

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**ANÁLISIS DE LAS FILTRACIONES DE LA BARRERA DEL LAGO LAJA**

**JOSE LUIS ARUMI RIBERA<sup>1</sup>**  
**JORG DIETRICH<sup>2</sup>**  
**INSA NEUWEILER<sup>3</sup>**

**RESUMEN**

La laguna del Laja es un sistema hidrológico del que dependen casi dos millones de habitantes, 6 centrales hidroeléctricas y 120.000 hectáreas de riego. Desde el año 1958 este sistema ha sido manejado siguiendo una serie de criterios entre los cuales está la Ley de Filtraciones del Lago Laja que es un polígono de sexto grado que establece una relación entre el nivel del lago y las filtraciones que originan el río del mismo nombre, que no se explica por la teoría del flujo de aguas subterráneas que hace esperar un desfase entre ambas variables. A través de un análisis conceptual de la formación de la barrera y el uso de diferentes modelos, se postula como hipótesis que la barrera está formada por un relleno que contienen fracturas o macroporos, que originan condiciones de escurrimiento libre al interior de estas lo que explica el exitoso uso de la Ley de Filtraciones a lo largo de casi 60 años.

---

<sup>1</sup>Profesor Titular, Departamento de Recursos Hídricos, Centro CRHIAM, Universidad de Concepción - jarumi@udec.cl

<sup>2</sup> Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, Hannover, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau - dietrich@iww.uni-hannover.de

<sup>3</sup>Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, Hannover, Institut für Strömungsmechanik und Umwelphysik Im Bauwesen - neuweiler@hydromech.uni-hannover.de

## 1. INTRODUCCIÓN

El Lago Laja es un importante cuerpo de agua ubicado en la zona central de Chile que sustenta el río del mismo nombre y es la fuente de agua que beneficia a casi dos millones de habitantes de la Región del Biobío, 6 centrales hidroeléctricas y cerca de 120.000 hectáreas de riego.

Durante la última década, el manejo de los recursos hídricos en el sistema Laja se ha transformado en un tema crítico debido a un largo período de escasez hídrica que ha afectado a Chile, así como también el incremento de la sensibilidad ciudadana por la protección de los paisajes y los servicios ecosistémicos, que se ha tomado al Salto del Laja como un icono central. Por todo lo anterior, se han realizado una serie de proyectos de investigación y consultoría sobre la hidrología de la cuenca del Laja y el manejo de dicho sistema (Endesa, 1970; Endesa 1986; Nardini y Montoya, 1996; Endesa 1997; Mardones y Vargas, 2005; Arumi et al., 2012a; 2012b; Muñoz et al., 2014)

Todos los modelos operacionales del sistema Laja resuelven el balance hídrico en el Lago Laja, ocupando estimaciones de los aportes de escorrentía de la cuenca aportante al Lago, estimaciones de la evaporación del Lago (en algunos casos se desprecia erróneamente) y la Ley de Filtraciones del Lago (Muñoz et al., 2014).

En este caso nos concentraremos en la Ley de filtraciones del Lago Laja, que se estableció en el Convenio 1958 Riego-Endesa y que establece un polinomio de grado 6, que relaciona los niveles del Lago Laja con el caudal de las filtraciones que originan el río del mismo nombre, lo que implica una conexión entre el Lago y las filtraciones

Las filtraciones del Lago Laja se producen a través de la barrera que se formó por el derrumbe de la pared del Volcán Antuco y afloran en el sector del Salto Las Chilcas, ubicado a aproximadamente 4 kilómetros del Lago. Por esta razón al considerar la teoría clásica del flujo en medios porosos, resulta contradictorio el uso de una relación directa entre el caudal medido en un determinado período, con el nivel del Lago medido ese período, sin considerar el tiempo que le toma al agua escurrir a través de la barrera.

Lo paradójico es que esta relación se ha usado desde 1958 y nunca se ha discutido su validez, entonces este trabajo se centra en entender cuál es la dinámica del flujo que conecta el lago Laja con el Río Laja a través de las filtraciones que ocurren a través de la barrera.

Es importante indicar que este trabajo tiene limitaciones propias de la disponibilidad de datos y corresponde principalmente a un ejercicio de análisis hidrogeológico y de la aplicación de distintos modelos numéricos y conceptuales

## 2. BARRERA DEL LAJA

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 el Lago Laja. La formación de este lago 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. Una erupción del volcán Antuco cerró el desagüe del Lago Laja provocando una barrera que represó el Lago Laja. Posteriormente una erupción del Volcán Antuco en 1853 generó una erupción fisural de lavas que elevó la barrera que represa el lago, subiendo el nivel de este en 20 m. Con toda esta actividad volcánica se creó la actual barrera que represa el Lago Laja, cuyo diagrama se presenta en la Figura 1.

En el Convenio firmado entre la ex Dirección de Riego, actual Dirección de Obras Hidráulicas, y ENDESA en el año 1958, se establecieron una serie de medidas para la explotación del Lago Laja considerando un uso en riego y generación eléctrica (DOH, 2007. En el marco de este convenio se estableció lo que se denominó “Ley de Filtraciones del Lago Laja” y que permite estimar los caudales aportantes a la Central Abanico que provienen desde las filtraciones que dan origen al río Laja en el Sector de los Saltos de las Chilcas y Torbellino.

La relación entre la cota del nivel de agua del Lago y los caudales de las filtraciones se estableció como tres polígonos de sexto grado que consideran tres niveles de altura del Lago (Figura 2):

Cota entre 1.362 y 1.369 m. s. n. m.

$$QF = 8,44 \times 10^{-3} * (cota - 1.290)^{2,000} \quad [1]$$

Cota entre 1.340 y 1.362 m. s. n. m.

$$QF = 9,74 \times 10^{-2} * (cota - 1.275)^{1,370} \quad [2]$$

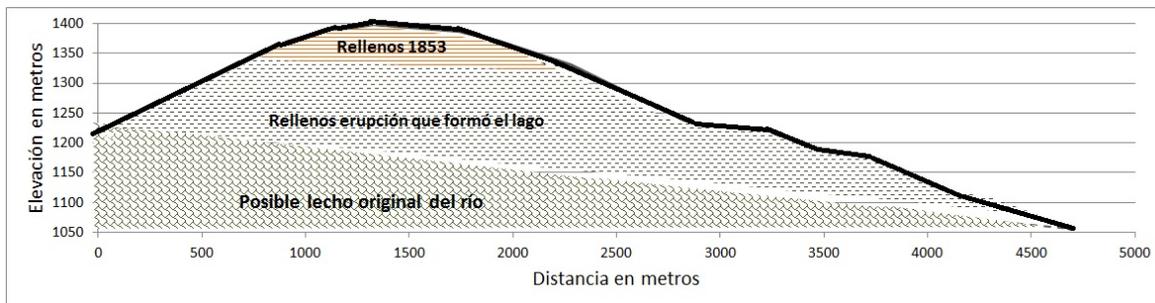
Cota entre 1.220 y 1.340 m. s. n. m.

$$QF = 9,26 \times 10^{-3} * (cota - 1.220)^{1,684} \quad [3]$$

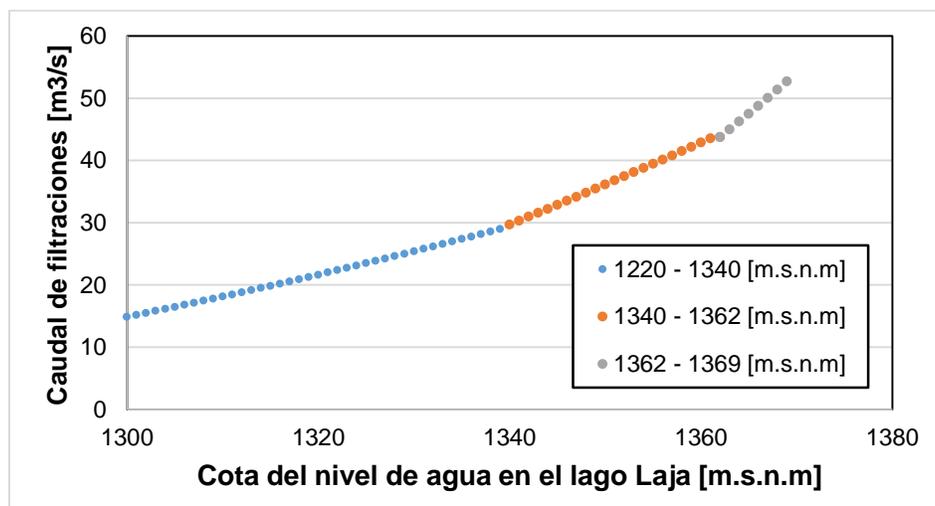
Dónde:

QF : Caudal de filtraciones [m<sup>3</sup>/s]

Cota: Cota del nivel de agua en el Lago Laja [m. s. n. m.].



**Figura 1.** Esquema conceptual de la barrera del Lago Laja, obtenido a partir de la interpretación de modelos digitales de elevación de terreno y la información geológica disponible.



**Figura 2.** Curva de caudales de la “Ley de Filtraciones” que está en función de la cota del Lago Laja por tramos.

### 3. ANÁLISIS DE LA LEY DE FILTRACIONES

Al considerar que la velocidad del agua subterránea, en medios muy permeables, tiene órdenes de magnitud de metros por día y que en el caso de la Barrera del Laja, el agua recorre una distancia de aproximadamente 4.000 metros, el tiempo de viaje teórico del agua debería ser del orden de un año, pero la ley de filtraciones plantea una conexión casi instantánea.

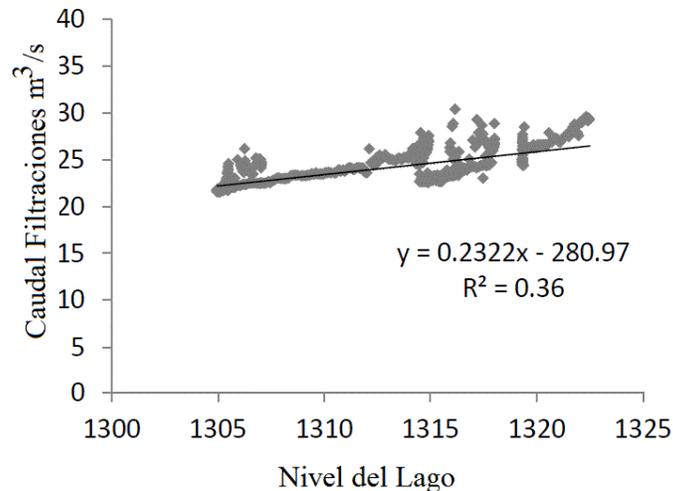
Por otro lado, la existencia de tres tramos en la Ley de Filtraciones refleja la existencia de tres rangos de conductividad hidráulica, lo que se puede interpretar de dos formas:

- Que existan rellenos más permeables en la parte alta de la barrera
- Que exista un sistema de fracturas que se activen en la medida que suba el nivel del lago, generando una mayor cantidad de conductos de agua y por ende una mayor conductividad hidráulica equivalente

Para realizar un primer análisis de la Ley de Filtraciones consideró la estadística disponible, a través de la DGA, que corresponde a niveles del Lago Laja y los caudales medidos en la Estación Canal Abanico en Km 49. Como la estadística de caudales considera tanto los aportes de las filtraciones del Laja, como los de las cuencas intermedia, fue necesario estimar dichos aportes mediante el uso de un modelo hidrológico.

En su tesis de pregrado Leinemann (2014) aplicó el modelo SWAT para generar series sintéticas de caudales para la cuenca intermedia, que fueron restadas de las estadísticas de caudales medidas en la estación Canal Abanico en Km 49 para estimar los caudales de las filtraciones (QF). Para aplicar el modelo SWAT, se delimitaron las cuencas usando los modelos de elevaciones digitales de terreno disponibles en Internet (<https://lpdaac.usgs.gov>). La información de suelos, fue estimada mediante el análisis de las cartas geológicas, mapas de pendiente y una campaña de reconocimiento de terreno.

Una vez eliminado el aporte de la cuenca intermedia, Leinemann (2014) analizó la relación Altura del Lago – Qf considerando tiempos de desfase de 0, 1, 2, 3, 7, 14, 21, 100 y 300 días. Los resultados de Leinemann establecieron que el mejor ajuste se producía para desfases de una semana, lo que resulta consistente con la Ley de Filtraciones, considerando que la altura del lago no experimenta grandes cambios en una semana.



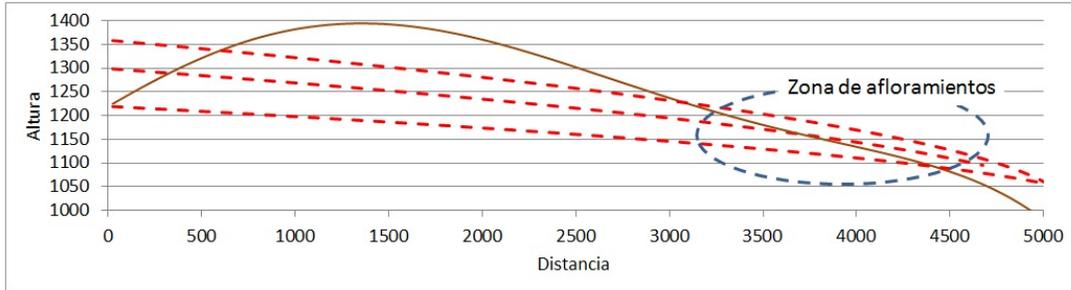
**Figura 3:** Relación entre la cota del Lago y el Caudal de Filtraciones considerando un desfase de una Semana (Leinemann, 2014)

#### 4. ANÁLISIS USANDO MODELOS DE FLUJO SUBTERRÁNEO

Una aproximación inicial al flujo de aguas subterráneas se realizó usando Modflow. Para ello se simuló una barrera simplificada asignándole un ancho constante y una forma dada por el modelo digital de elevación de terreno (Figura 4)

Se evaluó la condición de flujo considerando tres niveles del Lago Laja (cotas 1305, 1335 y 1350 msnm.) Cada cota será probada con distintas conductividades hidráulicas, para obtener flujos similares a los dados por la Ley de Filtraciones. Iterando con el modelo Modflow la conductividad hidráulica para cada nivel del lago y comparando el flujo de agua en esas condiciones con los valores de la “Ley de Filtraciones”, se llegó a los resultados de la tabla 1. En donde se indican las condiciones para cada nivel del lago modelado (Conejeros, 2014).

Con estos resultados se aprecia que se requieren conductividades hidráulicas muy altas para poder reproducir el flujo de agua a través de la barrera, lo que sería el equivalente a rellenos como los mostrados en la Figura 5. Estas conductividades son consistentes con la Ley de Filtraciones, pero al considerar un flujo en un medio poroso saturado, la ubicación de los afloramientos debe variar para distintos niveles del lago, situación que no ocurre, pues la ubicación del Salto de las Chilcas ha sido constante a lo largo del tiempo (Figura 6). Lo anterior indica que el escurrimiento dentro de la barrera del Laja no se produce como un medio poroso saturado, sino que probablemente como un medio fracturado o de doble porosidad



**Figura 4.** Esquema que muestra los resultados de modelar el flujo de agua subterránea a través de la barrera usando MODFLOW, para distintos niveles del Lago Laja

**Tabla 1.** Resultados del modelo de flujo de agua subterránea en Modflow, comparados con la “Ley de Filtraciones” (Conejeros, 2015)

Cota [m.s.n.m.]	K [m/día]	Flujo de agua [m3/día]	Flujo de agua [m3/s]	Ley de Filtraciones [m3/s]
1.305	325	1.447.765	16,76	16,43
1.335	450	2.432.150	28,15	27,34
1.350	500	2.956.605	34.22	36.09



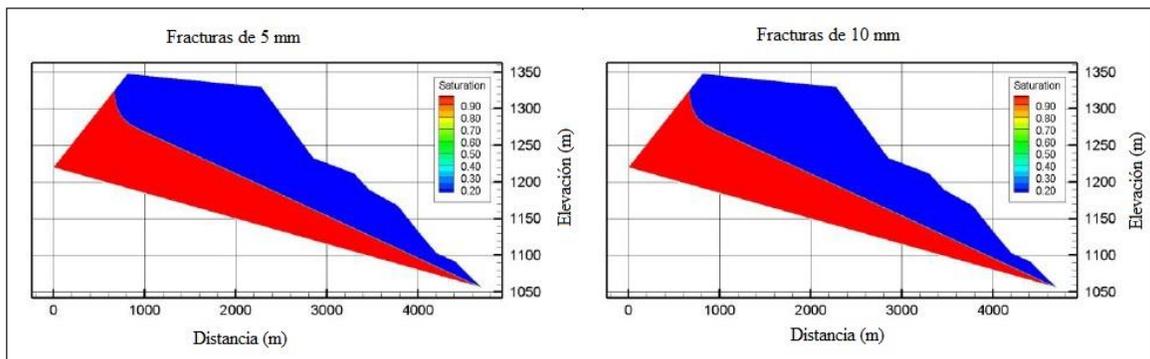
**Figura 5.** Medio macro-poroso, formado por grandes partículas de origen volcánico



**Figura 6.** Salto las Chilcas: a) Condición anterior a 1981 (Endesa, 1981) y actual (2014)

### HydroGeoSphere

Una segunda aproximación la estudió Spitzenberg (2014) usando el modelo HydroGeoSphere. Este modelo permite simular condiciones de flujo de saturación variable en un dominio que considere la existencia de fracturas, en la medida que estas no sean deformables. Spitzenberg (2014) simuló el flujo bajo la barrera considerando la existencia de un medio poroso sin fracturas y con fracturas de un tamaño equivalente de 5 y 10 milímetros. La figura 7 presenta los resultados de las simulaciones considerando las fracturas que permitieron obtener flujos equivalentes a los determinados por la Ley de Filtraciones y más interesante, la existencia de un punto fijo donde se producen los afloramientos.



**Figura 7.** Resultados de la Modelación utilizando un medio fracturado (Spitzenberg, 2014)

## **5. DISCUSIÓN**

Los resultados obtenidos por estos ejercicios académicos permiten plantear la siguiente hipótesis sobre el flujo que se produce a través de la Barrera del Lago Laja

Esta barrera se formó por un gran derrumbe del material que formaba la pared norte del Volcán Antuco, hace aproximadamente 9.500 años. Al escurrir agua por el interior de la barrera, lavó el material fino, dejando un medio poroso de macro porosidad, como el mostrado en la figura 5.

Las filtraciones del Lago Laja se conectan con la Barrera formando una caída inmediata, similar a la mostrada en la parte izquierda de las figuras 7a y 7b, que se conectan a los macroporos del material que forma la barrera y generan condiciones de escurrimiento a superficie libre en miles de canales que al sumarse forman el caudal que conecta el Lago Laja con el río del Mismo nombre.

## **6. CONCLUSIONES**

El Lago Laja está conectado con el río del mismo nombre a través de un sistema de flujo que cruza la barrera a través de grandes poros que en la práctica generan condiciones de escurrimiento libre en el interior de la barrera. Esto explica el reducido tiempo de residencia del agua en el interior de la barrera y la respuesta casi instantánea de la Ley de Filtraciones.

A pesar de las dudas originalmente expuestas, para efecto del manejo del balance hídrico del Sistema Laja, se puede considerar válida la Ley de Filtraciones

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores quieren agradecer el apoyo de Conicyt a través de los proyectos Fondecyt-BMBF-PCCII-2031 y Conicyt/Fondap/15130015

## REFERENCIAS

- Arumí, J. L., D. Rivera, A. Rougier, R. Díaz. 2012b. Estimación de pérdidas de agua en tramos de ríos del sistema Laja-Diguillín en la zona central de Chile. *Tecnología y Ciencias del Agua, antes Ingeniería Hidráulica en México*. Volumen III, núm. 3, julio-septiembre de 2012a, pp 135-141
- Arumí, J.L., Rivera, D., Muñoz, E., y Billib, M. (2012b). Interacciones entre el agua superficial y subterránea en la región del Bío Bío de Chile. *Obras y Proyectos* 12, 4-13
- Conejeros A., 2015. Estudio conceptual de las filtraciones del Lago Laja. Memoria para optar al título de Ingeniero Ambiental. Universidad de Concepción
- 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.
- Endesa, 1997. Estudio de regulación Lago Laja / Empresa Nacional de Electricidad,
- Endesa. 1970. Estudio de los recursos hidráulicos del río Laja, disponible en [www.dga.cl](http://www.dga.cl)
- Endesa. 1981. Central Hidroeléctrica Antuco. Empresa Nacional de Electricidad, Santiago, Chile. 54 pp.
- Endesa. 1986. Aprovechamiento hidroeléctrico del río Laja / ENDESA, Gerencia de Explotación, Subgerencia Comercial-ODIC.
- Leinemann J., 2014. Investigations about water losses from a natural volcanic reservoir in the Andes mountains (Laja Lake, Chile). Universidad de Leibniz Hannover. Septiembre 2014
- Mardones M., Vargas J. (2005) Efectos Hidrológicos de los Usos Eléctricos y Agrícolas en la Cuenca del Río Laja (Chile Centro-Sur). *Revista de Geografía, Norte Grande*, Julio, Número 033, pp. 89-102. Pontificia Universidad Católica, Santiago, Chile,
- Muñoz, E., J. L. Arumí, D. Rivera, A. Montecinos, M. Billib and C. Álvarez. 2014 Gridded data for a hydrological model in a scarce-data basin. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Water Management* 167 May 2014 Issue WM5. Pages 249–258 <http://dx.doi.org/10.1680/wama.12.00086>
- Nardini, A., y Montoya, D. (1995). Remarks on a Min-Max Optimization Technique for the Management of a Single Multiannual Reservoir Aimed at Hydroelectric Generation and Water Supply. *Water Resources Research*, 31(4), 1129-1135.
- Spitzenberg, Frank. 2014. Modelación del flujo bajo la barrera del Laja usando HydroGeoSphere. Universidad de Leibniz Hannover, Agosto 2014
- 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.