompt response, please receive our highest esteem.

(Signature)

(Stamp: Ambassador Juan Carlos Alurralde Tejada, VICE-MINISTER OF FOREIGN AFFAIRS, Ministry of Foreign Affairs of the Plurinational State of Bolivia)

To the Honourable
María Rivera
Advisor for the Americas
RAMSAR Convention on Wetlands
Gland – Switzerland

Annex 98

Ana Paola Castel, *Multi-Temporal Analysis through Satellite Images of the High Andean Wetlands (bofedales) of the Silala Springs, Potosí – Bolivia, September 2017*

(Original in Spanish, English translation)

**DIRECCIÓN ESTRATEGICA DE REIVINDICACIÓN
MARITIMA, SILALA Y RECURSOS HÍDRICOS
INTERNACIONALES
DIREMAR**



**ANÁLISIS MULTI-TEMPORAL MEDIANTE
IMÁGENES DE SATELITE DE LOS
BOFEDALES DE LOS MANANTIALES
DEL SILALA, POTOSI - BOLIVIA**

**ANA PAOLA CASTEL
PROFESIONAL EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA**

SEPTIEMBRE 2017

**STRATEGIC OFFICE FOR MARITIME VINDICATION,
SILALA AND INTERNATIONAL WATER RESOURCES
DIREMAR**



**MULTI-TEMPORAL ANALYSIS
THROUGH SATELLITE IMAGES OF THE
HIGH ANDEAN WETLANDS
(BOFEDALES) OF THE SILALA
SPRINGS, POTOSI - BOLIVIA**

**ANA PAOLA CASTEL
GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS PROFESSIONAL
SEPTEMBER 2017**

Índice

1. Introducción	4
2. Objetivos	4
2.1. Objetivo general	4
2.2. Objetivos específicos	4
3. Descripción del área de estudio	5
4. Marco teórico	6
4.1. Los bofedales: humedales de altura	6
4.2. El rol de los bofedales en el ciclo hidrológico	7
4.3. Los bofedales de los Manantiales del Silala	7
4.4. La vegetación a partir de datos espectrales	8
5. Metodología	10
5.1. Selección de imágenes satelitales	10
5.2. Pre-procesamiento de imágenes satelitales	11
5.3. Clasificación de los bofedales	12
6. Resultados	15
6.1. Imágenes Landsat	15
6.1.1. Superficie multi-temporal de los bofedales	15
6.1.2. Análisis de variabilidad de los bofedales	21
6.1.3. Análisis de Sensibilidad	25
6.2. Imágenes de alta resolución	25
6.2.1. Superficie multi-temporal de los bofedales	25
6.2.2. Análisis de variabilidad de los bofedales	30
6.2.3. Análisis de Sensibilidad	33
7. Discusión	33
8. Conclusiones	38
9. Referencias bibliográficas	40
10. Anexos	43
Anexo 1: Características de las imágenes satelitales utilizadas	43
Anexo 2: Resultados de la clasificación para las imágenes Landsat RGB 4,3,2	44
Anexo 3: Resultados de la clasificación para las imágenes de alta resolución RGB 4,3,2	50
Anexo 4: Perfiles de valores NDVI para los bofedales norte y sur	54

Table of Contents

1	Introduction	4
2	Objectives.....	4
2.1	General objective	4
2.2	Specific objectives.....	4
3	Description of the study area.....	5
4	Theoretical framework.....	6
4.1	The <i>bofedales</i> : high Andean wetlands (<i>humedales</i>)	6
4.2	The role of high altitude wetlands in the hydrological cycle	7
4.3	The high altitude wetlands of the Silala Springs	7
4.4	Vegetation based on spectral data	8
5	Methodology.....	10
5.1	Selecting Satellite Images.....	10
5.2	Pre-processing satellite images.....	11
5.3	Classifying the High altitude wetlands	12
6	Results	15
6.1	Landsat images.....	15
6.1.1	Multi-temporal surface area of the high altitude wetlands.....	15
6.1.2	High altitude wetland variability analysis.....	21
6.1.3	Sensitivity analysis.....	25
6.2	High Resolution Images.....	25
6.2.1	Multi-temporal surface of the high altitude wetlands.....	25
6.2.2	High altitude wetland variability analysis.....	30
6.2.3	Sensitivity analysis.....	33
7	Discussion.....	33
8	Conclusions	38
9	Bibliographic references	40
10	Annexes.....	43
	Annex 1: Characteristics of satellite imagery used	43
	Annex 2: Results of the classification for the Landsat images RGB 4,3,2	44
	Annex 3: Results of the classification for high resolution images RGB 4,3,2.....	50
	Annex 4: NDVI value profiles for high altitude wetlands south and north.....	54

Índice de figuras

Figura 1. Mapa de ubicación de los Manantiales del Silala.....	5
Figura 2. La vegetación en el espectro electromagnético.....	9
Figura 3. Valores NDVI a partir de la luz reflejada por la vegetación en el infrarrojo cercano y rojo visible.	10
Figura 4. Perfil botánico de bofedales del Mauri.....	13
Figura 5. Superficie total de los bofedales (ha). Periodo 1975 - 2000 (estación seca y húmeda) – Imágenes Landsat.....	15
Figura 6. Superficie de los bofedales durante la estación seca. Periodo 1975 – 2000 – Imágenes Landsat.....	16
Figura 7. Superficie de los bofedales durante la estación húmeda. Periodo 1975 – 2000 – Imágenes Landsat.....	16
Figura 8. Superficie total del bofedal sur (estación húmeda y seca). Periodo 1975 – 2000 – Imágenes Landsat.....	17
Figura 9. Superficie total del bofedal norte (estación húmeda y seca). Periodo 1975 – 2000 – Imágenes Landsat.....	17
Figura 10. Superficie total de otros bofedales en la zona (estación húmeda y seca). Periodo 1975 – 2000 – Imágenes Landsat.....	18
Figura 11. Distribución de los valores NDVI (mínima, primer cuartil, media, tercer cuartil y máxima) para toda la serie de tiempo para el periodo 1975 -2000 – Imágenes Landsat.....	21
Figura 12. Distribución de los valores NDVI (mínima, primer cuartil, media, tercer cuartil y máxima) para toda la estación seca del periodo 1975 -2000 – Imágenes Landsat.....	22
Figura 13. Distribución de los valores NDVI (mínima, primer cuartil, media, tercer cuartil y máxima) para toda la estación húmeda del periodo 1975 -2000 – Imágenes Landsat.....	23
Figura 14. Distribución de los valores NDVI mínimo, medio y máximo para el periodo 1975 -2000 – Imágenes Landsat.....	23
Figura 15. Superficie total de los bofedales (ha). Periodo 2002 - 2017 (estación seca y húmeda) – Imágenes de alta resolución.....	25
Figura 16. Mapa de Sensibilidad de los bofedales de los Manantiales del Silala. Periodo 1975 - 2000 – Imágenes Landsat.....	26
Figura 17. Superficie de los bofedales durante la estación seca. Periodo 2002 – 2017 – Imágenes de alta resolución.....	27
Figura 18. Superficie de los bofedales durante la estación húmeda. Periodo 2002 – 2017 – Imágenes de alta resolución.....	28
Figura 19. Superficie total del bofedal norte (estación húmeda y seca). Periodo 2002 - 2017 – Imágenes de alta resolución.....	28
Figura 20. Superficie total del bofedal sur (estación húmeda y seca). Periodo 2002 - 2017 – Imágenes de alta resolución (para los detalles ver Tabla 3).....	29
Figura 21. Superficie total de otros bofedales (estación húmeda y seca). Periodo 2002 - 2017 – Imágenes de alta resolución.....	29
Figura 22. Distribución de los valores NDVI (mínima, primer cuartil, media, tercer cuartil y máxima) para toda la serie de tiempo para el periodo 2002 - 2017– Imágenes de alta resolución.....	30
Figura 23. Distribución de los valores NDVI (mínima, primer cuartil, media, tercer cuartil y máxima) para toda la estación seca durante el periodo 2002 - 2017 – Imágenes de alta resolución.....	31

Figures Index

Figure 1. Map of the Silala Springs location.....	5
Figure 2. Vegetation in the electromagnetic spectrum.....	9
Figure 3. NDVI values based on light reflected by the vegetation in the near infrared and visible red.....	10
Figure 4. Botanical profile of the Mauri.....	13
Figure 5. Total surface area of the high altitude wetlands (ha). 1975 - 2000 period (dry and wet seasons) –Landsat Images.....	15
Figure 6. High altitude wetland surface area during the dry season. 1975 – 2000 period – Landsat images.....	16
Figure 7. High altitude wetland surface area during the wet season. 1975 – 2000 period – Landsat images.....	16
Figure 8. Total surface area of southern high altitude wetland (wet and dry season). 1975 – 2000 period –Landsat images.....	17
Figure 9. Total surface area of northern high altitude wetland (wet and dry season). 1975 – 2000 period –Landsat images.....	17
Figure 10. Total surface area of other high altitude wetlands (wet and dry season). 1975 – 2000 period –Landsat images.....	18
Figure 11. Distribution of NDVI values (minimum, first quartile, mean, third quartile and maximum) for the entire time series for the 1975 -2000 period –Landsat images.....	21
Figure 12. Distribution of NDVI values (minimum, first quartile, mean, third quartile, and maximum) for the dry season of the 1975 -2000 period –Landsat images.....	22
Figure 13. Distribution of NDVI values (minimum, first quartile, mean, third quartile, and maximum) for the wet season of the 1975 -2000 period –Landsat images.....	23
Figure 14. Distribution of minimum, mean and maximum NDVI values for the 1975 -2000 period – Landsat images.....	23
Figure 15. Total surface area of high altitude wetlands (ha). 2002 - 2017 period (dry and wet seasons) – High resolution images.....	25
Figure 16. Silala Springs high altitude wetlands sensitivity map. 1975 - 2000 period –Landsat images.....	26
Figure 17. High altitude wetlands surface area during the dry season. 2002 – 2017 period – High resolution images.....	27
Figure 18. High altitude wetlands surface area during the wet season. 2002 – 2017 period – High resolution images.....	28
Figure 19. Total surface area of northern high altitude wetland (dry and wet season). 2002 - 2017 period – High resolution images.....	28
Figure 20. Total surface area of southern high altitude wetland (dry and wet season). 2002 - 2017 period – High resolution images.....	29
Figure 21. Total surface area of other high altitude wetlands (dry and wet season). 2002 - 2017 period – High resolution images.....	29
Figure 22. Distribution of NDVI values (minimum, first quartile, mean, third quartile, and maximum) for the entire time series for the 2002 - 2017 period – High resolution images.....	30
Figure 23. Distribution of NDVI values (minimum, first quartile, mean, third quartile, and maximum) for the entire dry season for the 2002 - 2017 period – High resolution images.....	31

Figura 24. Distribución de los valores NDVI (mínima, primer cuartil, media, tercer cuartil y máxima) para toda la estación húmeda durante el periodo 2002 - 2017 – Imágenes de alta resolución	32
Figura 25. Distribución de los valores NDVI mínimo, medio y máximo para el periodo 2002 -2017 – Imágenes de alta resolución	33
Figura 26. Mapa de Sensibilidad de los bofedales de los Manantiales del Silala. Periodo 2002 – 2017 – Imágenes de alta resolución.	37

Índice de tablas

Tabla 1. Superficie de los bofedales de los Manantiales del Silala. Periodo 1975 - 2000 – Imágenes Landsat	19
Tabla 2. Superficie de los bofedales de los Manantiales del Silala. Periodo 2002-2017 – Imágenes de alta resolución	19
Tabla 3. Superficie total de los bofedales de los Manantiales del Silala y coeficiente de variabilidad interestacional e interanual. Periodo 1975 – 2000 (izquierda) y 2002 -2017 (derecha).	20
Tabla 3. Valores medios, máximos y mínimos del NDVI - Imágenes de alta resolución.....	24
Tabla 4. Valores medios, máximos y mínimos del NDVI – Imágenes Landsat	24

Índice de fórmulas

Fórmula 1. Ecuación del el Índice Normalizado de Vegetación (NDVI).	8
Fórmula 2. Fórmula para la conversión a Top-of-Atmosphere radiance para los sensores Digital Globe	11
Fórmula 3. Fórmula para la conversión a Top-of-Atmosphere reflectance para los sensores Digital Globe	12
Fórmula 4. Fórmula de corrección atmosférica QUAC	12

Figure 24. Distribution of NDVI values (minimum, first quartile, mean, third quartile and maximum) for the entire wet season during the 2002 - 2017 period – High resolution images.....	32
Figure 25. Distribution of minimum, mean and maximum NDVI values for the 2002 -2017 period – High resolution images.....	33
Figure 26. Silala Spring high altitude wetlands Sensitivity Map. 2002 – 2017 Period – High resolution images.....	37

Table index

Table 1. Surface area of Silala Springs high altitude wetlands. 1975 - 2000 period –Landsat images	19
Table 2. Surface area of Silala Springs high altitude wetlands. 2002-2017 Period – High resolution images	19
Table 3. Total surface of Silala Springs high altitude wetlands and coefficient of inter-seasonal and interannual variability. 1975 – 2000 period (left) and 2002 -2017 period (right).	20
Table 3 (sic). Mean, maximum and minimum NDVI values - High resolution images	24
Table 4 (sic). Mean, maximum and minimum NDVI values –Landsat images	24

Formula index

Formula 1. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) equation	8
Formula 2. Formula for conversion to Top-of-Atmosphere radiance for Digital Globe sensors	11
Formula 3. Formula for conversion to Top-of-Atmosphere reflectance for Digital Globe sensors..	12
Formula 4. QUAC atmospheric correction formula	12

1. Introducción

El presente trabajo se realizó en el marco del contrato por la consultoría en línea N° 01/2017 por el cargo de “Profesional en Sistemas de Información Geográfica”, que establece como producto el “Análisis Multi-temporal de los bofedales”, en el marco de la defensa de los Manantiales del Silala llevado a cabo por la Dirección Estratégica de Reivindicación Marítima, Silala y Recursos Hídricos Internacionales (DIREMAR).

Desde los inicios del siglo 20 se han iniciado distintas actividades de intervención en los Manantiales del Silala con el propósito de la captación y transporte de agua hacia territorio chileno. Se llevaron a cabo importantes trabajos de mampostería en una serie de canales, entre secundarios y primarios, sin tomar en cuenta el efecto de esta infraestructura sobre los bofedales que se formaron en la zona por la presencia de los manantiales que, en un estado natural, podrían haberse mantenido sin cambios importantes durante todo el año, e incluso haber alcanzado una mayor superficie a la que actualmente se observa. Aunque en el lugar se puede observar a simple vista el impacto de la infraestructura en la distribución de los bofedales, no se sabe cuáles han sido los impactos de esta a través de los años, por lo que se ha visto necesario estimar estos impactos por medio de diferentes estudios in situ y a través de métodos indirectos, siendo este trabajo parte de estos esfuerzos.

El presente trabajo busca identificar y evaluar a través de imágenes satelitales los cambios que se hayan podido observar en los bofedales durante del periodo 1975 -2017 producto de las intervenciones artificiales destinadas al transporte y captación de agua en funcionamiento desde el inicio del siglo. Como resultado se ha observado que los bofedales han llegado a un estado de estabilidad hidrológica que depende casi exclusivamente de la disponibilidad de agua proporcionada por las lluvias estacionales en la región. Debido a esta disponibilidad de agua temporal, se observan importantes cambios estacionales en la superficie de los bofedales que corresponden con vegetación activa e inactiva estacionalmente. Debido a esto, un gran porcentaje de la superficie total de los bofedales se puede relacionar con una sensibilidad alta y media a los cambios en la disponibilidad de agua como una disminución de las lluvias o periodos más largos de estiajes a causa del cambio climático, o por otros factores, como cambios en el manejo de los bofedales.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

El objetivo del presente estudio es realizar un análisis multi-temporal por medio de imágenes satelitales para evaluar los cambios y sensibilidad de los bofedales de los Manantiales del Silala durante el periodo 1975 -2017.

2.2. Objetivos específicos

- Determinar la superficie de los bofedales para el periodo 1975-2000 durante la estación húmeda y seca, por medio de imágenes Landsat¹.
- Determinar la superficie de los bofedales para el periodo 2002-2017 durante la estación húmeda y seca, por medio de imágenes de alta resolución.
- Estimar tendencias de cambios a largo plazo en los bofedales.

¹ <https://landsat.gsfc.nasa.gov/about/>

1 Introduction

This report was prepared in the context of the online consultancy contract No. 01/2017 requesting a “Geographic Information Systems Professional” to conduct a “Multi-Temporal Analysis of the High Andean High altitude wetlands (*Bofedales*)” in connection with the defense of the Silala Springs led by the Strategic Office for Maritime Vindication, Silala and International Water Resources (DIREMAR).

Since the beginning of the 20th century, different intervention activities have been carried out in the Silala Springs in order to collect and transport water to the Chilean territory. Important masonry works were carried out in a series of canals, between secondary and primary channels, without taking into consideration the effect of this infrastructure on the high Andean wetlands (“*bofedales*”). These wetlands were formed in the area thanks to the presence of springs and which, in a natural state, should have remained without experiencing major changes throughout the year and could have even extended to a larger area than that currently observed. While at first glance the impact of this infrastructure on the distribution of the high altitude wetlands is observable, its impact over the years is unknown, therefore it has been necessary to estimate this impact through different studies conducted in situ and indirect methods. This work is part of such efforts.

This report aims to identify and assess through satellite images any changes observed in the high altitude wetlands between 1975 and 2017 as a result of the artificial interventions and activities in operation since the beginning of the [20th] century transporting and collecting water. The high altitude wetlands have reached a state of hydrological stability that depends almost exclusively on the availability of water provided by the region’s seasonal rains. Due to this availability of seasonal rainwater, important seasonal changes are noted with respect to the high altitude wetlands’ surface area in connection with the seasonally active and inactive vegetation. In light of this, a large percentage of the total high altitude wetland area has a high and medium sensitivity to any changes in the availability of water, such as a drop in rainfall or longer dry periods due to climate change or other factors, such as changes in how the high altitude wetlands are managed.

2 Objectives

2.1 General objective

The objective of this study is to conduct a multi-temporal analysis using satellite imaging in order to assess any changes and the sensitivity of the Silala Springs high altitude wetlands during 1975 -2017.

2.2 Specific objectives

- Determine the surface area of the high altitude wetlands for the 1975-2000 period during the wet and dry seasons, using Landsat images.¹
- Determine the surface area of the high altitude wetlands for the 2002-2017 period during the wet and dry seasons, using high resolution images.
- Estimate long-term change trends in the high altitude wetlands.

¹ <https://landsat.gsfc.nasa.gov/about/>

- Determinar la sensibilidad de los bofedales durante el periodo 1982-2000 y 2002-2017.

3. Descripción del área de estudio

Los bofedales de los Manantiales del Silala se encuentran en el Departamento de Potosí, en la Provincia Sud Lípez frontera con Chile, en el Área Protegida Sitio Ramsar “Los Lípez” y la Reserva Nacional Eduardo Avaroa, entre los paralelos 22°59'5.83” y 22°1'36.92” latitud sur y meridianos 68°1'49.86” y 67°59'41.726” longitud oeste. Se encuentran a una altura entre los 4250 y 4500 m.s.n.m., en la Puna desértica (FAN, 2003) donde predominan los sistemas de tipo Puna xerofítica², de pajonal de glaciés y de piedemontes, además de tholares salobres de suelos más arenosos y más secos (Navarro et al., 2007). El clima es árido seco, típico de una zona desértica de alta montaña, con una gran amplitud térmica entre el día y la noche de entre -15°C a 29°C y un promedio de 14.2°C, siendo durante los meses de abril a agosto cuando se registran las temperaturas más bajas y diciembre a marzo las más altas. La precipitación es de tipo unimodal, con una estación de lluvia durante los meses de diciembre a marzo, con una media anual de 59.1 mm/año (Claros, 2005).

Los bofedales en los manantiales del Silala se dividen en los bofedales del sur y del norte, que se ubican en las mesetas volcánicas de ignimbritas y depósitos de sedimentos fluvio-glaciales de donde afloran los manantiales (SERGEOMIN, 2003) entre pendientes que oscilan entre los 1.50 % y 2.80%, respectivamente (estimación propia). Estos bofedales se encuentran intervenidos por medio de una serie de canales artificiales para el transporte de agua hacia el territorio chileno (Figura 1).

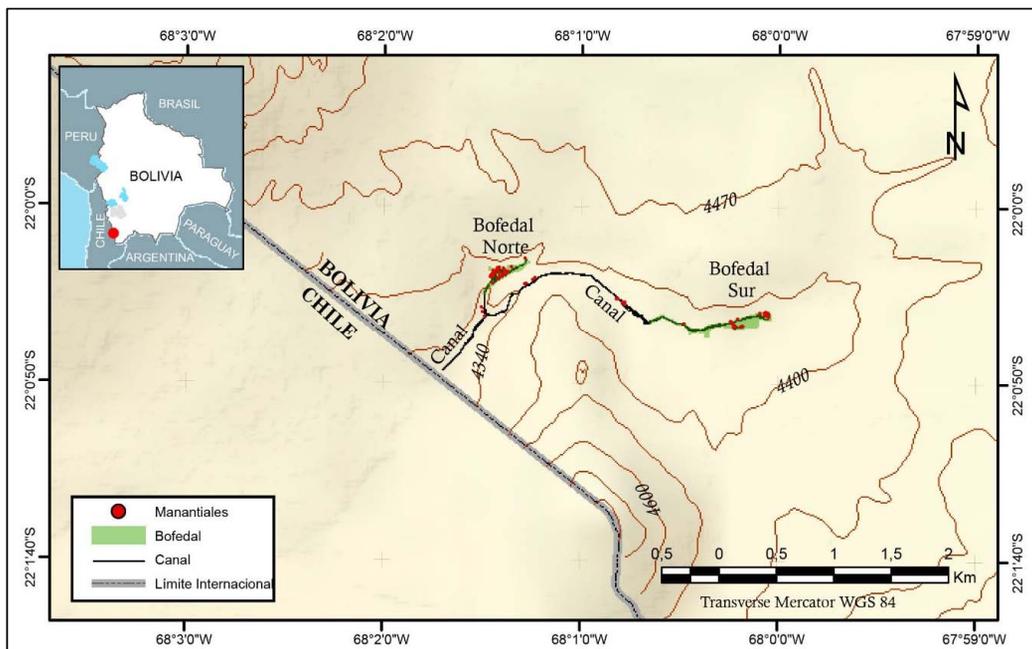


Figura 1. Mapa de ubicación de los Manantiales del Silala

² Vegetación adaptada a la escasez de agua.

- Determine the sensitivity of the high altitude wetlands during the 1982-2000 and 2002-2017 periods.

3 Description of the study area

The high altitude wetlands of the Silala Springs are located in the Department of Potosí, in the Sud Lípez Province on the border with Chile, in the Ramsar Site Protected Area “Los Lípez” and the National Reserve Eduardo Avaroa, between parallels 22°59'5.83” and 22°1'36.92” latitude south and meridians 68°1'49.86” and 67°59'41.726” longitude west. They are located at an altitude between 4250 and 4500 m.a.s.l., in the desert-like Puna region (FAN, 2003) where xerophytic Puna-type systems,² glacia grassland and piedmont (foothill) systems, as well as brackish *tolares* of sandier and drier soils (Navarro et al., 2007) predominate. The climate is arid and dry, typical of a high mountain desert area, with a wide temperate range varying between -15°C and 29°C between day and night, and an average of 14.2°C. The lowest temperatures are recorded from April to August and the highest from December to March. Precipitations are unimodal, with a rainy season from December to March, and an annual average of 59.1 mm/year (Claros, 2005).

The high altitude wetlands of the Silala springs are divided into the southern and northern high altitude wetlands, located on volcanic plateaus of ignimbrite and fluvio-glacial sediment deposits from which the springs originate (SERGEOMIN, 2003) between slopes ranging between 1.50% and 2.80%, respectively (author’s estimation). These high altitude wetlands have been interfered by a series of artificial channels that transport water to the Chilean territory (Figure 1).

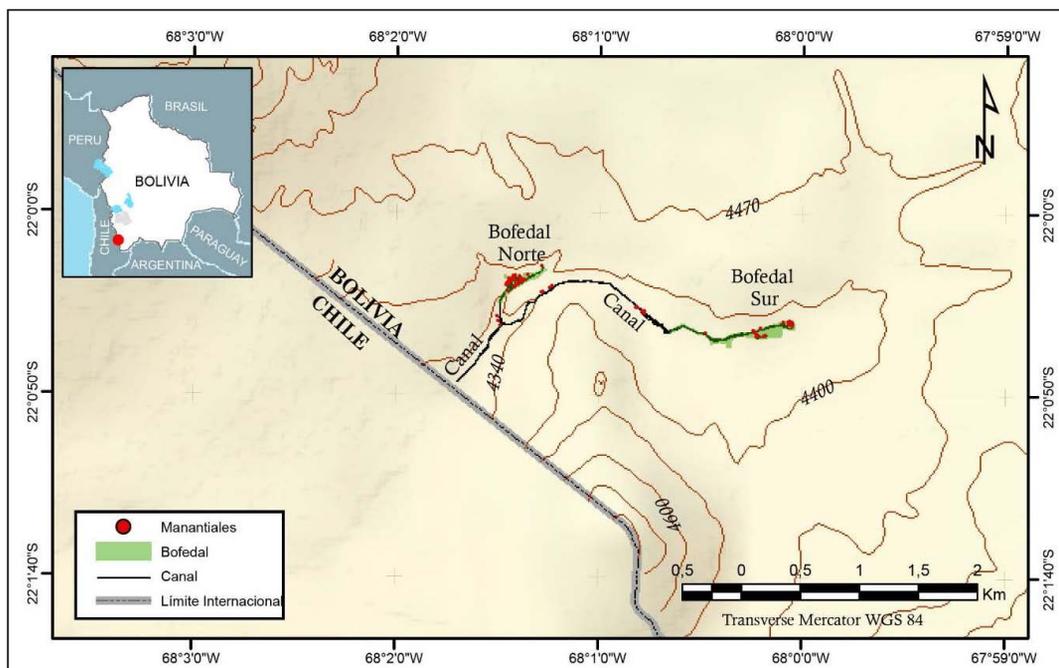


Figure 1. Map of the Silala Springs' location

²Vegetation adapted to water scarcity.

4. Marco teórico

4.1. Los bofedales: humedales de altura

Los humedales son ecosistemas sujetos a una inundación permanente o periódica y a la saturación prolongada de suelos que permiten el establecimiento de especies hidrófitas³ y el desarrollo de suelos hídricos (Ji, 2007). La Convención Ramsar (2006) los define a los humedales como zonas donde el agua es el principal factor controlador del medio, de vida vegetal y animal, donde la capa freática se halla en la superficie terrestre o cerca de ella, es decir, a las superficies cubiertas de aguas, ya sea de régimen natural o artificial, permanente o temporal, estancadas o corrientes, dulces o salobres, cuya profundidad no sobrepase los 6 metros. Según la Convención, los bofedales corresponden a turberas no arboladas.

Los bofedales son considerados humedales de altura que dan lugar a las llamadas turberas naturales altoandinas o peatlands de vegetación siempre verde, asociadas a un aprovisionamiento de agua permanente, predominantemente agua subterránea (Navarro and Maldonado, 2002; Ruthsatz, 2012; Squeo et al., 2006). Generalmente se forman en terrenos planos, en fondos de valles inclinados y cuencas de poca profundidad, donde su vegetación contrasta notablemente con la de sus alrededores debido a su alta biomasa y gran cobertura, que es principalmente controlada por la cantidad y disponibilidad de agua, especialmente durante periodos secos (Squeo et al., 2006). Sus nutrientes provienen de los minerales disueltos que transporta el agua de infiltración, por lo que la disponibilidad de agua permite el avance la vegetación de bofedal; mientras que en condiciones de sequía prolongada desarrolla otras especies, que se expanden cuando se evidencia un desecamiento o una degradación de los bofedales (Ruthsatz, 2012).

Los bofedales se encuentran entre los ecosistemas más productivos y únicos del planeta, proveedores de servicios ambientales claves que aportan a la diversidad andina de montaña y el modo de vida de las poblaciones de altura. Se considera que durante los asentamientos de hace 5000 años atrás, la ubicación de las villas y aldeas en la Puna, estaban determinadas por la proximidad a los bofedales (Lumbreras, 2006 citado en Fonkén, 2014), en algunos casos convirtiéndose en “paisajes culturales”, es decir, ecosistemas mantenidos por la actividad del hombre (Fonkén, 2014). Al mismo tiempo, estos son ecosistemas extremadamente frágiles, sensibles a los cambios climáticos y a las alteraciones provocadas por el hombre (Squeo et al., 2006).

Los bofedales también tienen un papel importante en el mantenimiento de una diversidad biológica única e endémica en la Cordillera de los Andes que depende de los bofedales para el pastoreo, anidación y como fuente de agua debido a su alto contenido de humedad en el suelo (Squeo et al., 2006; Ruthsatz, 2012). Además, son considerados como importantes acumuladores de carbono (Segnini et al., 2010 citado en Fonkén, 2014; Hribljan et al., 2015). A pesar de poseer una superficie más pequeña que los humedales de las latitudes norte, estos poseen niveles significativamente más altos de acumulación de carbón (Earle et al., 2003), formando una parte integral del sistema global debido a su habilidad de secuestrar dióxido de carbono y emitir metano, alcanzando una reserva del 30% del carbón terrestre en suelo (Frolking et al., 2011).

³ Plantas acuáticas o que viven en suelos inundados. Su vegetación es en parte determinada por la profundidad del agua.

4 Theoretical framework

4.1 The *bofedales*: high Andean wetlands (*humedales*)

Wetlands (*humedales*) are ecosystems that are permanently or periodically inundated and susceptible to a prolonged saturation of the soil that allows for the settling of hydrophyte species³ and the development of hydric soils (Ji, 2007). The Ramsar Convention (2006) defines wetlands as areas where water is the main controlling factor of the environment, flora and fauna, where the phreatic layer (water table) is located on or near the ground surface, namely, areas covered by water, whether natural or artificial, permanent or temporary, static or flowing, fresh or brackish, the depth of which at low tide does not exceed 6 meters. According to the Convention, *bofedales* or high altitude wetlands are non-forested peatbogs.

High altitude wetlands or *bofedales* are considered high Andean wetlands from which so-called natural high Andean peatbogs or evergreen high altitude wetlands originate, associated with a permanent water supply, predominantly groundwater (Navarro and Maldonado, 2002; Ruthsatz, 2012; Squeo et al., 2006). They are generally formed on flat terrains, in the bottom of inclined valleys and shallow basins, where their vegetation contrasts sharply with that of their surroundings due to their high biomass and large coverage, which is mainly controlled by the quantity and availability of water, especially during dry periods (Squeo et al., 2006). Their nutrients come from the dissolved minerals transported by the infiltration water, therefore the availability of water allows for the progression and expansion of the high altitude wetland's vegetation; during prolonged droughts they develop other species, which spread when there is evidence of desiccation or a degradation of the high altitude wetlands (Ruthsatz, 2012).

High Andean wetlands are among the most productive and unique ecosystems on the planet, the providers of key environmental services that contribute to Andean mountain diversity and the way of life of high altitude populations. It is thought that during the settlements of 5000 years ago, the location of the villages and hamlets in the Puna were determined by their proximity to the high altitude wetlands (Lumbreras, 2006 cited in Fonkén, 2014), in some cases becoming "cultural landscapes", namely, ecosystems maintained by human activity (Fonkén, 2014). At the same time, these ecosystems are extremely fragile, sensitive to climate changes and human-induced alterations (Squeo et al., 2006).

The high altitude wetlands also play an important role in keeping a unique and endemic biological diversity in the Andes that depends on the high altitude wetlands for grazing, nesting and as a source of water due to their high soil moisture content (Squeo et al., 2006; Ruthsatz, 2012). They are also considered important carbon accumulators (Segnini et al., 2010 cited in Fonkén, 2014; Hribljan et al., 2015). Despite having a smaller area than the wetlands located in northern latitudes, these high altitude wetlands have significantly higher levels of carbon accumulation (Earle et al., 2003), forming an integral part of the global system due to their ability of capturing carbon dioxide and emitting methane, reaching a reserve of 30% of terrestrial carbon in soil (Frolking et al., 2011).

³ Aquatic plants or plants that live in inundated soils. Their vegetation is in part susceptible to the depth of the water.

Los bofedales también juegan un papel importante en los ciclos de la materia y en la calidad del agua, a través de la retención, transformación y/o remoción de sedimentos, de nutrientes y contaminantes (Ecosur, 2005).

4.2. El rol de los bofedales en el ciclo hidrológico

Por su formación los bofedales se destacan como reguladores hídricos donde se desarrollan procesos de acumulación de agua y recarga de acuíferos (Fonkén, 2014). Los bofedales se forman en áreas que reciben agua del derretimiento de glaciares, ríos, lagos y acuíferos subterráneos (Ruthsatz, 2012), además de la precipitación y el almacenamiento de considerables cantidades de agua en las cuencas altas de la cordillera, son importantes para la manutención estructural y funcional del bofedal.

Varios estudios destacan la importancia de estos como reguladores del sistema hídrico y de recarga de acuíferos, al ser depósitos evidentes de acumulación de agua subterránea provenientes de la infiltración. Son considerados como grandes embalses naturales por su gran capacidad de almacenamiento y lenta transmisión de agua (Earle et al., 2003; Otto et al., 2011). Este ecosistema regula el flujo pendiente abajo, debido a que su escorrentía es lenta y en muchos casos se infiltra a través del subsuelo para retomar su curso a niveles inferiores (Fonkén, 2014). Los bofedales cumplen funciones importantes asociadas al ciclo hidrológico regional y local, como: 1) el control y regulación de corrientes acuíferas, 2) control de la erosión, 3) asimilación de agua, y 4) la provisión de fuentes-sumidero de sedimentos (Earle et al., 2003). Al ser dependientes de la fluctuación de los cursos naturales permanentes y temporales, los bofedales tienen un comportamiento estacional, lo que se puede evidenciar al presentar cambios dramáticos de acuerdo a la estación y a las variaciones anuales (Mitsch, 1993).

De acuerdo a la relación de disponibilidad de agua o el gradiente freático, distintos estudios clasifican a los bofedales en tres tipos: 1) bofedales de mayor humedad o inundable, donde predominan las especies acuáticas por mantenerse permanentemente inundados. Sus suelos son únicos, con gran cantidad de materia orgánica y la vegetación predominante es *Oxychloe andina*, *Distichia muscoides* y *Plantago tubulosa*. 2) bofedales de humedad intermedia que reciben suficiente agua durante el año, y a menudo tienen una mayor actividad forrajera; 3) los bofedales de menor humedad o de zona periférica, que reciben agua de manera semipermanente, que pueden secarse en invierno y se encuentran influenciados por especies de estepa (Buttolph, 1998; Beck et al., 2010; Alzérreca et al., 2001).

4.3. Los bofedales de los Manantiales del Silala

En la región alto-andina los bofedales son tipificados como hidromórficos neutros (siempre húmedos) dominados por especies de juncáceas de *Oxychloe Andina* y *Distichia Muscoides* (Alzérreca et al., 2001), sin embargo, en el sudoeste del país principalmente predominan los bofedales de *Oxychloe andina*, debido al clima fuertemente árido y afectado por un volcanismo reciente (Ruthsatz, 2012). Entre las especies que generalmente la acompañan están las ciperáceas *Zameioscirpus muticus* y *Phylloscirpus deserticola*, que forman cojines planos y más someros que no dan origen a una turba considerable (Ruthsatz, 2012), además de ser especies asociadas con condiciones más salinas (Squeo et al., 2006) y con la capacidad de mantener el contenido más alto de materia orgánica reportado en bofedales (Cooper et al., 2015).

High altitude wetlands also play an important role in matter cycles and water quality, through retention, transformation and/or removal of sediments, nutrients and pollutants (Ecosur, 2005).

4.2 The role of high altitude wetlands in the hydrological cycle

Due to their formation, the high altitude wetlands stand out as water regulators where water accumulation and aquifer recharge processes occur (Fonkén, 2014). The high altitude wetlands are formed in areas that receive water from the melting of glaciers, from rivers, lakes and underground aquifers (Ruthsatz, 2012), as well as from rainfall and the storage of considerable quantities of water in the upper basins of the *cordillera* (mountain range), which are important for the high altitude wetlands' structural and functional sustenance.

Several studies note the importance of high altitude wetlands as regulators of the water system and aquifer recharge, as they are deposits of groundwater accumulation originating from infiltration. They are considered large natural reservoirs because of their large water storage capacity and slow water transmission (Earle et al., 2003; Otto et al., 2011). This ecosystem regulates the downward slope flow because its runoff is slow and in many cases infiltrates through the subsoil to resume its course at lower levels (Fonkén, 2014). High altitude wetlands perform important functions in connection with the regional and local hydrological cycle, such as: 1) controlling and regulating the aquifer flows, 2) controlling erosion, 3) water assimilation, and 4) providing sediment-sinkhole sources (Earle et al., 2003). In light of the fact that they are dependent on the fluctuation of permanent and temporary natural courses, high altitude wetlands have a seasonal behavior, evidenced by dramatic changes according to the season and annual variations (Mitsch, 1993).

Depending on the relation of water availability or the phreatic gradient, different studies classify high altitude wetlands into three types: 1) wetter or floodable high altitude wetlands, where aquatic species predominate because they remain permanently inundated. Their soils are unique, and have a large amount of organic matter, where the predominant vegetation is *Oxychloe andina*, *Distichia muscoides* and *Plantago tubulosa*; 2) intermediate moisture high altitude wetlands that receive sufficient water during the year and often have greater forage activity; and 3) lower moisture high altitude wetlands or peripheral zone high altitude wetlands that receive water on a semi-permanent basis, which can dry up in the winter and are influenced by steppe species (Buttolph, 1998; Beck et al., 2010; Alzérreca et al., 2001).

4.3 The high altitude wetlands of the Silala Springs

In the high Andean region, high altitude wetlands are classified as neutral hydromorphic (always wet) dominated by the Juncaceous species of *Oxychloe Andina* and *Distichia Muscoides* (Alzérreca et al., 2001), however, in the southwest of the country the *Oxychloe andina* high altitude wetlands mainly predominate, due to the highly arid climate and affected by a recent volcanism (Ruthsatz, 2012). Among the species that are usually found in the high altitude wetlands are the cyperaceous *Zameioscirpus muticus* and *Phylloscirpus deserticola*, which form flatter and shallower cushions that do not produce considerable peat (Ruthsatz, 2012), as well as species associated with more saline conditions (Squeo et al., 2006) that have the capacity of maintaining the highest content of organic matter reported in high altitude wetlands (Cooper et al., 2015).

Sin embargo, los bofedales de los Manantiales del Silala se encuentran intervenidos por medio de una red de canales artificiales para la captación y transporte de agua hacia el territorio chileno. Estos atraviesan gran parte de los humedales, separando hidráulicamente sub-sistemas de humedales y capas freáticas más bajas en los suelos de turba, que implica una reducción en la disponibilidad de agua para la vegetación, creando corredores de pastos invasivos (DHI, 2017). De este modo, se considera que estos se encuentran en un estado de segmentación o fraccionamiento, conformados por vegetación subhúmeda y/o temporalmente abnegada de transición hacia otro tipo de vegetación.

4.4. La vegetación a partir de datos espectrales

El comportamiento espectral de la vegetación muestra una reducida reflectividad en las bandas visibles del espectro electromagnético, mientras que presenta una elevada reflectividad en el infrarrojo cercano (Figura 2) (Chuvienco, 1996). La identificación de los bofedales por percepción remota es posible porque estos contrastan con la configuración de vegetación circundante al tener una cobertura vegetal usualmente mucho mayor al 70% y una alta productividad (Squeo et al., 2006).

Para mejorar la discriminación entre coberturas en una imagen satelital y generar nueva información se utilizan diferentes combinaciones multiespectrales, para los cuales se han desarrollado índices que aprovechan las posibilidades del sensor al revelar ciertas características de la vegetación. Los diferentes tipos vegetales, el contenido de agua, pigmento, contenido de carbón, nitrógeno, y otras propiedades se distinguen en diferentes zonas del espectro, proporcionando información sobre la salud, estrés ambiental y otras características, que pueden ser descritas por diferentes índices de vegetación.

Uno de estos índices es el **Índice Normalizado de Vegetación (NDVI)**, el cual ha sido ampliamente usado en el monitoreo y detección de vegetación, cambios en el uso del suelo, estrés ambiental y degradación, por su robustez, base científica y aplicabilidad para representar el comportamiento de la vegetación (Anderson et al., 1993; Lu et al., 2004; Wessels et al.2004; Chen y Rao, 2008 citado en Hartman et al., 2016). En el estudio de los bofedales alto andinos se lo ha utilizado para la evaluación de la biomasa, tomando en cuenta los bajos efectos atmosféricos debido a la altitud en que se encuentran y a la baja influencia de un suelo subyacente por la densa cobertura vegetal de los bofedales de altura (Otto et al., 2011).

El Índice NDVI es derivado de la banda espectral del infrarrojo cercano (NIR) y la banda roja (RED) por la siguiente formula:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Fórmula 1. Ecuación del el Índice Normalizado de Vegetación (NDVI).

Donde:

NIR = Infrarrojo cercano

RED = Banda roja del espectro electromagnético

However, the high altitude wetlands of the Silala Springs have been interfered by way of a network of artificial channels to capture and transport water to the Chilean territory. These channels cross a large part of the high altitude wetlands, hydraulically separating sub-systems of wetlands and lower water tables in peat soils, which signifies a reduction in the availability of water for vegetation, creating invasive pasture corridors (DHI, 2017). Consequently, they are considered to be in state of segmentation or fractionation, made up of vegetation that is sub-humid vegetation and/or temporarily flooded transitioning toward other types of vegetation.

4.4 Vegetation based on spectral data

The spectral behavior of vegetation shows reduced reflectance in the visible bands of the electromagnetic spectrum, while having high near-infrared reflectance (Figure 2) (Chuvienco, 1996). Identifying the high altitude wetlands by remote perception is possible because they contrast with the configuration of surrounding vegetation, as they have a usually much higher vegetative cover, normally higher than 70%, and a high productivity (Squeo et al., 2006).

In order to improve distinguishing between different coverages in satellite imaging and obtain new information, different multispectral combinations are used, for which indexes have been developed that take advantage of the possibilities the sensor has to offer when revealing certain characteristics of the vegetation. The different plant types, water content, pigment content, carbon content, nitrogen content, and other properties are identified in different areas of the spectrum, providing new information on the area's health, environmental stress and other characteristics that can be described by different vegetation indexes.

One of these indexes is the **Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)**, which has been widely used in monitoring and detecting vegetation, changes in soil use, environmental stress and degradation, thanks to its robustness, scientific basis and applicability in terms of representing the behavior of vegetation (Anderson et al., 1993; Lu et al., 2004; Wessels et al. 2004; Chen and Rao, 2008 cited in Hartman et al., 2016). In the study of high Andean wetlands, this index has been used to evaluate biomass, taking into account the low atmospheric effects due to the altitude at which the high altitude wetlands are found and the low influence of an underlying soil due to the dense vegetative cover of high altitude wetlands (Otto et al., 2011).

The NDVI is derived from the near infrared (NIR) spectral band and the red band (RED) using the following formula:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Formula 1. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) equation.

Where:

NIR = Near infrared

RED = Electromagnetic spectrum red band

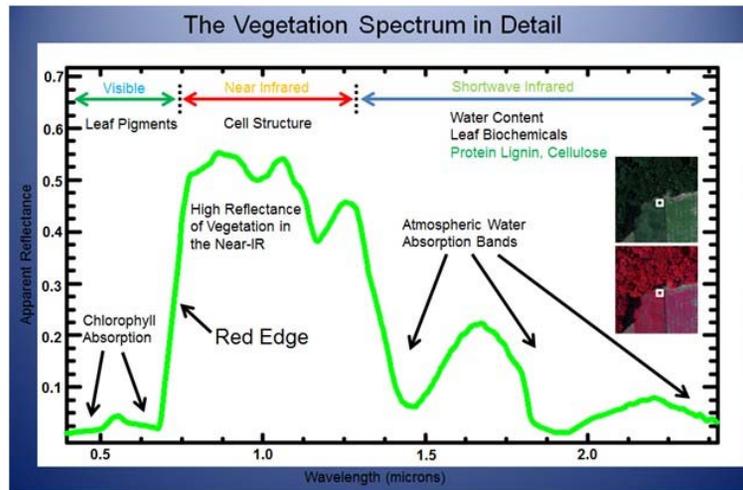


Figura 2. La vegetación en el espectro electromagnético. Fuente: Elowitz, Mark R. "What is Imaging Spectroscopy (Hyperspectral Imaging)?" www.markelowitz.com/Hyperspectral.html (ENVI, 2013).

Las plantas absorben energía de la luz solar con la ayuda de la clorofila, un pigmento verde que se encuentra en las hojas de las plantas para poder realizar su fotosíntesis. El espectro de la vegetación absorbe en la longitud de onda roja y azul, refleja en la verde y fuertemente en el infrarrojo cercano (NIR) (ENVI, 2013).

Al utilizar el infrarrojo cercano, Índice NDVI es considerado como un indicador que describe la "verdosidad" de la vegetación o su actividad fotosintética, que a su vez está relacionada con la densidad relativa, actividad y vigor o salud de la vegetación (Figura 3). Se ha demostrado que el NDVI ofrece una buena correlación con algunos parámetros vitales de la vegetación, como la biomasa total, los índices de verdor de la hoja y los índices de superficie foliar (Curran, 1980; Jensen, 1983 citado en Chuvieco, 1996). Así mismo, este índice puede indicar las condiciones de humedad de la vegetación y su comportamiento fenológico, que es altamente sensible a la variación del clima (USGS, 2004; Bradley y Salyler, 1999).

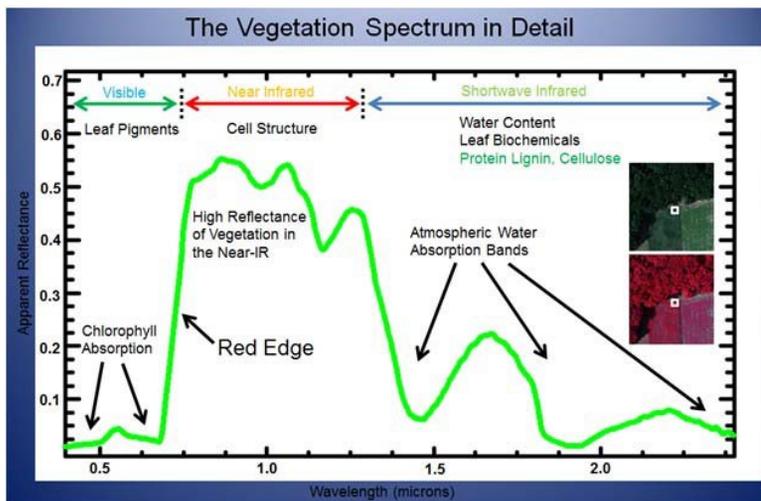


Figure 2. Vegetation in the electromagnetic spectrum. Source: Elowitz, Mark R. "What is Imaging Spectroscopy (Hyperspectral Imaging)?" www.markelowitz.com/Hyperspectral.html (ENVI, 2013).

Plants absorb energy from sunlight with the help of chlorophyll, a green pigment found in plant leaves for photosynthesis. The vegetation spectrum absorbs at the red and blue wavelength, reflects in the green wavelength and reflects strongly in the near infrared (NIR) (ENVI, 2013).

When using the near infrared, the NDVI is considered as an indicator that describes the "greenness" of the vegetation or its photosynthetic activity, which in turn is related to the vegetation's relative density, activity and vigor or health (Figure 3). NDVI has been shown to provide a good correlation with some of the vegetation's vital parameters, such as total biomass, the leaf greenness indexes, and foliar surface indexes (Curran, 1980; Jensen, 1983 cited in Chuvieco, 1996). This index can also indicate the vegetation's moisture conditions and phenological behavior, which is highly sensitive to climate variation (USGS, 2004; Bradley and Salyer, 1999).

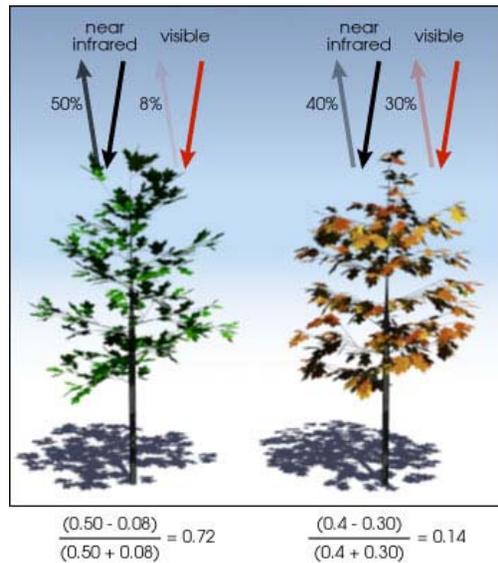


Figura 3. Valores NDVI a partir de la luz reflejada por la vegetación en el infrarrojo cercano y rojo visible.

La vegetación sana (izquierda) absorbe la mayor parte de la luz visible y refleja una gran parte de la luz en el infrarrojo cercano. La vegetación degradada o escasa (derecha) refleja más la luz visible y menos la luz en el infrarrojo cercano (Weier and Herring, 2000).

Los valores del Índice varían entre +1.0 a -1.0, donde la vegetación dispersa, arbustos y pastizales o cultivos senescentes, pueden dar lugar a valores del índice moderados de 0.2 a 0.5, aproximadamente. Valores altos del Índice, entre 0.6 a 0.9, corresponden a vegetación densa como la encontrada en bosques o cultivos en su etapa de máximo crecimiento (USGS, 2004). Aunque estos valores no puedan traducirse directamente en magnitudes físicas, si indican una valoración ordinal, donde los valores altos o bajos del Índice corresponden a valores altos o bajos de reflectividad, respectivamente (ENVI, 2013).

5. Metodología

5.1. Selección de imágenes satelitales

5.1.1. Imágenes Landsat

Para la serie de datos de imágenes Landsat se consideró un total de 18 escenas Path 233 Row 075, 9 años, 2 escenas por año, estación húmeda (noviembre-marzo) y seca (abril-septiembre) para el periodo 1975 – 2000. Las diferencias estacionales fueron consideradas para caracterizar las diferencias entre estaciones y los efectos de una sequía prolongada. Se escogieron imágenes libres de nubes o con porcentajes muy bajos de cobertura que no afectan directamente al área de estudio. Las imágenes son de tipo L1T, las cuales se encuentran radiométricamente calibradas y ortorectificadas usando puntos de control y un modelo digital de elevación, obtenidas desde el servidor <http://earthexplorer.usgs.gov/> de la US Geological Survey. Todas las imágenes fueron proyectadas al datum WGS84 UTM zona 19 sur. Otros detalles de las características de las imágenes utilizadas se pueden encontrar en el Anexo 1.

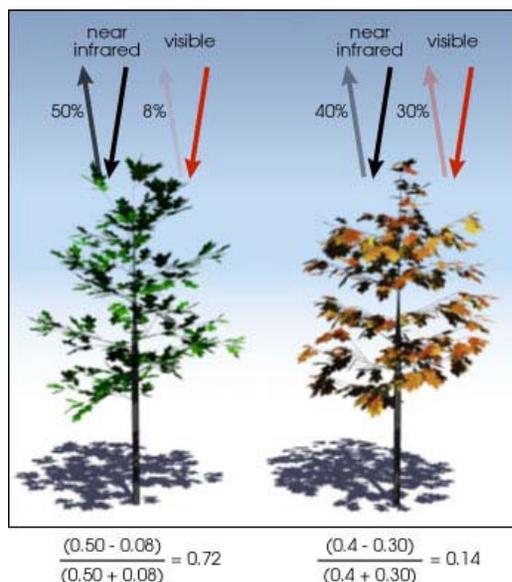


Figure 3. NDVI values based on light reflected by the vegetation in the near infrared and visible red. Healthy vegetation (left) absorbs the greater part of visible light and reflects a large part of light in the near infrared. Degraded or scarce vegetation (right) reflects more visible light and less light in the near infrared (Weier and Herring, 2000).

Index values range between +1.0 and -1.0, where the sparse vegetation, shrubs and grasslands or senescent crops can yield moderate index values from approximately 0.2 to 0.5. High index values, between 0.6 and 0.9, correspond to dense vegetation such as that found in forests or crops at their highest growth stage (USGS, 2004). While these values do not translate directly into physical magnitudes, they do indicate an ordinal valuation, where high or low index values signify high or low reflectance values, respectively (ENVI, 2013).

5 Methodology

5.1 Selecting Satellite Images

5.1.1 Landsat images

A total of 18 Path 233 Row 075 scenes, in 9 years, 2 scenes per year, taken in the wet season (November-March) and dry season (April-September) were considered for the series of Landsat imaging data for the 1975 – 2000 period. Seasonal differences were taken into consideration in order to characterize the differences between the seasons and the effects of a prolonged drought. Images free of clouds or images with very low percentages of coverage that do not directly affect the study areas were chosen. The images are L1T type, which are radiometrically calibrated and orthorectified using control points and a digital elevation model, obtained from the server <http://earthexplorer.usgs.gov/> of the US Geological Survey. All images were projected onto the WGS84 UTM zone 19 south datum. Other details concerning the characteristics of the images are described in Annex 1.

5.1.2. Imágenes de alta resolución

Para la serie de datos de imágenes de alta resolución se consideró un total de 13 escenas, 9 años para el periodo 2002-2017. Aunque se tomó en cuenta la estacionalidad climática, la selección de imágenes de los distintos años se limitó a la disponibilidad de fechas, tipo de sensor y resolución, así como fechas libres de nieve y nubes. Las imágenes fueron obtenidas de distintas fuentes desde servidores europeos con representantes en el país. Las características de las imágenes se detallan en el Anexo 1.

5.2. Pre-procesamiento de imágenes satelitales

Para interpretar los valores de pixel en términos cuantitativos en valores absolutos comparables entre las diferentes fechas de análisis, sensores y escenas para las imágenes Landsat y de alta resolución se realizó:

1. La registración imagen a imagen usando 28-100 puntos de control generados automáticamente y asistidos manualmente en el caso de las imágenes Landsat, procurando obtener un error RMS ≤ 0.70 . Para este proceso se usó una imagen GLS Landsat ortorectificada, para el grupo de imágenes Landsat, y la fecha base 10 de octubre 2016 Pléiades ortorectificada y georreferenciada. Las imágenes de alta resolución n° 2-8 y 10 (Anexo 1) fueron previamente ortorectificadas y georreferenciadas en base al modelo de elevación ASTER GDEM de 30 metros de resolución.
2. Se realizó la conversión de valores de número digital (ND) a valores de reflectancia ToA (Top-of-Atmosphere reflectance) en base a la información encontrada en el archivo de metadatos de cada imagen y el archivo los valores de corrección proporcionada para cada imagen de alta resolución.

Para las imágenes de alta resolución de Digital Globe (imágenes 2-8 y 10 - Anexo 1) primero se realizó la corrección radiométrica absoluta a valores de radiancia ToA (Top-of-Atmosphere radiance) para cada banda recomendada por la empresa (Digital Globe, 2017) para este tipo de sensores, por medio de la siguiente fórmula:

$$L = GAIN * DN * \left(\frac{abscalfactor}{effectivebandwidth} \right) + OFFSET$$

Fórmula 2. Fórmula para la conversión a Top-of-Atmosphere radiance para los sensores Digital Globe

Donde:

L = Radiancia Top-of-atmosphere del pixel en una banda espectral específica ($W\mu m^{-1} m^{-2} sr^{-1}$)

Gain = Ganancia de una banda espectral

DN = Valor digital del pixel

Offset = Sesgo o bias de una banda espectral

Abscalfactor = Factor de cálculo absoluto en una banda específica

Effectivebandwidth = Ancho de banda en una banda específica

5.1.2 High resolution images

For the high resolution imaging data series, a total of 13 scenes, in 9 years for the 2002 – 2017 period, were considered. Although climatic seasonality was taken into consideration, the selection of images from the different years was limited to the availability of dates, sensor type and resolution, as well as snow- and cloud-free dates. Images were obtained from different sources from European servers with representatives in the country. The characteristics of the images are detailed in Annex 1.

5.2 Pre-processing satellite images

In order to interpret the pixel values in quantitative terms in comparable absolute values between the different analysis dates, sensors and scenes for the Landsat images and the high resolution images, the following was carried out:

1. Image to image recording using 28-100 control points generated automatically and manually assisted in the case of the Landsat imagery, ensuring to obtain an RMS error of ≤ 0.70 . For this process, we used an orthorectified GLS Landsat image, for the group of Landsat images, and the base date 10 October 2016, orthorectified and georeferenced Pleiades image [sic]. The high resolution images Nos. 2-8 and 10 (Annex 1) were previously orthorectified and georeferenced based on the ASTER GDEM elevation model of 30 meters of resolution.
2. The conversion of digital number (DN) values to ToA (Top-of-Atmosphere) reflectance values was carried out based on information found in the metadata file of each image and the correction values file provided for each high resolution image.

With respect to the Digital Globe high resolution images (images 2-8 and 10 - Annex 1), the absolute radiometric correction to ToA (Top-of-Atmosphere) radiance values was first carried out for each band recommended by the company (Digital Globe, 2017) for this type of sensors, using the following formula:

$$L = GAIN * DN * \left(\frac{abscalfactor}{effectivebandwith} \right) + OFFSET$$

Formula 2. Formula for conversion to Top-of-Atmosphere radiance for Digital Globe sensors

Where:

L = Top-of-atmosphere radiance of the pixel in a specific spectral band ($W\mu m^{-1} m^{-2} sr^{-1}$)

Gain = Gain of a spectral band

DN = Pixel digital number value

Offset = Bias of a spectral band

AbsCalFactor = Absolute calculation factor in a specific band

Effectivebandwith = Bandwidth of a specific band

Luego, se realizó la conversión a valores de reflectancia ToA mediante la fórmula:

$$\rho_{\lambda_{\text{Band}}} = \frac{L_{\lambda_{\text{Band}}} \cdot d_{\text{ES}}^2 \cdot \pi}{E_{\text{sun}}_{\lambda_{\text{Band}}} \cdot \cos(\theta_s)}$$

Fórmula 3. Fórmula para la conversión a Top-of-Atmosphere reflectance para los sensores Digital Globe

Donde:

L = radiancia para cada banda calculada con la formula

d_{es} = distancia tierra-sol en AU para la fecha correspondiente

E_{sun} = irradiancia exoatmosferica media para cada banda (se utilizó Thuillier, 2003 citado en Digital Globe, 2017)

θ_s = angulo solar zenith (90-elevación media del sol)

3. Para reducir los efectos de la atmosfera en el momento de la captura de la escena se aplicó la corrección atmosférica Quac disponible en ENVI (Bernstein et al., 2012). Este algoritmo determina los parámetros de compensación atmosférica directamente de la información que ofrece la escena. Su principio es la determinación de los parámetros offset y gain para obtener la reflectancia (Fórmula 4). Esta corrección empírica ha sido ampliamente utilizada y testada con vegetación otorgando óptimos resultados (Dewi y Trisakti, 2017; Mandanici et al., 2015)

$$\rho_{\text{SUP}} = \text{Gain}(L_{\text{TOA}} - \text{Offset})$$

Fórmula 4. Fórmula de corrección atmosférica QUAC

Donde:

L = bandas de reflectividad ToA

Offset = valor mínimo de reflectancia para cada banda

Gain = ratio entre el promedio de los espectros de reflectancia de referencia y el promedio de los espectros de los pixeles observados en la escena.

4. Cálculo del índice NDVI (Fórmula 1) para cada fecha.

5.3. Clasificación de los bofedales

5.3.1. Clasificación no supervisada y post-processing

Para la discriminación y delimitación de los bofedales se utilizó la combinación de bandas infrarrojo RGB 4,3,2, que resalta la vegetación, y las combinaciones de imágenes composite RGB 4/NDVI/2 y RGB 4/NDVI/5 (Landsat) para resaltar los distintos estados de “verdosidad” o actividad de la vegetación de los bofedales. Al mismo tiempo, como base para la identificación de los bofedales del Silala se utilizó a los dos principales bofedales, norte y sur (Figura 1), y se consideró el perfil botánico de la vegetación de los bofedales del Altiplano (Coronel, 2010 - Figura 4), en las que se puede observar predominantemente el pasto higrófilo estacionalmente anegado (tipo 3), la vegetación

Subsequently, the conversion to ToA reflectance values was carried out, using the following formula:

$$\rho_{\lambda_{\text{Pixel,Band}}} = \frac{L_{\lambda_{\text{Pixel,Band}}} \cdot d_{\text{ES}}^2 \cdot \pi}{E_{\text{sun}}_{\lambda_{\text{Band}}} \cdot \cos(\theta_s)}$$

Formula 3. Formula for conversion to Top-of-Atmosphere reflectance for Digital Globe sensors

Where:

L = Radiance for each band calculated with the formula

d_{es} = Earth-sun distance in AU for the relevant date

E_{sun} = Mean exoatmospheric solar irradiance for each band (Thuillier, 2003 was used, cited in Digital Globe, 2017)

θ_s = Zenith solar angle (90-mean solar elevation)

3. In order to reduce the atmospheric effects during the moment when the scene was being captured, the Quac atmospheric correction available in ENVI was applied (Bernstein et al., 2012). This algorithm determines the atmospheric compensation directly based on the information provided by the scene. Its principle is to determine the offset and gain parameters in order to obtain the reflectance (Formula 4). This empirical correction has been widely used and tested on vegetation, giving optimal results (Dewi and Trisakti, 2017; Mandanici et al., 2015)

$$\rho_{\text{SUP}} = \text{Gain}(L_{\text{TOA}} - \text{Offset})$$

Formula 4. QUAC atmospheric correction formula

Where:

L = ToA reflectance bands

Offset = minimum reflectance value for each band

Gain = ratio between the average of reference reflectance spectrums and the average of spectrums of pixels observed in the scene.

4. Calculation of NDVI index (Formula 1) for each date.

5.3 Classifying the High altitude wetlands

5.3.1 Unsupervised and post-processing classification

In order to distinguish and delimit the high altitude wetlands, the combination of infrared bands RGB 4,3,2, which highlights the vegetation, and the combinations of composite images RGB 4/NDVI/2 and RGB 4/NDVI/5 (Landsat) were used to highlight the different states of “greenness” or activity of the high altitude wetlands’ vegetation. At the same time, as a base for identifying the Silala high altitude wetlands, the two main high altitude wetlands, northern and southern, were used (Figure 1), and the botanical profile of the vegetation of the *Altiplano*’s high altitude wetlands was considered (Coronel, 2010 - Figure 4), where one can observe predominantly the seasonally flooded hygrophyllic grass (type 3), aquatic vegetation (type 4), flooded hygrophyllic grass (type 6),

acuática (tipo 4), pasto higrófilo estacionalmente anegado (tipo 6), junto con pequeños parches de bofedal siempre anegado (tipo 5); procurando no considerar vegetación en los extremos del perfil.

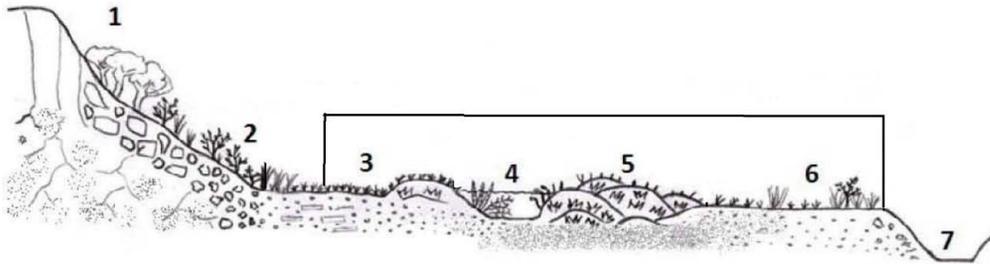


Figura 4. Perfil botánico de bofedales del Mauri.

1) Kewiñares altioplánico occidentales de *Polylepis tarapacana* 2) Tolares representados por *Parastrephia lepidophylla* en asociación con *Tetraglochin cristatus* y *Festuca dilichophylla* 3) Pasto higrófilo estacionalmente anegado compuesto por *Scirpus deserticola*, *Deyeuxia curvula*, *D.rigescens* y *Plantago tubulosa* 4) Vegetación acuática de aguas mineralizadas compuestas principalmente por *Lilaeopsis macloviana*, *Lachemilla diplophylla* y *Ranunculus uniflorus* 5) Bofedal siempre anegado por aguas mineralizadas compuesto por almohadillas compactas de *Oxychloe andina* y en menor proporción *Distichia muscoides* 6) Pasto higrófilo estacionalmente anegado compuesto por *Deyeuxia curvula*, *D.rigescens* con abundante paja brava 7) Cuerpo de agua principal (Coronel, 2010).

Para la clasificación de las imágenes satelitales se aplicó el método de clasificación no supervisada de Jenks Natural Breaks Optimization (Jenks, 1967; Morsy et al., 2016; Gavazzi et al., 2016; Anchang et al., 2016). En este método las clases se basan en agrupaciones naturales inherentes en los datos, donde se identifican los puntos de quiebre escogiendo los saltos de clase que agrupa mejor los valores similares y maximiza las diferencias entre clases. Se clasificaron ≤ 18 clases para las distintas fechas, en los cuales los límites que dividen las clases se establecen donde hay relativamente grandes saltos en los valores (ESRI, 2017). En cada fecha se consideró en la clasificación los valores más altos en el rango NDVI, que representan mayor actividad y por tanto mayor disponibilidad de agua, diferenciando la vegetación del humedal de otras en el área de estudio. Debido a que los bofedales de la zona se encuentran en gran parte fraccionados por la presencia de canales, se considera que la vegetación clasificada incluye vegetación en transición de tipo 3, 4 y 6, de acuerdo a la Figura 4.

Posteriormente, como parte de la aplicación del método de post-procesamiento, se consideró la influencia de la resolución espacial sobre la escala de mapeo aplicando la unidad mínima cartografiable (MUC) de clasificación digital de Tobler (1987). Este método propone un mínimo de 2 píxeles necesarios en la determinación de una categoría a cartografiar, la cual es equivalente a 0.36 ha (3.600 m²) para una imagen de resolución espacial de 30 metros, y de 1 a 100 m² para las imágenes de alta resolución. Debido a que se ha definido que en el área de estudio la unidad de mapeo es de aproximadamente 10 m², no se aplicó un método de post-procesamiento para las imágenes Landsat, manteniendo los resultados de la clasificación intactos. Sin embargo, para las imágenes de alta resolución se aplicó un filtro kernel de 4x4 (Majority Filtering) para eliminar el efecto salt & pepper de píxeles individuales y aislados. Finalmente, el resultado de la clasificación se convirtió a polígonos para el cálculo de la superficie.

along with small patches of permanently flooded high altitude wetland (type 5), ensuring not to consider vegetation in the profile's ends.

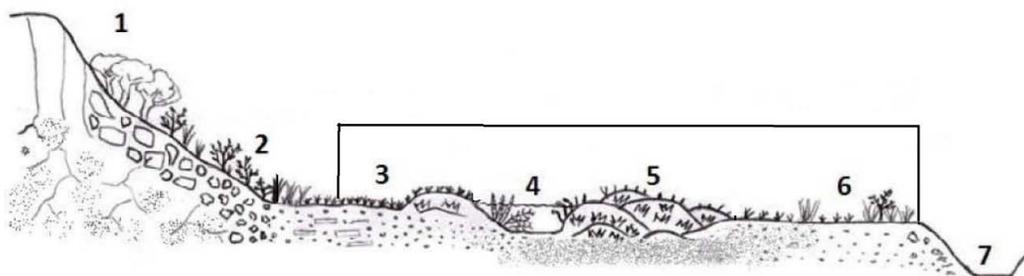


Figure 4. Botanical profile of the Mauri.

1) Western high plateau Kewiñares of *Polylepis tarapacana*. 2) *Tolares* (shrub-like vegetation) represented by *Parastrephia lepidophylla* in association with *Tetraglochin cristatus* and *Festuca dilichophylla*. 3) Seasonally flooded hygrophyllic grass composed of *Scirpus deserticola*, *Deyeuxia curvula*, *D. rigescens* and *Plantago tubulosa*. 4) Aquatic vegetation from mineralized waters composed mainly of *Lilaeopsis macloviana*, *Lachemilla diplophylla* and *Ranunculus uniflorus*. 5) High altitude wetland permanently flooded by mineralized waters composed of compact clumps of *Oxychloe andina* and to a lesser extent *Distichia muscoides*. 6) Seasonally flooded hygrophyllic grass composed of *Deyeuxia curvula*, *D. rigescens* with abundant *paja brava* (*Panicum prionitis*). 7) Main body of water (Coronel, 2010).

The unsupervised classification of Jenks Natural Breaks Optimization (Jenks, 1967; Morsy et al., 2016; Gavazzi et al., 2016; Anchang et al., 2016) was applied in order to classify the satellite images. Under this method, classes are put into natural groupings inherent to and based on the data, where break points are identified by choosing the class shifts in order to best group together the similar values and maximize the differences between the classes. ≤ 18 classes were classified for the different dates, in which the limits that divide the classes were set in those places where there are relatively large jumps in the values (ESRI, 2017). The classification of the highest values in the NDVI range, namely, those representing greater activity and therefore greater water availability, were considered for each date, differentiating the wetland's vegetation from others in the study area. Given that the high altitude wetlands in the area are, in large part, fractioned by the presence of channels, the classified vegetation is considered to include vegetation in transition type 3, 4 and 6, according to Figure 4.

Subsequently, as part of the application of the post-processing method, the influence of spatial resolution on the mapping scale was considered, applying the minimum mapping unit (MMU or MUC for its acronym in Spanish) of the Tobler digital classification (1987). This method proposes a minimum of 2 pixels necessary to determine a category to be mapped, which is equivalent to 0.36 ha (3,600 m²) for a spatial resolution image of 30 meters, and from 1 to 100 m² for high resolution images. Since the mapping unit in the study area has been defined as approximately 10 m², no post-processing method was applied for Landsat images, keeping the classification results intact. However, a 4x4 (Majority Filtering) filter kernel was applied for high resolution images in order to eliminate the salt & pepper effects of individual and isolated pixels. Finally, the results of the classification were converted into polygons for surface area calculation.

5.3.2. Superficie y variabilidad total y estacional (tendencias)

El cálculo de la superficie total de los bofedales se ha realizado a partir de la conversión de la clasificación obtenida a polígonos, los cuales se los ha organizado como: bofedal norte, bofedal sur y otros bofedales (referido a otros polígonos de vegetación también clasificada como bofedal).

Para realizar el análisis de variabilidad, se han extraído los valores NDVI de cada polígono delimitado como bofedal norte y sur en las distintas fechas, para construir una serie de tiempo. Se ha aplicado un análisis para la detección de cambios al obtener la media, máximas y mínimas de cada fecha y realizar la comparación año-estación/año-estación. Esta diferencia ha sido evaluada a través de distintos gráficos exploratorios. Asimismo, para observar la distribución de los valores NDVI en cada fecha se presentan los datos en gráficos box-plot de la serie completa y por estaciones, los cuales resumen: la mínima, el primer cuantil, la media, tercer cuantil y la máxima.

Los análisis inicialmente son divididos por las diferencias de resolución en los datos (imágenes Landsat e imágenes de alta resolución), dado que se asume existe un mayor número de píxeles mixtos⁴ en las imágenes Landsat que en las imágenes de alta resolución. Se asume que estas diferencias son en parte minimizadas al tomar valores medios en los análisis estadísticos.

Por otro lado, también se debe tomar en consideración las diferencias en los sensores, en los cuales incluso las bandas de la misma región del espectro pueden tener diferentes longitudes de onda o diferentes funciones de respuesta espectral, los cuales pueden llevar a diferencias en los diferentes valores de pixel para una misma cobertura (ENVI, 2017).

5.3.3. Sensibilidad de los bofedales e influencia de los canales

La sensibilidad a los cambios en la disponibilidad de agua en los bofedales es estimada a partir de las variaciones interestacionales e interanuales para toda la serie de tiempo analizada. Para su cálculo se utiliza la función Sum Cell Statistics⁵ de ArcGis 10. Para la simplificación de los resultados se ha asignado el valor de 1 a toda la vegetación clasificada como bofedal. El resultado indica que donde se presente una mayor frecuencia de la presencia de los bofedales, esta corresponde a una mayor estabilidad a través del tiempo, y por lo tanto, una menor sensibilidad a la disponibilidad de agua; mientras una menor frecuencia de la presencia de los bofedales corresponde a una mayor sensibilidad a cambios relacionados con la disponibilidad del agua. Estos resultados son presentados para los dos periodos estudiados, según las diferencias de resolución de las imágenes.

⁴ Un pixel mixto es un elemento representado en el pixel que ocupada por más de un tipo de cobertura. Existen dos situaciones: 1) los píxeles que se ubican en los bordes de una gran cobertura reflejaran un valor mezclado, 2) cuando un objeto es relativamente más pequeño comparado a la resolución espacial del sensor (Klein Gebbinck et al., 1998).

⁵ Esta función computa la suma de todas las celdas raster de los archivos de entrada para representarlos como una salida.

5.3.2 Total and seasonal surface area and variability (trends)

Calculating the total surface area of the high altitude wetlands was done by converting the obtained classification into polygons, which were organized as follows: northern high altitude wetland, southern high altitude wetland, and other high altitude wetlands (referring to other vegetation polygons that were also classified as high altitude wetlands).

In order to conduct the variability analysis, the NDVI values were extracted from each polygon delimited as northern high altitude wetland and southern high altitude wetland on the different dates, in order to build a time series. An analysis was conducted in order to detect changes by obtaining the mean, maximums and minimums of each date and comparing year-season/year-season. This difference has been evaluated using different exploratory graphics. Additionally, in order to identify the distribution of the NDVI values on each date, the data is shown in box-plot graphics for the complete series and by seasons, which summarize: the minimum, the first quartile, the mean, the third quartile, and the maximum.

The analyses are initially divided by differences in the data resolution (Landsat images and high resolution images), as it is assumed there is a higher number of mixed pixels⁴ in the Landsat images than in the high resolution images. It is assumed that these differences are in part minimized by taking the mean values in the statistical analyses.

On the other hand, the differences in the sensor must also be taken into consideration, in which bands that are in the same spectrum region could have different wavelengths or different spectral response functions, which could lead to differences in the different pixel values for the same coverage (ENVI, 2017).

5.3.3 Sensitivity of high altitude wetlands and influence of the channels

Sensitivity to changes in water availability in the high altitude wetlands is estimated based on the inter-seasonal and interannual variations for the entire analyzed time series. The Sum Cell Statistics⁵ function of ArcGis10 was used to calculate sensitivity. In order to simplify the results, the value of 1 was assigned to any vegetation classified as high altitude wetland. The result indicates that where there is a greater frequency of the presence of high altitude wetlands, there is a greater stability over time and, therefore, less sensitivity to water availability; whereas where there is a lesser frequency of the presence of high altitude wetlands, there is a greater sensitivity to changes relating to water availability. These results are presented for both studied periods, according to the differences in the imaging resolution.

⁴ A mixed pixel is an element represented in the pixel that is used for more than one type of coverage. There are two occurrences: 1) pixels located on the border of a large coverage will reflect a mixed value, 2) when an object is relatively small compared to the sensor's spatial resolution (Klein Gebbinck et al., 1998).

⁵ This function calculates the sum of all raster cells of the input files to represent them as an output.

6. Resultados

6.1. Imágenes Landsat

6.1.1. Superficie multi-temporal de los bofedales

Los resultados de la clasificación de los bofedales para la obtención de la superficie total durante el periodo 1975 – 2000 muestran que, en general, existe una considerable variabilidad entre la estación seca y húmeda en un mismo año y de año a año. No obstante, no se observa una tendencia de cambio importante durante todo el periodo, es decir, la superficie de los bofedales, a pesar de mostrar importantes cambios estacionales, se ha mantenido en un mismo rango de superficie durante el periodo de tiempo estudiado.

La leve tendencia al incremento que se puede observar en la Figura 5 se debe principalmente a la menor superficie captada durante 1975, esto debido a la menor resolución espacial del sensor para esta fecha de la estación seca.

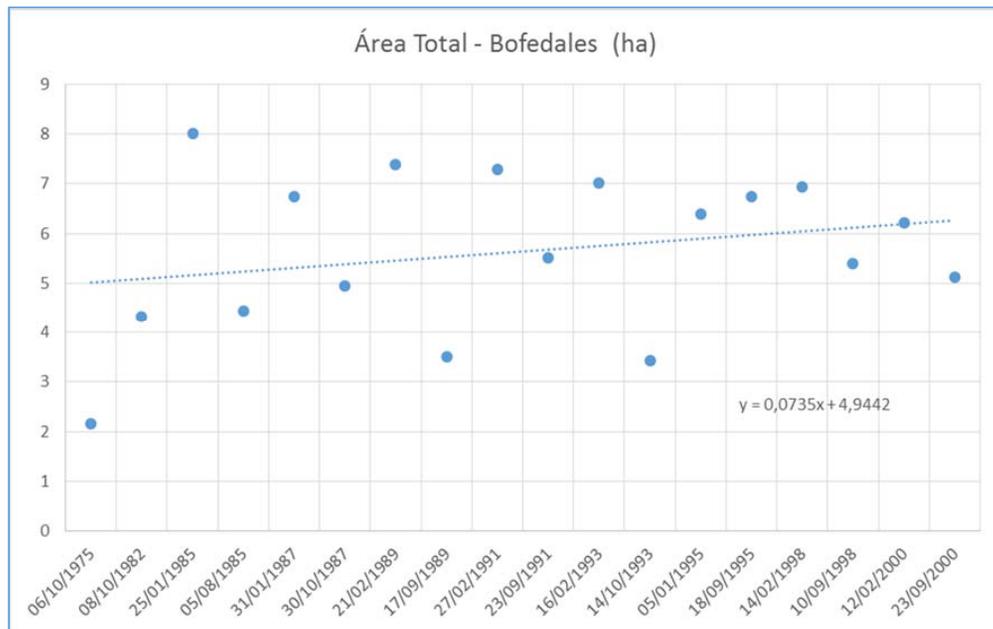


Figura 5. Superficie total de los bofedales (ha). Periodo 1975 - 2000 (estación seca y húmeda) – Imágenes Landsat (ver Tabla 1)

Durante la estación seca (Figura 6) se puede observar que existe una leve tendencia al incremento en superficie, especialmente entre los últimos años de la serie estudiada (1995 a 2000). Este comportamiento parece estar directamente relacionado con la tendencia a la reducción de la superficie observada durante la estación húmeda (Figura 6). Se debe observar que en general se ha clasificado una mayor superficie de los bofedales durante la estación húmeda (Figura 7), esto debido a que los valores NDVI durante la estación seca llegan a ser muy bajos, comparables al de cualquier otra vegetación circundante en la zona; sin embargo, para realizar la diferenciación entre

6 Results

6.1 Landsat images

6.1.1 Multi-temporal surface area of the high altitude wetlands

The results of the classification of the high altitude wetlands to obtain the total surface area during the 1975 – 2000 period show that, in general, there is considerable variability between the dry and wet season within the same year and from year to year. Nevertheless, no significant change trend is noted during the entire period; namely, the surface area of the high altitude wetlands, despite showing important seasonal changes, has remained within the same surface area range during the studied time period.

The slight trend to increase noted in Figure 5 is mainly due to the smaller surface area captured in 1975, due to the sensor's lower spatial resolution for that date of the dry season.

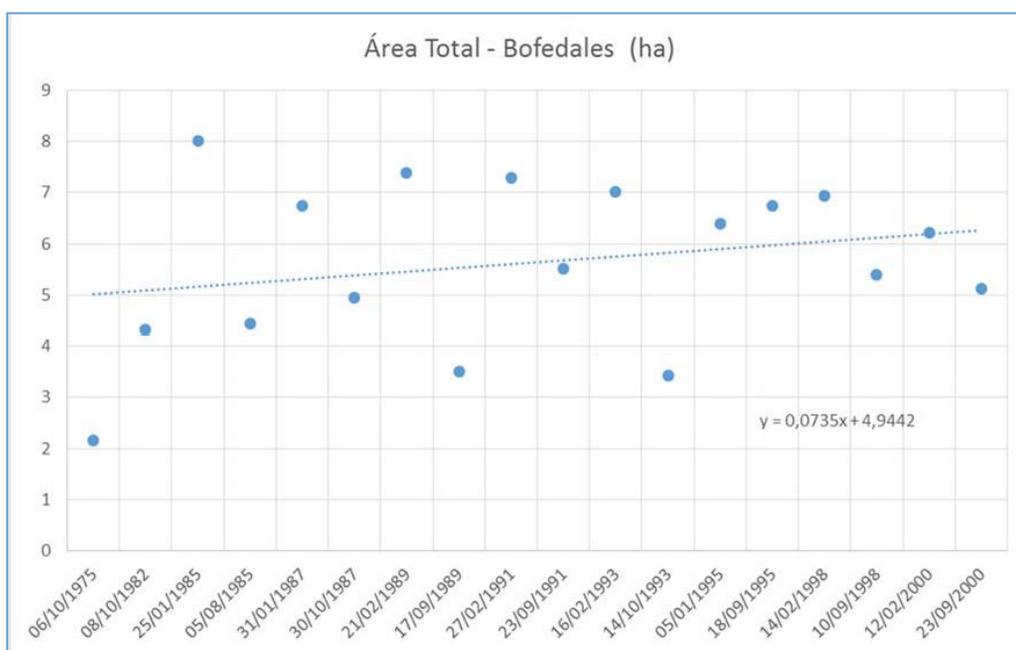


Figure 5. Total surface area of the high altitude wetlands (ha). 1975 - 2000 period (dry and wet seasons) –Landsat Images (see Table 1)

During the dry season (Figure 6) the surface area shows a slight trend to increase, especially in the last years of the studied time series (1995 to 2000). This behavior seems to be directly related to the surface area's trend to decrease during the wet season (Figure 6). In general, it is worth observing that a greater surface area of high altitude wetlands has been classified during the wet season (Figure 7) due to the fact that NDVI values are very low during the dry season, compared to any other vegetation surrounding the area; however, in order to differentiate between coverages,

coberturas, la clasificación diferencia principalmente los valores más altos, que corresponde a una menor área que la observada durante la estación húmeda.

Se debe notar que durante la época seca la tendencia observada se encuentra levemente influenciada por la fecha de la estación seca del año 1975, la cual tiene una menor resolución espacial que el resto de la serie.

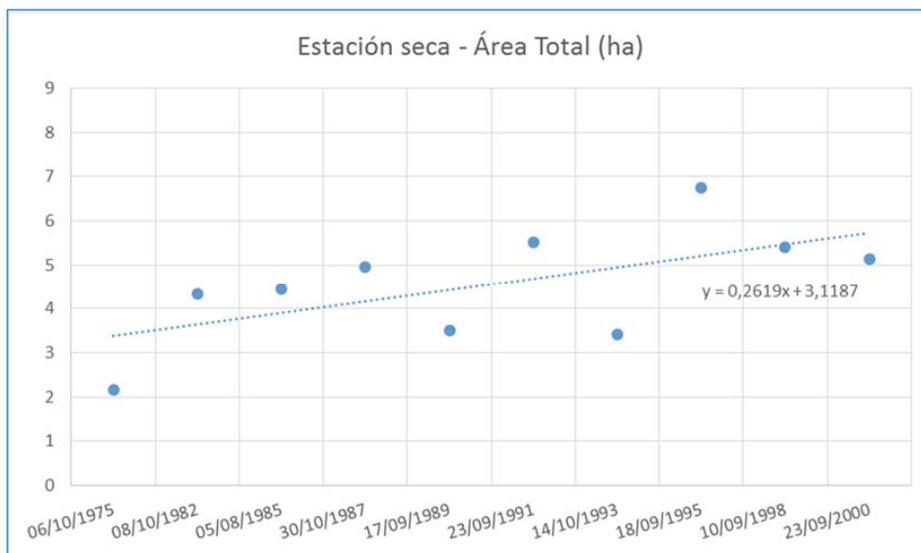


Figura 6. Superficie de los bofedales durante la estación seca. Periodo 1975 – 2000 – Imágenes Landsat (para los detalles ver Tabla 1)

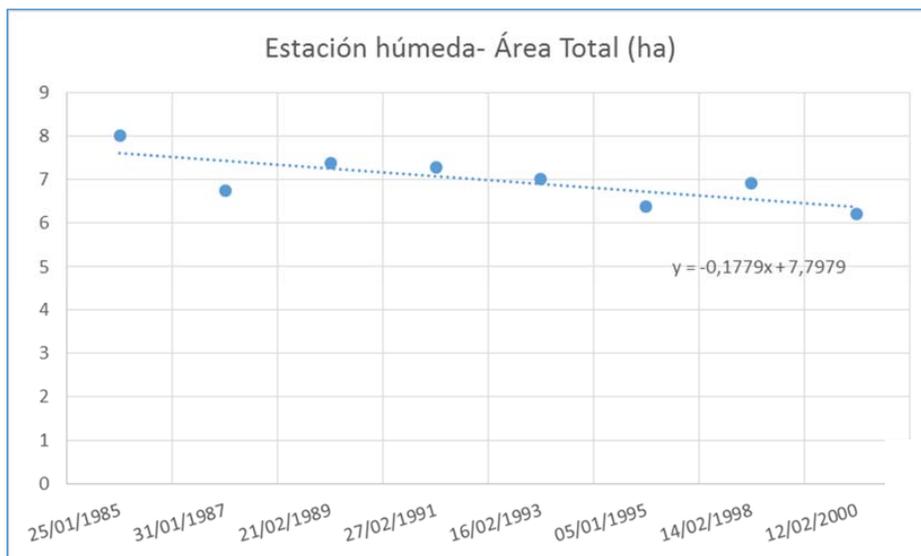


Figura 7. Superficie de los bofedales durante la estación húmeda. Periodo 1975 – 2000 – Imágenes Landsat (para los detalles ver Tabla 1)

the classification differentiates mainly the highest values, which correspond to an area that is smaller than that observed during the wet season.

It is worth noting that during the dry season the observed trend is slightly influenced by the date of the 1975 dry season, which has a lower spatial resolution than the rest of the series.

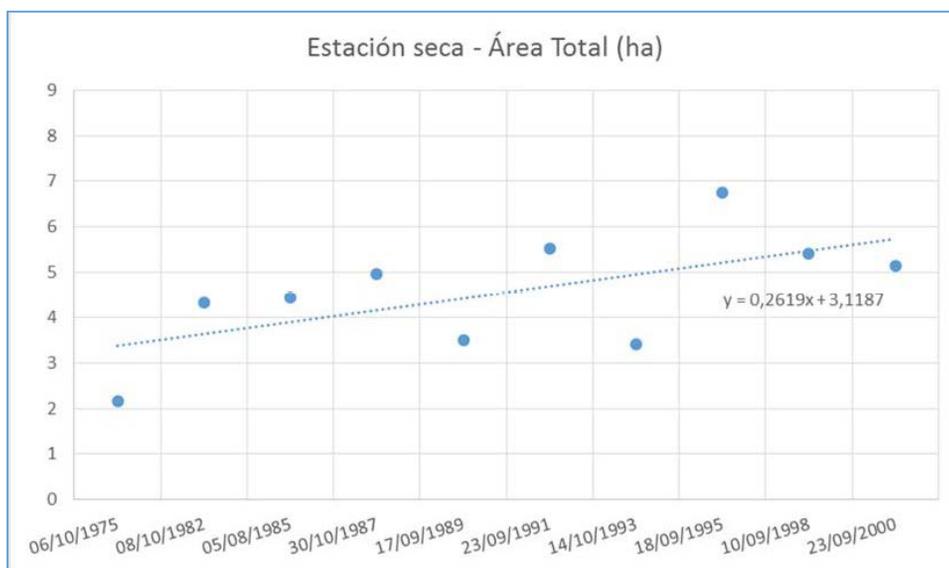


Figure 6. High altitude wetland surface area during the dry season. 1975 – 2000 period –Landsat images (see details in Table 1)

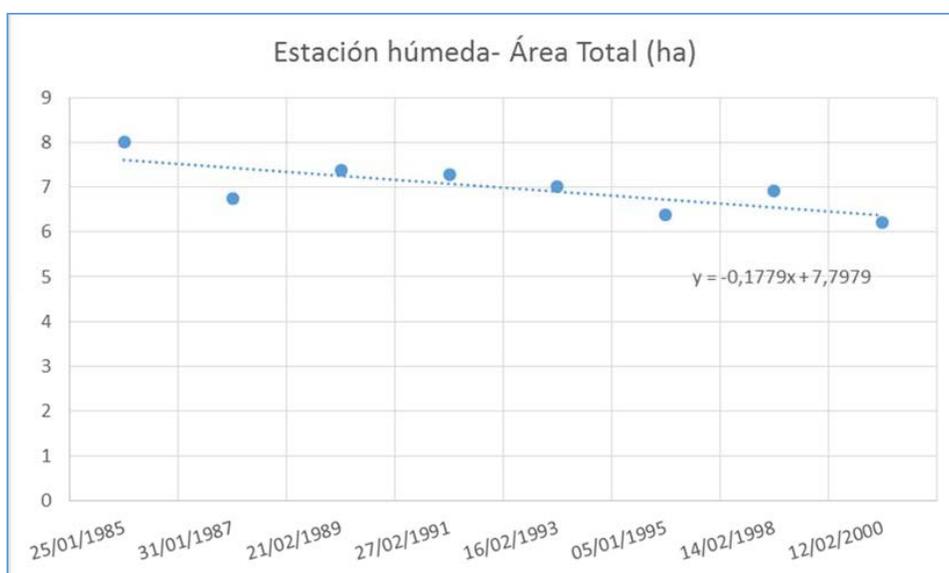


Figure 7. High altitude wetland surface area during the wet season. 1975 – 2000 period –Landsat images (see details in Table 1)

Entre los bofedales norte, sur y otros en la zona (Figura 8 a Figura 10), en general, se observa una estabilidad en las distintas superficies. También se puede observar la importante variabilidad entre la estación seca y húmeda de la serie, la cual es menor en el bofedal norte en comparación con el bofedal sur, principalmente. Por otro lado, la superficie del bofedal sur es mayor al norte y los otros bofedales.

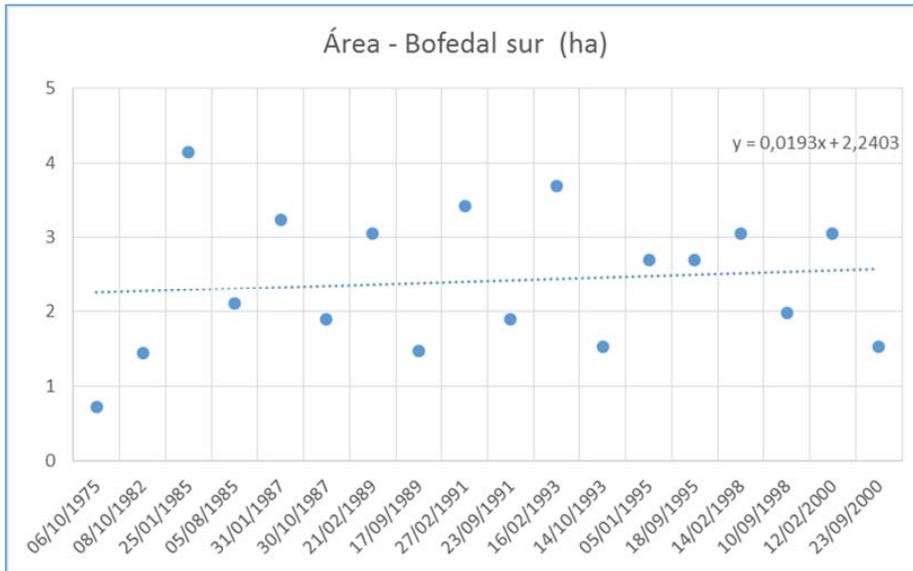


Figura 8. Superficie total del bofedal sur (estación húmeda y seca). Periodo 1975 – 2000 – Imágenes Landsat (para los detalles ver Tabla 1)

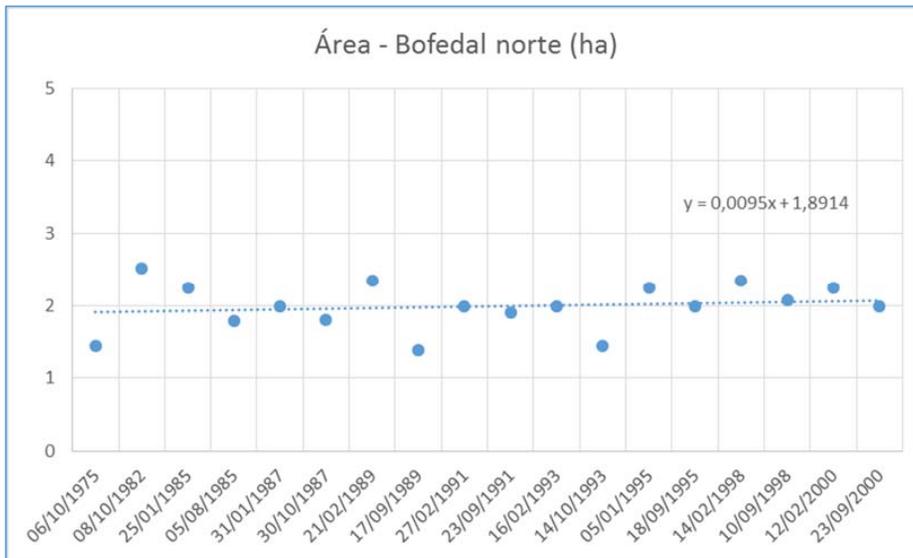


Figura 9. Superficie total del bofedal norte (estación húmeda y seca). Periodo 1975 – 2000 – Imágenes Landsat (para los detalles ver Tabla 1)

A stability, in general, is noted regarding the different surface areas between the northern, southern and other high altitude wetlands in the area (Figure 8 to Figure 10). The significant variability between the dry and wet season of the series is also noted, which is primordialy lower in the northern high altitude wetland compared to the southern high altitude wetland. On the other hand, the surface area of the southern high altitude wetland is larger than the northern and other high altitude wetlands.

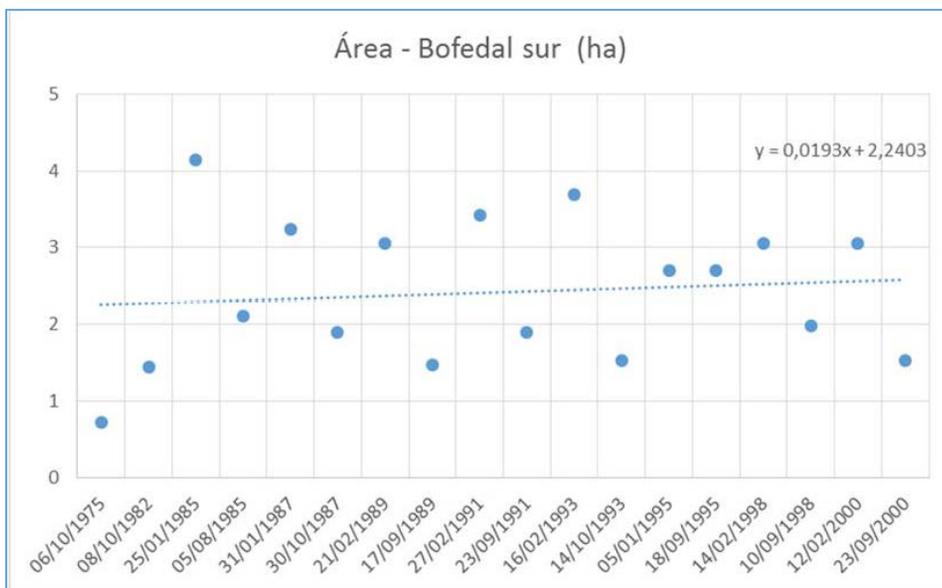


Figure 8. Total surface area of southern high altitude wetland (wet and dry season). 1975 – 2000 period –Landsat images (see details in Table 1)

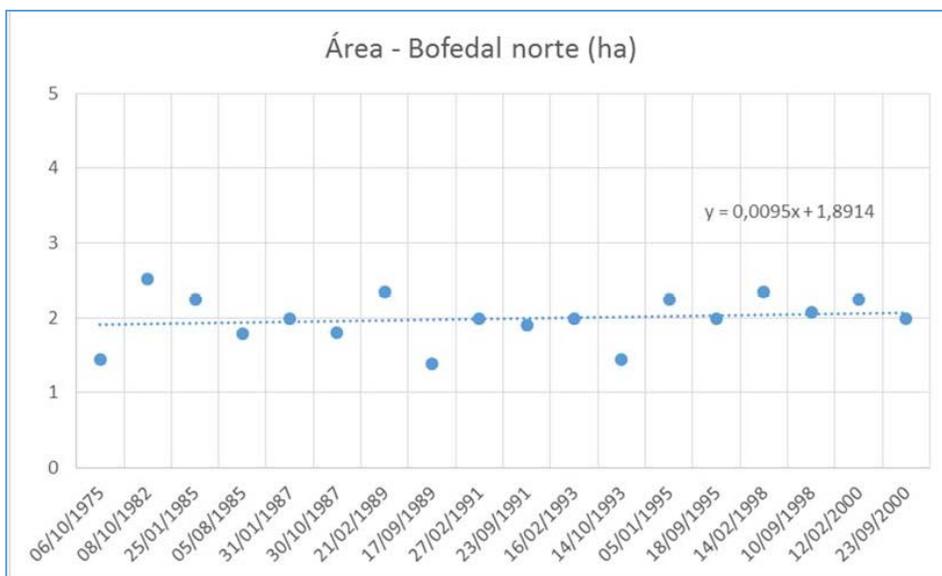


Figure 9. Total surface area of northern high altitude wetland (wet and dry season). 1975 – 2000 period –Landsat images (see details in Table 1)

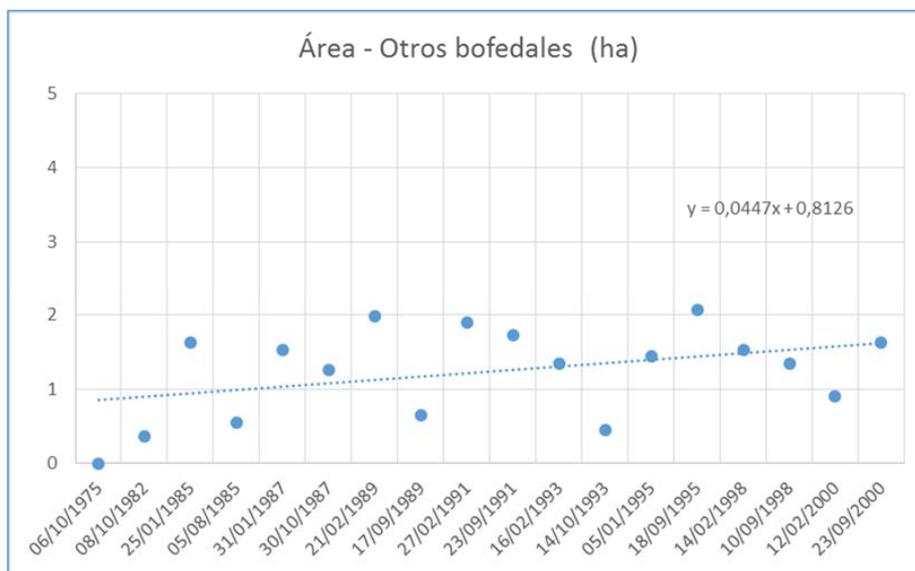


Figura 10. Superficie total de otros bofedales en la zona (estación húmeda y seca). Periodo 1975 – 2000 – Imágenes Landsat (para los detalles ver Tabla 1)

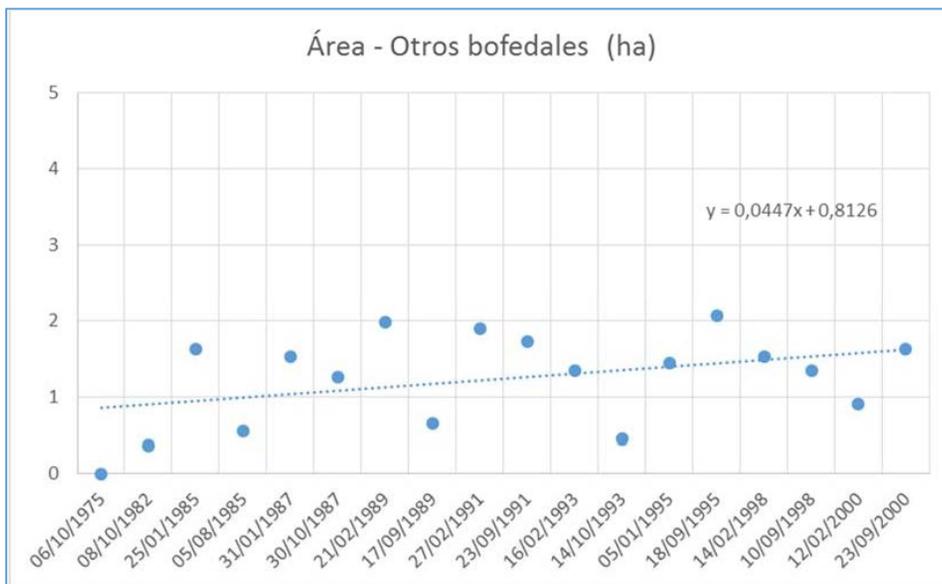


Figure 10. Total surface area of other high altitude wetlands (wet and dry season). 1975 – 2000 period –Landsat images (see details in Table 1)

Número	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Fecha	06/10/1975	08/10/1982	25/01/1985	31/01/1987	30/10/1987	21/02/1987	17/09/1989	27/02/1991	23/09/1991	12/02/1991	16/02/1993	14/10/1993	05/01/1995	18/09/1995	14/02/1998	10/09/1998	12/02/2000	23/09/2000
Bofedal norte	1.44	2.52	2.25	1.79	1.98	1.8	2.34	1.38	1.98	1.9	1.98	1.44	2.25	1.98	2.34	2.07	2.25	1.98
Bofedal sur	0.72	1.44	4.14	2.11	3.24	1.89	3.06	1.47	3.42	1.89	3.69	1.53	2.7	2.7	3.06	1.98	3.06	1.53
Bofedal Total	0	0.36	1.62	0.55	1.53	1.26	1.98	0.65	1.89	1.72	1.35	0.45	1.44	2.07	1.53	1.35	0.9	1.62
Estación	2.16	4.32	8.01	4.45	6.75	4.95	7.38	3.5	7.29	5.51	7.02	3.42	6.39	6.75	6.93	5.4	6.21	5.13
	Seca	Húmeda																

Tabla 1. Superficie de los bofedales de los Manantiales del Silala. Período 1975 - 2000 – Imágenes Landsat

Numero	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Fecha	06/12/2002	16/06/2004	30/05/2007	10/09/2010	21/03/2011	15/10/2011	03/03/2014	12/10/2014	08/08/2015	02/03/2016	25/06/2016	10/08/2016	01/02/2017
Bofedal norte	0.9	0.5	0.7	0.7	0.5	0.4	1.1	0.6	0.8	0.8	0.9	0.5	0.7
Bofedal sur	1.9	1.2	1.5	1.2	1.6	0.9	2.4	0.7	1.0	2.0	0.7	0.5	1.9
Bofedal Total	1.1	1.4	0.9	1.7	1.5	0.7	2.4	1.1	1.4	2.0	1.4	1.1	1.5
Total	3.97	3.185	3.02	3.65	3.58	1.92	5.88	2.39	3.25	4.87	2.91	2.07	4.06
Estación	Húmeda	Seca	Seca	Seca	Húmeda	Seca	Húmeda	Seca	Húmeda	Húmeda	Seca	Seca	Húmeda

Tabla 2. Superficie de los bofedales de los Manantiales del Silala. Período 2002-2017 – Imágenes de alta resolución

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Date	06/10/1975	08/10/1982	25/01/1985	05/08/1985	31/01/1987	30/10/1987	21/02/1989	17/09/1989	27/02/1991	23/09/1991	16/02/1993	14/10/1993	05/01/1995	18/09/1995	14/02/1998	10/09/1998	12/02/2000	23/09/2000
Northern wetland	1.44	2.52	2.25	1.79	1.98	1.8	2.34	1.38	1.98	1.9	1.98	1.44	2.25	1.98	2.34	2.07	2.25	1.98
Southern wetland	0.72	1.44	4.14	2.11	3.24	1.89	3.06	1.47	3.42	1.89	3.69	1.53	2.7	2.7	3.06	1.98	3.06	1.53
Wetland	0	0.36	1.62	0.55	1.53	1.26	1.98	0.65	1.89	1.72	1.35	0.45	1.44	2.07	1.53	1.35	0.9	1.62
Total	2.16	4.32	8.01	4.45	6.75	4.95	7.38	3.5	7.29	5.51	7.02	3.42	6.39	6.75	6.93	5.4	6.21	5.13
Season	Dry	Dry	Wet	Wet	Dry	Wet	Dry	Wet	Wet	Dry								

Table 1. Surface area of Silala Springs high altitude wetlands. 1975 - 2000 period – Landsat images

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Date	06/12/2002	16/06/2004	30/05/2007	10/09/2010	21/03/2011	15/10/2011	03/03/2014	12/10/2014	08/08/2015	02/03/2016	25/06/2016	10/08/2016	01/02/2017
Northern wetland	0.9	0.5	0.7	0.7	0.5	0.4	1.1	0.6	0.8	0.8	0.9	0.5	0.7
Southern wetland	1.9	1.2	1.5	1.2	1.6	0.9	2.4	0.7	1.0	2.0	0.7	0.5	1.9
Wetland	1.1	1.4	0.9	1.7	1.5	0.7	2.4	1.1	1.4	2.0	1.4	1.1	1.5
Total	3.97	3.185	3.02	3.65	3.58	1.92	5.88	2.39	3.25	4.87	2.91	2.07	4.06
Season	Wet	Dry	Dry	Dry	Wet	Dry	Wet	Dry	Dry	Wet	Dry	Dry	Wet

Table 2. Surface area of Silala Springs high altitude wetlands. 2002-2017 Period – High resolution images

N°	Fecha	Total	Estación	Desv.Est	Media	CV
1	06/10/1975	2,16	Seca	-	-	-
2	08/10/1982	4,32	Seca	-	-	-
3	25/01/1985	8,01	Húmeda	2,52	6,23	40,41
4	05/08/1985	4,45	Seca	-	-	-
5	31/01/1987	6,75	Húmeda	1,27	5,85	21,76
6	30/10/1987	4,95	Seca	-	-	-
7	21/02/1989	7,38	Húmeda	2,74	5,44	50,43
8	17/09/1989	3,50	Seca	-	-	-
9	27/02/1991	7,29	Húmeda	1,26	6,40	19,67
10	23/09/1991	5,51	Seca	-	-	-
11	16/02/1993	7,02	Húmeda	2,55	5,22	48,77
12	14/10/1993	3,42	Seca	-	-	-
13	05/01/1995	6,39	Húmeda	0,25	6,57	3,87
14	18/09/1995	6,75	Seca	-	-	-
15	14/02/1998	6,93	Húmeda	1,08	6,17	17,55
16	10/09/1998	5,40	Seca	-	-	-
17	12/02/2000	6,21	Húmeda	0,76	5,67	13,47
18	23/09/2000	5,13	Seca	-	-	-
			Húmeda	0,57	7,00	8,21
			Seca	1,30	4,56	28,44
						CV interanual

N°	Fecha	Total	Estación	Desv.Est	Media	CV
1	06/12/2002	3,97	Húmeda	-	-	-
2	16/06/2004	3,19	Seca	-	-	-
3	30/05/2007	3,02	Seca	-	-	-
4	10/09/2010	3,65	Seca	0,05	3,62	1,37
5	21/03/2011	3,58	Húmeda	-	-	-
6	15/10/2011	1,92	Seca	-	-	-
7	03/03/2014	5,88	Húmeda	2,47	4,14	59,68
8	12/10/2014	2,39	Seca	-	-	-
9	08/08/2015	3,25	Seca	1,15	4,06	28,21
10	02/03/2016	4,87	Húmeda	-	-	-
11	25/06/2016	2,91	Seca	-	-	-
12	10/08/2016	2,07	Seca	1,41	3,07	45,91
13	01/02/2017	4,06	Húmeda	-	-	-
			Húmeda	0,92	4,47	20,49
			Seca	0,61	2,80	21,81
						CV interanual

Tabla 3. Superficie total de los bofedales de los Manantiales del Silala y coeficiente de variabilidad interestacional e interanual. Período 1975 – 2000 (izquierda) y 2002 – 2017 (derecha).

N°	Date	Total	Season	Season Dev.	Mean	Inter-seasonal VC
1	06/10/1975	2,16	Dry			
2	08/10/1982	4,32	Dry			
3	25/01/1985	8,01	Wet	2.52	6.23	40.41
4	05/08/1985	4,45	Dry			
5	31/01/1987	6,75	Wet	1.27	5.85	21.76
6	30/10/1987	4,95	Dry			
7	21/02/1989	7,38	Wet	2.74	5.44	50.43
8	17/09/1989	3,50	Dry			
9	27/02/1991	7,29	Wet			
10	23/09/1991	5,51	Dry	1.26	6.40	19.67
11	16/02/1993	7,02	Wet	2.55	5.22	48.77
12	14/10/1993	3,42	Dry			
13	05/01/1995	6,39	Wet	0.25	6.57	3.87
14	18/09/1995	6,75	Dry			
15	14/02/1998	6,93	Wet	1.08	6.17	17.55
16	10/09/1998	5,40	Dry			
17	12/02/2000	6,21	Wet	0.76	5.67	13.47
18	23/09/2000	5,13	Dry			
			Wet	0.57	7.00	8.21
			Dry	1.30	4.56	28.44
						Inter-annual VC

N°	Date	Total	Season	Season Dev.	Mean	Inter-seasonal VC
1	06/12/2002	3,97	Wet			
2	16/06/2004	3,19	Dry			
3	30/05/2007	3,02	Dry			
4	10/09/2010	3,65	Dry	0.05	3.62	1.37
5	21/03/2011	3,58	Wet			
6	15/10/2011	1,92	Dry			
7	03/03/2014	5,88	Wet	2.47	4.14	59.68
8	12/10/2014	2,39	Dry			
9	08/08/2015	3,25	Dry	1.15	4.06	28.21
10	02/03/2016	4,87	Wet			
11	25/06/2016	2,91	Dry			
12	10/08/2016	2,07	Dry			
13	01/02/2017	4,06	Wet	1.41	3.07	45.91
			Wet	0.92	4.47	20.49
			Dry	0.61	2.80	21.81
						Inter-annual VC

Table 3. Total surface of Silala Springs high altitude wetlands and coefficient of inter-seasonal and interannual variability. 1975 – 2000 period (left) and 2002 -2017 period (right).

6.1.2. Análisis de variabilidad de los bofedales

El análisis de los valores NDVI en la superficie de los bofedales clasificada muestra que estos están distribuidos en una media de 0.4 aproximadamente. Las diferencias estacionales se pueden distinguir claramente en la Figura 11, alcanzando los valores más altos durante la estación húmeda, que a su vez muestra un mayor rango de valores que la observada durante la estación seca.

En general, no se observa cambios importantes durante el periodo estudiado. La vegetación parece mantener los mismos rangos a través de los años y las distintas estaciones. Los cambios observados en estos datos pueden estar más relacionados a la fecha de año en que se observa.

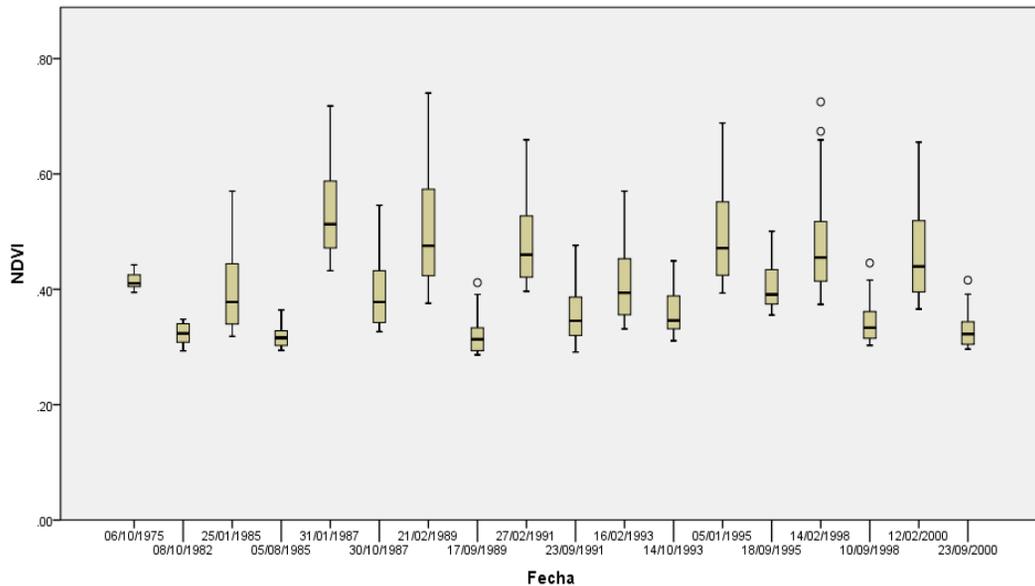


Figura 11. Distribución de los valores NDVI (mínima, primer cuartil, media, tercer cuartil y máxima) para toda la serie de tiempo para el periodo 1975-2000 – Imágenes Landsat

Observando la distribución de la estación seca a detalle (Figura 12), se observa que no existen cambios importantes durante el periodo estudiado y que estos pueden estar más relacionados con la fecha observada y la duración del tiempo de estiaje en año determinado. Se observa que durante esta estación los bofedales se mantienen principalmente entre valores de 0.20 a 0.40, lo cual corresponde generalmente con vegetación de pastos secos, y dificulta su diferenciación de otra vegetación. El rango de los valores NDVI durante la estación seca es más reducido, no llegando a mostrar los picos de valores que se observan durante la estación húmeda (Anexo 4).

6.1.2 High altitude wetland variability analysis

The analysis of the NDVI values for the surface area of the classified high altitude wetlands show that the high altitude wetlands are distributed in a mean of approximately 0.4. The seasonal differences are clearly seen in Figure 11, reaching higher values during the wet season, which in turn shows a wider range of values than that observed during the dry season.

In general, no significant changes were identified during the studied period. The vegetation seems to maintain the same ranges over the years and through the different seasons. The changes observed in these data could be related more to the date of the year in which they are observed.

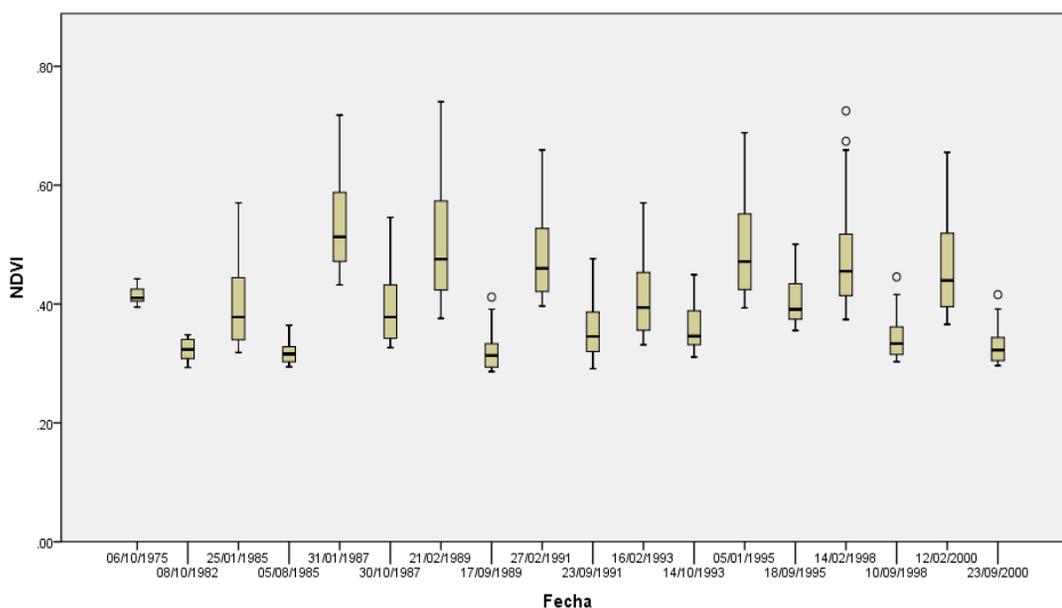


Figure 11. Distribution of NDVI values (minimum, first quartile, mean, third quartile and maximum) for the entire time series for the 1975 -2000 period –Landsat images

Upon observing the distribution of the dry season in detail (Figure 12), one notes that there are no significant changes during the studied period and that any changes could be related more to the observed date and the duration of the dry season in a specific year. During this season, the high altitude wetlands stay mainly between values of 0.20 and 0.40, which generally refers to dry grass vegetation, and hinders differentiating it from other vegetation. The range of NDVI values during the dry season is narrower, and does not even show the peaks of values reached during the wet season (Annex4).

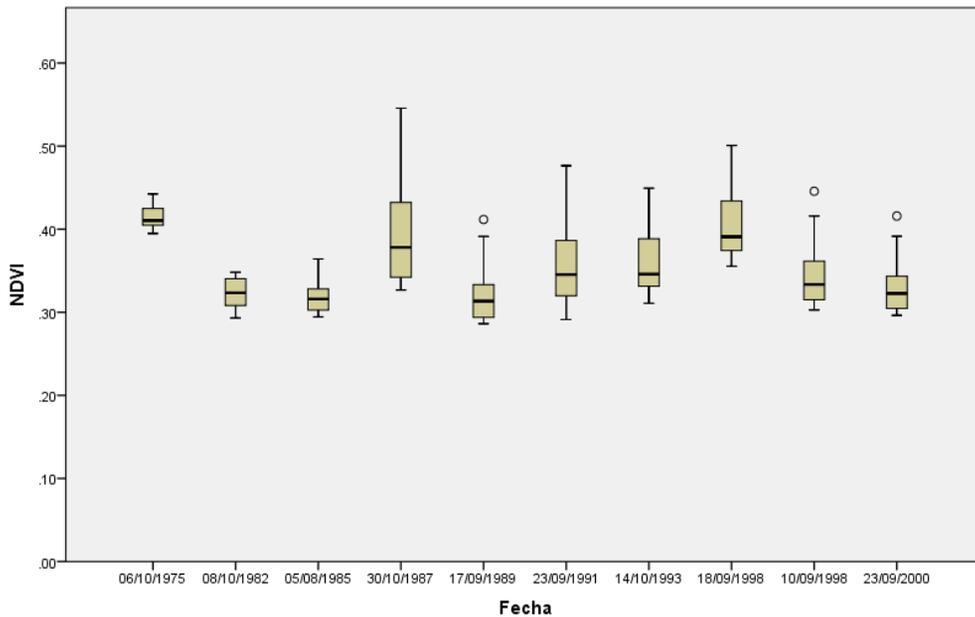


Figura 12. Distribución de los valores NDVI (mínima, primer cuartil, media, tercer cuartil y máxima) para toda la estación seca del periodo 1975 -2000 – Imágenes Landsat

Durante la estación húmeda tampoco se observan cambios importantes durante el periodo estudiado (Figura 13), los cambios observados pueden estar más relacionados con la fecha y disponibilidad de agua en ese momento. Como se ha mencionado con anterioridad, se puede observar que durante la estación húmeda el rango de valores NDVI es mucho más alto, alcanzando valores entre 0.40 a 0.70, lo cual corresponde con la de vegetación saludable y activa.

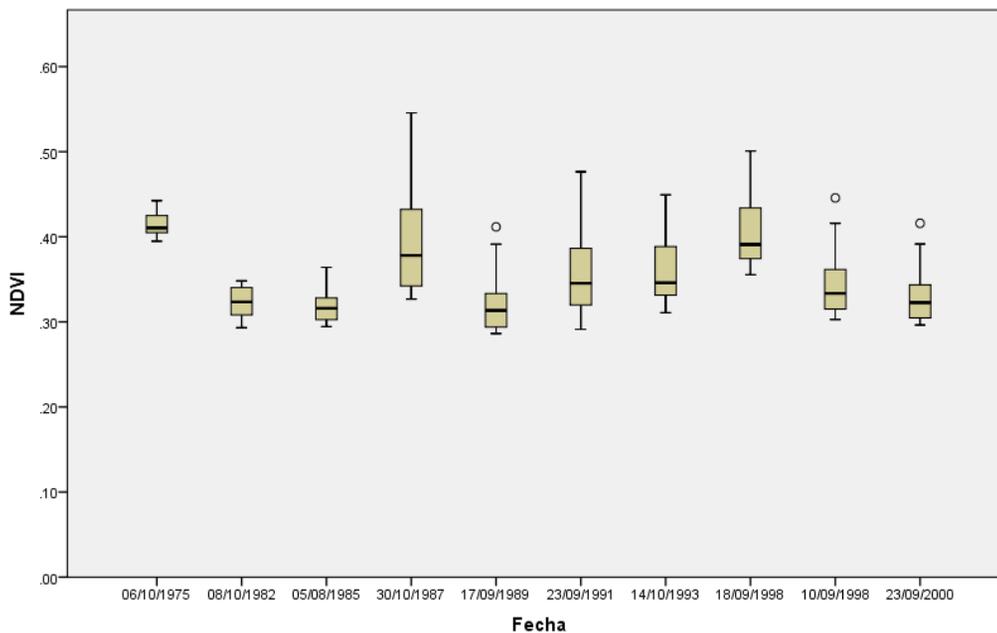


Figure 12. Distribution of NDVI values (minimum, first quartile, mean, third quartile, and maximum) for the dry season of the 1975 -2000 period –Landsat images

No significant changes were observed either during the wet season for the studied period (Figure 13). Any observed changes could be related more to the date and availability of water at that time. As mentioned previously, during the wet season the range of NDVI values is not very wide, reaching values between 0.40 and 0.70, which corresponds to healthy and active vegetation.

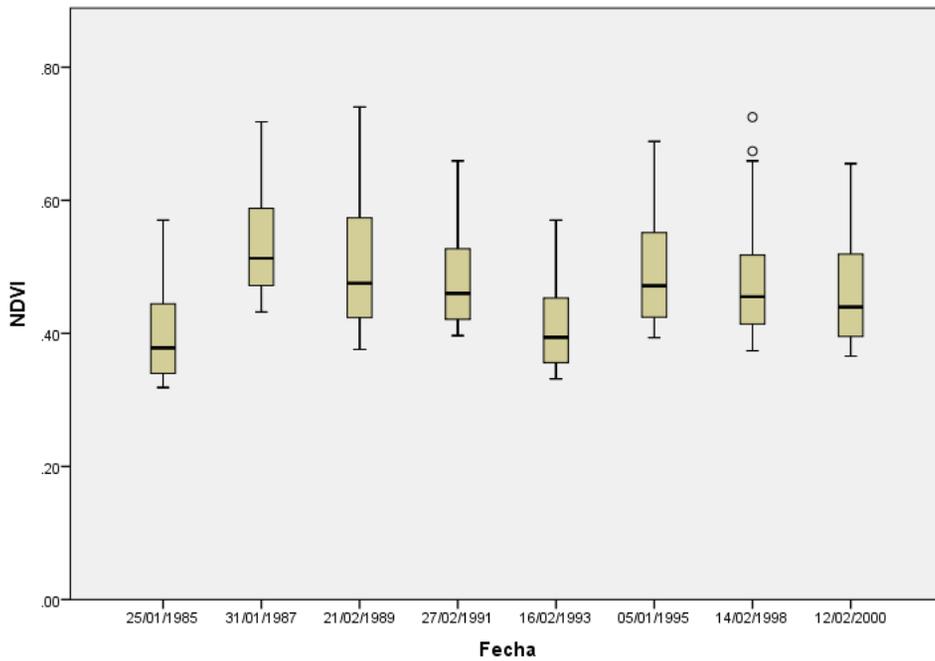


Figura 13. Distribución de los valores NDVI (mínima, primer cuartil, media, tercer cuartil y máxima) para toda la estación húmeda del periodo 1975 -2000 – Imágenes Landsat

El análisis de las medias mínimas y máximas para la serie de datos completa (Figura 14 y Tabla 5), tampoco muestra evidencias de cambios a través de todo el periodo de estudio. Se puede evidenciar los importantes cambios estacionales en la actividad de la vegetación de los bofedales, los cuales se mantienen estables durante todo el periodo.

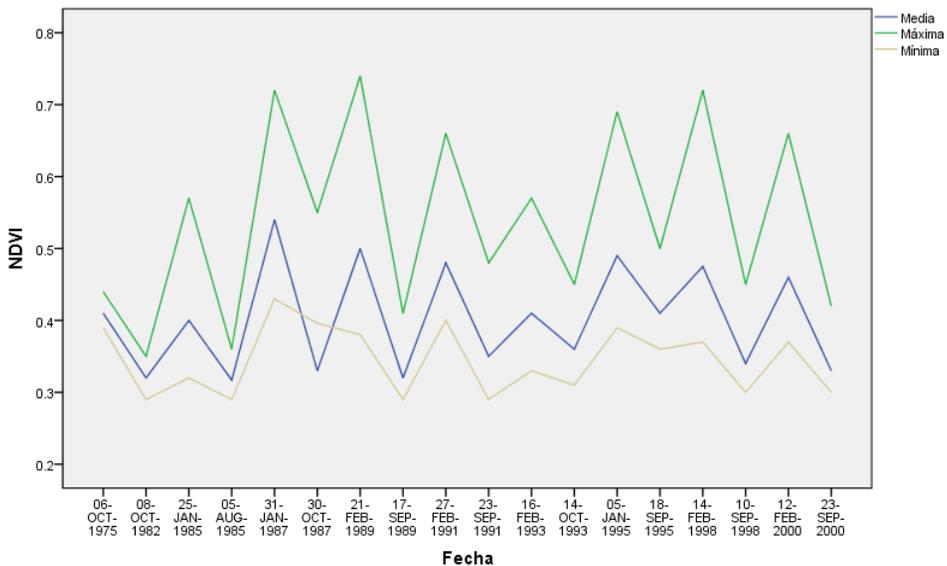


Figura 14. Distribución de los valores NDVI mínimo, medio y máximo para el periodo 1975 -2000 – Imágenes Landsat

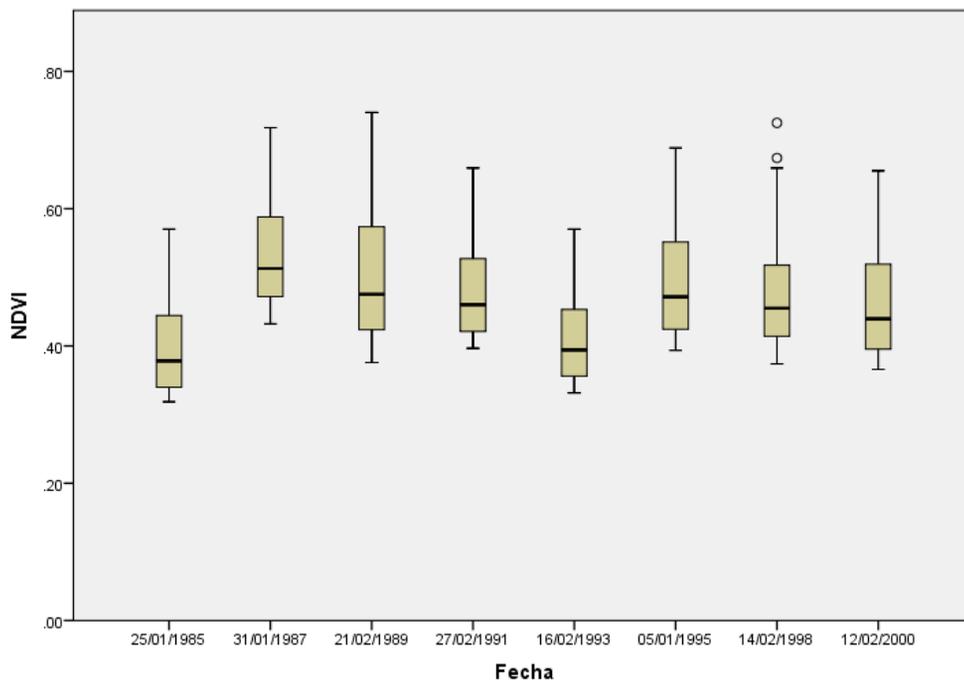


Figure 13. Distribution of NDVI values (minimum, first quartile, mean, third quartile, and maximum) for the wet season of the 1975 -2000 period –Landsat images

The analysis of the means, minimums and maximums for the complete data series (Figure 14 and Table 5) also shows no evidence of changes throughout the entire studied period. One can observe the important seasonal changes in the activity of the high altitude wetlands' vegetation, which remains stable during the entire period.

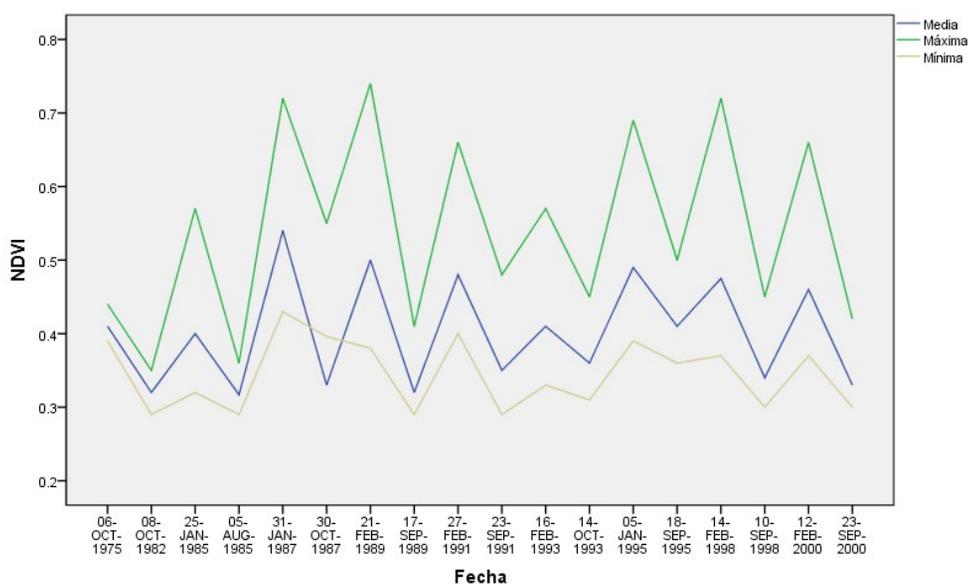


Figure 14. Distribution of minimum, mean and maximum NDVI values for the 1975 -2000 period –Landsat images

Numero	1	2	3	4	5	7	9	10	11	12	13
Fecha	06/12/2002	16/06/2004	30/05/2007	10/09/2010	21/03/2011	03/03/2014	08/08/2015	02/03/2016	25/06/2016	10/08/2016	01/02/2017
Media	0.13	0.27	0.28	0.28	0.56	0.48	0.3	0.5	0.32	0.31	0.79
Máxima	0.39	1	1	1	0.92	1	0.56	0.8	0.48	0.53	1
Mínima	0.06	0.22	0.24	0.13	0.32	0.34	0.25	0.36	0.29	0.27	0.76

Tabla 4. Valores medios, máximos y mínimos del NDVI - Imágenes de alta resolución

Numero	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Fecha	06/10/1975	08/10/1982	25/01/1985	05/08/1985	31/01/1987	30/10/1987	21/02/1989	17/09/1989	27/02/1991	23/09/1991	16/02/1993	14/10/1993	05/01/1995	18/09/1995	14/02/1998	10/09/1998	12/02/2000	23/09/2000
Media	0.41	0.32	0.40	0.32	0.50	0.33	0.50	0.32	0.48	0.35	0.41	0.36	0.49	0.41	0.48	0.34	0.46	0.33
Máxima	0.44	0.35	0.57	0.36	0.72	0.55	0.74	0.41	0.66	0.48	0.57	0.45	0.69	0.50	0.72	0.45	0.66	0.42
Mínima	0.36	0.29	0.32	0.29	0.43	0.40	0.38	0.29	0.40	0.29	0.33	0.31	0.39	0.36	0.37	0.30	0.37	0.30

Tabla 5. Valores medios, máximos y mínimos del NDVI – Imágenes Landsat

Number	1	2	3	4	5	7	9	10	11	12	13
Date	06/12/2002	16/06/2004	30/05/2007	10/09/2010	21/03/2011	03/03/2014	08/08/2015	02/03/2016	25/06/2016	10/08/2016	01/02/2017
Mean	0.13	0.27	0.28	0.28	0.56	0.48	0.3	0.5	0.32	0.31	0.79
Maximum	0.39	1	1	1	0.92	1	0.56	0.8	0.48	0.53	1
Minimum	0.06	0.22	0.24	0.13	0.32	0.34	0.25	0.36	0.29	0.27	0.76

Table 4. Mean, maximum and minimum NDVI values - High resolution images

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Date	06/10/1975	08/10/1982	25/01/1985	05/08/1985	31/01/1987	30/10/1987	21/02/1989	17/09/1989	27/02/1991	23/09/1991	16/02/1993	14/10/1993	05/01/1995	18/09/1995	14/02/1998	10/09/1998	12/02/2000	23/09/2000
Mean	0.41	0.32	0.40	0.32	0.54	0.33	0.50	0.32	0.48	0.35	0.41	0.36	0.49	0.41	0.48	0.34	0.46	0.33
Max.	0.44	0.35	0.57	0.36	0.72	0.55	0.74	0.41	0.66	0.48	0.57	0.45	0.69	0.50	0.72	0.45	0.66	0.42
Min.	0.39	0.29	0.32	0.29	0.43	0.40	0.38	0.29	0.40	0.29	0.33	0.31	0.39	0.36	0.37	0.30	0.37	0.30

Table 5. Mean, maximum and minimum NDVI values –Landsat images

6.1.3. Análisis de Sensibilidad

Se estima que 58% y 28 % (8.8 y 4.2 hectáreas aproximadamente) de la superficie total de los bofedales se encuentra en los niveles más altos y medios de sensibilidad, mientras que la superficie restante, 17% (2.5 ha aproximadamente) se encuentra clasificada en los valores medios y bajos de sensibilidad (Figura 16).

Asímismo, se estima que la vegetación que mantiene niveles bajos de sensibilidad es en mayor parte la que depende de fuentes de agua imperecederas, como ojos de agua, entre otros.

6.2. Imágenes de alta resolución

6.2.1. Superficie multi-temporal de los bofedales

Los resultados de la clasificación de la superficie de los bofedales con imágenes de alta resolución para el periodo 2002 – 2017 muestran que en general no se observan cambios importantes en la superficie de los bofedales. Los cambios en la superficie observados corresponden con los cambios estacionales, es decir, en un mismo año, entre la estación húmeda y seca, existe una importante variabilidad en superficie, no obstante, estos cambios son observables en todos los años, con diferencias según la fecha de la captura de la imagen y la disponibilidad de agua producto de las precipitaciones locales.

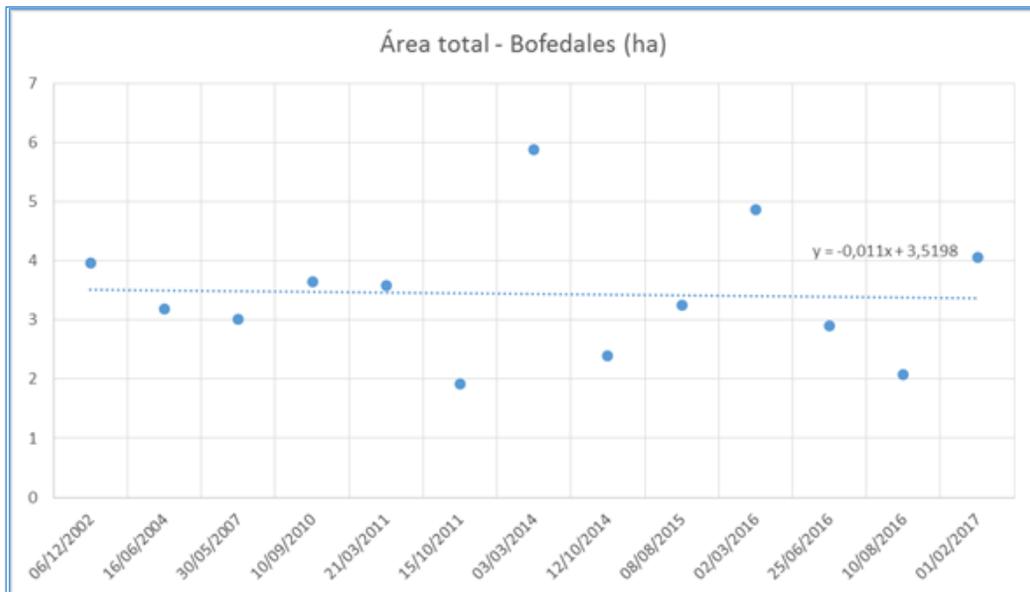


Figura 15. Superficie total de los bofedales (ha). Periodo 2002 - 2017 (estación seca y húmeda) – Imágenes de alta resolución (para los detalles ver Tabla 3)

6.1.3 Sensitivity analysis

It is estimated that 58% and 28 % (approximately 8.8 and 4.2 hectares) of the total surface area of the high altitude wetlands are at high and medium sensitivity levels, while the remaining surface area, 17% (approximately 2.5 ha), is classified at medium and low sensitivity levels (Figure 16).

Additionally, it is estimated that vegetation that remains at low sensitivity levels is, for the most part, dependent on imperishable sources of water, such as water holes or springs, among others.

6.2 High Resolution Images

6.2.1 Multi-temporal surface area of the high altitude wetlands

The results of the classification of the high altitude wetlands' surface area using high resolution images for the 2002 – 2017 period show that in general there were no significant changes in the high altitude wetlands' surface area. Any observed changes in the surface area are related to seasonal changes, namely, during the same year there is a significant variability in the surface area between the wet and dry seasons, however these changes are noticeable in every year, with differences varying according to the date on which the image was captured and the availability of water as a result of local precipitations.

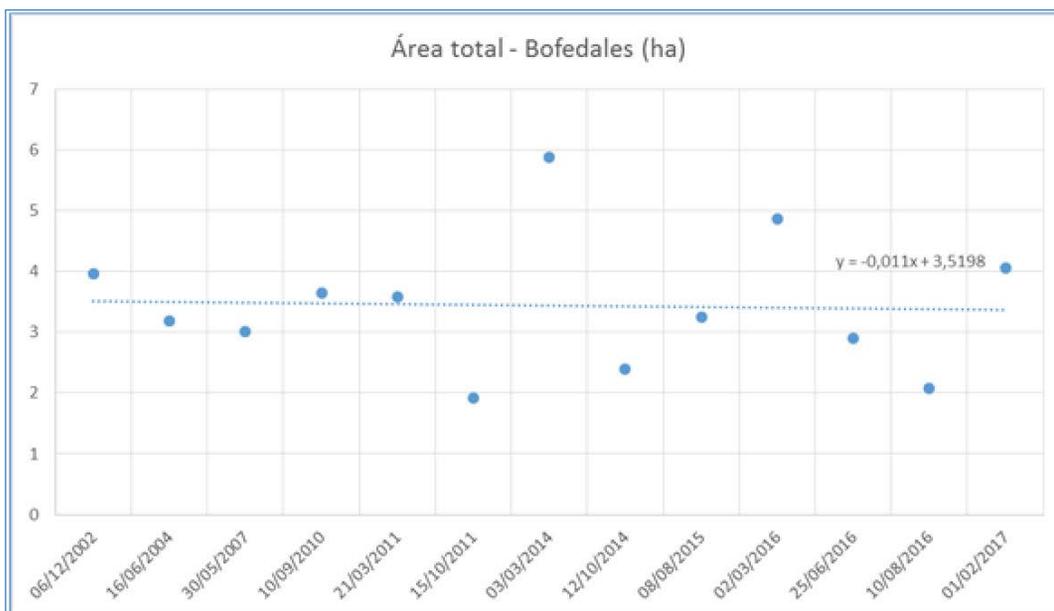


Figure 15. Total surface area of high altitude wetlands (ha). 2002 - 2017 period (dry and wet seasons) – High resolution images (see details in Table 3)

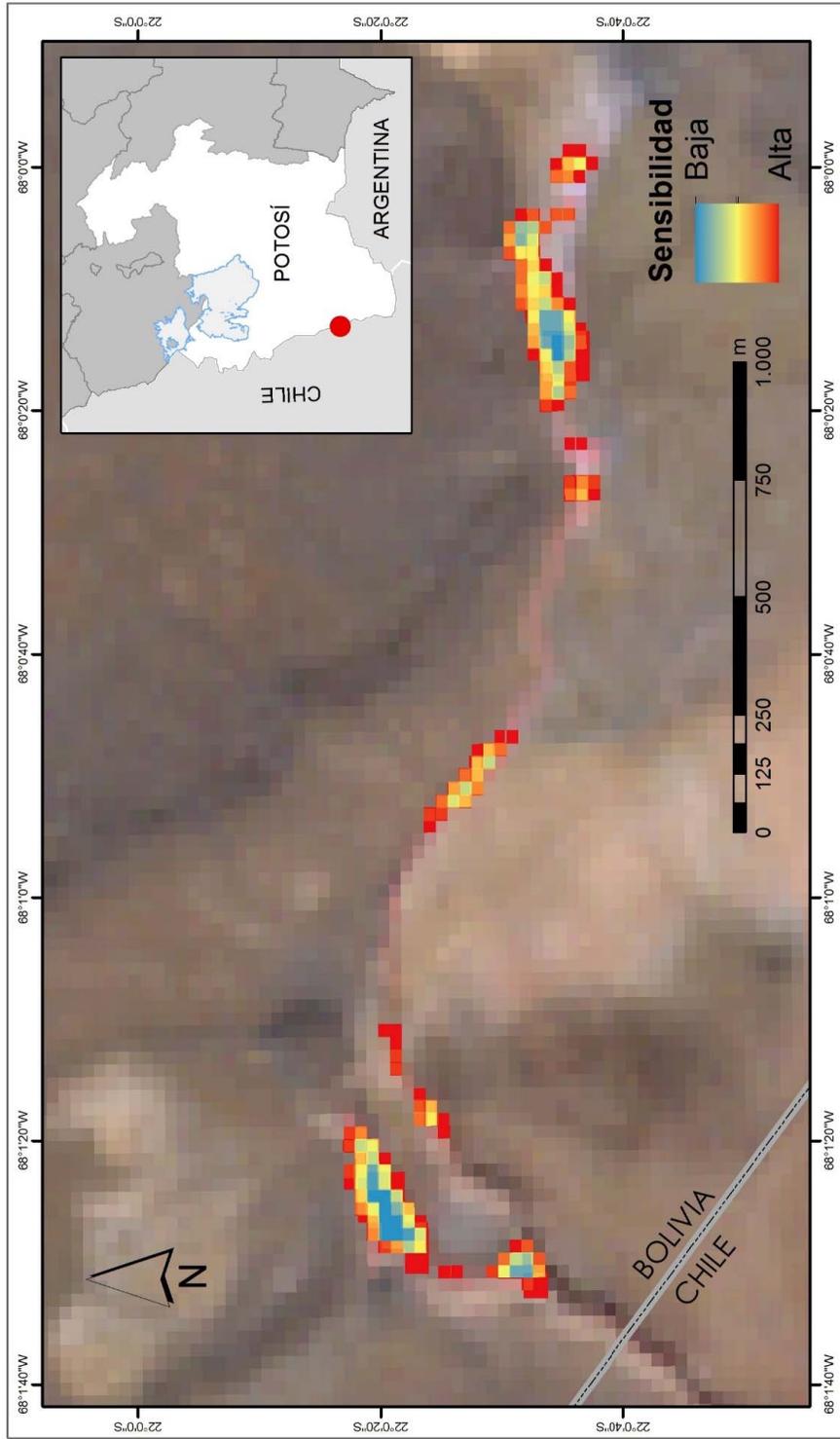


Figura 16. Mapa de Sensibilidad de los bofedales de los Manantiales del Silala. Periodo 1975 - 2000 – Imágenes Landsat.

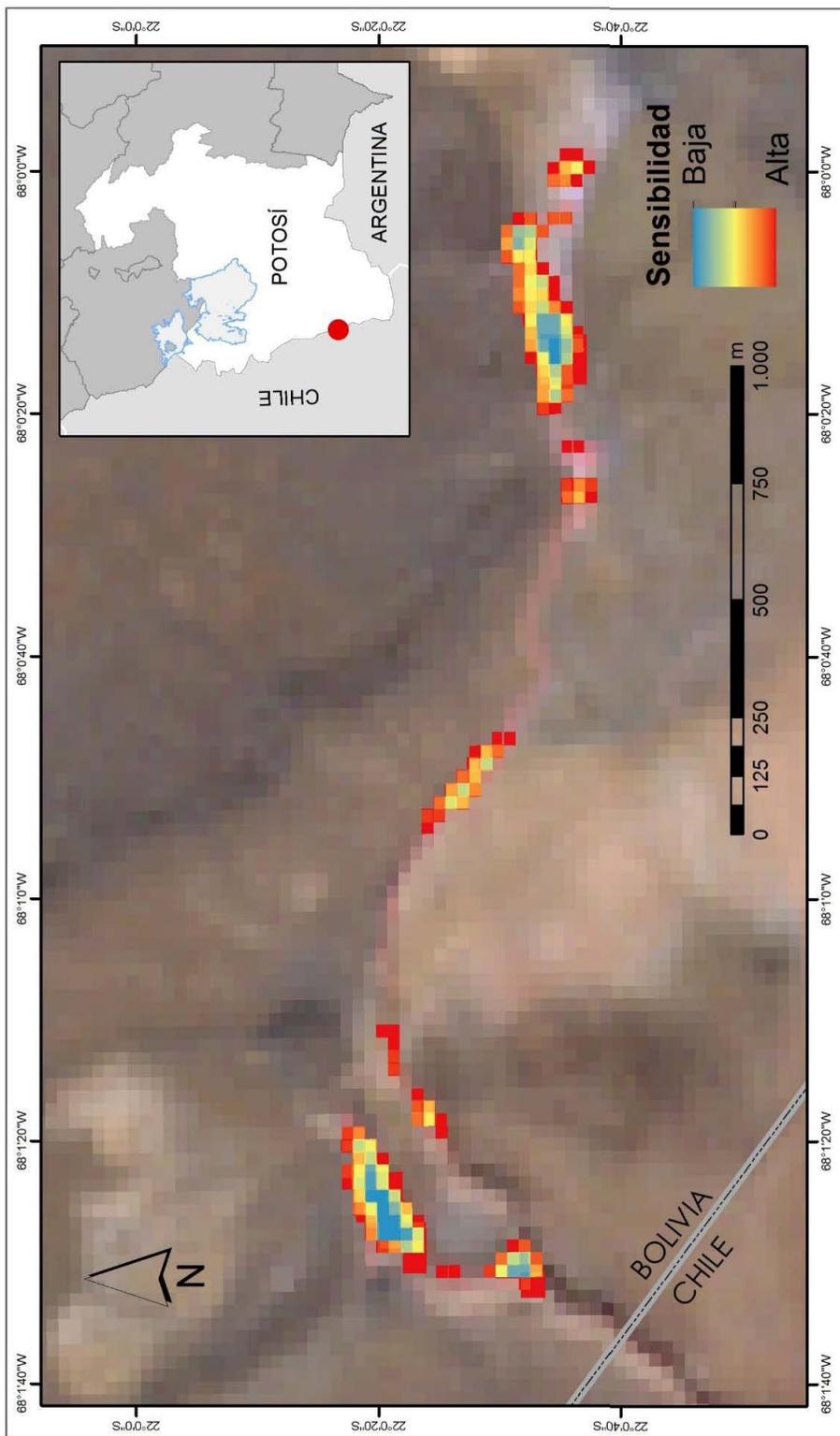


Figure 16. Silala Springs high altitude wetlands sensitivity map. 1975 - 2000 period –Landsat images.

Durante la estación seca (Figura 17) se observa que la superficie de los bofedales tiende a reducirse, especialmente durante la última década. Esto se encuentra relacionado con el aumento de superficie que se observa durante la estación húmeda, de la misma manera, durante la última década. Se puede observar, además, que la superficie es mayor durante la estación húmeda. Al igual que las imágenes Landsat, es de notarse que los valores y rangos NDVI son más altos durante la estación húmeda que durante la seca, por ello la superficie clasificada es mayor durante esta estación. Los valores NDVI durante la estación seca se comparan a otra vegetación observada en la zona (ver Anexo 4).

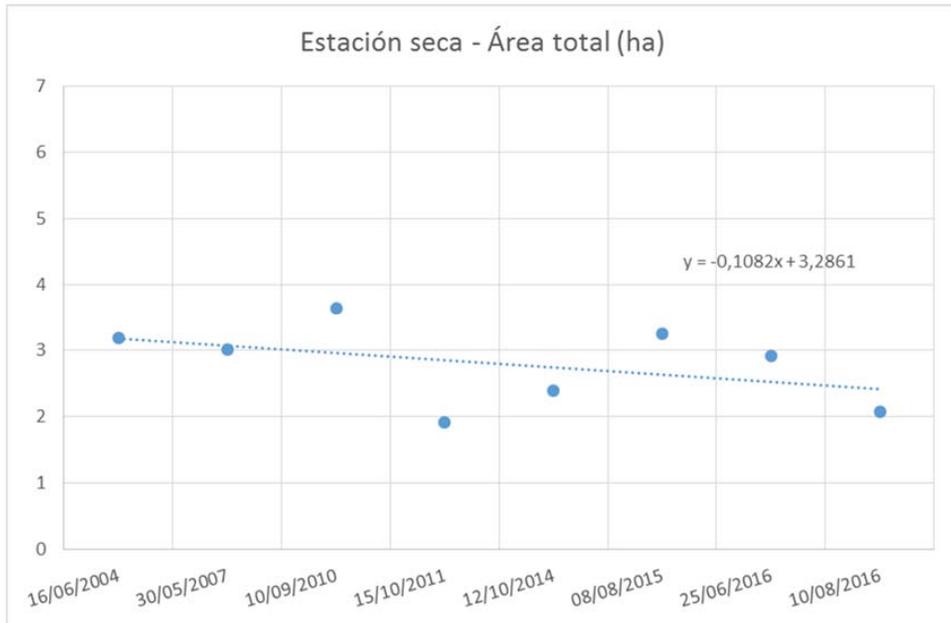


Figura 17. Superficie de los bofedales durante la estación seca. Periodo 2002 – 2017 – Imágenes de alta resolución (para los detalles ver Tabla 3)

During the dry season (Figure 17), the surface area of the high altitude wetlands tends to decrease, especially during the last decade. This is related to the increase in surface area observed during the wet season, also during the last decade. Moreover, the surface area is larger during the wet season. As in the case of the Landsat images, it is worth noting that the NDVI values and ranges are higher during the wet season than during the dry season, therefore the classified surface area is larger during this season. The NDVI values during the dry season are compared to other vegetation observed in the area (see Annex 4).

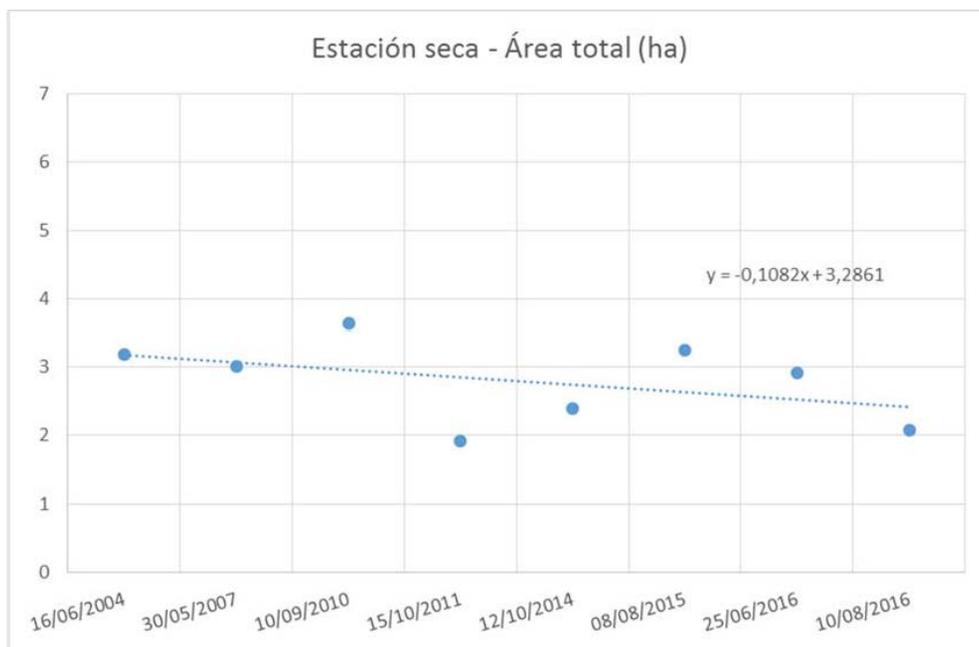


Figure 17. High altitude wetlands surface area during the dry season. 2002 – 2017 period – High resolution images (see details in Table 3)

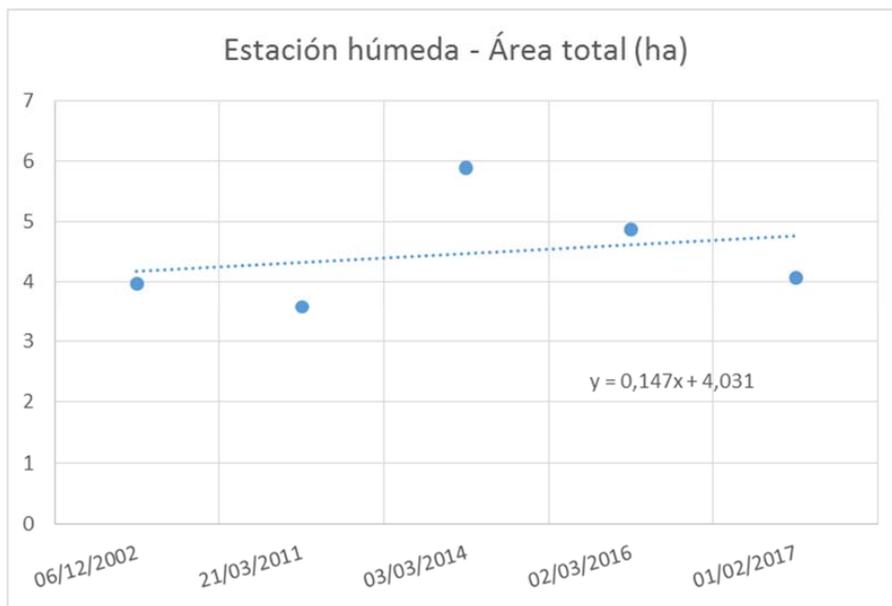


Figura 18. Superficie de los bofedales durante la estación húmeda. Periodo 2002 – 2017 – Imágenes de alta resolución (para los detalles ver Tabla 3)

Las diferencias en superficie que se puede observar entre los bofedales norte, sur y otros en la zona (Figura 19 a Figura 21), muestran que el bofedal sur es el de más superficie junto con los otros bofedales. La superficie de los tres bofedales, en general se ha mantenido estable, sin cambios significativos, especialmente el bofedal norte. Los cambios observados se encuentran relacionados con la variabilidad estacional, la cual puede ser importante en diferentes fechas.

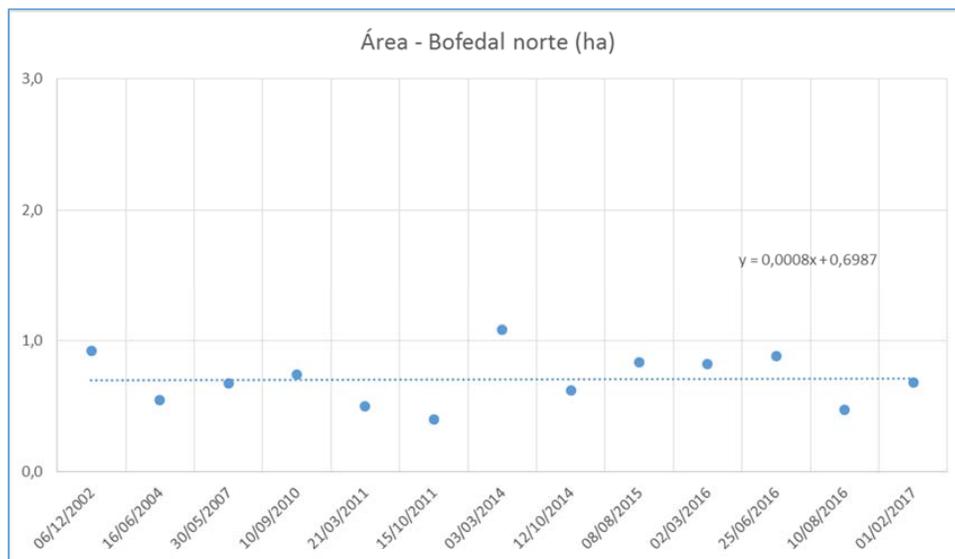


Figura 19. Superficie total del bofedal norte (estación húmeda y seca). Periodo 2002 - 2017 – Imágenes de alta resolución (para los detalles ver Tabla 3)

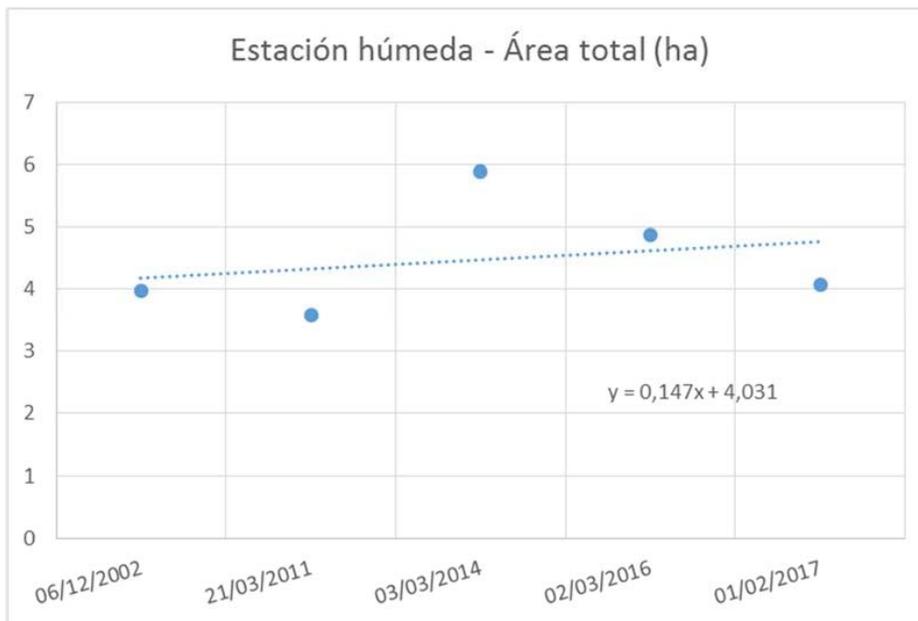


Figure 18. High altitude wetlands surface area during the wet season. 2002 – 2017 period – High resolution images (see details in Table 3)

The differences observed in the surface areas between the northern, southern and other high altitude wetlands in the area (Figure 19 to Figure 21) show that the southern high altitude wetland has the most surface area along with the other high altitude wetlands. The surface area of the three high altitude wetlands has remained, in general, stable, without any significant changes, especially the northern wetland. Any observed changes are related to seasonal variability, which can be significant on different dates.

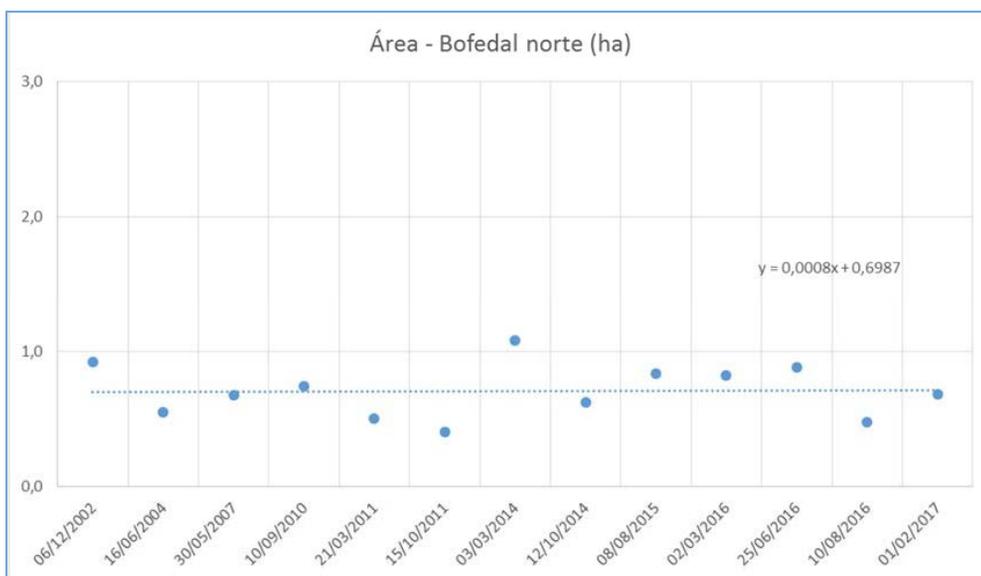


Figure 19. Total surface area of northern high altitude wetland (dry and wet season). 2002 - 2017 period – High resolution images (see details in Table 3)

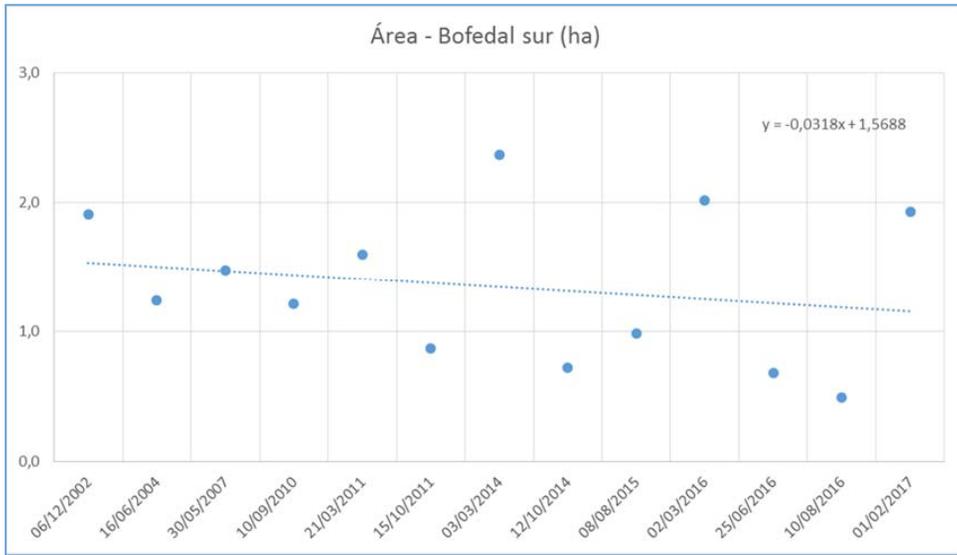


Figura 20. Superficie total del bofedal sur (estación húmeda y seca). Periodo 2002 - 2017 – Imágenes de alta resolución (para los detalles ver Tabla 3)

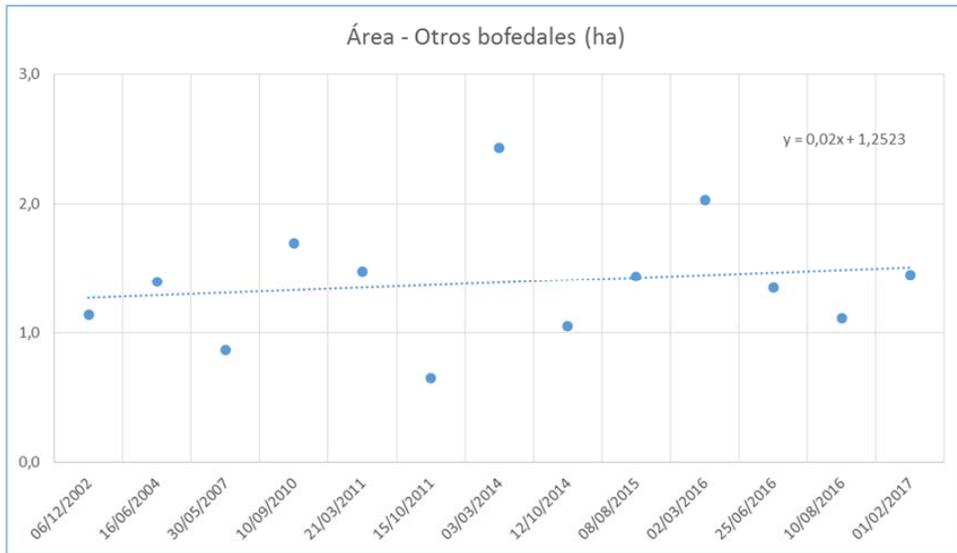


Figura 21. Superficie total de otros bofedales (estación húmeda y seca). Periodo 2002 - 2017 – Imágenes de alta resolución (para los detalles ver Tabla 3)

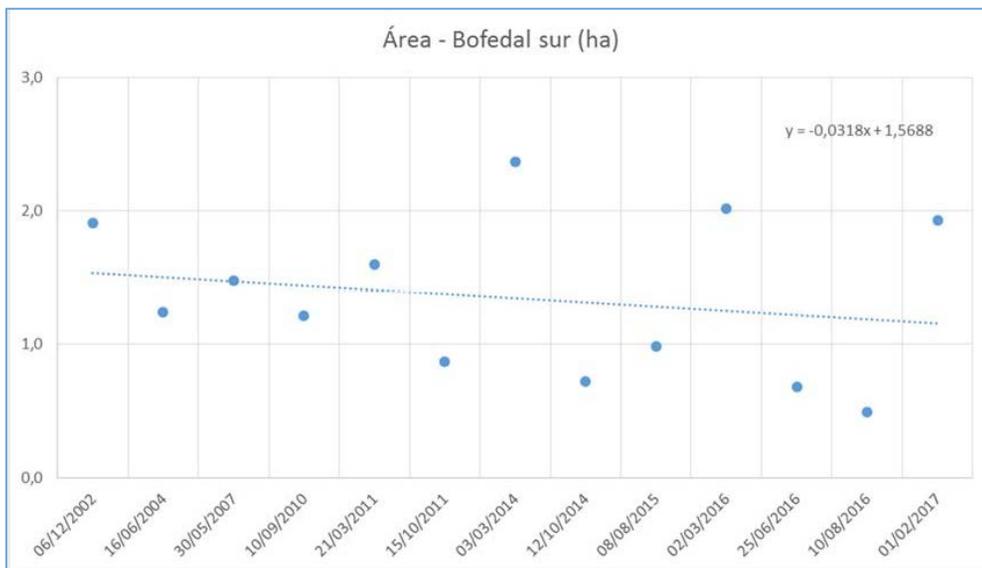


Figure 20. Total surface area of southern high altitude wetland (dry and wet season). 2002 - 2017 period – High resolution images (see details in Table 3)

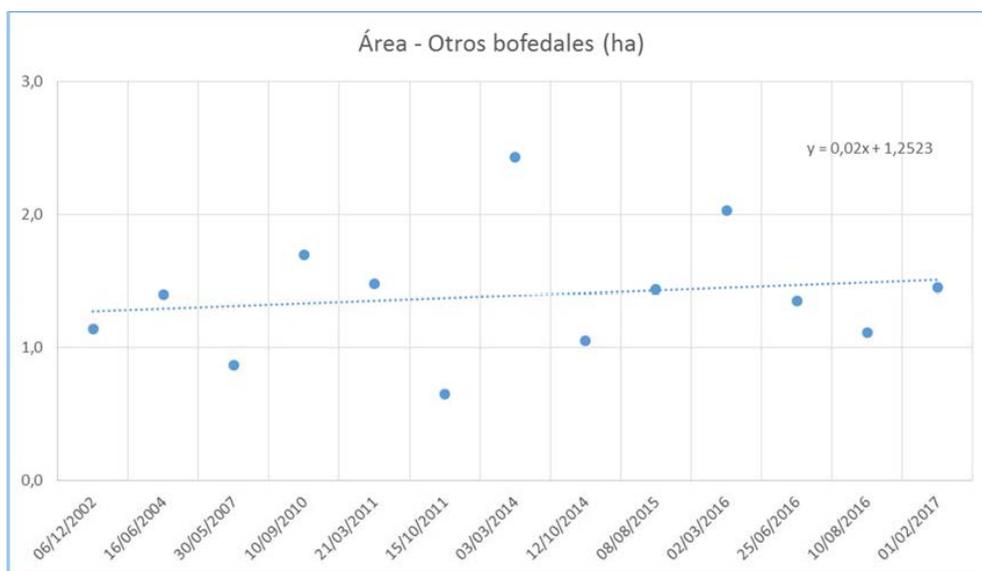


Figure 21. Total surface area of other high altitude wetlands (dry and wet season). 2002 - 2017 period – High resolution images (see details in Table 3)

6.2.2. Análisis de variabilidad de los bofedales

El análisis de los valores NDVI en la superficie de los bofedales clasificada con las imágenes de alta resolución, muestra que estos están distribuidos en una media de 0.25 aproximadamente para la estación seca y 0.50 aproximadamente para la húmeda (Figura 22). En general, no se observa cambios importantes durante el periodo estudiado, la vegetación parece mantenerse en un mismo rango a través de los años y las distintas estaciones. Los cambios observados reflejan las diferencias estacionales, alcanzando los valores más altos durante la estación húmeda, que a su vez muestra un rango de valores ligeramente mayor que el observado durante la estación seca. Sus valores están relacionados con la disponibilidad de agua de lluvia en la fecha considerada.

Todas las fechas muestran un gran número de valores fuera de la media, esto probablemente debido a la mayor resolución espacial, la cual es capaz de captar comportamiento en área más aislada y exclusiva de la vegetación observada en ese punto, sin el efecto de mezcla de coberturas que se puede observar en imágenes de menor resolución, ej. Landsat.

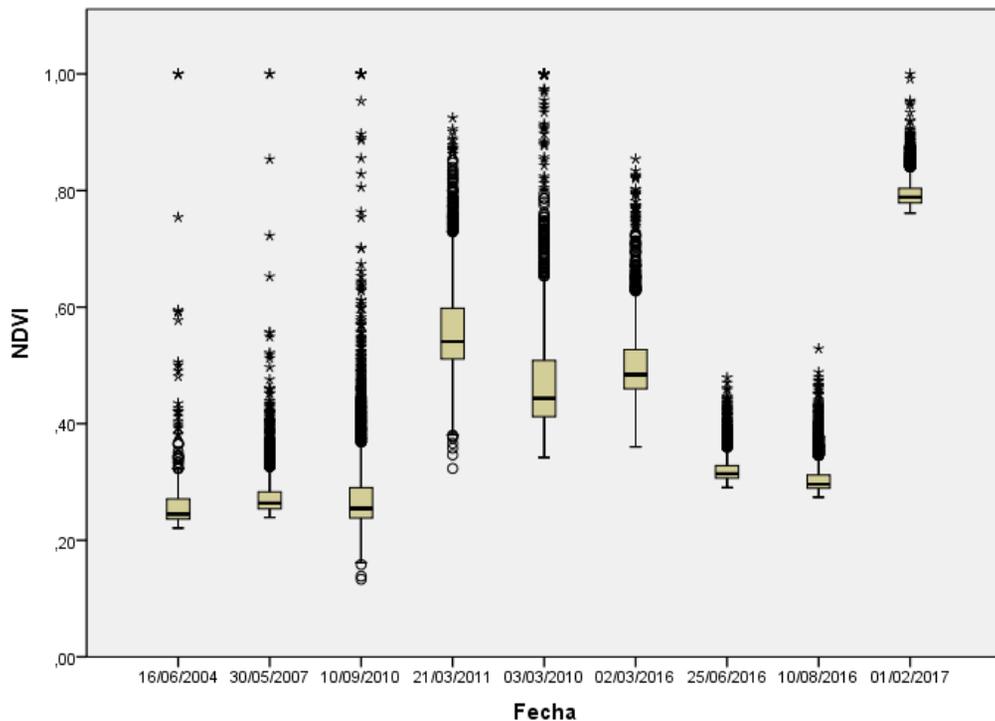


Figura 22. Distribución de los valores NDVI (mínima, primer cuartil, media, tercer cuartil y máxima) para toda la serie de tiempo para el periodo 2002 - 2017– Imágenes de alta resolución

Se evidencia que durante la estación seca existe un rango de valores estable, que no cambia a través de los años estudiados (Figura 23). Por ello, no se observan cambios importantes durante el periodo estudiado. Los valores fuera de la media, que incluso llegan a los más altos, pueden estar relacionados con pequeñas áreas que mantienen su actividad por tener acceso a agua constante,

6.2.2 High altitude wetland variability analysis

The analysis of NDVI values for the surface area of the high altitude wetlands classified using high resolution images shows that the wetlands are distributed in a mean of approximately 0.25 for the dry season and approximately 0.50 for the wet season (Figure 22). In general, no significant changes are observed during the studied period. The vegetation seems to remain within the same range throughout the years and different seasons. Any observed changes reflect seasonal differences, reaching higher values during the wet season, which in turn shows a range of slightly higher values than that observed during the dry season. Its values are related to water availability on the considered date.

All dates show a large number of values falling outside of the mean. This is probably due to the higher spatial resolution, which is able to capture any behavior in a more isolated and exclusive area of the vegetation observed in this point, without the effect of mixing coverages that is observed in lower resolution images, e.g. Landsat.

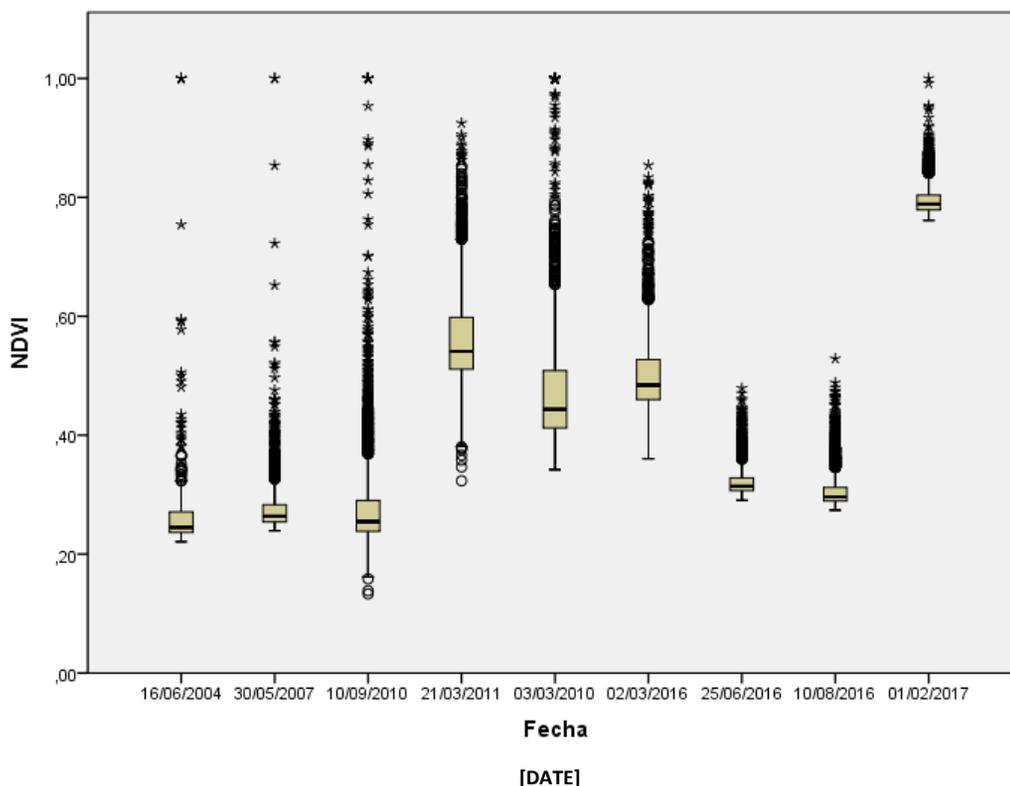


Figure 22. Distribution of NDVI values (minimum, first quartile, mean, third quartile, and maximum) for the entire time series for the 2002 - 2017 period – High resolution images

During the dry season one notes that there is a range of stable values, which does not change over the studied years (Figure 23). Consequently, no significant changes are observed during the studied period. The values that fall outside of the mean, which even reach the highest, could be

sin embargo, estas son aisladas. Se observa que los bofedales durante esta estación se mantienen principalmente en valores de 0.20 a 0.30, un rango pequeño, el cual puede confundirse con vegetación de pastos secos (Anexo 4).

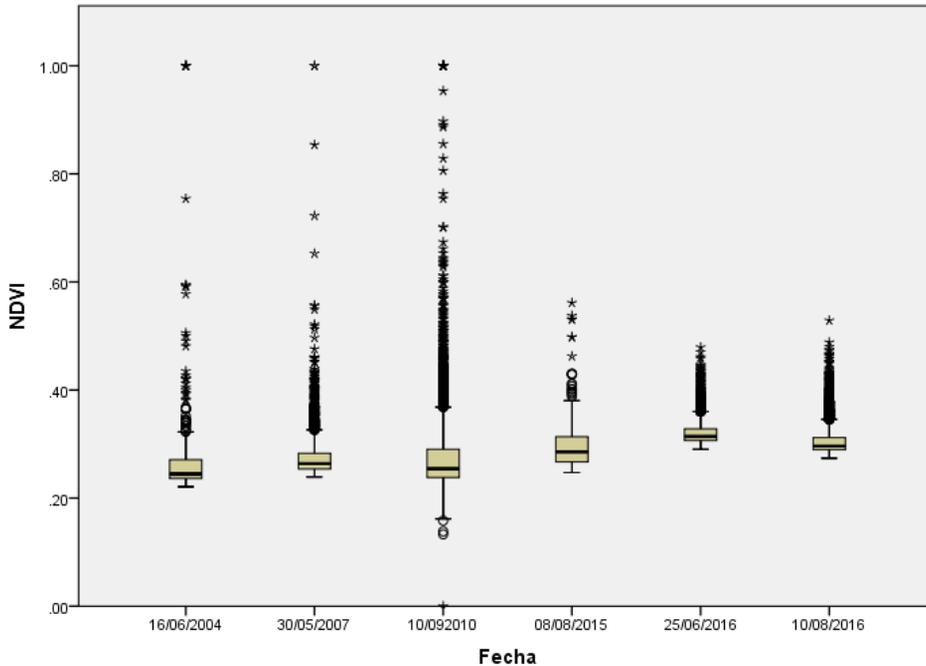


Figura 23. Distribución de los valores NDVI (mínima, primer cuartil, media, tercer cuartil y máxima) para toda la estación seca durante el periodo 2002 - 2017 – Imágenes de alta resolución

Durante la estación húmeda tampoco se evidencian cambios importantes (Figura 24). La media de los valores para esta estación se mantiene entre 0.40 a 0.60 aproximadamente. Los cambios observados están más relacionados con la fecha estudiada y la disponibilidad de agua. Se observa que en el año 2017 se muestran valores marcadamente mayores a los observados en otras fechas, pero que no representan un cambio significativo de la serie temporal.

related to small areas that maintain activity by having constant access to water, however these are isolated. The wetlands during this season remain mainly between values of 0.20 and 0.30, a small range, which could be confused with dry grass vegetation (Annex 4).

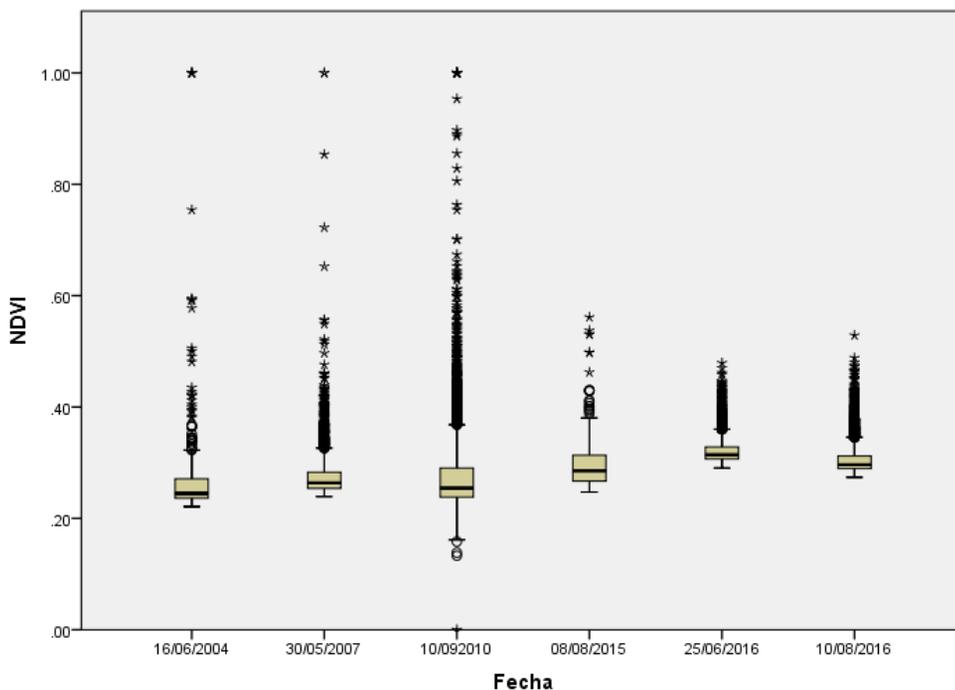


Figure 23. Distribution of NDVI values (minimum, first quartile, mean, third quartile, and maximum) for the entire dry season for the 2002 - 2017 period – High resolution images

No significant changes are noted during the wet season (Figure 24) either. The mean of values for this season remains between approximately 0.40 and 0.60. Any observed changes are related more to the studied date and water availability. Markedly higher values are noted in 2017 than those observed in other dates, but this does not represent a significant change in the time series.

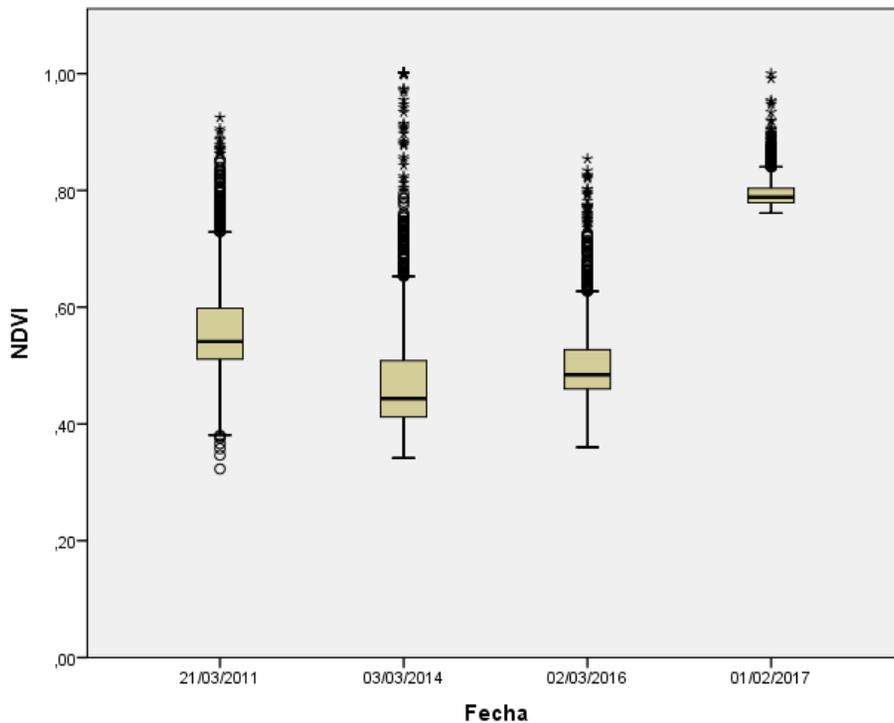


Figura 24. Distribución de los valores NDVI (mínima, primer cuartil, media, tercer cuartil y máxima) para toda la estación húmeda durante el periodo 2002 - 2017 – Imágenes de alta resolución

El análisis de las medias, mínimas y máximas para la serie de datos completa de las imágenes de alta resolución muestra evidencias de cambios importantes durante el periodo de estudio (Figura 25 y Tabla 4). Se puede observar que existen valores que llegan a la máxima del rango NDVI, incluso durante la estación seca. Estos valores pueden responder a superficies pequeñas de vegetación que cuenta con acceso permanente al agua. Los cambios que se observan se relacionan con los cambios estacionales que pueden llegar a ser importantes entre máximas, mínimas y medias en una misma fecha y entre distintos años y estaciones.

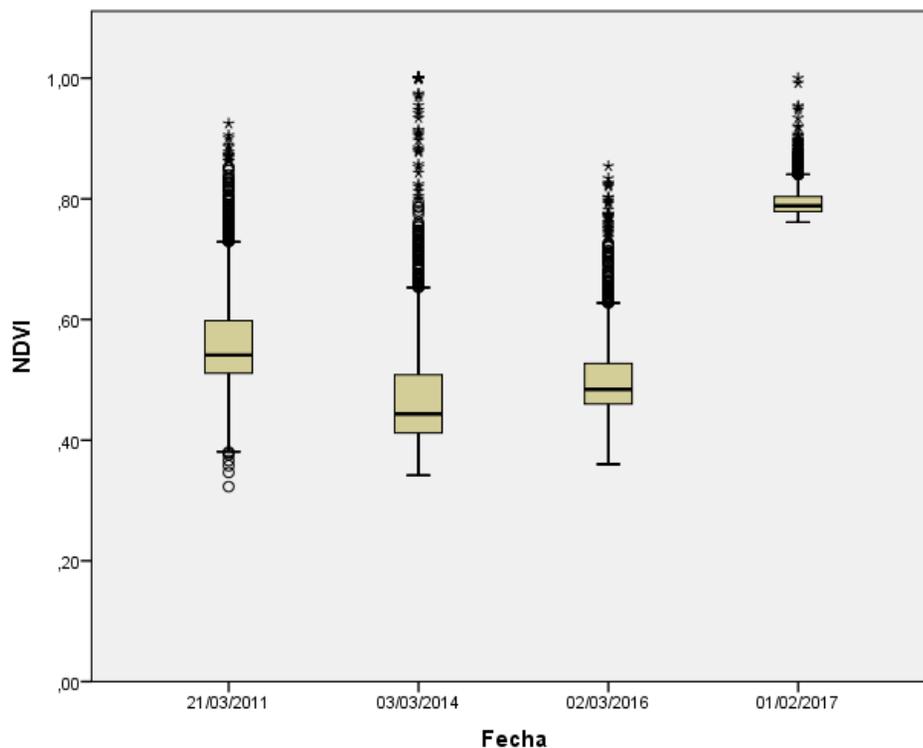


Figure 24. Distribution of NDVI values (minimum, first quartile, mean, third quartile and maximum) for the entire wet season during the 2002 - 2017 period – High resolution images

The analysis of the means, minimums and maximums for the complete data series of the high resolution images shows evidence of significant changes during the studied period (Figure 25 and Table 4). One can observe that there are values that reach the maximum of the NDVI range, even during the dry season. These values could refer to smaller surface areas of vegetation that have permanent access to water. The observed changes relate to seasonal changes that could be important between the maximums, minimums and means of a same date and between different years and seasons.

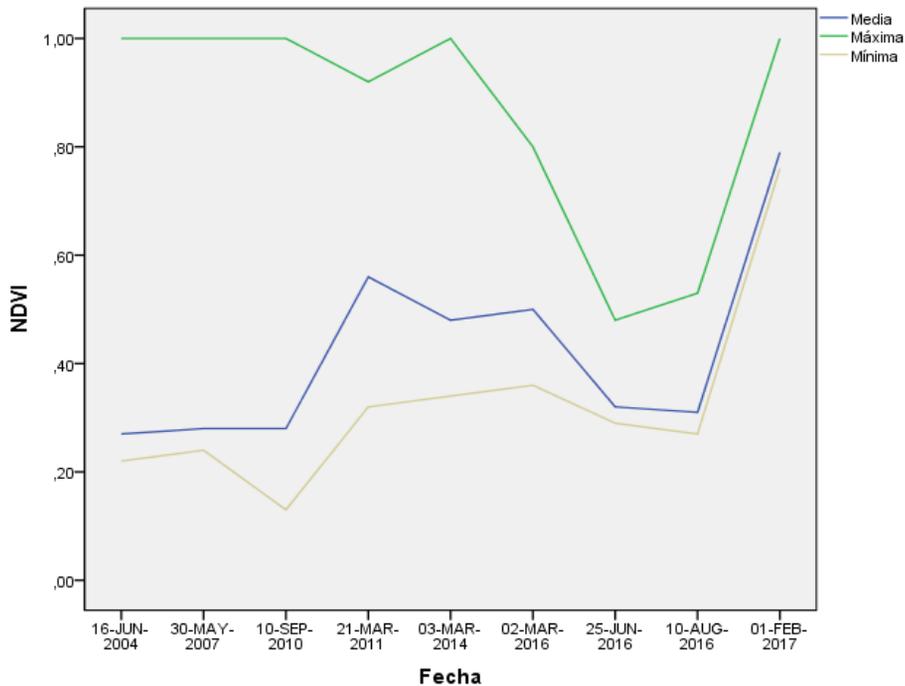


Figura 25. Distribución de los valores NDVI mínimo, medio y máximo para el periodo 2002 -2017 – Imágenes de alta resolución

6.2.3. Análisis de Sensibilidad

Se estima en que 50% y 36% (4 y 2.80 hectáreas aproximadamente) de la superficie total de los bofedales se encuentra en los niveles más altos y medios de sensibilidad, mientras que la superficie restante, 22% (1.79 hectáreas aproximadamente) se encuentra clasificada en los valores medios y bajos de sensibilidad (Figura 26).

De igual manera, se estima que la vegetación que mantiene niveles bajos de sensibilidad es en mayor parte la que depende de fuentes de agua imperecederas; como ojos de agua, lagos, canales, entre otros.

7. Discusión

A pesar de que no se observó una tendencia de cambio en la superficie de los bofedales a largo plazo en ninguno de los periodos, se han podido observar los importantes cambios o fluctuaciones interestacionales e interanuales de superficie y de la actividad de la vegetación. Los cambios en la actividad o “verdosidad” de la vegetación son claramente visibles en una imagen satelital sin la necesidad de aplicar distintas combinaciones de banda para resaltar la vegetación (Anexo 4).

Se ha estimado que la superficie total de los bofedales para el periodo 1975 – 2000 (imágenes Landsat) fluctúa entre 8.01 a 6.21 hectáreas durante la estación húmeda, y 6.75 a 2.16 hectáreas durante la estación seca, representando una variabilidad interestacional de hasta 50% aproximadamente, e interanual de 28% aproximadamente (Tabla 3).

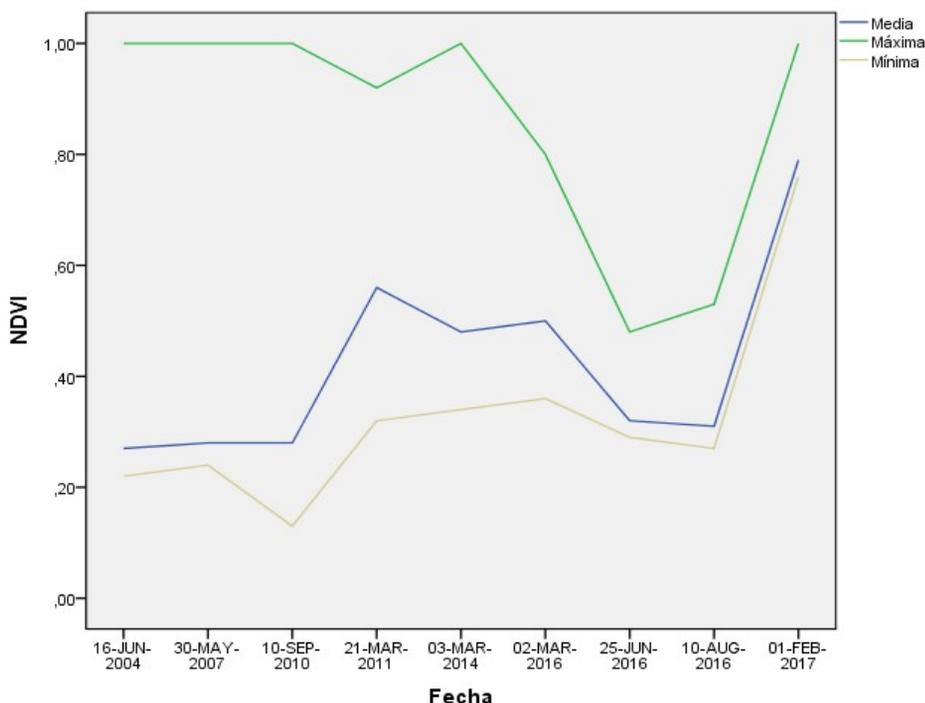


Figure 25. Distribution of minimum, mean and maximum NDVI values for the 2002 -2017 period – High resolution images

6.2.3 Sensitivity analysis

It is estimated that 50% and 36% (approximately 4 and 2.80 hectares) of the total surface area of the high altitude wetlands are at high and medium sensitivity levels, while the remaining surface area, 22% (approximately 1.79 ha), is classified at medium and low sensitivity levels (Figure 26).

Similarly, it is estimated that the vegetation that stays at low sensitivity levels is, for the most part, dependent on imperishable sources of water, such as water sources and springs, lakes, and channels, among others.

7 Discussion

Despite the fact that the surface area of the high altitude wetlands showed no change trend in the long term in any of the periods, important inter-seasonal and interannual changes or fluctuations in the surface area and in the vegetation's activity were noted. Changes in the vegetation's activity or "greenness" are clearly visible in a satellite image without requiring the application different band combinations to highlight the vegetation (Annex 4).

It is estimated that the total surface area of the high altitude wetlands in the 1975 – 2000 period (Landsat image) fluctuates between 8.01 and 6.21 hectares during the wet season, and between 6.75 and 2.16 hectares during the dry season, representing an inter-seasonal variability of up to approximately 50%, and an interannual variability of approximately 28% (Table 3).

Para el periodo 2002 – 2017 (imágenes de alta resolución) la superficie total de los bofedales fluctúa entre 5.88 a 3.58 hectáreas durante la estación húmeda, y 3.65 a 1.92 hectáreas durante la estación seca, representando una variabilidad interestacional de hasta 60% aproximadamente, e interanual de 22% aproximadamente (Tabla 3). Estas variaciones, aunque importantes, se han mantenido en un mismo rango, no significando diferencias de superficie a largo plazo.

Estos resultados de superficie, en promedio, se aproximan a los estimados por medio de GPS en Claros (2005; 214 y SERGEOMIN, 2003). Sin embargo, se observan fechas de menor o mayor superficie, de acuerdo a la estación, que pueden ser de ± 1 hectáreas de diferencia en el caso de las imágenes de alta resolución; y de ± 1.89 hectáreas para las imágenes Landsat, aproximadamente. Es más común observar una cuantificación de la superficie menor a la estimada por medio de GPS en las imágenes de alta resolución, mientras que lo opuesto sucede con las imágenes Landsat. Estas diferencias pueden estar relacionadas con la fecha del año y el tipo de vegetación del humedal considerada en el cálculo de superficie por medio de GPS.

No obstante, a pesar de las diferencias en la resolución espacial, en cuanto al comportamiento se pueden observar los mismos resultados en ambos periodos estudiados. Las diferencias de resolución se evidencian en una cuantificación de superficie mayor, en el caso de las imágenes Landsat (de menor resolución espacial), en contraste con una imagen de alta resolución; lo cual equivale a hasta 40% aproximadamente de la superficie cuantificada por medio de imágenes de alta resolución.

Por otro lado, la tendencia de los cambios estacionales que se observa durante el periodo 1975 – 2000 es hacia el incremento en superficie seca, la cual corresponde con la reducción de la superficie observada durante la estación húmeda. Aunque en menor medida, lo opuesto se observa durante el periodo 2000 – 2017; durante la estación seca la superficie se reduce, e incrementa durante la estación húmeda. La estabilidad de la superficie observada durante toda la serie de tiempo está relacionada con los intercambios de superficie que existe interestacionalmente: la superficie que se identifique como bofedal activo durante la estación húmeda es solo en parte identificada como tal durante la estación seca.

Estos intercambios de superficie entre estaciones son observados como diferencias en rango de valores del NDVI que representan la actividad o “verdosidad” de la vegetación. Existe una mayor actividad durante la estación húmeda, la cual muestra valores NDVI en promedio más altos en una superficie más amplia, mientras que esta actividad se reduce durante la estación seca, reduciendo la superficie identificada como bofedal. Durante esta estación, los valores NDVI llegan a ser similares a la de la vegetación circundante en la zona, no distinguiéndose claramente de esta. Los cambios de superficie están directamente relacionados con la actividad de la vegetación durante la estación seca y húmeda.

En relación a esto, tampoco se han observado cambios de tendencia de los valores NDVI en ninguna de las estaciones. Los valores de NDVI durante la estación seca y húmeda a través de ambos periodos de estudio se han mantenido dentro de los mismos rangos, con diferencias que están más relacionadas con la fecha observada y la disponibilidad de agua. Relacionando este resultado con las tendencias de cambios de superficie observados durante las dos estaciones, se podría confirmar que estos se deben a cambios en la salud del bofedal que no resultan en pérdidas de superficie de

For the 2002 – 2017 period (high resolution images), the total surface area of the wetlands fluctuates between 5.88 and 3.58 hectares during the wet season, and between 3.65 and 1.92 hectares during the dry season, representing an inter-seasonal variability of up to approximately 60%, and an interannual variability of approximately 22% (Table 3). These variations, while significant, have remained within the same range, therefore implying no differences in surface area over the long term.

These surface area-related results are, on average, similar to those estimated by GPS in Claros (2005; 214 and SERGEOMIN, 2003). However, dates of smaller or larger surface areas are observed, based on the season, which could have a ± 1 hectare difference in the case of high resolution images; and ± 1.89 hectares for Landsat images, approximately. It is more common to observe a smaller surface area quantification than that estimated by GPS in the high resolution images, while the opposite occurs with the Landsat images. These differences could be related to the date of the year and the type of vegetation of the high altitude wetlands considered in the calculation of the surface area using GPS.

Nevertheless, despite the differences in spatial resolution, in terms of behavior the same results are noted in both periods studied. The differences in resolution are demonstrated in a higher surface area quantification, in the case of the Landsat images (lower spatial resolution), in contrast to a high resolution image, which is equal to up to approximately 40% of the surface area quantified using high resolution images.

On the other hand, the seasonal changes trend observed during the 1975 – 2000 period shows an increase in dry surface area, which is associated with the decrease in surface area observed during the wet season. On the other hand, to a lesser extent, the opposite is observed during the 2000 – 2017 period; during the dry season the surface area decreases, and increases during the wet season. The stability of the surface area observed during the entire time series is related to the surface area exchanges that occur inter-seasonally: the surface area identified as active high altitude wetland during the wet season is only partially identified as such during the dry season.

These surface area exchanges between seasons are observed as differences in the range of NDVI values that represent the activity or “greenness” of the vegetation. There is greater activity during the wet season, which shows NDVI values that on average are higher on a wider surface area, while this activity drops during the dry season, decreasing the surface area identified as high altitude wetland. During this season, the NDVI values are similar to those of vegetation surrounding the area, where there is no clear distinction between them. The changes in the surface area are directly related to the vegetation’s activity during the dry and wet seasons.

In relation to the above, no trend changes in the NDVI values were observed in any of the seasons either. The NDVI values during the dry and wet seasons in both studied periods remained within the same ranges, with differences that are related more to the observed date and availability of water. If we were to associate this result with the change trends in surface areas observed during both seasons, one could confirm that these are due to changes in the high altitude wetland’s health that do not translate into a loss of the high altitude wetlands’ surface area, in the case of the 1975 – 2000 period, and the opposite during the 2002 – 2017 period.

los bofedales, pero sí a un intercambio estacional que tiende al incremento de la superficie seca, en caso del periodo 1975 – 2000 y lo opuesto durante el periodo 2002 – 2017.

Por otro lado, entre los bofedales norte y sur se observa que durante los distintos periodos estudiados el bofedal norte es el que presenta la mayor estabilidad, es decir una superficie mejor definida que la del bofedal sur u otros bofedales identificados en la zona.

Es de notar que a pesar de las diferencias de resolución, en general, se observan similitudes en el comportamiento de los bofedales entre los dos periodos estudiados. Los valores NDVI entre ambos tipos de resolución y sensores, es en promedio de menor magnitud para las imágenes de alta resolución. El rango de variación, especialmente en píxeles fuera de la media, es mucho mayor, esto debido a una mayor capacidad de captar diferentes cambios en una misma área. No obstante, el comportamiento observado, tanto en superficies como los valores de NDVI, muestran una misma estabilidad, sin cambios importantes.

En cuanto a la sensibilidad de los bofedales, se observa que hay un importante porcentaje de su superficie que reduce su actividad durante la estación seca. Esto significa que una mayor superficie es propensa a cambios en la disponibilidad de agua, ya sean por cambios de manejo de los bofedales o la reducción de la cantidad o duración de las lluvias estacionales debido al cambio climático. En el caso de los Bofedales del Silala, la superficie de los bofedales se limita a las áreas estables (baja sensibilidad), que aún reciben aportes de agua subterránea, mientras las superficies que pasan por cambios importantes (alta sensibilidad) dependen casi exclusivamente de las lluvias estacionales y pueden encontrarse en varias etapas de sucesión de especies de vegetación, incluso, ya no pudiéndose considerar bofedal o humedal (Figura 16 y Figura 26). Estas últimas pueden considerarse áreas afectadas por el drenaje de las aguas hacia los canales. Es posible que las superficies de alta sensibilidad hayan sido en algún momento parte de la superficie de bofedales permanentemente activa en un estado natural, sin la intervención que actualmente se observa producto de los trabajos de captación y canalización de agua para su transporte a territorio chileno. En términos generales, esto puede corresponder a aproximadamente el 70 - 80% de la superficie total mapeada a largo plazo consideradas de alta y media sensibilidad durante ambos periodos estudiados, es decir, aproximadamente 5 ha afectadas, existiendo 3 ha de bofedal en diferentes grados de afectación⁶. Estos porcentajes coinciden con los estimados por otros estudios (Claros, 2005; SERGEOMIN, 2003, Ramsar, 2017;) en cuanto a la afectación de los canales a la vegetación de los bofedales. Se debe considerar que este cálculo no considera las áreas/bofedales salinos (aproximadamente 2.5 ha), que se estima formaron parte del Bofedal Sur en estado natural y que actualmente no muestran actividad (respuesta a la disponibilidad de humedad) en ninguna de las fechas estudiadas.

Los bofedales, por formarse en climas áridos con limitados recursos de agua, pueden ser extremadamente vulnerables a los cambios del clima y el uso de suelos que puede alterar la hidrología del bofedal y reducir la acumulación de turba (Chimner y Cooper, 2003; Cooper et al., 2015 citados en Hribljan et al., 2015). Uno de los efectos observados por la reducción de la profundidad de capa freática que se mantiene baja por varios meses en los bofedales de Bolivia (incluso la época de lluvias) es la desconexión de las plantas de su fuente de agua subterránea, lo

⁶ Aproximación en base al Mapa de Sensibilidad – Imágenes de alta resolución.

On the other hand, during the different periods studied, in comparing the northern and southern high altitude wetlands, the northern high altitude wetland displays greater stability, namely, a surface area that is better defined than that of the southern high altitude wetland or other high altitude wetlands identified in the area.

It is worth noting that despite the differences in resolution, in general similarities were observed in the wetlands' behavior in the two periods studied. The NDVI values between both types of resolution and sensors are on average lower for the high resolution images. The variation range, especially with respect to the pixels falling outside of the mean, is much wider due to a greater ability to capture different changes in a same area. Nevertheless, the observed behavior, both with respect to the surface areas and the NDVI values, show the same stability, without any significant changes.

With respect to the sensitivity of the high altitude wetlands, an important percentage of their surface area decreases in terms of activity during the dry season. This means that a larger surface area is susceptible to changes in water availability, either due to changes in how the wetlands are managed or a drop in the amount or duration of the seasonal rainfall due to climate change. In the case of the Silala Springs, the surface area of the wetlands is limited to the stable areas (low sensitivity), which still receive inputs of underground water, while the surfaces that experience important changes (high sensitivity) depend almost exclusively on seasonal rainfall and may undergo several sequential stages of vegetation species, to the point where they may no longer be considered high altitude wetlands (*bofedales*) or wetlands (*humedales*) (Figure 16 and Figure 26). The latter could be considered as areas affected by the draining of the water to the channels. High sensitivity surface areas may have possibly at one point in time been part of the surface area of the permanently active high altitude wetlands in a natural state without the intervention currently observed as a result of the water collection and channeling works implemented to transport the water to the Chilean territory. In general terms, this could involve 70 - 80% of the total surface area mapped over the long term and considered as highly or medium sensitive during both periods studied, namely, approximately 5 affected ha, where 3 ha of high altitude wetlands have been affected to different degrees.⁶ These percentages coincide with those estimated by other studies (Claros, 2005; SERGEOMIN, 2003; Ramsar, 2017;) in connection with the impact of the channels on the high altitude wetlands' vegetation. It is worth considering that this calculation does not consider the saline areas/high altitude wetlands (approximately 2.5 ha) that it is estimated form part of the Southern Wetland in its natural state, and which currently show no activity (response to the availability of moisture) in any of the dates studied.

High altitude wetlands, because they are formed in arid climates with limited water resources, can be extremely vulnerable to climate changes and soil usage that could alter the high altitude wetland's hydrology and reduce the accumulation of peat (Chimner and Cooper, 2003; Cooper et al., 2015 cited in Hribljan et al., 2015). One of the noted effects of the reduction in the depth of the phreatic layer that remains low for several months in Bolivia's high altitude wetlands (including during the rainy season) is that the plants are cut off from their source of underground water, resulting in higher plant mortality (Cooper et al., 2015).

⁶ Approximate figure based on the Sensitivity Map – High resolution images.

que resulta en una mayor mortalidad de las plantas (Cooper et al., 2015). Además, se ha reportado que en los Andes Sur de Chile, la producción de biomasa muestra cambios por la reducción de la temporada de crecimiento, lo cual está directamente relacionado con los fenómenos de El Niño y La Niña, donde periodos prolongados de reducción de la disponibilidad de agua contribuyen a la degradación de la vegetación. De existir procesos de autorregulación del ciclo hidrológico, estos también contribuirían a la degradación de los bofedales, reduciendo su extensión y acelerando el deterioro de estos delicados ecosistemas (Squeo et al., 2006).

Por otro lado, se debe considerar que el Índice NDVI otorga valores bajos o negativos a superficies inundadas o saturadas, lo cual podría incrementar la incertidumbre de los resultados.

Moreover, there have been reports that the production of biomass in the Southern Andes of Chile has shown certain changes due to the reduction in the growth season, which is directly related to the phenomena of El Niño and La Niña where prolonged periods of low water availability contribute to vegetation degradation. If there are any self-regulating processes of the hydrological cycle, these too would contribute to the degradation of the high altitude wetlands, reducing their extension and speeding up the deterioration of these delicate ecosystems (Squeo et al., 2006).

On the other hand, the NDVI provides low or negative values for inundated or saturated surfaces, which could increase the uncertainty regarding the results.

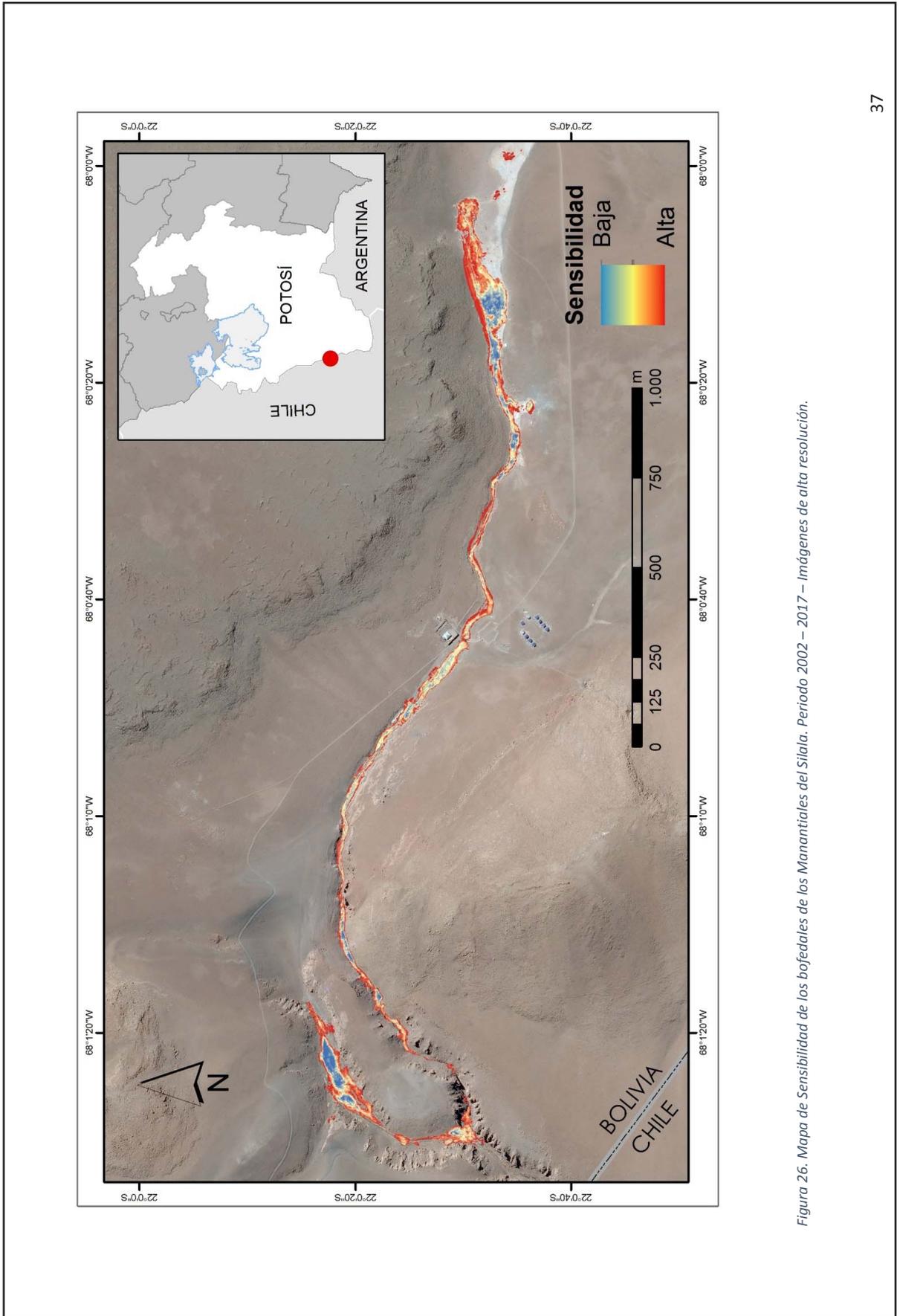


Figura 26. Mapa de Sensibilidad de los bofedales de los Manantiales del Silala. Periodo 2002 – 2017 – Imágenes de alta resolución.

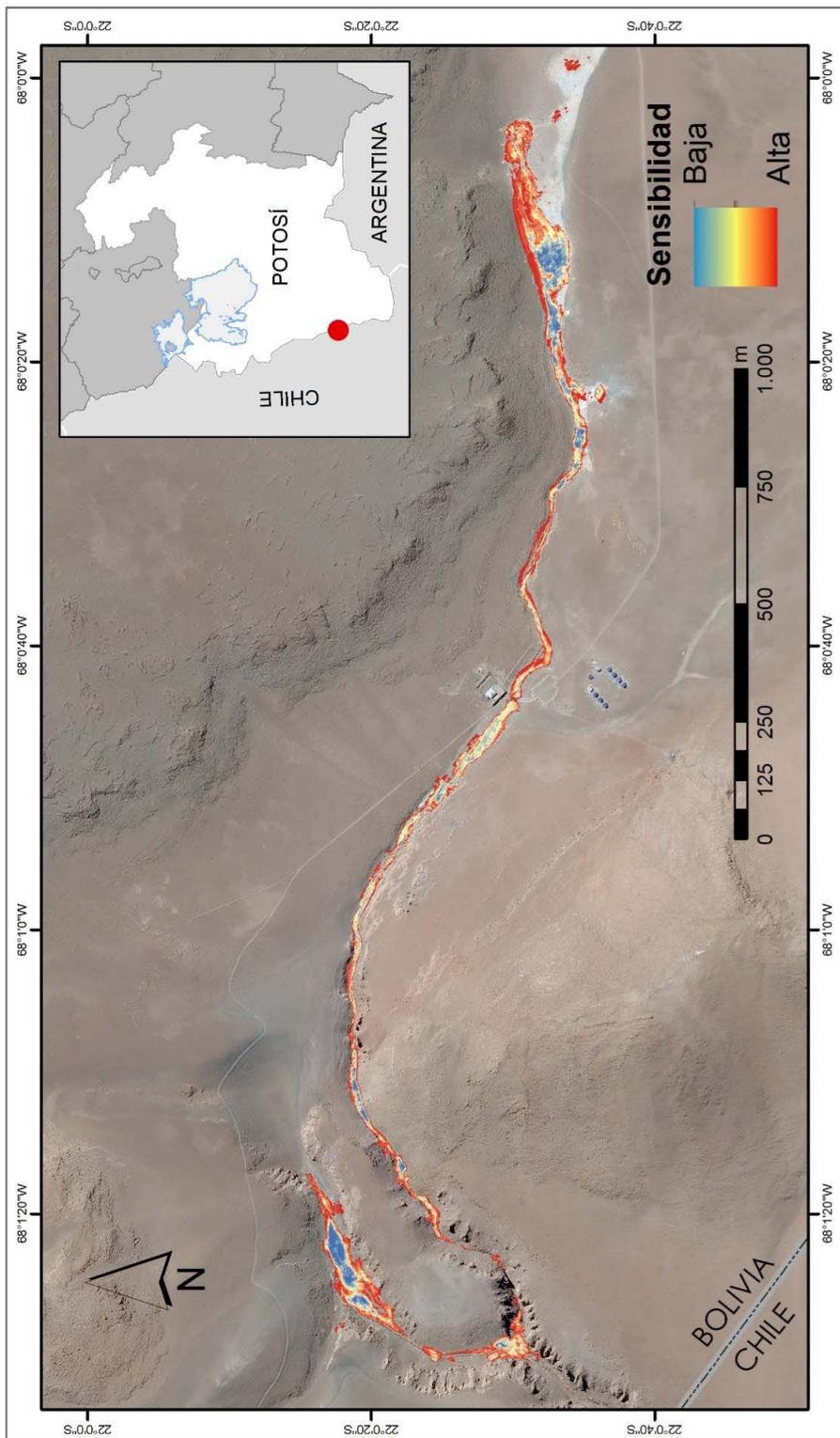


Figure 26. Silala Spring high altitude wetlands Sensitivity Map, 2002 – 2017 Period – High resolution images.

8. Conclusiones

El presente trabajo tuvo como objetivo realizar el análisis multi-temporal de los bofedales para identificar cambios en la superficie y la vegetación de los bofedales de los Manantiales del Silala. Se han analizado dos periodos de tiempo tomando en cuenta la estación húmeda y seca: 1975 – 2000, con imágenes Landsat de resolución media, y el periodo 2002 – 2017, con imágenes de alta resolución. Para la delimitación de la superficie de los bofedales se ha utilizado el índice NDVI y la clasificación no supervisada de Jenks Natural Breaks Optimization. Los resultados son utilizados para realizar el análisis de los cambios en el comportamiento de la vegetación, representados por el rango -1 a 1 del índice NDVI, como indicadores de actividad o salud de la vegetación.

Como resultado, se ha estimado una superficie total de los bofedales para el periodo 1975 – 2000 (imágenes Landsat) que fluctúa entre 8.01 a 6.21 hectáreas durante la estación húmeda, y 6.75 a 2.16 hectáreas durante la estación seca, representando una variabilidad interestacional de hasta aproximadamente 50%, e interanual de aproximadamente 28%. Y para el periodo 2002 – 2017 (imágenes de alta resolución) de entre 5.88 a 3.58 hectáreas durante la estación húmeda, y 3.65 a 1.92 hectáreas durante la estación seca, representando una variabilidad interestacional de hasta 60%, e interanual de aproximadamente de 22%.

Durante ambos periodos estudiados no se han observado cambios importantes a largo plazo en la superficie de los bofedales. Tanto de las imágenes Landsat como las imágenes de alta resolución, muestran que a pesar de existir una importante variabilidad estacional, no se observa una tendencia a la disminución de su superficie total de los bofedales.

La importante variabilidad estacional observada muestra la alta dependencia de los bofedales de los Manantiales del Silala a la lluvia estacional como principal fuente de agua, por lo que no recibe suficiente aporte de agua subterránea, como se esperaría de este tipo de bofedal en estado natural. En ese sentido, gran parte de la superficie mapeada podría no ser considerada bofedal, estimándose en 5 ha afectadas y 3 ha de bofedal en diferentes grados de afectación. Adicionalmente, su alta dependencia a la disponibilidad de agua estacional los puede hacer sensibles a los cambios por distintos factores, como el cambio climático.

Las diferencias en la resolución espacial se manifiestan en la cuantificación del área definida como bofedal, obteniendo, como era de esperarse, una menor extensión con respecto a las imágenes de menor resolución. No obstante, la variabilidad en superficie es la misma, a pesar de representar dos periodos distintos. Por otro lado, el comportamiento de los cambios en la “verdosidad” o de actividad de la vegetación es similar en ambos periodos, a pesar de presentar un rango de valores inferior y más variable (mayor número de outliers) en las imágenes de alta resolución.

Los dos periodos de estudio son relativamente cortos para definir tendencias de cambio, que deben ser evaluados a través de un análisis de significancia. Por otro lado, los bofedales de los Manantiales del Silala han permanecido en ese estado de intervención desde inicios del siglo XX, por lo que un periodo de tiempo en un estado natural, sin intervención, no puede ser analizado a través de imágenes satelitales.

En conclusión, los bofedales han alcanzado a un estado de estabilidad hidrológica que depende casi exclusivamente de la disponibilidad de agua proporcionada por las lluvias estacionales. Debido a esta disponibilidad temporal de agua, se observan importantes cambios estacionales en la superficie

8 Conclusions

The objective of this report was to conduct a multi-temporal analysis of the high altitude wetlands to identify any changes in the surface area and the vegetation of the high altitude wetlands of the Silala Springs. Two time periods have been analyzed, taking into account the wet and dry seasons: the 1975 – 2000 period, using medium resolution Landsat imaging, and the 2002 – 2017 period, using high resolution imaging. In order to delimit the surface area of the high altitude wetlands, the NDVI was used as well as the unsupervised classification Jenks Natural Breaks Optimization. The results are used to analyze any changes in the vegetation's behavior, represented by the -1 to 1 range of the NDVI as indicators of the vegetation's activity or health.

As a result, a total surface area of the high altitude wetlands has been estimated for the 1975 – 2000 period (Landsat images) that fluctuates between 8.01 and 6.21 hectares during the wet season, and between 6.75 and 2.16 hectares during the dry season, representing an inter-seasonal variability of up to approximately 50%, and an interannual variability of approximately 28%. And for the 2002 – 2017 period (high resolution images) between 5.88 and 3.58 hectares during the wet season, and between 3.65 and 1.92 hectares during the dry season, representing an inter-seasonal variability of up to 60%, and an interannual variability of approximately 22%.

No significant long-term changes were noted during both periods studied in the surface of the high altitude wetlands. Both the Landsat images and the high resolution images show that although there is significant seasonal variability, there is no trend toward a decrease in the total surface area of the high altitude wetlands.

The observed important seasonal variability shows the strong dependence that the Silala Spring high altitude wetlands have on seasonal rainfall as their main source of water, in light of the fact that they do not receive enough groundwater, which is normally expected for this type of wetlands in their natural state. In this regard, a large part of the mapped surface could possibly not be considered high altitude wetland, estimated at 5 affected hectares and 3 hectares of high altitude wetland affected to different degrees. Additionally, their high dependence on seasonal water availability make them sensitive to changes caused by different factors, such as climate change.

Differences in spatial resolution become apparent in the quantification of the area defined as a high altitude wetland, obtaining, as expected, a smaller extension with lower resolution images. Nevertheless, the surface area variability is the same, despite representing two different periods. On the other hand, the behavior of the changes in the vegetation's "greenness" or activity is similar in both periods, despite the fact they present smaller and more variable ranges of values (higher number of outliers) in the high resolution images.

The two periods that were studied are relatively short for defining change trends, which must be evaluated through a significance analysis. On the other hand, the Silala Spring high altitude wetlands have remained in this state of intervention since the beginning of the XX century, therefore they could not be analyzed through satellite imaging over a period of time in a natural state, without intervention.

In conclusion, the high altitude wetlands have reached a state of hydrological stability that depends almost exclusively on the availability of water provided by seasonal rainfall. Due to this

de los bofedales, que se relacionan con un importante porcentaje de la superficie total identificada con una alta y media sensibilidad a los cambios en la disponibilidad de agua, ya sean por cambios en el manejo de los bofedales o periodos más largos de estiajes a causa del cambio climático.

seasonal water availability, important seasonal changes were observed in the surface area of the high altitude wetlands, relating to a significant percentage of the total surface area identified as having a high and medium sensitivity to changes in water availability, whether due to changes in how the high altitude wetlands are managed or to longer dry seasons because of climate change.

9. Referencias bibliográficas

Alzérreca, H., Prieto, G., Laura, J., et al. (2001) **Características y distribución de los bofedales en el Ambito Boliviano. Informe de Consultoría. Asociación Integral de Ganaderos En Camélidos de Los Andes Altos (AIGACAA)**

Anchang, J.Y., Ananga, E.O. and Pu, R. (2016) **An efficient unsupervised index based approach for mapping urban vegetation from IKONOS imagery**. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 50: 211–220

Beck, S., Domic, A., García, C., et al. (2010) **El Parque Nacional Sajama y sus plantas**. Herbario Nacional de Bolivia, La Paz

Bernstein, L.S., Jin, X., Gregor, B., et al. (2012) **Quick atmospheric correction code: algorithm description and recent upgrades**. Optical engineering, 51 (11): 111711–111719

Bradley, C. and Salyer, K. (1999) **A Method for Deriving Phenological Metrics...** [online]. Available from: <http://geochange.er.usgs.gov/sw/impacts/biology/Phenological-CO/>

Buttolph, L.P. (1998) **Rangeland dynamics and pastoral development in the high Andes: The camelid herders of Cosapa, Bolivia**.

Chuvieco, E. (1996) **Fundamentos de Teledetección**. 3ª edición revisada. Ediciones RIALP, Madrid. España

Claros, F. (2005) **Recopilación de Información Técnica sobre Recursos Hídricos del Silala Tomo I: Parte I a Parte IV. Editado UDAPEX**.

Cooper, D.J., Kaczynski, K., Slayback, D., et al. (2015) **Growth and Organic Carbon Production in Peatlands Dominated by, Bolivia, South America**. Arctic, Antarctic, and Alpine Research [online], 47 (3): 505–510. Available from: <http://www.bioone.org/doi/abs/10.1657/AAAR0014-060>

Coronel, J.S. (2010) **Bofedales de la cuenca del río Mauri: vegetación y características físico - químicas**.

Dewi, E.K. and Trisakti, B. (2017) **COMPARING ATMOSPHERIC CORRECTION METHODS FOR LANDSAT OLI DATA**. International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences (IJReSES), 13 (2): 105–120

DHI (2017) **Fase II, Producto N° 2. Informe Provisional N° 1 - Flujos Superficiales**.

Digital Globe (2017) **Absolute Radiometric Calibration: 2016v0**

Earle, L.R., Warner, B.G. and Aravena, R. (2003) **Rapid development of an unusual peat-accumulating ecosystem in the Chilean Altiplano**., 59: 2–11

ENVI (2013) **Vegetation Analysis: Using Vegetation Indices in ENVI**. Exelis VIS [online]. Available from: <http://www.exelisvis.com/Learn/WhitepapersDetail/TabId/802/ArtMID/2627/ArticleID/13742/Vegetation-Analysis-Using-Vegetation-Indices-in-ENVI.aspx>

ENVI (2017) **Change Detection Analysis** [online]. Available from: <https://www.harrisgeospatial.com/docs/ChangeDetectionAnalysis.html>

ESRI (2017) **ArcGIS Help** [online]. Available from: <http://desktop.arcgis.com>

FAN (2003) **Ecoregiones de Bolivia**

Fonkén, M.S.M. (2014) **An introduction to the bofedales of the Peruvian High Andes**. *Mires and Peat*, 15 (DECEMBER 2014): 1–13

Frolking, S., Talbot, J., Jones, M.C., et al. (2011) **Peatlands in the Earth's 21st century climate system**. *Environmental Reviews*, 19 (NA): 371–396

Gavazzi, G.M., Madricardo, F., Janowski, L., et al. (2016) **Evaluation of seabed mapping methods for fine-scale classification of extremely shallow benthic habitats—application to the Venice Lagoon, Italy**. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 170: 45–60

Hartman, B.D., Bookhagen, B. and Chadwick, O.A. (2016) **The effects of check dams and other erosion control structures on the restoration of Andean bofedal ecosystems**. *Restoration Ecology*, 24 (6): 761–772

Hribljan, J.A., Cooper, D.J., Sueltenfuss, J., et al. (2015) **Carbon storage and long-term rate of accumulation in high-altitude Andean peatlands of Bolivia**. *Mires and Peat* [online], 15 (12): 1–14. Available from: <http://www.mires-and-peat.net/>,

Jenks, G.F. (1967) **The data model concept in statistical mapping**. *International yearbook of cartography*, 7 (1): 186–190

Ji, W. (2007) **Wetland and water resource modeling and assessment: a watershed perspective**. CRC Press

klein Gebbinck, M.S., Bibliotheek, C.K. and Klein, M.S. (1998) **Decomposition of mixed pixels in remote sensing images to improve the area estimation of agricultural fields**.

Mandanici, E., Franci, F., Bitelli, G., et al. (2015) **“Comparison between empirical and physically based models of atmospheric correction.”** In Third International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment. 2015. International Society for Optics and Photonics. p. 95350E–95350E

Mitsch, W. (1993) **Ecological engineering a cooperative role with the planetary life-support system**. *Environmental Science & Technology*, 27 (3): 438–445

Morsy, S., Shaker, A., El-Rabbany, A., et al. (2016) **AIRBORNE MULTISPECTRAL LIDAR DATA FOR LAND-COVER CLASSIFICATION AND LAND/WATER MAPPING USING DIFFERENT SPECTRAL INDEXES**. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 3 (3)

Navarro, G., Ferreira, W. and Chambi, J. (2007) **Mapeo, clasificación y descripción de la vegetación de Bolivia. Escala 1: 250 000**. 2007th ed. Rumbol

Navarro, G. and Maldonado, M. (2002) **Geografía ecológica de Bolivia: Vegetación y ambientes acuáticos** [online]. Centro de Ecología Simón I. Patiño, Departamento de Difusión. Available from: <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IisScript=AGRISUM.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=000241>

Otto, M., Scherer, D. and Richters, J. (2011) **Hydrological differentiation and spatial distribution of high altitude wetlands in a semi-arid Andean region derived from satellite data**. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15 (5): 1713–1727

Ramsar (2017) **Misión Ramsar de Asesoramiento N° 84 - Sitio Ramsar Los Lipez, Bolivia**

Ramsar, S. de la C. de (2006) **Manual de la Convención de Ramsar**, 4a. edición. Secretaría de la Convención de Ramsar [online], 4 (4): 93–99. Available from:
<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10256016.2013.831089>http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:No+Title#0%5Chttp://www.ramsar.org/pdf/lib/lib_manual2006s.pdf%5Chttp://www.tellusb.net/index.php/tellusb/article/view/16628

Ruthsatz, B. (2012) **Vegetation and ecology of the high Andean peatlands of Bolivia**.
Phytocoenologia, 42 (3–4): 133–179

SERGEOMIN (2003) **ESTUDIO DE LA GEOLOGÍA, HIDDROLOGÍA, HIDROGEOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE DEL ÁREA DE LOS MANANTIALES DE SILALA**

Squeo, F.A., Warner, B.G., Aravena, R., et al. (2006) **Bofedales: High altitude peatlands of the central Andes**. *Revista Chilena de Historia Natural*, 79 (2): 245–255

Tobler, W. (1987) **“Measuring spatial resolution.”** In Proceedings, Land Resources Information Systems Conference. 1987. pp. 12–16

USGS (2004) **Remote Sensing Phenology**. [online]. Available from:
<http://phenology.cr.usgs.gov/overview.php>

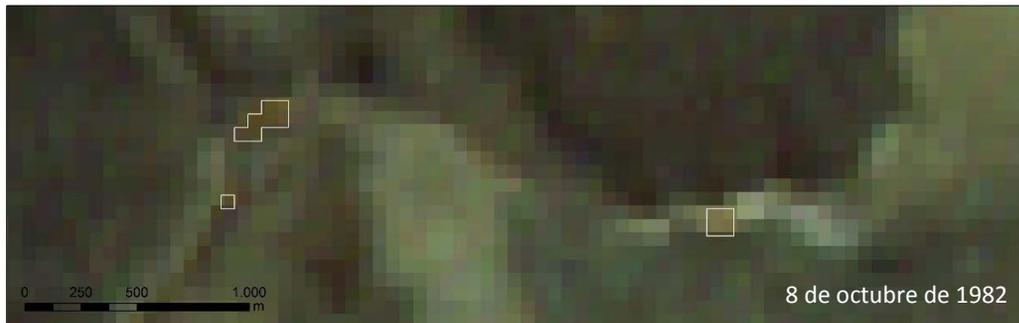
Weier, J. and Herring, D. (2000) **Measuring Vegetation (NDVI & EVI)** [online]. Available from:
<https://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/>

10. Anexos

Anexo 1: Características de las imágenes satelitales utilizadas

N°	N° Tipo	Fechas	Tipo	Resolución (metros)	Cloud	RMSE Registration
1	1	06/10/1975	Landsat MS	60		0,503
2	2	08/10/1982	Landsat MS	60	1	0,527
3	3	25/01/1985	Landsat TM	30	2	0,645
4	4	05/08/1985	Landsat TM	30	2	0,281
5	5	30/10/1987	Landsat TM	30	0	0,307
6	6	31/01/1987	Landsat TM	30	0	0,71
7	7	17/09/1989	Landsat TM	30	1	0,383
8	8	21/02/1989	Landsat TM	30	3	0,284
9	9	23/09/1991	Landsat TM	30	19	0,328
10	10	27/02/1991	Landsat TM	30	19	0,664
11	11	16/02/1993	Landsat TM	30	8	0,176
12	12	14/10/1993	Landsat TM	30	3	0,319
13	13	18/09/1995	Landsat TM	30	22	0,311
14	14	05/01/1995	Landsat TM	30	19	0,309
15	15	10/09/1998	Landsat TM	30	12	0,350
16	16	14/02/1998	Landsat TM	30	0	0,299
17	17	23/09/2000	Landsat TM	30	17	0,285
18	18	12/02/2000	Landsat TM	30	5	0,386
19	1	06/12/2002	SPOT 5-m Colour	5	0	0,429
20	2	16/06/2004	QB02	0,5	0	Automatic
21	3	30/05/2007	QB02	0,5	0	Automatic
22	4	10/09/2010	GE01	0,5	0	Automatic
23	5	21/03/2011	GE01	0,5	0	Automatic
24	6	15/10/2011	QB02	0,5	0	Automatic
25	7	03/03/2014	QB02	0,5	0	Automatic
26	8	12/10/2014	GE01	0,5	0	Automatic
27	9	08/08/2015	SPOT 5-m Colour	5	0	Automatic
28	10	02/03/2016	GE01	0,5	0	Automatic
29	11	25/06/2016	Pléiades 0.5-m	0,5	0	Automatic
30	12	10/08/2016	Pléiades 0.5-m	0,5	0	Base
31	13	01/02/2017	Pléiades 0.5-m	0,5	0	Automatic

Anexo 2: Resultados de la clasificación para las imágenes Landsat RGB 4,3,2 (resaltando vegetación en rojo)





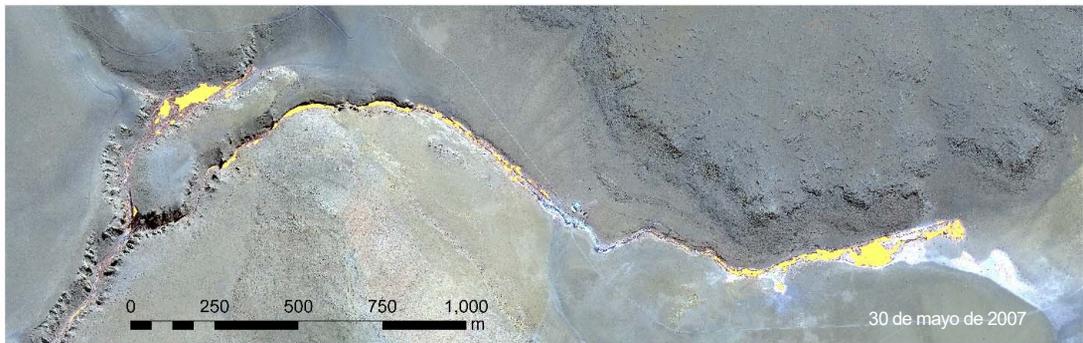
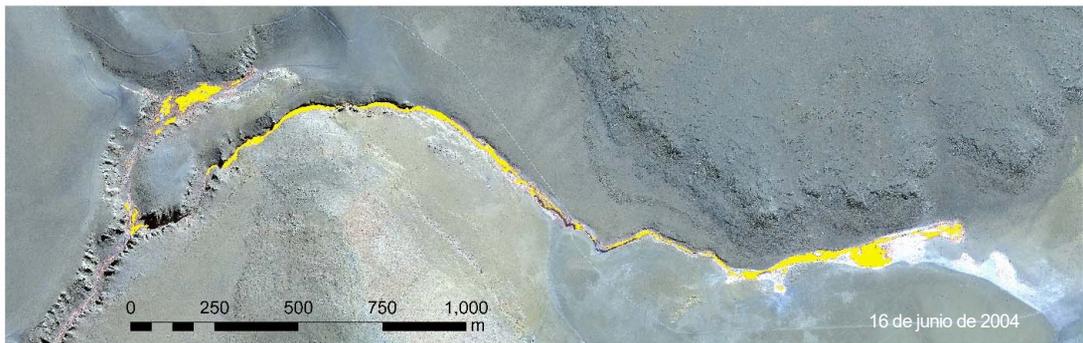


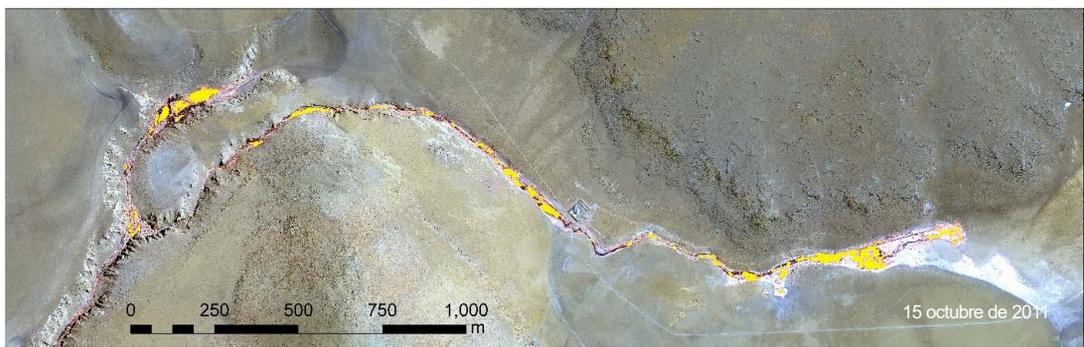
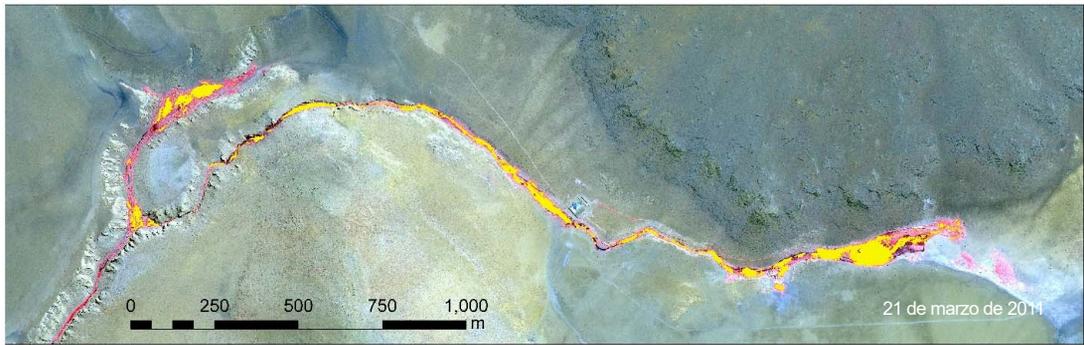


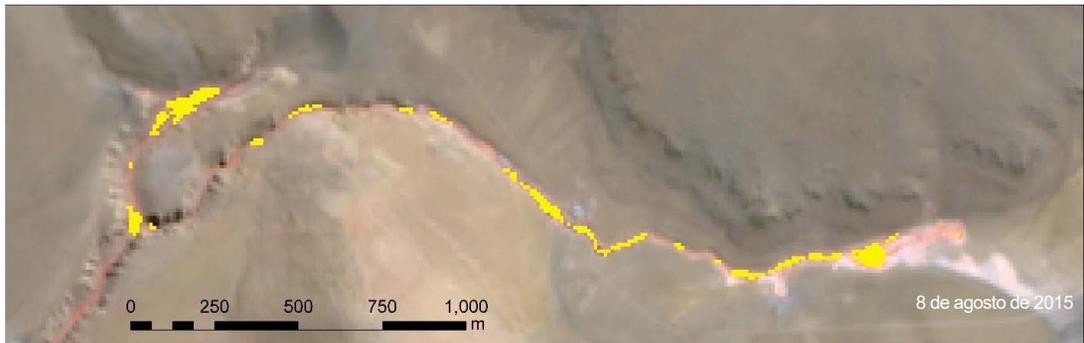


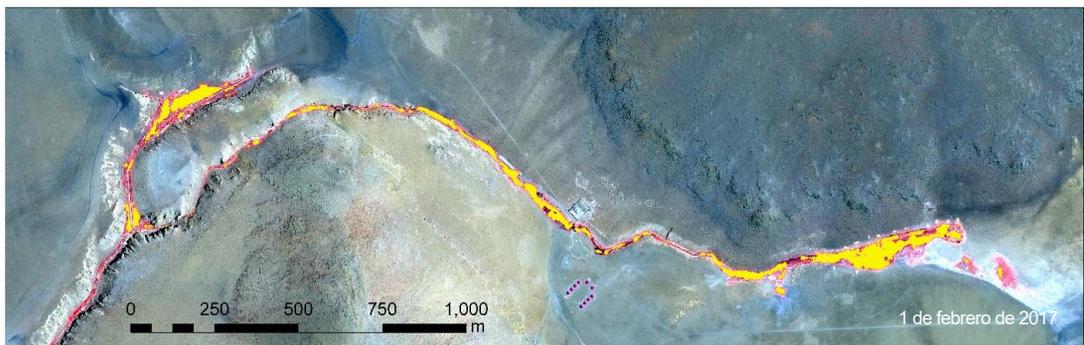
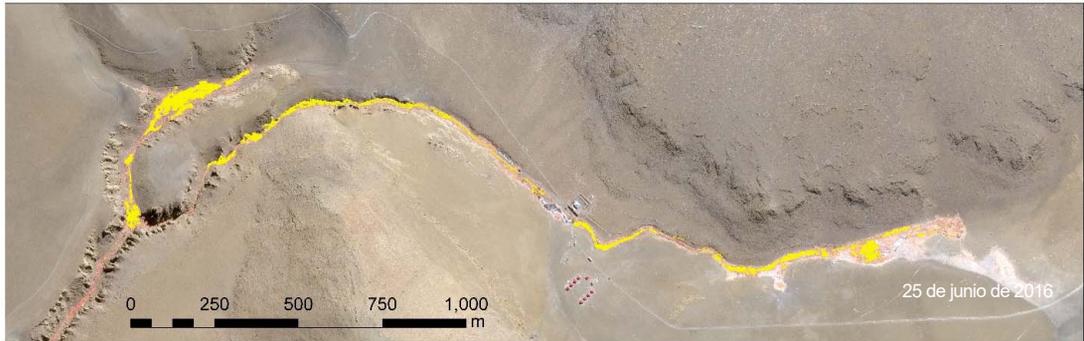


Anexo 3: Resultados de la clasificación para las imágenes de alta resolución RGB 4,3,2 (resaltando vegetación en rojo y los bofedales clasificados en amarillo)







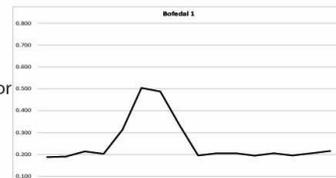


Anexo 4: Perfiles de valores NDVI para los bofedales 1 (sur) y 2 (norte) para la estación seca y húmeda (color verdadero, infrarrojo e imagen NDVI).

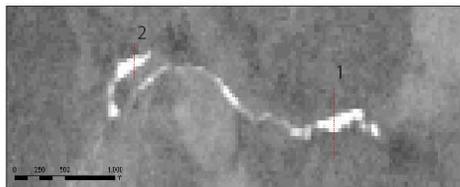
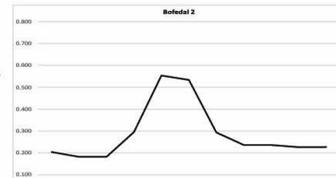


25 de enero de 1985 - Época húmeda

True color



Infrarrojo

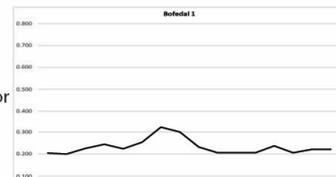


NDVI

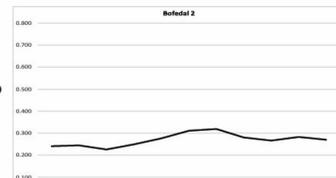


5 de agosto de 1985 - Época seca

True color



Infrarrojo

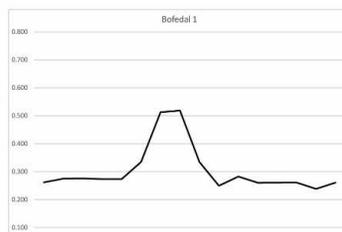


NDVI

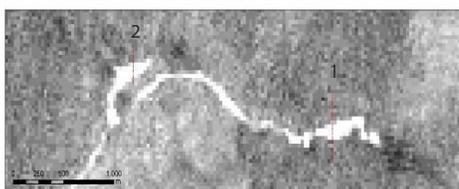
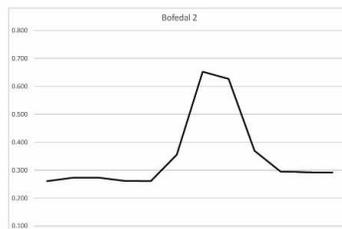


27 de febrero de 1991 - Época húmeda

True color



Infrarojo

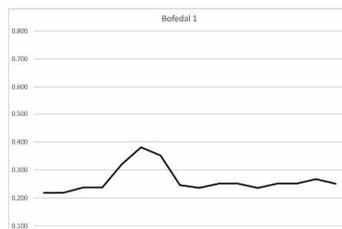


NDVI

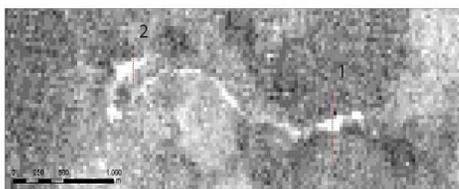
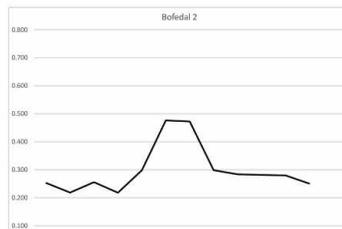


23 de septiembre de 1991 - Época seca

True color



Infrarojo

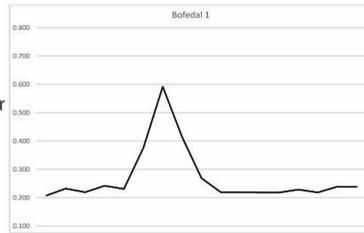


NDVI

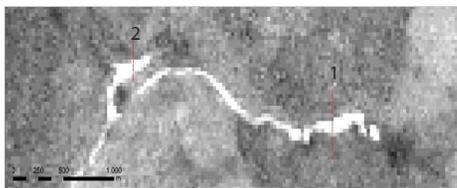
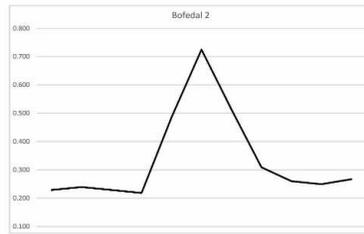


14 de febrero de 1998 - Época húmeda

True color



Infrarojo

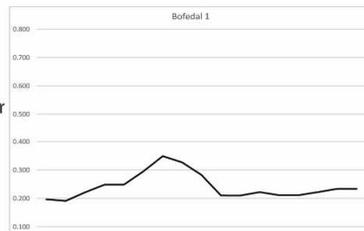


NDVI

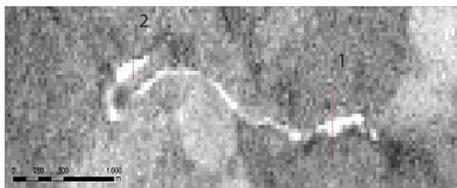
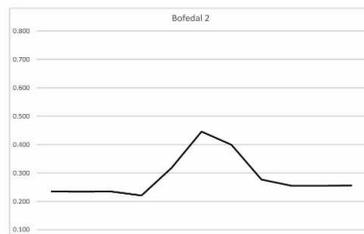


10 de septiembre de 1998 - Época seca

True color



Infrarojo

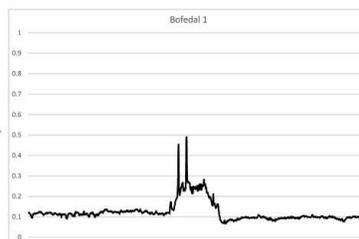


NDVI

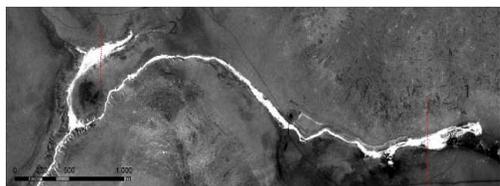


10 de septiembre de 2010 - Época seca

True color



Infrarojo

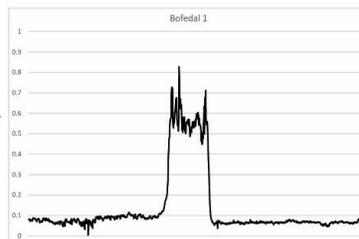


NDVI



21 de marzo de 2011- Época húmeda

True color



Infrarojo

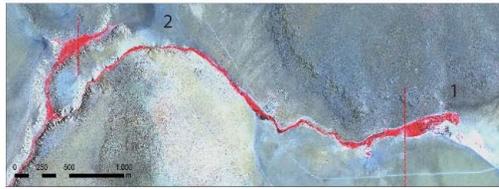
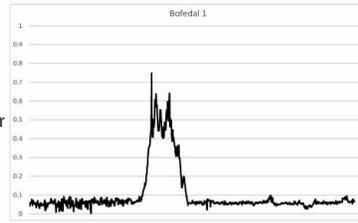


NDVI

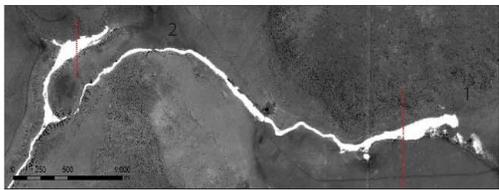
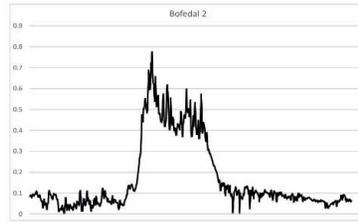


3 de marzo de 2014- Época húmeda

True color



Infrarojo

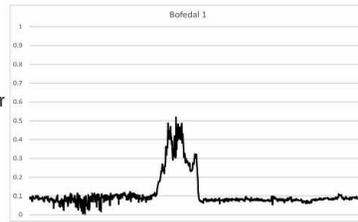


NDVI



12 de octubre de 2014- Época seca

True color



Infrarojo



NDVI

Annex 99

99.1 Note from the Agent of the Republic of Chile to the Agent
of the Plurinational State of Bolivia,
5 November 2018

99.2 Note from the Agent of the Plurinational State of Bolivia
to the Agent of the Republic of Chile,
22 November 2018

99.3 Note from the Agent of the Republic of Chile to the Agent
of the Plurinational State of Bolivia,
30 November 2018

99.4 Note from the Agent of the Plurinational State of Bolivia
to the Agent of the Republic of Chile,
11 December 2018

99.5 Note from the Agent of the Republic of Chile to the Agent
of the Plurinational State of Bolivia,
21 December 2018

99.6 Note from the Agent of the Plurinational State of Bolivia
to the Agent of the Republic of Chile,
11 January 2019

99.7 Note from the Agent of the Plurinational State of Bolivia
to the Agent of the Republic of Chile,
7 February 2019

(Originals in English)



REPUBLICA DE CHILE
MINISTERIO DE RELACIONES EXTERIORES

5 November 2018

His Excellency
Mr. Eduardo Rodríguez Veltzé
Agent
Plurinational State of Bolivia

Sir,

On behalf of the Government of the Republic of Chile, and with reference to the Dispute over the Status and Use of the Waters of the Silala (Chile v. Bolivia), I have the honour of recalling that Chile provided a data CD together with our Memorial so that your Government would have access to all data and information relied upon or otherwise referred to in the Memorial.

In this regard, I have the honour to request the Government of the Plurinational State of Bolivia to do likewise, by making available to my Government the digital data used by the Danish Hydraulic Institute for their conceptual and numerical modelling in support of the report and conclusions contained in Annex 17 to the Counter-Memorial of 3 September 2018, within a suggested time period of two weeks.

I also have the honour to request certain documents referred to in Annexes 17 and 18 to Bolivia's Counter-Memorial that are not publicly available and were not presented by the Plurinational State of Bolivia as part of its submission. My Government should be much obliged if these documents could be made available in their original language and, where available, in English translation, also within a suggested time period of two weeks.

Attached please find the list of digital data and documents requested.

Accept, Sir, the assurances of my highest consideration,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Ximena Fuentes Torrijo'.

Ximena Fuentes Torrijo
Agent of the Republic of Chile



EMBASSY OF THE PLURINATIONAL STATE OF BOLIVIA
The Hague – The Netherlands

The Hague, 22 November 2018

Excellency
Mrs. Ximena Fuentes Torrijo
Agent of the Republic of Chile

Madam,

I have the honor of addressing you to refer to your note dated 5 November 2018, transmitted to Bolivia through the Registrar of the International Court of Justice in reference to the case Dispute over the Status and Use of the Waters of the Silala (Chile v. Bolivia), which requests digital data and documents referred to or relied on in Annexes 17 and 18 of the Bolivian Counter-Memorial.

In this regard, enclosed please find a USB stick containing the requested documentation, with the exception of the following:

- The digital data used by the Danish Hydraulic Institute (DHI) for its conceptual and numerical modeling contained in Annex 17, which is currently under consultation with DHI
- The documents mentioned in Annex D of the Final Report of the Danish Hydraulic Institute (DHI), paragraphs 6.1, 6.2, 6.3, and 6.4, information that is under consultation with DHI
- Report of the Ministry of Mining and Metallurgy of Bolivia. Social study of Socio-Economic Integration of the Southern Altiplano, referenced on page 13 of the Ramsar Report, which is under consultation with the aforementioned Ministerial body

Accept, Madam, the assurances of my high highest consideration.

Eduardo Rodríguez Veltzé
Agent of the Plurinational State of Bolivia



REPUBLICA DE CHILE
MINISTERIO DE RELACIONES EXTERIORES

30 November 2018

His Excellency
Mr. Eduardo Rodríguez Veltzé
Agent
Plurinational State of Bolivia

Sir,

On behalf of the Government of the Republic of Chile, and with reference to the Dispute over the Status and Use of the Waters of the Silala (Chile v. Bolivia), I have the honour of confirming receipt of your note dated 22 November 2018, transmitted to Chile through the Registrar of the International Court of Justice, together with a USB stick containing some of the documents referred to or relied on in Annexes 17 and 18 of the Bolivian Counter-Memorial that were requested by Chile, by note of 5 November 2018.

Regarding the documents transmitted with the above-mentioned note, the Government of Chile takes note that the requested digital data used by the Danish Hydraulic Institute (DHI) for its conceptual and numerical modeling contained in Annex 17, have not been submitted and are “under consultation with DHI”, as explained by your Government in the referred note of 22 November. These data are indispensable for a proper analysis of the DHI report by Chile’s experts and should be readily available to DHI in digital format.

The Government of Chile also notes that the SERGEOMIN 2001 study (document 1.3) has not been submitted, allegedly because it is the same document as the SERGEOMIN 2003 study (document 1.4). Chile notes that both studies were quoted and referenced in the DHI Final Report as two distinct reports. The same applies to the SERGEOTECCMIN 2002 report (document 8.4) which is also said to be included in the SERGEOMIN 2003 study (document 1.4).

The Government of Chile reminds the Government of Bolivia that an official Bolivian Press Release of 26 February 2002 (Annex 49 to Chile’s Memorial), has referred to the SERGEOMIN 2001 study as a finalized document that was presented by SERGEOMIN to the Bolivian Ministry of Foreign Affairs in October 2001. In the Press Release, the Government of Bolivia pointed out that the referred SERGEOMIN 2001 studies are the exclusive responsibility of SERGEOMIN and “do not reflect the criteria of the Ministry of Foreign Affairs and Worship or of the National Government”. The Government of Chile also notes that the SERGEOMIN 2003 study (submitted as document 1.4) is an edited version (“Final edition June 2003”) of the original SERGEOMIN 2001 report and therefore cannot be the same document. Invoking the principle of procedural good faith, the Government of Chile reiterates its request for submission of the SERGEOMIN 2001 report



REPUBLICA DE CHILE
MINISTERIO DE RELACIONES EXTERIORES

in its original edition, together with the SERGEOTECMIN 2002 report, also in its original edition.

In addition, the Government of Chile has identified several further discrepancies between the documents requested and the documents submitted, as indicated in the Table annexed to this note, concerning which it would be much obliged to receive final clarification.

The Government of Chile also kindly recalls its request for the English translations of the submitted documents as provided to DHI, for reasons of procedural economy and to make sure that the experts of both States have access to the same translations.

Finally, the Government of Chile notes that almost a month has lapsed since its request for digital data and documents, and that in the meantime the Court has fixed the date for Chile's Reply for 15 February 2019. Given the proximity of such date and the relevance of the digital data, documents, translations and clarifications requested, my Government suggests that these shall be provided at your earliest convenience and no later than within seven days following receipt of this note.

Accept, Sir, the assurances of my highest consideration,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Ximena Fuentes Torrijo".

Ximena Fuentes Torrijo
Agent of the Republic of Chile



EMBASSY OF THE PLURINATIONAL STATE OF BOLIVIA
The Hague – The Netherlands

The Hague, 11 December 2018

Her Excellency
 Dr. Ximena Fuentes Torrijo
 Agent of the Republic of Chile

Madam,

I have the honor to acknowledge receipt of your Note dated 30 November 2018, transmitted through the Registrar, in reference to the case Dispute Over the Status and Use of the Waters of the Silala (Chile v. Bolivia), through which receipt of the Note of 22 November 2018 is confirmed and a series of comments and observations are made with respect to the USB delivered by Bolivia with documents related to Annexes 17 and 18 of the Bolivian Counter-Memorial.

In this context, I hereby respond to the above-mentioned note with the following considerations:

- 1.) Regarding the request for digital data used by DHI for its conceptual and numerical modeling, as well as preliminary reports, I would like to inform you that, in response to Bolivia's inquiry, Eng. Roar Askaer Jensen, DHI's Project Manager, has informed, attached herewith as Annex I, that the digital data and the contents of the preliminary reports prepared within the context of DHI's Study are fully covered in the Final Report submitted to Bolivia.
- 2.) With regard to the clarifications requested concerning other studies submitted by Bolivia, I hereby assert that those are duly responded to in the table attached to this note as Annex II.
- 3.) Regarding the SERGEOMIN 2001 study, I would kindly like to inform you that its contents do not differ from the SERGEOMIN 2003, final edition study, which has already been sent by the Note dated 22 November 2018. Notwithstanding, I am hereby attaching, in digital format, the SERGEOMIN 2001 study, in its only available edition. Further, I would also like to clarify that the report entitled 'SERGEOTECCMIN 2005' is the same as that referred to as 'SERGEOTECCMIN 2006', cited in Annex E to DHI's Final Report and that it is thus not a different document. Finally, these studies, as well as the English



EMBASSY OF THE PLURINATIONAL STATE OF BOLIVIA
The Hague – The Netherlands

translations of other studies requested, are enclosed in a USB device, appearing as Annex III.

Accept, Excellency, the assurances of my highest consideration.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Eduardo Rodríguez Veltzé'.

Eduardo Rodríguez Veltzé
Agent of the Plurinational State of Bolivia



DIREMAR
 Palacio Quemado
 Plaza Murillo
 La Paz
 Bolivia

To: Emerson Calderon, Secretary-General, DIREMAR
 Eduardo Rodriguez, Agent of Bolivia before the ICJ

Ref:
 11820137

Init:
 RAJ

Date:
 3 December 2018

DHI
 Agern Allé 5

DK-2970 Hørsholm
 Denmark

+45 4516 9200 Telephone
 +45 4516 9292 Telefax

dhi@dhi-group.com
 www.dhi-group.com

Re. "Study of the flows of the Water System of the Silala Water-Springs, quantifying the superficial and underground flows in the present conditions and under natural conditions, without the constructed canals".

DHI has been contacted regarding release of *preliminary* reports and underlying data of the above mentioned study carried out by DHI for DIREMAR during 2017 and beginning of 2018.

The preliminary reports shall not be released. They are internal documents representing work in progress and are based on less complete information and analyses than the final report. The final report compiles and summarizes the results of the full study.

The data that has been used in DHI's analyses and modelling are described and referenced in the Final Report and its annexes.

Best regards
 DHI

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Roar Askær Jensen', written in a cursive style.

Roar Askær Jensen
 Project manager

MSc. Civil Engineering
 Senior Water Resources Expert
 Water Resources Department, DHI
 Tel. +45 45 16 92 00
 Direct +45 45 16 92 70
 Mob. +45 24 27 98 48



REPUBLICA DE CHILE
MINISTERIO DE RELACIONES EXTERIORES

21 December 2018

His Excellency
Mr. Eduardo Rodríguez Veltzé
Agent
Plurinational State of Bolivia

Sir,

On behalf of the Government of the Republic of Chile, and with reference to the Dispute over the Status and Use of the Waters of the Silala (Chile v. Bolivia), I have the honour of confirming receipt of your Note dated 11 December 2018, transmitted to Chile through the Registrar of the International Court of Justice, together with a USB stick (attached as Annex III) containing some of the documents referred to or relied on in Annexes 17 and 18 of the Bolivian Counter-Memorial that were requested by Chile by Note of 5 November 2018 and again by Note of 30 November 2018, including requested English translations, and two additional Annexes (Annex I and Annex II).

Regarding the digital data used by the Danish Hydraulic Institute (DHI) for its conceptual and numerical modeling contained in Annex 17, also requested by Chile in its communications referred above, the Government of Chile takes note that these have not been submitted and that, according to DHI's Project Manager, Eng. Roar Askaer Jensen, these are fully covered in the DHI Final Report submitted by Bolivia, as stated in his letter of 3 December 2018, attached as Annex I to your Note of 11 December 2018.

After consulting with its expert Prof. Howard Wheeler, the Government of Chile wishes to convey that, in Prof. Wheeler's expert opinion, the information provided in the Bolivian Counter-Memorial and its Annexes is inadequate to define the models that were used, the modelling process that was followed, and that furthermore the detailed results are not provided. In particular, it is Prof. Wheeler's expert opinion that without the modelling digital data (requested under item I. of the Request for presentation of digital data and documents that are not publicly available, annexed by Chile to its Note of 5 November 2018) the model cannot be fully understood or critically assessed and that the modelling results must be seen as a set of unsubstantiated assertions, with no evidential justification. Prof. Wheeler's full response is annexed to this Note.

The Government of Chile also takes note of DHI's refusal to release preliminary reports, which it considers internal documents representing work in progress. Chile points out that it has requested only those preliminary reports (documents 6.1, 6.2, 6.3 and 6.4 of its Request) that were specifically referenced in Annex F to the DHI Final Report and that are not publicly available. The Government of Chile requests Bolivia to ensure that these documents are submitted as requested.



REPUBLICA DE CHILE
MINISTERIO DE RELACIONES EXTERIORES

Finally, the Government of Chile reiterates the urgency of its request, in particular with respect to the modelling information and the supporting data in digital form, given the short term for the submission of its Reply on 15 February 2019.

Accept, Sir, the assurances of my highest consideration,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Ximena Fuentes Torrijo'.

Ximena Fuentes Torrijo
Agent of the Republic of Chile

Professor Howard Wheater

317 Albert Avenue

Saskatoon

SK S7N 1E9

Canada

19 December 2018

Ximena Fuentes Torrijo

Agent for Chile before the International Court of Justice,

Dirección Nacional de Fronteras y Límites del Estado, DIFROL,

Ministry of Foreign Affairs of the Republic of Chile,

Teatinos 180, 7th floor,

Santiago 8340434

Chile

Dear Dr Fuentes,

Chile's Request for Modelling Information

Thank you for passing on to me the letter of 3 December 2018 from Roar Jensen, DHI Project Manager, concerning Chile's request for information from Bolivia. This included a request for information on DHI's modelling, i.e. specification of the model configuration, the input data including specification of boundary conditions, the parameter values used, and the output data, for each of the models used by DHI and reported in Bolivia's Counter Memorial of September 2018.

I note that the case for Bolivia depends crucially on simulation results from a series of DHI models. However, the information provided in the Bolivian Counter-Memorial is inadequate to define the models that were used, or the modelling process that was followed, and furthermore the detailed results are not provided.

Results of any hydrological model depend primarily on assumptions made by the modellers. These include:

- i) the detail assumed for the geometry of the system (in this case including crucially the representation of channels and drains and their interactions with surface and subsurface flows, as well as of the stratigraphy of the sub-surface),
- ii) the material properties used to represent the soils and aquifers and their spatial distribution, and

- iii) the assumed boundary conditions of the model, which determine the inflows to and discharges from, the model.

With a complex non-linear model, such as that used by DHI, there are also issues of numerical stability that are of concern, which depend for example on the space and iteration time steps used in the model and the associated numerical schemes and their convergence properties. Also, during the modelling process, there is normally an iterative procedure whereby model parameters are adjusted so that the model meets various measures of performance. These all form part of the scientific method that underlies any model development and application, and without the basic information on the model set up, properties and procedures, not to mention access to the detailed results, the model cannot be fully understood or critically assessed.

I would therefore urge DHI to reconsider its refusal to provide further information on the modelling, as requested by Chile. Without this information, the modelling results must be seen as a set of unsubstantiated assertions, with no evidential justification. This modelling information, and the supporting data, are of course very extensive, and would be required in digital form.

Yours sincerely,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'H.S. Wheater', with a long horizontal flourish extending to the right.

H.S.Wheater FRSC, FEng.



EMBASSY OF THE PLURINATIONAL STATE OF BOLIVIA
The Hague – The Netherlands

The Hague, 11 January 2019

Excellency
Mrs. Ximena Fuentes Torrijo
Agent of the Republic of Chile

Madam,

I have the honor to acknowledge receipt of your note dated 21 December 2018, transmitted to Bolivia through the Registrar of the International Court of Justice on 27 December 2018, in which you attach a note stating the opinions of the expert of the Chilean Government, Prof. Howard Weather, and request additional information used by the Danish Hydraulic Institute (DHI) in the "Study of the Flows in the Silala Wetlands and Spring System, 2018" submitted in Annex 17 (F) of the Counter Memorial of Bolivia in the case Dispute over the Status and Use of the Waters of the Silala (Chile v. Bolivia).

The Government of the Plurinational State of Bolivia considers it premature to enter into a controversy on the opinions of the expert Prof. Weather on the aforementioned hydrology study prepared by the DHI, the results of which are thoroughly stated in the report presented as Annex 17. However, after further consultation with DHI, the requested digital information, which is ample and sophisticated, can be processed for delivery and analysis by Chile by 6 February 2018.

In relation to the preliminary reports of the DHI previously requested and referenced in the Final Report of DHI as work in progress, will also be transmitted by the same date.

Accept, Madam, the assurances of my high highest consideration.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'E. Rodríguez Veltzé'.

Eduardo Rodríguez Veltzé
Agent of the Plurinational State of Bolivia



EMBASSY OF THE PLURINATIONAL STATE OF BOLIVIA
The Hague – The Netherlands

EB.NL.-Cs-3/2019

The Hague, 07 February 2019

Excellency
Mrs. Ximena Fuentes Torrijo
Agent of the Republic of Chile

Madam,

With reference to the case concerning the Dispute over the Status and Use of the Waters of the Silala (Chile v. Bolivia) and following my note dated 11 January 2019, regarding your request of additional information used by the Danish Hydraulic Institute (DHI) in the “Study of the Flows in the Silala Wetlands and Spring System, 2018”, submitted in Annex 17 (F) of the Counter-Memorial of Bolivia, I hereby attach a copy of the modelling data referred to in DHI’s Final Report and its Annexes.

The information is stored in a Tera Byte hard disk (Transcend SN: E58741-0667) in digital format and may only be explored through the graphic user interface of the MIKESHE modelling software. A demo version of this modelling package is included in the hard disk. The hard disk comprises also a short explanation of how the data is organized and how to access it, which can be found in the file “Technical note Transfer of Modelling Data.docx.” in the root directory of the disk.

Furthermore, enclosed find a USB pen drive containing DHI’s Preliminary Reports in their PDF format and the book entitled “Los Salares del Altiplano Boliviano” by O. Ballivian and F. Risacher, which contains the Report of the Ministry of Mining and Metallurgy as requested through your note dated 5 November 2018.

Accept, Madam, the assurances of my highest consideration.

Eduardo Rodríguez Veltzé
Agent of the Plurinational State of Bolivia