

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

XIX CONGRESO CHILENO DE HIDRAULICA

**ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS POR INFILTRACIÓN Y EVAPORACIÓN DEL
SISTEMA LAJA-DIGUILLÍN EN LOS RÍOS POLCURA Y LAJA**

**JOSÉ LUIS ARUMÍ¹
DIEGO ANDRÉS RIVERA²
ALFONSO ROUGIER³
RICARDO DÍAZ BORQUEZ⁴**

RESUMEN

Durante el verano del año 2008, se desarrollo un estudio para estimar las pérdidas de agua de riego que se producen en el sistema Laja-Diguillín en dos tramos de ríos que son utilizados para conducir dichas aguas. Los dos ríos son el Polcura y el Laja. Para evaluar las pérdidas por infiltración se utilizó un modelo de balance hídrico a nivel mensual. Este modelo se parametrizó usando datos de velocidad de infiltración en el lecho del río medidos durante una campaña de terreno y se calibró usando datos históricos de caudales. Las pérdidas de conducción de las aguas de riego son del aproximadamente un 2.2% del caudal descargado al sistema, alcanzando un máximo de 1.58 m³/s. Esta agua alimenta el acuífero ubicado en la parte baja del río Laja.

¹Profesor Titular, Departamento de Recursos Hídricos, Universidad de Concepción, mail jarumi@udec.cl

²Profesor Asistente, Departamento de Recursos Hídricos, Universidad de Concepción, mail dirivera@udec.cl

³Ingeniero Proyecto, Departamento de Riego, DOH, MOP. mail alfonso.rougier@mop.gov.cl

⁴Prisma Ingeniería Limitada, mail rdiazb@prisma.cl

1. INTRODUCCIÓN

El Sistema de Riego Laja Diguillín (SRLD) es un importante proyecto que está desarrollando el Estado de Chile en la Región del Biobío, que consiste en la construcción de una serie de canales matrices que conectan cauces naturales para conducir aguas desde la Laguna del Laja a un distrito de riego de aproximadamente 40.000 hectáreas ubicado en la parte Sur del la cuenca del río Itata (Figura 1). La idea central de este proyecto es transformar la producción agrícola del área, desde la actual producción de cultivos de secano de baja rentabilidad, a la producción de cultivos y plantaciones regadas de alta rentabilidad. Dicha transformación beneficiara a la Provincia de Ñuble (600.000 habitantes) ubicada en la cuenca del Itata.

El proyecto ha causado gran polémica debido a que utiliza aguas de la cuenca del río Laja, que es un afluente del río Biobío, para regar una zona que pertenece a la cuenca del río Itata. Frente a este trasvase de aguas, la población de la cuenca del Biobío se ha considerado afectada aduciendo que la construcción de este canal reducirá la disponibilidad de agua en la parte baja del río Laja y del río Biobío, impactando directamente a la Ciudad de Concepción. En respuesta a esto, la autoridad plantea que los derechos de agua usados por el canal provienen de la acumulación de aguas invernales en la Laguna del Laja y que por ello no se afectará la disponibilidad de agua en el verano.

Debido a que existe una gran sensibilidad en la comunidad frente al Sistema de Riego Laja Diguillín, ha sido necesario conocer el efecto de este proyecto en el balance hídrico de la cuenca del río Laja, considerando que las aguas de dicho río son utilizadas para el riego, generación de energía eléctrica, agua potable y que además se debe proteger el valor turístico del Salto del Laja que es uno de los principales iconos turísticos de Chile. Lo anterior, ha motivado el desarrollo de estudios específicos para responder preguntas que nunca antes habían sido planteadas en Chile. Una de estas preguntas fue cuánta agua de riego se pierde en la conducción del agua de riego que es realizada por los ríos Polcura y Laja.

Este documento presenta los resultados de un estudio planteado para responder dicha pregunta y que fue desarrollado durante la temporada de riego comprendida entre septiembre del 2006 y abril del 2007.

2. ANTECEDENTES GENERALES.

Las aguas del Sistema de Riego Laja-Diguillín provienen de la acumulación de excedentes invernales que son almacenados en la Laguna del Laja, que es un lago natural operado como un sistema de regulación interanual desde el año 1958 (DOH, 2007). Las aguas acumuladas durante los meses de invierno (Mayo-Agosto) son descargadas al río Polcura a través de la Central Hidroeléctrica de El Toro y son conducidas por dicho río durante un tramo de 12 kilómetros hasta el río Laja donde son conducidas por otros 42 kilómetros hasta la Bocatoma Tucapel, lugar en el cual las aguas son captadas hacia un canal matriz revestido en hormigón y conducidas unos 100 kilómetros hasta un distrito de riego de 40.000 hectáreas.

El río Polcura es el principal afluente del río Laja y tiene un marcado régimen nivo-pluvial, pues nace en la vertiente Occidental de la Cordillera de los Andes. El río se desarrolla en la dirección Norte-Sur, y posee un cauce de alta pendiente, donde el material depositado es predominantemente roca transportada (Figura 2).

El río Laja es el principal afluente del río Biobío y nace de las filtraciones que se producen a través de la barrera de material volcánico que cierra la Laguna del Laja. En su curso superior, el río se desarrolla en una dirección Este-Oeste y posee un cauce ancho, donde predomina el material gravo-arenoso (Figura 3). Una detallada descripción de la evolución geológica y geomorfológica de la parte superior del Valle del río Laja es presentada por Thiele et. al, (1998), quienes describen las unidades geológicas existentes y los procesos que formaron dicho territorio, asociados a la actividad del volcán Antuco ocurrida durante el Pleistoceno superior y Holoceno temprano. Debido a su origen volcánico, los depósitos que conforman el valle del río Laja tienen una alta permeabilidad y gran capacidad de almacenar agua, formándose acuíferos que son recargados por filtraciones provenientes del río, lluvias y derretimiento de nieves. Evidencia de la alta tasa de infiltración del cauce se puede apreciar que, en condiciones de estiaje y sin el aporte de los caudales del SRLD, el río se seca en algunos tramos.

Al inicio del estudio, se realizó un recorrido exhaustivo de los ríos Polcura y Laja, desde la descarga de la Central Hidroeléctrica de El Toro, donde serán vaciadas las aguas del SRLD hasta la Bocatoma Tucapel, donde estas aguas serán extraídas a la red de canales. Este recorrido, más el análisis de la geología y entrevista a actores que conocen los ríos, como los operadores de los canales de riego, permitió establecer como principal hipótesis de trabajo que, a lo largo de los 54 kilómetros del estudio, los ríos infiltran aguas hacia los sistema de aguas subterráneas.

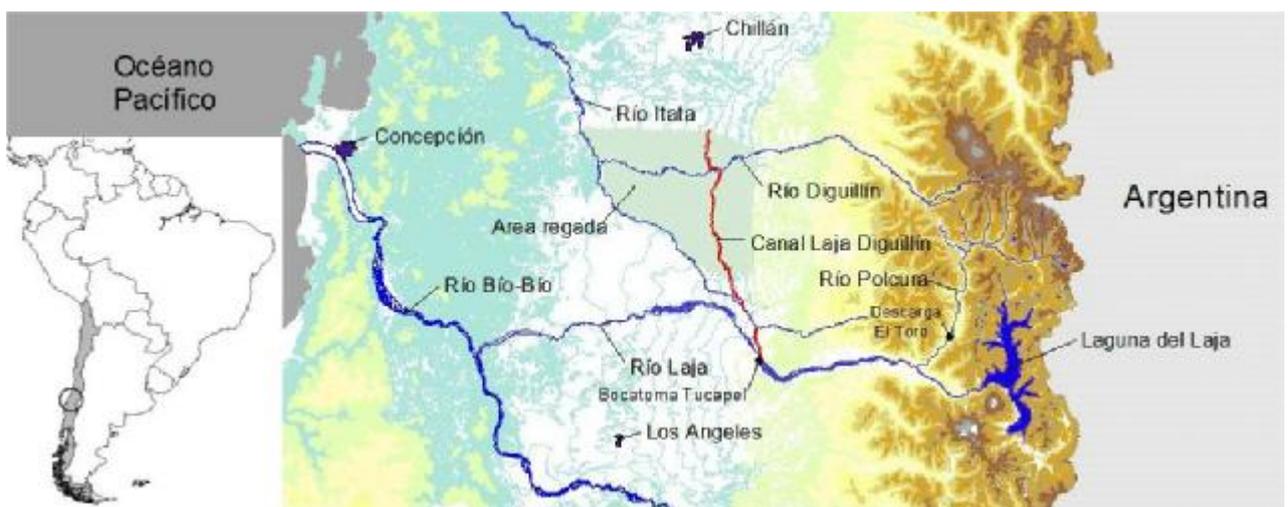


Figura 1. Ubicación geográfica del Sistema de Riego Laja Diguillín.



Figura 2. Sección típica del río Polcura



Figura 3. Sección típica del río Laja, abajo de la descarga de la Central Antuco.

3. METODOLOGÍA

Para la determinación del balance hídrico en los tramos de río en estudio se utilizó una metodología consistente en discretizar los cauces en estudio en diferentes tramos y resolver la ecuación de balance hídrico (Ec. 1) en forma numérica, considerando que los ingresos de agua se concentran al inicio de cada tramo y que las pérdidas por infiltración y evaporación ocurren en forma distribuida a lo largo de cada tramo. Luego, es posible resolver numéricamente la Ec. 1, considerando las pérdidas por infiltración como incógnitas. Finalmente, dado que se cumple la condición de balance en cada tramo, se cumple la condición de balance en el cauce estudiado. Una vez se obtienen las incógnitas para cada tramo, el caudal a la salida del tramo j corresponde al caudal de ingreso en el tramo $j+1$. Esta metodología es similar a la propuesta por Khepar et., al (2000), quienes evaluaron la magnitud de la infiltración que recarga los sistemas de aguas subterráneas.

$$\sum_j Qe_{ij} - Qs_i = Pinf_i + Pev_i \quad (1)$$

Donde:

$Qe_{i,j}$: Caudal j -ésimo que ingresa en el nodo inicial del tramo i

Qs_i : Caudal que sale del tramo i

$Pinf_i$: Pérdidas por infiltración en el tramo i

Pev_i : Pérdidas por evaporación en el tramo i

Como se presente de manera detallada más adelante los términos del lado derecho de la Ec 1 son función de la altura de escurrimiento en la sección, la cual puede estimarse mediante la ecuación de Chézy-Manning. Las pérdidas por infiltración pueden modelarse mediante la aplicación de la Ley de Darcy al caso de un cauce que recarga un acuífero (Anderson y Woessner, 1991) según las siguientes ecuaciones:

$$P_{inf} = \frac{k}{e} \cdot A \cdot h \quad (2)$$

Donde:

P_{inf} : Pérdida por infiltración (m^3/s)

k : Conductividad hidráulica del material a través del cual se produce el flujo entre el río y el acuífero (m/s).

e : Espesor del lecho por donde se produce el flujo entre el río y el acuífero el agua (m)

A : Superficie por donde se produce el flujo entre el río y el acuífero (m^2)

h : Altura hidráulica promedio del río en el tramo (m)

La ecuación anterior considera que las pérdidas por infiltración a través del lecho del cauce son dependientes de la conductividad hidráulica de este y de la carga hidráulica sobre el lecho, la cual a su vez puede aproximarse o considerarse equivalente a la altura normal de escurrimiento. Para disponer de estimaciones de los valores de conductividad hidráulica y espesor del material a través del cual se produce la infiltración, se realizaron reconocimientos de terreno para identificar el material constituyente de los cauces y se ejecutaron 10 pruebas de infiltración basadas en el método propuesto por Rosenberry (2008). Las estimaciones de estos valores se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados pruebas de infiltración.

Cauce	Sector	Conductividad hidráulica (cm/min)
Laja	Tucapel	2,20
Laja	Tucapel	1,00
Laja	Puente Tucapel	0,80
Laja	Aguas Abajo Bocatoma Rucue	0,02
Laja	Aguas Abajo Descarga Antuco	3,80
Laja	Confluencia Polcura	3,00
Polcura	Antes Confluencia Laja	5,80
Polcura	Frente Campamento Endesa	3,40
Polcura	Aguas Abajo Bocatoma Polcura	1,60
Polcura	Antes Descarga El Toro	0,60

Para cada tramo se calcula la altura hidráulica suponiendo que se cumplen las condiciones de régimen uniforme usando la Ecuación de Chézy-Manning. La longitud, pendiente y ancho de cada tramo se obtuvieron usando un modelo digital de terreno SRTM (Nasa, 2005). Considerando que el ancho de los cauces es dos órdenes de magnitud superior a la profundidad, se simplificó la Ecuación de Manning suponiendo que el radio hidráulico es igual a la altura hidráulica.

3.1 Estimación de las Pérdidas por Evaporación

Las pérdidas por evaporación desde un curso de agua pueden ser estimadas a través de ecuaciones físicamente basadas dependientes de parámetros meteorológicos o bien mediante correlaciones con evaporímetros (bandeja de evaporación). Considerando que los métodos que se reportan en la literatura para la estimación de la evaporación desde cuerpos de agua superficial que son físicamente basados requieren de un notable esfuerzo en instrumentación y costos de operación (e.g. Tanny et al, 2008) se prefirió utilizar una correlación con datos disponibles de evaporímetro de bandeja, dada la disponibilidad de

datos meteorológicos de la Estación Agrometeorológica de la Universidad de Concepción, Campus Chillán.

De lo anterior, se estimaron las pérdidas por evaporación desde cuerpos de agua a partir de registros de evaporación de bandeja, corregidos mediante la ecuación 3 (metodología de McKenzie y Craig; 2001). Las constantes adimensionales (K_i) usadas son 1,26 para el caso de pozas (deBruin y Keijman, 1978) y 1,00 para vegetación ribereña (McKenzie y Craig, 2001). Se supone que la vegetación ribereña no tiene limitación de abastecimiento de agua y que el efecto del viento (fetch) en las pozas genera mayor evaporación. En la ecuación 3, la evaporación en el tramo es dependiente del ancho de escurrimiento, el cual a su vez puede estimarse a partir de la ecuación de Chézy-Manning.

$$ME = \frac{E}{1000} \sum_i k_i A_i \quad (3)$$

Donde:

- ME : Mermas por evaporación ($m^3 d^{-1}$)
- E : Evaporación bandeja ($mm d^{-1}$)
- k_i : Constante adimensional que relaciona la evaporación de bandeja con la evaporación de la fuente en el área A_i
- A_i : Área (m)

3.2. Definición del modelo por tramos

Debido a que las aguas del canal Laja Diguillín son vaciadas al río Polcura a través de la descarga del Toro y que estas son conducidas a través los ríos Polcura y Laja, hasta la Bocatoma Antuco, se analizaron ambos cauces con un solo modelo que consideró tres tramos del río Polcura y cuatro tramos del río Laja (Tabla 2 e Figura 4). Se modeló el balance hídrico en cada tramo considerando los ingresos y salidas de agua para cada nodo. Cada tramo presenta características similares en cuanto a geometría, pendiente y composición del material de fondo.

Para la estimación de las mermas por infiltración y evaporación se supone que las aguas del Sistema Laja Diguillín, no son captadas por Endesa para generar a través de la Central Antuco. Este supuesto es conservador, pues aumenta la conducción por tramos expuestos a infiltración y a evaporación.

Tabla 2. Tramos considerados para el modelo.

Tramo	
1	Río Polcura desde la descarga de El Toro (Nodo 1) al inicio de la laguna formada por la Bocatoma Antuco (Nodo 2)
2	Río Polcura desde el inicio de la laguna formada por la Bocatoma Antuco hasta dicha Bocatoma (Nodo 3)
3	Río Polcura desde la Bocatoma a la confluencia con el río Laja (Nodo 4)
4	Río Laja desde la junta con el Polcura (Nodo 4) hasta la descarga Antuco (Nodo 5).
5	Río Laja desde la descarga Antuco (Nodo 5) hasta la Bocatoma Rucue (Nodo 6).
6	Río Laja desde la Bocatoma Rucue (Nodo 6) hasta la confluencia con el río Rucue (Nodo 7)
7	Tramo 7. Río Laja desde la confluencia con el río Rucue (Nodo 7) hasta Bocatoma Tucapel.

3.3 Evaluación de pérdidas

Para la evaluación de las pérdidas de conducción asociadas al SRLD, fue necesario disponer de una condición de referencia que representara el balance hídrico para los 7 tramos de río sin la operación del SRLD. Para esto, se consideraron las estadísticas mensuales de caudales del período previo a la operación del sistema entre los años 2003 y 2007 para aplicar la metodología. Se eligió este período de cinco años, pues era el único período en que se dispone de una estadística completa de caudales para los cauces naturales relacionados con el SRLD.

Lo anterior permitió validar la metodología utilizada, pues se contrastaron los valores de caudal estimados a la salida del nodo 8, con los valores medidos en la estación fluviométrica Río Laja en Tucapel (Figura 5).

Para simular la operación del SRLD se consideraron siete escenarios definidos por posibles valores de caudales de entrega descargados a través de la Central El Toro: 10, 20, 30, 40 50, 60 y 65 m³/s. Estos caudales fueron definidos para cubrir los posibles rangos de operación del SRLD, considerando el valor máximo que puede ser entregado de acuerdo a las reglas de operación (DOH, 2007).

Para cada escenario se evaluaron las pérdidas de conducción, considerando los caudales naturales definidos por las series de caudales medidas entre los años 2003 y 2007.

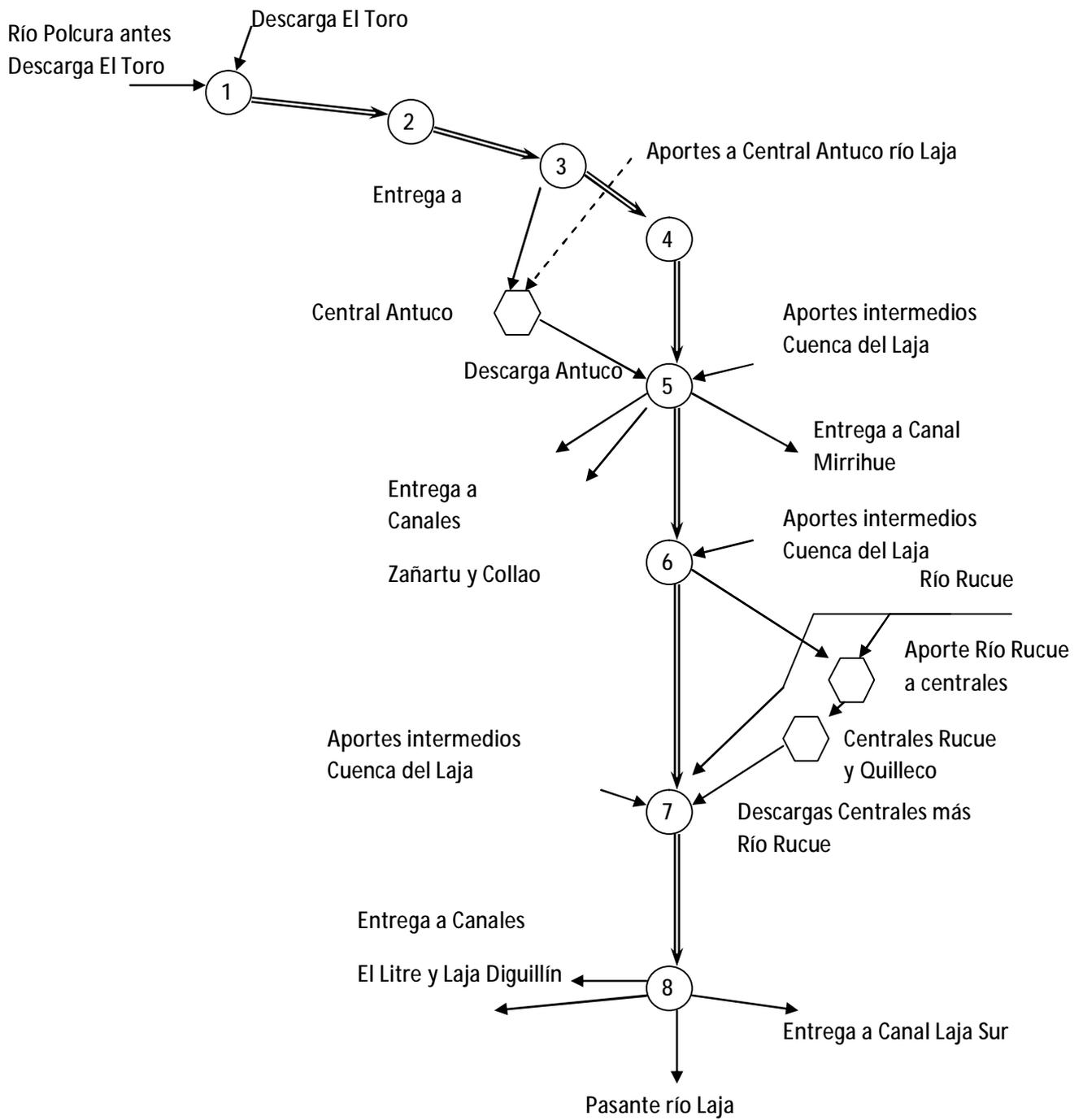


Figura 4. Diagrama unifilar modelo Ríos Polcura y Laja.

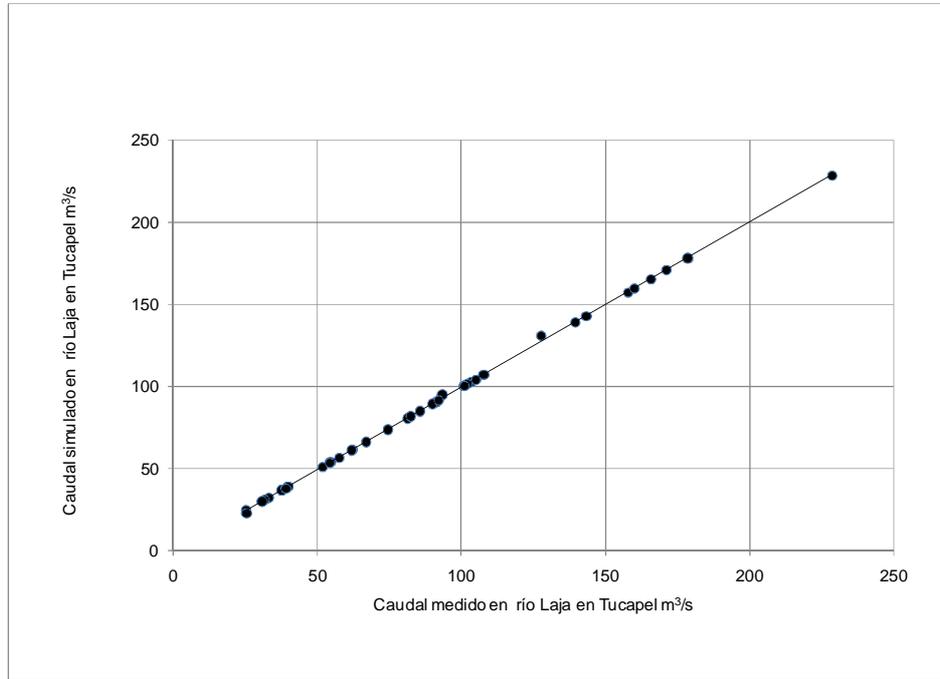


Figura 5. Verificación del modelo de balance hídrico utilizado.

4. RESULTADOS

Para todo el tramo en estudio, los resultados muestran que:

- Las pérdidas por evaporación naturales para los ríos Polcura y Laja son de aproximadamente 200 L/s.
- Las pérdidas promedio por infiltración, estimadas para los ríos Laja – Polcura, sin considerar aportes al SRLD son del orden de 3,55 m³/s. Posteriormente estas pérdidas se aumentan en la medida que se incrementa el caudal descargado por el Toro (Tabla 3).
- Al considerar el aporte incremental de caudal asociado al sistema Laja Diguillín, las pérdidas por evaporación no varían significativamente y las pérdidas promedio por infiltración para todo el tramo alcanzan un máximo del orden de 5,36 m³/s, de los cuales 1,58 m³/s corresponden a pérdidas de conducción del SRLD (Tabla 4).

Tabla 3: Infiltración tramos Polcura y Laja

Caudal descargado por el Toro al SRLD m ³ /s	Pérdidas totales por infiltración en m ³ /s		
	río Polcura m ³ /s	río Laja m ³ /s	ríos Polcura + Laja
0,00	1,02	2,53	3,55
10,00	1,09	2,91	4,00
20,00	1,14	3,24	4,38
30,00	1,18	3,52	4,70
40,00	1,20	3,73	4,93
50,00	1,23	3,91	5,14
60,00	1,24	4,05	5,29
65,00	1,25	4,11	5,36

Tabla 4: Perdidas sistema L-D tramos Polcura y Laja

Caudal descargado por el Toro al sistema L-D m ³ /s	Pérdidas totales en m ³ /s		Caudal disponible en bocatoma Tucapel
	río Polcura	río Laja	
0,0	0,00	0,00	0,00
10,0	0,07	0,38	9,55
20,0	0,12	0,71	19,17
30,0	0,16	0,99	28,85
40,0	0,18	1,20	38,62
50,0	0,21	1,38	48,41
60,0	0,22	1,52	58,26
65,0	0,23	1,58	63,19

5. CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio permitieron corroborar la hipótesis de trabajo que, a lo largo de los 54 kilómetros del estudio, los ríos Polcura y Laja infiltran aguas hacia el sistema regional de aguas subterráneas. Este resultado es consistente con las características generales de los ríos Andinos de la zona Centro Sur de Chile, los cuales en su recorridos por la Precordillera Andina (transición entre la Cordillera de los Andes y la Depresión Central) forman valles con materiales de relleno muy permeable, en los cuales los depósitos de agua subterránea tienden a ser profundos y en los cuales las filtraciones desde los lechos de los ríos son un importante mecanismo de recarga de aguas subterráneas.

Para la operación del sistema de riego Laja Diguillín, es necesario considerar las pérdidas de conducción que se producen por infiltración desde el lecho de los ríos Polcura y Laja, en los tramos donde se realiza la conducción de las aguas del sistema. Se concluye que el caudal que debe ser descargado por la Central el Toro debe ser un 2,2% mayor al caudal requerido en la Bocatoma Tucapel.

Referencias

- Anderson M. P. y Woessner W. W. Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. Elsevier Science & Technology Books. Estados Unidos. 1991. 381pp.
- De Bruin, H A. A simple model for shallow lake evaporation. *Journal of Applied Meteorology* 17: 1132-1134.
- DOH. Guía Para la Explotación del Lago Laja. Gobierno de Chile. Ministerio de Obras Públicas. Dirección de Obras Hidráulicas – Endesa S.A. Santiago, Chile. 2007. 17 pp.
- Khepar, S. D., A. K. Yadav, S. K. Sondhi y A. Sherring. 2000. Modelling surplus canal water releases for artificial recharge of groundwater through surface drainage systems. *Irrigation Science*. Vol. 19, núm. 2, enero 2000, pp. 95-100
- McKenzie, R y Craig, A (2001) Evaluation of river losses from the Orange River using hydraulic modelling. *Journal of Hydrology*. Vol. 241, núm. 1-2, enero 2001, pp. 62-89.
- NASA. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) [en línea] <ftp://e0mss21u.ecs.nasa.gov/srtm/>, 2005.
- Rosenberry, D. O. 2008. A seepage meter designed for use in flowing water. *Journal of Hydrology*. Vol. 359, núm. 1-2, septiembre 2008, pp. 118-130.
- Tanny, J; Cohen, S; Assouline, S; Lange, F; Grava, A; Berger, D; Teltch, B y Parlange, M. Evaporation from a small water reservoir: Direct measurements and estimates. *Journal of Hydrology*. Vol. 351, núm. 1-2, marzo 2008, pp. 218-229.
- Thiele, R., Moreno, H., Elgueta, S., Lahsen, A., Rebolledo, S. y Petit-Breuilh M. E. Evolución geológico-geomorfológica cuaternaria del tramo superior del valle del río Laja. *Revista geológica de Chile*. Vol.25, núm. 2, diciembre 1998, pp. 229-253.