

# ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS HÍDRICOS DE VEGAS Y BOFEDALES EN EL NORTE DE CHILE

Realizado por:

- *Carlos Salazar M.*  
*Ing. Jefe Depto. de Estudios y Planificación*
- *Luis Rojas B.*  
*Director Regional DGA I Región*
- *Adrián Lillo Z.*  
*Ing. Depto. de Estudios y Planificación*
- *Evelyn Aguirre D.*  
*Comisión Chilena de Energía Nuclear*

## 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 físico-químicos, la interpretación de resultados y la elaboración de los informes correspondientes.

A partir de un análisis de antecedentes preexistentes, se preseleccionaron algunos humedales de la I y II Región como potenciales sitios para la realización del estudio, pero luego de analizar la información recopilada en una primera campaña de 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 n°1**. En dichos sitios se realizaron 4 campañas de terreno con distribución estacional que incluyeron mediciones de caudal, muestreos de calidad de agua, análisis isotópicos de Deuterio y Oxígeno-18 y caracterización vegetal



rizomatosas que forman los céspedes planos o regulares de las vegas del mismo sector del norte de Chile.

Su perfil es profundo y generalmente orgánico, compuesto por raíces vivas, muertas y materia orgánica en descomposición. La vegetación es de color verde intenso en el período de lluvias asociado a las mayores temperaturas estacionales, y amarillenta en el período de sequía con temperaturas invernales, normalmente bajo la temperatura de congelación.

Se forman 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 corriente, mayor concentración de oxígeno y menor concentración de sales que en aguas estancadas. También están en laderas de montañas o conos volcánicos donde existen vertientes o ríos superficiales o subsuperficiales.

La vegetación de los bofedales está adaptada a las condiciones ambientales extremas de la Puna altoandina. Las especies dominantes en estos sistemas son:

- *Oxychloe andina*
- *Distichia muscoides*
- *Patosia* cfr. *clandestina*
- *Scirpus atacamensis*



Figura n°2. Microrrelieve ondulado en Cojines (Bofedal)

Una Vega, corresponde a un sistema ecológico biológico azonal, con una vegetación característica que se desarrolla gracias a un elevado y permanente contenido de humedad edáfica. La apariencia corresponde a una estrata herbácea densa a muy densa (coberturas de más del 50%), de baja a mediana altura (5-100 cm), sobre una superficie general plana o con un muy escaso microrrelieve (**figura n°3**). Los cursos de agua, cuando los hay, quedan restringidos a surcos de escaso tamaño, completamente vegetados, o bien a uno solo de gran tamaño.



Figura n°3. Formación típica de Vegas

Entre las especies vegetacionales dominantes, se encuentran: *Catabrosa wendermanni*, *Triglochin* spp. *Sarcocornis pulvinata*, *Patosia* cfr. *clandestina*, *Festuca nardifolia*, *Deyeuxia velutina*, *Carex* sp.

#### **b) Sitios Seleccionados**

Para el presente estudio se seleccionaron dos sistemas de bofedales, los cuales se encuentran situados en Isluga y Chungará respectivamente. La selección se basó en criterios de accesibilidad, morfología e hidrogeología adecuada para el establecimiento de balances hídricos, escasa o nula intervención antrópica, composición vegetal suficientemente distribuida y presencia de infraestructura hidrométrica con registros históricos. En ellos 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 n°4**), 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 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 m.s.n.m.) y la presencia de abundantes sedimentos clásticos continentales, permite 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.

Para efectos del estudio, este sistema representa el típico bofedal de quebrada, de pequeña magnitud, con presencia de una desarrollada red de drenaje, clara delimitación de sus bordes y ausencia de formación de vegas. La pronunciada pendiente longitudinal (12 %) lo hace susceptible de estar sometido a los efectos erosivos de las crecidas estacionales.

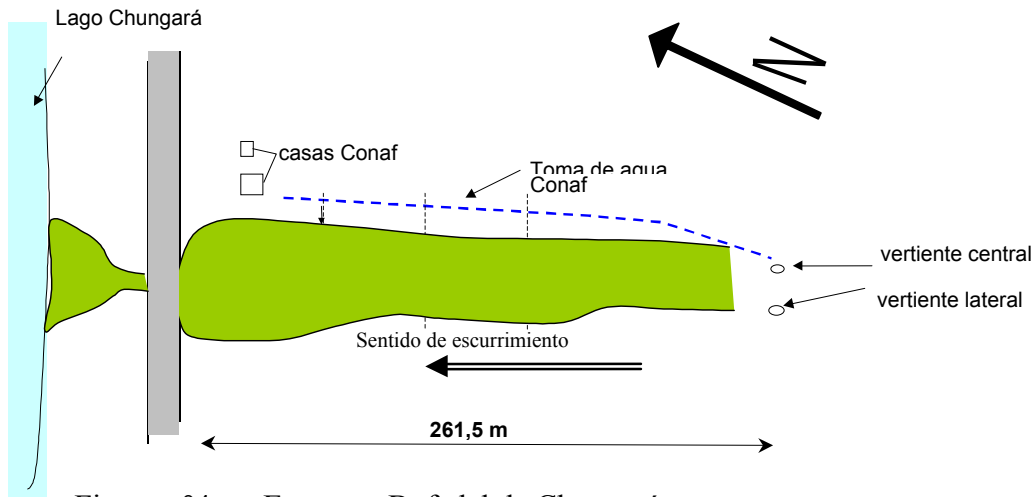


Figura n°4. Esquema Bofedal de Chungará.

El Bofedal de Isluga forma parte de un gran sistema de humedales que sustentan la ganadería de los pueblos de Enquelga, Isluga, Pisiga y Colchane (**figura n°5**). Su génesis es producto del río del mismo nombre que en su desarrollo por territorio chileno está flanqueado por las cuencas del Salar de Surire por el norte y Salar del Huasco al sur. Este río de escurrimiento permanente, con un caudal medio anual aproximado de 400 l/s en la estación “Río Isluga en Bocatoma”, 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.

Este gran Bofedal corresponde a un sistema mixto de vegas y bofedales, con predominancia de éstos últimas, e involucra una gran extensión de terreno 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. Respecto a su cobertura vegetal, presenta una gran gama de unidades evapotranspirativas propias de estos ecosistemas (desde suelo desnudo hasta zonas con gran densidad de vegetación, incluyendo algunas lagunas).

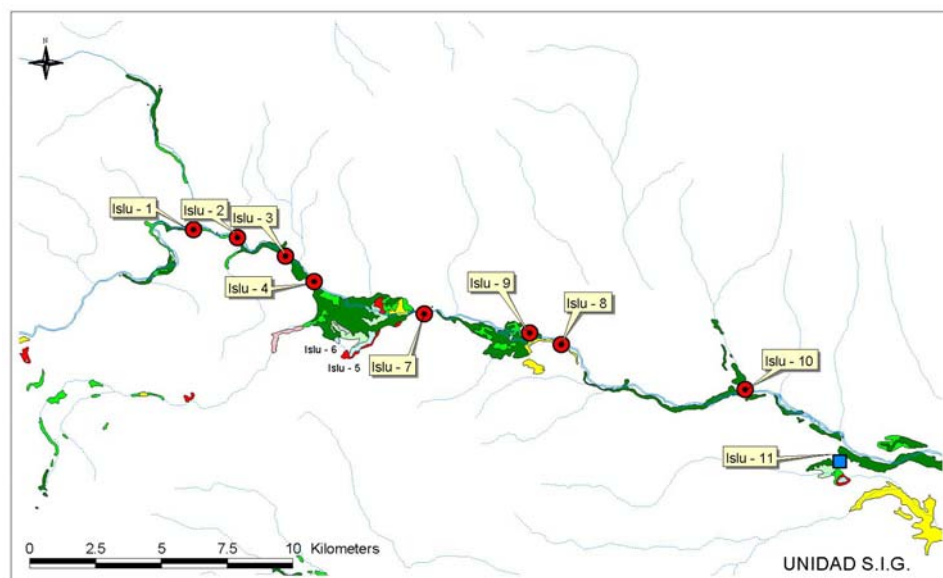


Figura n°5. Estaciones de Monitoreo Bofedal de Isluga

## Análisis de Resultados

### a) Bofedal Chungará

Como era de esperarse en este caso, la escasa acumulación de suelo presente está directamente relacionada con la vulnerabilidad del emplazamiento del sistema, en el sentido que una fuerte pendiente impediría la depositación de sedimentos y en consecuencia la fijación de las plantas. En la **figura n°6**, el diagrama de distribución de espesores en este bofedal indica una clara degradación lateral que es producida por el curso principal de su red de drenaje. Otro antecedente que avala esta hipótesis, es la edad estimada por medio del análisis de C-14 sobre una muestra de materia orgánica obtenida desde el fondo del sector de máxima acumulación; éste indicó una antigüedad en un orden de magnitud entre los 100 y 1000 años (moderno).

Por otro lado, el esquema de un corte transversal ilustra en profundidad la conformación típica de este bofedal, con una cubierta vegetal viva de aprox. 50 cm en promedio, bajo la cual existe una capa anóxica de materia orgánica en descomposición de 5 a 10 cm de espesor, que sólo está ausente en las zonas degradadas. Esta capa fija el límite de oxigenación del sistema y cumple un importante rol de confinamiento al flujo subsuperficial.

La **figura n°7** reproduce la topografía del bofedal y zonas adyacentes, y se le ha superpuesto un mapa de isoconcentraciones de STD obtenido a partir del análisis de las muestras de agua subsuperficial. En él se observa un claro aumento de salinidad del flujo conforme avanza hacia aguas abajo.

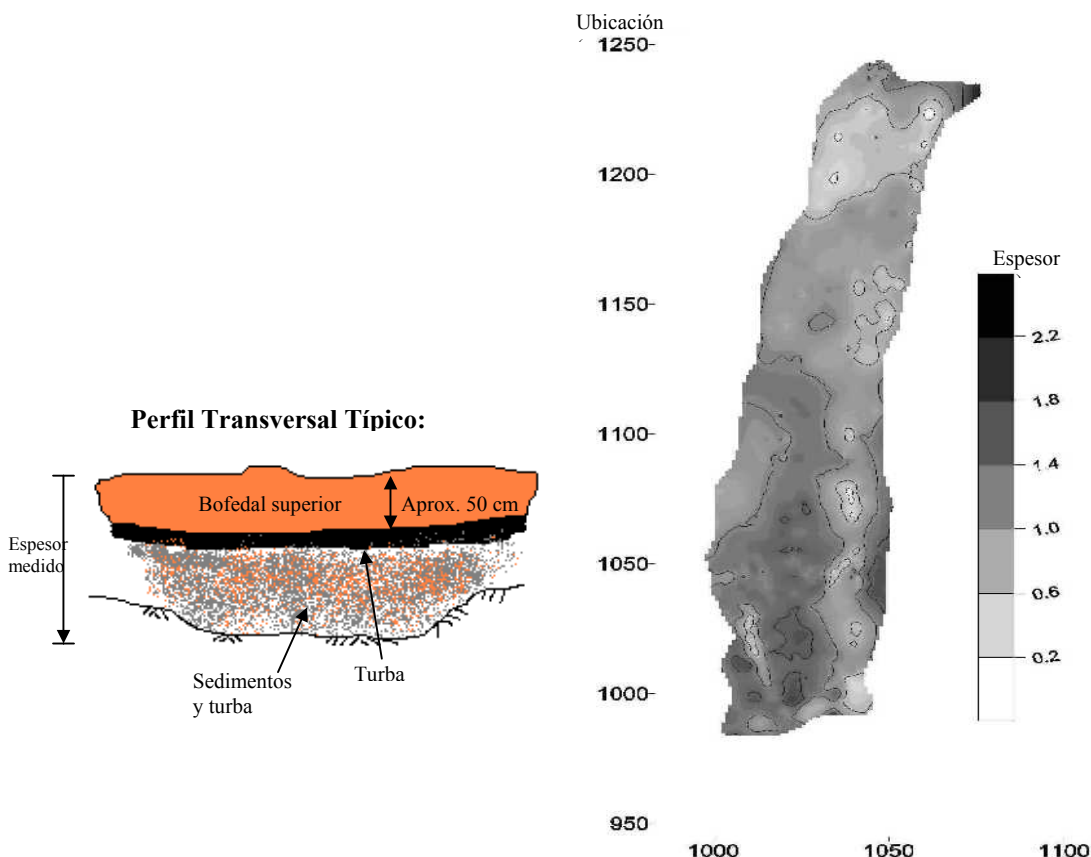


Figura n°6. Distribución del espesor en bofedal de Chungará

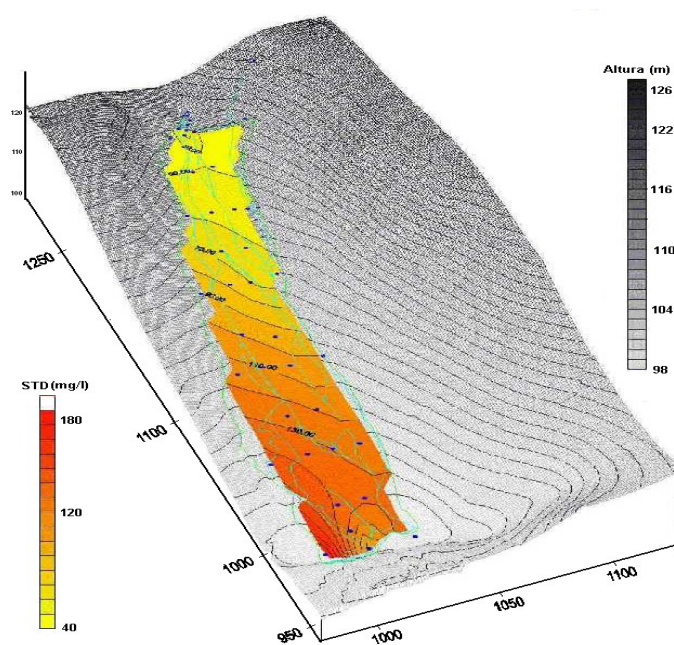


Figura n°7. Topografía y distribución de STD en el agua subterránea del Bofedal de Chungará

Este proceso de salinización del agua se debe mayoritariamente al ingreso de  $\text{CO}_2$  por la descomposición de la materia orgánica desde la capa anóxica, debido a lo cual se genera mayor acidez y se favorece la alteración meteórica de sedimentos, con el consecuente ingreso de sales por esa vía. Mediante el trazado de perfiles de conductividad en profundidad, se ha podido establecer la localización general de un máximo que se sitúa entre los 0 y 50 cm; en dicho estrato no sólo se estaría produciendo el efecto anteriormente indicado sino que estaría siendo afectado localmente por el ingreso de nutrientes a través de la depositación fecal en superficie.

Contrariamente a lo que podría pensarse, el agua superficial no modifica apreciablemente su contenido de STD, manteniendo siempre una concentración similar a la de las vertientes alimentadoras del sistema en la zona alta, así como, de los pozos de la primera sección, lo cual apunta a que el agua subsuperficial no estaría haciendo un aporte significativo al escurrimiento superficial en el área de estudio y saldría del sistema en forma subterránea. Consecuentemente, en este bofedal, no es posible establecer un balance hídrico simple, por lo que se desecha estimar la evapotranspiración de este sector mediante este método.

### **b) Bofedal de Isluga**

En este bofedal las actividades se centraron en el tramo comprendido entre los puntos de muestreo Islu-4 e Islu-7, el cual es aparece como una planicie semi-inclinada que cubre un área de  $5 \text{ km}^2$ , este sector posee una gran diversidad en su cobertura vegetal y presenta las condiciones hidrogeológicas adecuadas para la determinación de un balance hídrico instantáneo. Su escasa pendiente (en general, las pendientes fluctúan entre un 0% y un 2%) ha permitido la acumulación de sedimentos y de materia orgánica en una profundidad superior a 5 m (altura máxima alcanzada por los equipos de toma de muestras), obteniéndose una datación en orden de magnitud entre los 1000 a 10000 años, notablemente superior al caso del Bofedal Chungará.

El esquema en profundidad para este bofedal varía de acuerdo al tipo de vegetación presente, y éste a su vez, al régimen del escurrimiento superficial presente. En sectores con escurrimiento superficial permanente o discontinuo, la vegetación predominante es de tipo bofedal y el esquema es similar al presentado en Chungará. En sectores sin escurrimiento superficial, se observa cobertura vegetal del tipo vega o de transición, y en profundidad se caracterizan por presentar una menor cubierta vegetal que los bofedales, con ausencia de la capa anóxica. No obstante lo anterior, estos sectores de vegas y transición, en conjunto con las lagunas, cumplen un rol preponderante en la dinámica de sales del sistema completo, ya sea acumulando sales en superficie durante el estiaje, gracias a un nivel freático cercano y al efecto capilar, o reinfiltrando y salinizando eventuales escurrimientos debido a la precipitación directa durante la estación húmeda.

### Determinación de la Evapotranspiración

Este cálculo se aplicó a un sector del Bofedal de Isluga donde se presentaron las mejores características hidrogeológicas para establecer un balance hídrico, elección que se complementó con el análisis de afloros y análisis fisicoquímicos e isotópicos (Deuterio y Oxígeno-18). El subsector considerado, cubre un área de 5 km<sup>2</sup> y se extiende en el tramo entre los puntos de muestreo Islu-4 e Islu-7, y mediante el análisis de imágenes satelitales en conjunto con observaciones de terreno se ha podido establecer la delimitación de un número de 5 distintas unidades de cobertura vegetal, de acuerdo con la actividad de fotosíntesis asociada, más una representativa de los espejos de agua (**figura n°8**).

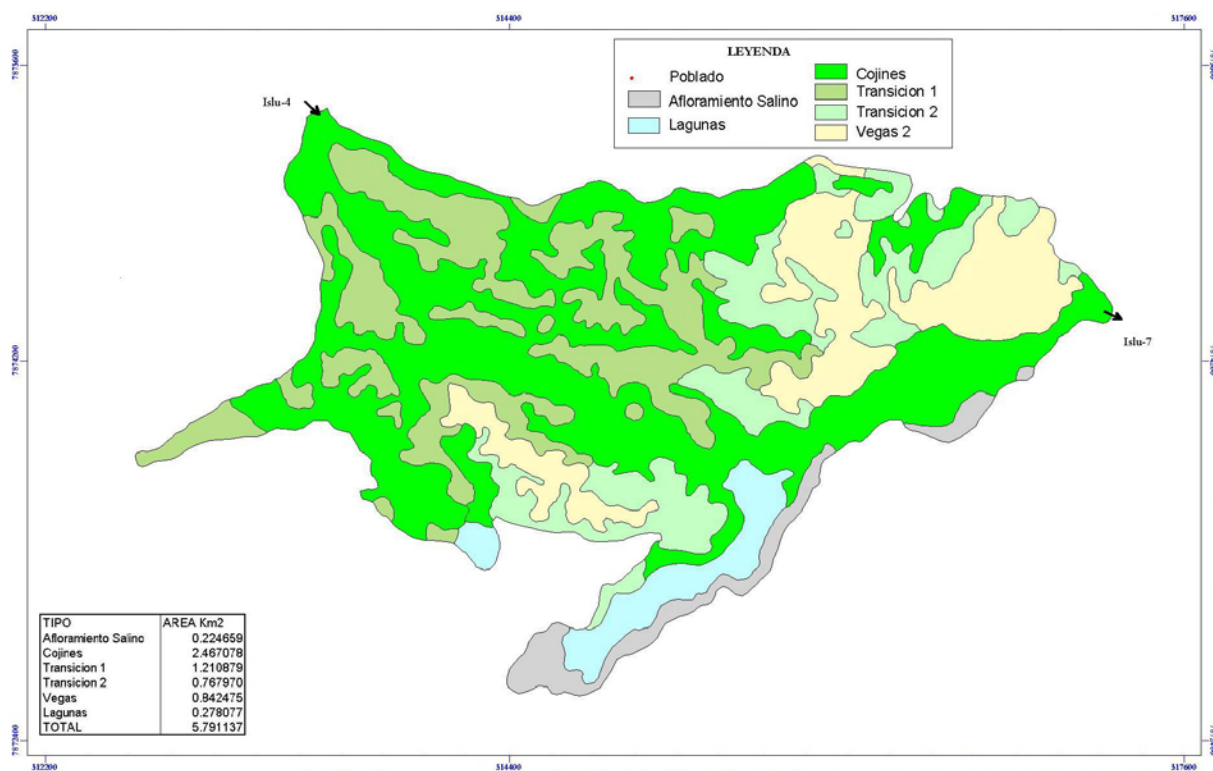


Figura n°8. Unidades vegetacionales presentes según interpretación de imagen satelital



Para la estimación convencional de la evapotranspiración de referencia mensual se utilizaron los métodos de evaporímetro de bandeja y Penman-Monteith. 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 sobre la base de 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)

Los valores de  $K_c$  asignados a cada unidad, así como, las áreas asociadas se señalan en la **tabla n°1**. También se presentan las áreas asociadas a cada cobertura vegetal en el subsector que va desde Islu-4 a Islu-7.

Tabla n°1.  $K_c$  según unidad vegetacional. Áreas 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 n°2**.

Tabla n°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 estimada finalmente para el tramo entre ISL-4 e ISL-7, expresada en mm/día y l/s se presenta en la **tabla n°3**, en conjunto con los caudales instantáneos medidos en terreno para ambas secciones de control. En la **figura n°9** se comparan los resultados de ambos métodos.

Tabla n°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
	mm/día	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

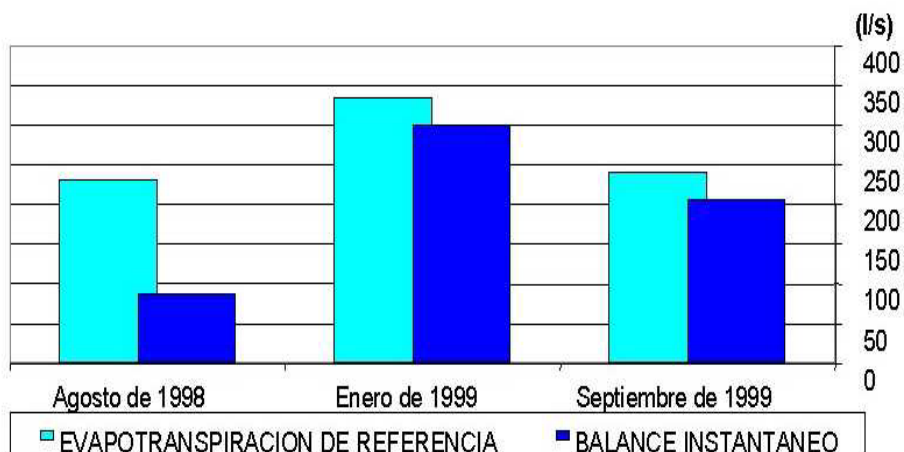


Figura n° 9. Gráfico comparativo entre la evapotranspiración estimada convencionalmente y el balance hídrico instantáneo

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 estimada (300 l/s v/s 335 l/, y 206 l/s v/s 240 l/s), lo cual no deja de ser interesante considerando la simplicidad de cálculo del balance hídrico en comparación con la determinación de la evapotranspiración convencional. Para la campaña de agosto de 1998 no se detectaron eventos meteorológicos que pudieran desestabilizar el régimen establecido, por lo que la diferencia entre el balance

hídrico y la evapotranspiración determinada puede deberse a un error en la medición del caudal.

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, tal como se asumió inicialmente a partir de los análisis isotópicos, son escasos o nulos, y que las diferencias de caudal entre la entrada y la salida de un sistema en régimen se deberían principalmente a la evapotranspiración.

Otro punto interesante de resaltar se infiere a partir de registros históricos de la estación de Collacagua, para la cual la evaporación de bandeja máxima es de 11 mm/día; según esto, la tasa máxima de evapotranspiración totalizada para este tramo de bofedal sería de unos 0.8 l/s/ha, y en un análisis por unidad vegetacional, los cojines alcanzarían un máximo de 0.96 l/s/ha.

## **Conclusiones**

Los resultados obtenidos son preliminares y 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 de agua en Isluga como de Chungará se concluyó que los flujos subsuperficiales 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 aceleración de la meteorización debida al ingreso ácido carbónico por la descomposición de materia orgánica.
- El espesor de la columna de sedimentos bajo un bofedal, la cobertura vegetacional y la extensión de una formación de vegas o de bofedal, lo establece fundamentalmente la condición geomorfológica local (pendiente del cauce, permeabilidad de las formaciones adyacentes, singularidad hidrogeológica, 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 del sistema en 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 esto 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

D:\Estudios\_Tapas\PAPERS\REVISTA VERTIENTE\Paper Bofedales Vertiente.doc