

## III ENCUENTRO DE LAS AGUAS

Santiago, Chile, Octubre de 2001.

### ESTIMACIÓN DE REQUERIMIENTOS HÍDRICOS DE HUMEDALES DEL NORTE DE CHILE

Salazar, Carlos<sup>1</sup>; Rojas, Luis<sup>1</sup>; Lillo, Adrian<sup>1</sup>.

#### ABSTRACT:

Water requirements from wetlands located in highlands are important within water assignment process in order to establish sustainability in the long term.

A characterization of flow and water quality was made based on isotopic, hydrobiological and hydrological information collected in site. Integrated evapotranspiration was estimated using Penman and the pan-coefficient approach methods. Water balance shows similar results as a preliminary approach.

#### Introducción

La creciente demanda hídrica en la zona árida del norte de Chile, especialmente por parte de empresas mineras, requiere mejorar el conocimiento respecto a los requerimientos hídricos en humedales de altura de modo de lograr un aprovechamiento sustentable del recurso.

La Dirección General de Aguas (DGA) ha venido desarrollando investigaciones sobre la materia en los humedales del norte de Chile; dentro de dicho marco, el presente estudio tiene como objetivo central avanzar en la estimación de los requerimientos hídricos de los sistemas de humedales en la zona altiplánica chilena, sobre la base de la estimación de las tasas de evapotranspiración y evaporación en zonas de vegas y bofedales, teniendo como objetivos específicos una caracterización hidrobiológica de las formaciones vegetacionales, caracterización del régimen hidrológico de la zona de estudio, caracterización hidroquímica e isotópica de las aguas que alimentan estos humedales y estimación de evaporación desde superficies libres en torno a estos humedales.

El trabajo realizado se enmarca dentro de un convenio de cooperación entre la DGA, la Universidad de Chile y la Comisión Chilena de Energía Nuclear. La Comisión Chilena de Energía Nuclear abordó los análisis de isótopos estables (Deuterio y Oxígeno-18); la Universidad de Chile abordó los aspectos hidrobiológicos tanto de terreno como de laboratorio, y la DGA, se encargó de la realización de los análisis fisico-químicos, la interpretación de resultados y la elaboración de los informes correspondientes.

Inicialmente se preseleccionaron algunos sectores donde se localizaron humedales de la I y II Región, pero luego de analizar la información recopilada en terreno y considerando el objetivo central del estudio, así como los recursos disponibles para ello, se optó por la idea de focalizar los esfuerzos sobre dos zonas de trabajo específicas. Estos lugares correspondieron al Bofedal de Isluga y Bofedal de Chungará, cuya ubicación se aprecia en la **figura 1**. En dichos sitios se realizaron trabajos de terreno que incluyeron mediciones de caudal, muestreos de calidad de agua, análisis isotópicos de Deuterio y Oxígeno-18 y caracterización vegetal



Figura 1. Ubicación de Bofedales seleccionados

## **Humedales Altiplánicos**

### **a) Descripción General**

En la zona altiplánica de las regiones I y II de nuestro país, las principales características climáticas son la sequedad extrema, la limpidez atmosférica, la enorme variación térmica y precipitaciones entre noviembre y marzo que pueden alcanzar los 250 mm anuales.

Dado lo anterior, los cauces presentan normalmente escurrimientos permanentes, condicionando la existencia de sistemas vegetacionales de vegas y bofedales que corresponden a formaciones vegetales que se establecen en un ambiente edáfico, principalmente orgánico, caracterizado por una condición hídrica de saturación permanente, presentando una gran diversidad biológica respecto al entorno, con un mayor número de especies vegetales propias de estos sistemas.

Los BOFEDALES, son ecosistemas que se caracterizan por presentar un microrrelieve fuertemente ondulado con una red intrincada de canales o cursos de agua normalmente permanentes y de baja salinidad. Este microrrelieve está directamente relacionado con la dominancia de especies herbáceas en cojines compactos. Entre las especies dominantes se tiene: *Oxychloe andina*, *Distichia muscoides*, *Patosia* cfr. *Clandestina*, *Scirpus atacamensis*. Se forman generalmente sobre los 4.000 msnm, y generalmente, en el fondo de quebradas o en valles, sobre suelos de turba alcalina generalmente profundos que presentan niveles de agua subterránea altos y escurrimientos superficiales permanentes, y restringidos a lugares donde exista agua en circulación, es decir, exista una mayor concentración de oxígeno y menor concentración de sales que en aguas estancadas. También se emplazan en laderas de montañas o conos volcánicos donde existen vertientes o ríos superficiales o subsuperficiales.

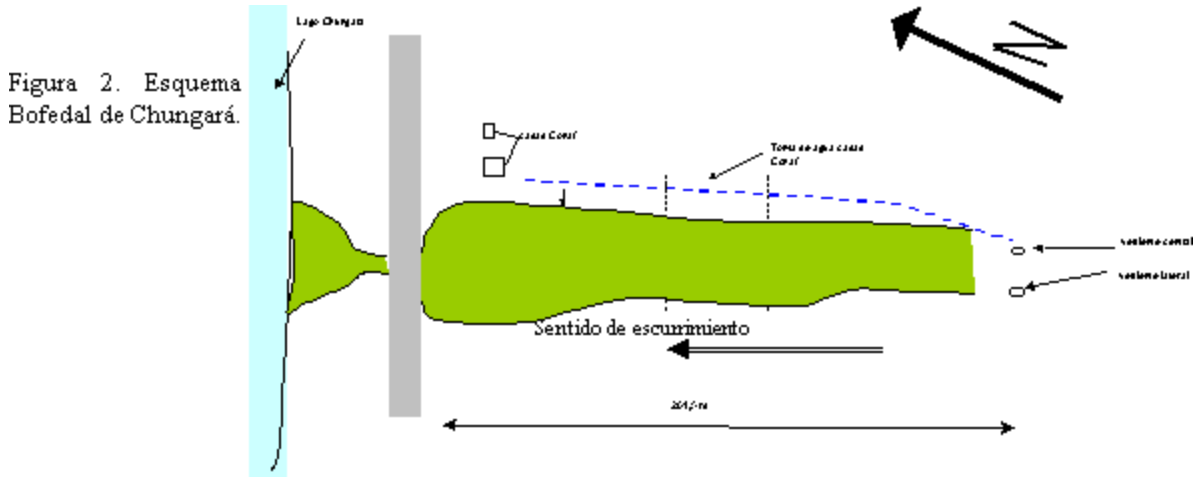
### **b) Sitios Seleccionados**

Se eligieron dos Bofedales para llevar a cabo la investigación: Bofedal de Chungará y Bofedal de Isluga, cuya selección se basó en los siguientes criterios: accesibilidad, morfología adecuada para el establecimiento de balances hídricos, escasa o nula intervención antrópica, composición vegetal suficientemente distribuida y presencia de infraestructura hidrométrica con registros históricos.

Fueron realizadas tres campañas de terreno: agosto de 1998, enero de 1999 y septiembre de 1999.

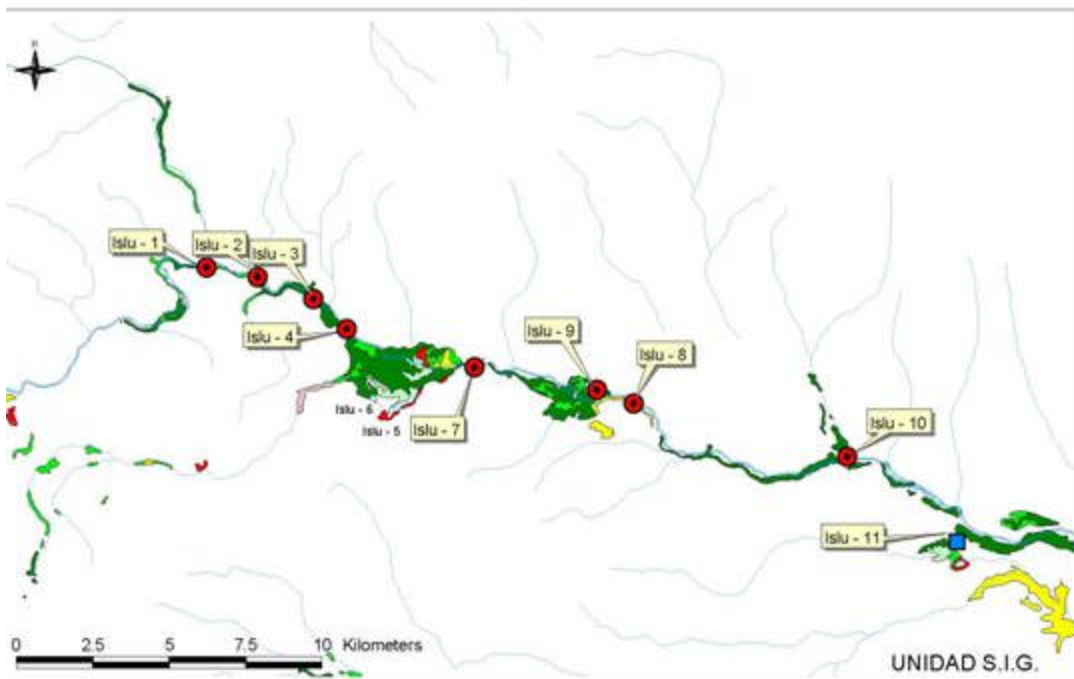
El Bofedal de Chungará, de aproximadamente 250 m de largo por 50 m de ancho (**figura 2**), se ubica aproximadamente a 4.500 msnm y es alimentado por la vertiente denominada Mal Paso cuyas aguas emergen desde el cauce de la quebrada Quebradilla, 300 m aguas arriba del camino internacional, y sus aguas descargan directamente sobre el borde surponiente del Lago Chungará. La subcuenca de drenaje de la mencionada quebrada abarca una superficie aproximada de 10 km<sup>2</sup>. A pesar de que el área de drenaje es pequeña, la gran altura a la cual se encuentra (sobre 5.000 msnm) y la presencia de abundantes sedimentos clásticos continentales, permiten una favorable recarga de la vertiente alimentadora del bofedal, que se traduce en un flujo base permanente a lo largo del año, de aproximadamente 8 l/s.

Este sistema se consideró como un microbofedal, el cual, por su tamaño se encuentra sometido a los efectos erosivos de las crecidas estacionales



El Bofedal de Isluga (**figuras 3 y 4**) se sitúa en la cuenca del río Isluga, la cual se encuentra entre las cuencas del Salar de Surire y Salar del Huasco y forma parte de la cuenca del salar de Coipasa. El río Isluga nace del nevado del mismo nombre y después de traspasar la frontera chileno-boliviana cambia su nombre por el de Sitaní hasta que se infiltra en los llanos del salar de Coipasa. En su curso inferior, el río raviesa un gran bofedal que sustentan la ganadería de los pueblos de la región, como Enquelga, Isluga Pisiga.

Este gran Bofedal corresponde a un sistema interconectado de vegas y bofedales e involucra una gran extensión dentro de la cuenca hidrográfica. Se encuentra dentro de un Parque Nacional, donde existe escasa intervención antrópica, a excepción del uso ancestral que se mantiene hasta hoy relativo al manejo de éstos para fines de pastoreo. Además, existe control hidrométrico por parte de la DGA. En cuanto a la vegetación, presenta gran parte de la gama de unidades evapotranspirativas (desde suelo desnudo hasta zonas con gran densidad de vegetación, incluyendo algunas lagunas) propias de estos ecosistemas.



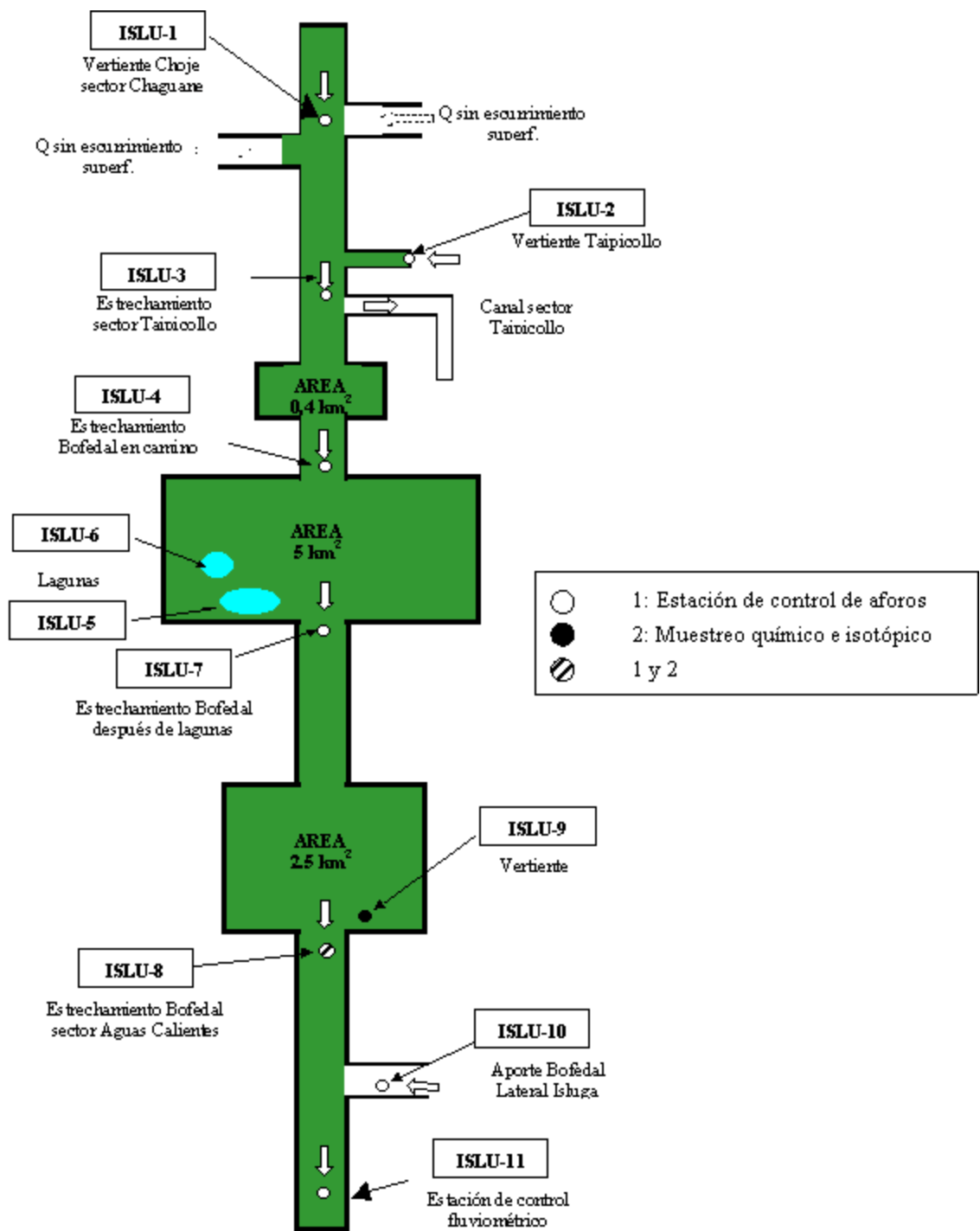


Figura 4. Esquema simplificado Bofedal de Isluga

Tanto en Isluga como Chungará se realizó una caracterización de los procesos fisicoquímicos

Figura 6. Topografía y distribución de STD en el agua subterránea del Bofedal de Chungará

El proceso de salinización del agua del bofedal es producto de la descomposición de la materia orgánica, debido al ingreso de  $\text{CO}_2$  lo cual acidifica el agua generándose más ácido carbónico. Esto favorece la alteración meteórica de las rocas e ingreso de sales por esa vía.

Es interesante señalar que el agua subterránea, a medida que escurre en el bofedal, se va salinizando hasta llegar a la zona más baja donde están las mayores salinidades. Pero contrariamente a lo que podría pensarse, el agua superficial no modifica su STD, manteniendo la misma de las vertientes en la zona alta y de los pozos de la primera sección, lo cual apunta a que el agua subterránea no está haciendo un aporte significativo al escurrimiento superficial en el área de estudio y sale del sistema en forma subterránea. Al no poder cuantificarse la salida subterránea, no es posible establecer un balance hídrico simple, por lo que se desecha estimar la evapotranspiración de este sector mediante este método.

Respecto al perfil de conductividad trazado, el estrato más salino se encuentra entre los 50 y 100 cm que es donde se estaría produciendo la mayor descomposición de materia orgánica.

### Determinación de la Evapotranspiración

Este cálculo se aplicó a un sector del Bofedal de Isluga donde se presentaron las mejores características para establecer un balance hídrico, esto es, hidrogeológicamente cerrado, elección que se basó en aforos y análisis fisicoquímicos e isotópicos (Deuterio y Oxígeno-18). El subsector considerado, se extiende en el tramo que se desarrolla entre los puntos de muestreo Islu-4 e Islu-7 (**figura 4**).

Se estimó la evapotranspiración de referencia mensual a partir de los métodos de evaporímetro de bandeja y Penman-Monteith. Para el primer caso se consideró la evaporación de bandeja media mensual histórica de las estaciones meteorológicas DGA Caquena, Collacagua y Chungará-Ajata, consideradas representativas de la zona de estudio. Para el coeficiente de bandeja  $K_p$  se adoptó el valor de 0,75 en base a los valores sugeridos por la literatura (Ref. 1).

El método de Penman-Monteith considera la siguiente expresión:

$$E(o) = \frac{\left( \Delta (h(o) - G) + \frac{867 AD (e(a) - e(d))}{AR} \right)}{(HV (\Delta + \gamma))}$$

Donde,

$E(o)$  = Evapotranspiración de referencia (mm)

$\Delta$  = pendiente de la curva de saturación de presión de vapor (kPa/°C)

$h(o)$  = Radiación neta (MJ/m<sup>2</sup>)

$G$  = Flujo de calor del suelo (MJ/m<sup>2</sup>)

$AD$  = Densidad del aire (g/m<sup>3</sup>)

$e(a) - e(d)$  = Déficit de presión de vapor (kPa)

$AR$  = Resistencia aerodinámica a la transferencia de calor y vapor (s/m)

$HV$  = Calor latente de vaporización (MJ/kg)

$\gamma$  = Constante psicrométrica (kPa / °C)

En las campañas de terreno y sobre la base de la caracterización de los grupos vegetacionales que componen el bofedal, se identificaron Unidades a las que se les asignó un valor de  $K_c$ . Los valores considerados se señalan en la **tabla 1**. También se presentan las áreas asociadas a cada cobertura vegetal en el subsector que va desde Islu-4 a Islu-7.

Tabla 1. Valores de  $K_c$  según unidad vegetacional. Areas de cada cobertura entre Islu-4 e Islu-7.

Unidad vegetacional	Verano	Otoño	Invierno	Primavera	Area (km <sup>2</sup> )
Cojines	1,00	1,00	1,00	1,00	2,467
Transición 1	0,83	0,80	0,78	0,80	1,211
Vega 1	0,76	0,69	0,58	0,69	-
Transición 2	0,60	0,52	0,35	0,52	0,768
Vega 2	0,50	0,42	0,24	0,42	0,842
Afloramiento salino	0,50	0,30	0,30	0,30	0,225
Lagunas	1,15	1,15	1,15	1,15	0,278
	Total Area:				5,791

Los resultados de la evapotranspiración de referencia para los días de las campañas de terreno se presentan en la **tabla 2**.

Tabla 2. Evapotranspiración de referencia en las fechas de las campañas de terreno.

Fecha	Bandeja	Penman-Monteith	Promedio
	mm/día		
8-Ago-98	4.50	5.07	4.79
24-Ene-99	5.48	6.60	6.04
9-Sep-99	4.50	5.13	4.82

La evapotranspiración en el tramo del mayor ensanchamiento del bofedal de Isluga (entre ISL-4 e ISL-7) expresada en mm/día y l/s se presenta en la **tabla 3**. Los valores indicados se adoptaron considerando el día específico. En la misma tabla se puede apreciar la diferencia entre aforos puntuales realizados en la entrada y salida superficial del tramo.

Tabla 3. Evapotranspiración y caudales de entrada y salida en ensanchamiento de bofedal Isluga.

Fecha	Evapotranspiración		QE <sup>1</sup>	QS <sup>2</sup>	QE-QS	
	l/s	l/s/ha	l/s			
8-Ago-98	4.79	231	0.40	327	240	87
24-Ene-99	6.04	335	0.58	388	88	300
9-Sep-99	4.82	240	0.41	371	165	206

1. QE = Caudal de entrada. Corresponde a aforo instantáneo en ISL-4

2. QS = Caudal de salida. Corresponde a aforo instantáneo en ISL-7

Al analizar estos resultados se aprecia que para dos de las tres campañas las diferencias entre los caudales entrantes y salientes son similares a la evapotranspiración calculada (300 l/s v/s 335 l/, y 206 l/s v/s 240 l/s). Sin embargo, los caudales considerados son instantáneos. Por lo anterior, es posible decir que esta primera aproximación no está tan lejana a la realidad y que los aportes y salidas de agua subterránea, en este tramo, son escasos o nulos, lo cual se corroboró a partir de los análisis isotópicos de Deuterio y Oxígeno-18 en este bofedal, de los cuales se concluyó que en este tramo no hay aportes subterráneos, por lo que las diferencias de caudal entre la entrada y la salida se deberían principalmente a la evapotranspiración.

A partir de registros históricos de la estación de Collacagua, la evaporación de bandeja máxima es de 11 mm/día; según esto, la tasa máxima de evapotranspiración en la totalidad de este



ensanchamiento del bofedal sería de unos 0.8 l/s/ha en el que los cojines tendrían 0.96 l/s/ha.

## Conclusiones

Los resultados encontrados forman parte de un trabajo de mayor alcance que se orienta a generar información que permita conocer los procesos hídricos e hidrobiológicos que intervienen en humedales de altura localizados en el altiplano chileno.

- } Respecto a la parte fisicoquímica, a partir de los análisis fisicoquímicos de Isluga como de Chungará se concluyó que los flujos subterráneos incrementan su salinidad en el sentido del escurrimiento. Este aumento de concentración de sales tiene tres fuentes principales: la propia evaporación que concentra las sales de las aguas de aporte, la redisolución de sales depositadas superficialmente durante el estiaje, y los procesos de meteorización por el ácido carbónico que se ven incrementados por la descomposición de materia orgánica.
- } El espesor de la columna de sedimentos bajo un bofedal, la cobertura vegetal y la extensión de una formación de vegas o de bofedal, lo establece fundamentalmente las condiciones geomorfológicas locales (pendiente del cauce, permeabilidad de las formaciones adyacentes, singularidades hidrogeológicas, litología de las cuencas de aporte, etc.) y el régimen hídrico a que está sujeto (caudal base, caudal de crecidas). El tema calidad de agua está subordinada a las condicionantes anteriores. Sin perjuicio de lo anterior, la calidad de agua tiene un rol de primera importancia en lo relativo a la composición biológica asociada a estos sistemas.
- } De acuerdo a los resultados es posible estimar preliminarmente la demanda evapotranspirativa máxima como un valor de 0.8 l/s/ha. Ésta fue calculada a partir de un valor máximo de evaporación de bandeja en la Estación Collacagua que resultó 11 mm/día.
- } En relación con las unidades vegetacionales básicas definidas en el presente estudio, se obtuvo un valor máximo de 0.96 l/s/ha para cojines y de 0.55 l/s/ha para vegas.
- } Los valores de evapotranspiración obtenidos teóricamente han sido estimados a partir de coeficientes de cultivos ( $K_c$ ) de especies vegetales sometidas a similares condiciones hídricas, por lo que se sugiere corroborar los valores obtenidos con mediciones directas de evapotranspiración en terreno. Para lo cual se propone instalar equipos diseñados para tal efecto, como por ejemplo lisímetros, en las distintas unidades vegetacionales.
- } Como recomendación se propone seleccionar un lugar de estudio donde poder implementar un seguimiento continuo mediante la instrumentalización y monitoreo. En este sector se aplicarían diversos escenarios a un sistema de Bofedales, ya sea stress hídrico y cambios en la calidad del agua de aporte, todo esto tendiente a establecer reglas o criterios para protección y/o mitigación de Bofedales altiplánicos.

## Referencias

1. Necesidades de agua de los cultivos, serie de Riego y Drenaje N°24 (FAO 24)
2. DGA, 1993. Identificación y Ubicación de Areas de Vegas y Bofedales de las Regiones Primera y Segunda.
3. DGA,UCN, ORSTOM, 1998. Geoquímica de Aguas en Cuencas Cerradas I, II y III Regiones, Chile
4. DGA 2001, Requerimientos Hídricos de Vegas y Bofedales (En edición)

---

<sup>1</sup> Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas