

Vargas, X., H. Zavala y E. Brown. 1986b. "Modelos ARMAX en el Estudio de Propagación de Crecidas en Tiempo Real". XII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Vol. 2, Sao Paulo, Brasil, 1986.

Vargas, X. y E. Brown. 1988. "Modelos de Función de Transferencia de Múltiples Entradas para el Pronóstico de Crecidas en Tiempo Real". XIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Vol 2, La Habana, Cuba. 1988.

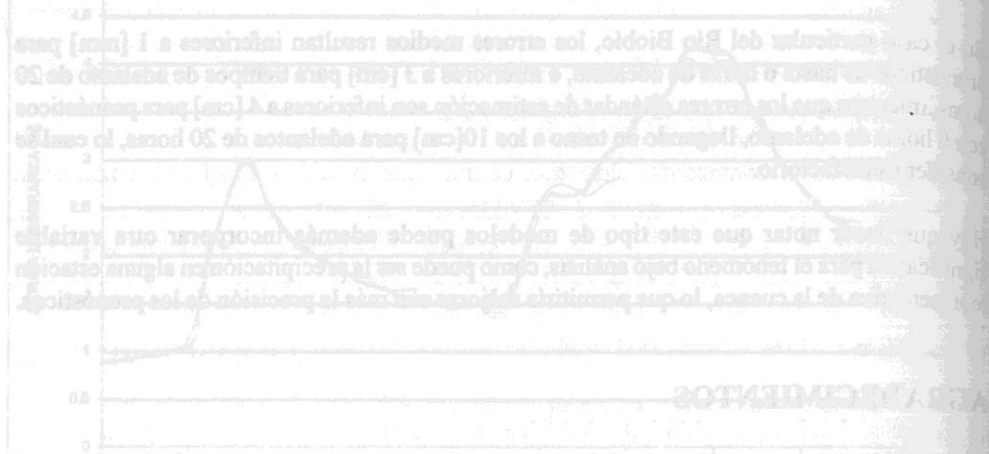


Figura 8. Crecida 25/15/50/10 (19/50/10) y precipitación a 20 horas.

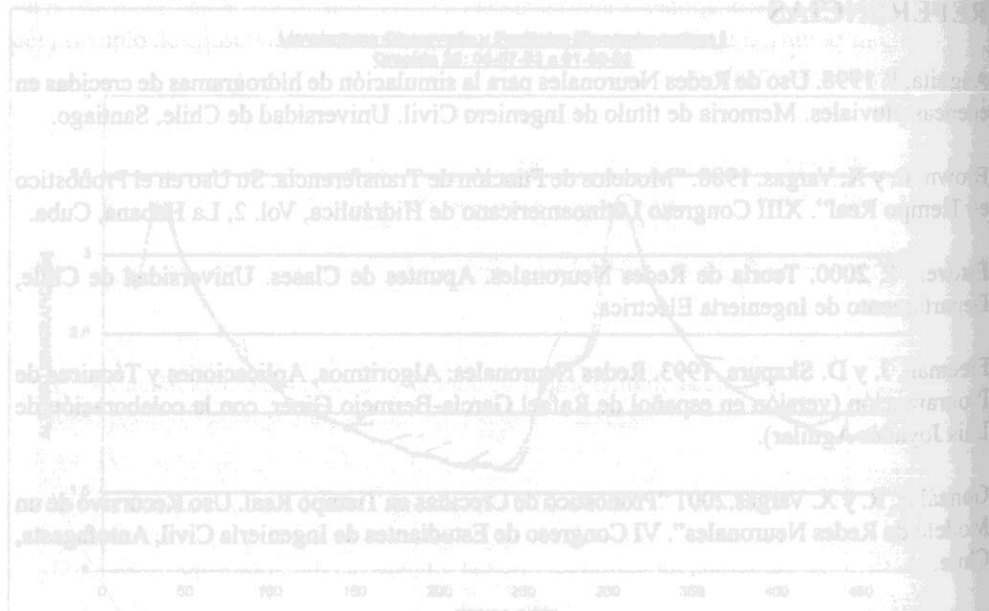


Figura 9. Crecida 25/15/50/10 (19/50/10) y precipitación a 20 horas.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

APORTES AL BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA DEL LAJA

JOSÉ VARGAS B.¹
BELFOR ALARCON P.¹

RESUMEN

Se presenta el balance hídrico anual de la cuenca del río Laja, que pertenece a la cuenca del Biobío y se ubica en la VIII Región de Chile, entre los 36° 54' y 37° 39' latitud Sur y entre los 71° 05' y 72° 43' de longitud Oeste, abarcando una superficie de 4600 km². Tiene un caudal medio en su desembocadura de 194.7 m³/s. Su altitud fluctúa entre los 3585 m.s.n.m. en la cumbre de la Sierra Velluda y los 40 m.s.n.m. en el sector de San Rosendo.

Respecto al uso actual de los suelos de la cuenca del río Laja, el bosque nativo, los terrenos agrícolas y las plantaciones forestales son los de mayor relevancia. En la parte alta, el aprovechamiento de la hoya del río Laja considera la generación de energía hidroeléctrica (complejo hidroeléctrico Laja: centrales Antuco, El Toro, Abanico y Rucúe).

El balance hídrico se realizó sobre un período de 35 años, y los resultados se presentan a nivel de cuenca completa y subcuencas. De éstos, se concluyó que la cuenca en su parte alta es más productiva que la baja, el déficit de agua en la zona alta es bastante menor y se puede atribuir a la estimación del uso de fórmulas empíricas. En cambio, en la parte baja y considerando la cuenca completa, el déficit de agua es significativo y es atribuible al uso consuntivo del recurso, como es el riego.

¹Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción.

1. INTRODUCCIÓN

A partir de un estudio del balance hídrico, es posible hacer una evaluación cuantitativa de los recursos de agua y sus modificaciones por influencia de las actividades del hombre.

El conocimiento de la estructura del balance hídrico de cuencas es fundamental para conseguir un uso más racional de los recursos de agua en el espacio y en el tiempo, así como para mejorar el control y redistribución de los mismos, por ejemplo, trasvases de cuencas, control de máximas crecidas, etc. El balance hídrico ayuda en la predicción de las consecuencias debidas a cambios artificiales en el régimen de ríos, lagos y cuencas subterráneas.

El conocimiento del balance hídrico es también muy importante para el estudio del ciclo hidrológico. Con los datos del balance hídrico es posible comparar recursos específicos de agua en un sistema, en diferentes períodos de tiempo y establecer el grado de su influencia en las variaciones del régimen natural.

2. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en este estudio fue la del balance hídrico superficial, basado en la "Guía Metodológica para la Elaboración del Balance Hídrico de América del Sur", publicada por UNESCO-ROSTLAC (1982).

El balance hídrico se realizará para el período de 35 años de 1964/65 a 1998/99 y será anual. El año hidrológico se considera que empieza en el mes de Abril.

La ecuación de balance hídrico superficial para una cuenca se obtiene a partir de la aplicación del principio de conservación de masas, y se puede expresar de la siguiente forma:

$$\langle \bar{P} \rangle - \langle \bar{Q} \rangle = \langle \bar{E} \rangle + \Delta S + \eta \quad (1)$$

Con:

$\langle \bar{P} \rangle$ = Precipitación media del período y del área

$\langle \bar{Q} \rangle$ = Caudal medio del período y del área efluente neto de la cuenca

$\langle \bar{E} \rangle$ = Pérdidas medias del período y del área

ΔS = Variación del almacenamiento de agua en la cuenca

η = Término residual de discrepancia, error de medición o estimación

El símbolo $\langle \rangle$ indica promedio espacial y la barra (-) promedio temporal.

El término $\langle \bar{Q} \rangle$ incluye el flujo superficial como subterráneo. Sin embargo, con frecuencia el caudal subterráneo resulta insignificante con relación al superficial, de modo que en la mayoría de los casos los balances se determinan considerando solamente el caudal efluente superficial.

El término $\langle \bar{E} \rangle$ representa las cantidades totales de agua que salen del ciclo de escorrentía y retornan a la atmósfera o son consumidas. Desde el punto de vista de la disponibilidad de recursos hídricos, estos valores corresponden a "pérdidas". Ellas se pueden producir de la siguiente forma:

- Evaporación desde superficies de agua libre $\langle \bar{E} \rangle$, como lagos y embalses.

- Evaporación desde suelo húmedo desnudo $\langle \bar{E}_s \rangle$, en zonas con un nivel freático próximo a la superficie, como sucede en salares.

- Evapotranspiración real desde superficies naturales $\langle \bar{ETR}_n \rangle$, desde superficies con riego artificial, $\langle \bar{ETR} \rangle$, o en zonas con un nivel freático próximo a la superficie a través de plantas freatófitas $\langle \bar{ETR}_f \rangle$.

- Pérdidas netas por consumos directos derivados de la actividad humana, incluyendo los consumos domésticos, industriales y mineros, $\langle \bar{E}_c \rangle$.

En la gran mayoría de las cuencas las pérdidas se presentan comúnmente en forma de evapotranspiración desde superficies naturales, $\langle \bar{ETR}_n \rangle$, resultando despreciables el resto de los términos.

Para determinar la escorrentía superficial, a la estadística fluviométrica proveniente de diferentes estaciones en la cuenca, se le verifica la consistencia de sus registros mediante el método de las curvas doble acumuladas (CDA). Posteriormente, se procede a ampliar los datos cuando es necesario, hasta completar el período en estudio mediante correlación gráfica con otra estación que posea buenos registros, o con estadística de precipitaciones, o por el método de transposición de caudales (UNESCO-ROSTLAC, 1982).

Para obtener la precipitación promedio en el tiempo, se procede de manera similar al de la escorrentía superficial, es decir, a la estadística pluviométrica se le verifica su consistencia por el método de las CDA. Luego, se rellenan los datos de estaciones hasta completar el período en estudio mediante correlación gráfica con otra estación que tenga buenos registros o con un patrón de precipitaciones. Después, para evaluar la distribución espacial de la precipitación en la cuenca se utiliza el método de los polígonos de Thiessen, que trata de corregir la falta de uniformidad en la distribución de los pluviómetros (UNESCO-ROSTLAC, 1982).

Respecto a la evaporación, ésta no se debe despreciar cuando en la cuenca exista una superficie importante cubierta por agua, por ejemplo un lago o embalse. En ese caso, la evaporación se estima mediante la fórmula empírica de Langbein (1956).

Para realizar el balance hídrico de la cuenca completa, ésta se dividió en dos zonas: una zona cordillerana y una zona intermedia-baja. La zona cordillerana comprende las subcuencas cordilleranas y de la precordillera, las cuales quedan limitadas hacia aguas abajo por las áreas de riego. La zona intermedia y baja está comprendida hacia aguas arriba por la zona cordillerana y hacia aguas abajo por la desembocadura del río. Esta subdivisión se realizó debido a que las

características fisiográficas son diferentes y la cantidad de información hidrométrica en la zona cordillerana es más escasa.

3. LOCALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN GEOGRÁFICA

La hoya hidrográfica del Río Laja, de gran importancia hidroeléctrica, se ubica íntegramente en la VIII región, Chile, entre los 36° 54' y 37° 39' latitud Sur y entre los 71° 05' y 72° 43' de longitud Oeste, abarcando una superficie de 4600 km². Emplaza su cabecera en la Cordillera Andina, al Este del volcán Antuco y al Sur de los Nevados de Chillán, drena la Laguna del Laja y su río principal, luego de atravesar la depresión central, confluye en el río Biobío, próximo a la localidad de San Rosendo. Tiene un caudal medio en su desembocadura de 194,7 m³/s. Su altitud fluctúa entre 3585 m.s.n.m. en la cumbre de la Sierra Velluda y 40 m.s.n.m. en el sector de San Rosendo. En la Figura N° 1 se presenta la cuenca del Laja, y su ubicación dentro de la VIII Región, Chile.

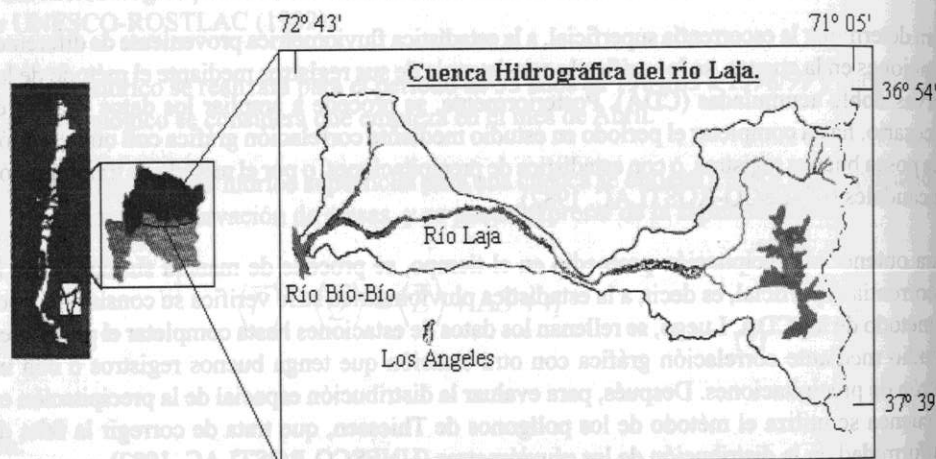


Figura N°1. Localización del área de estudio.

El principal cuerpo de agua de la cuenca es la Laguna del Laja, ubicada en la Cordillera de los Andes a 1.368 m.s.n.m., cerca del límite con la República Argentina. Tiene una longitud de 33 km, un ancho medio de 3 km, una profundidad media de 75 m con respecto a la cota 1.360 m.s.n.m. aproximadamente y una superficie de 100 km². Tiene la capacidad de almacenar un volumen útil de 5.587,1 x 10⁶ m³, lo que le da la característica de un embalse multianual, siendo un cuerpo regulador del potencial hídrico de la parte alta de la Cordillera de los Andes.

La subcuenca de la Laguna del Laja abarca una superficie de 975 km². La descarga del lago se realiza por la bocatoma de la Central Hidroeléctrica El Toro con un aporte medio anual de

39,6 m³/s, además de las filtraciones que posee el lago producto de la naturaleza volcánica del suelo con un aporte anual de 27 m³/s (Endesa, 1981)

El nacimiento del Río Laja se ubica en los Ojos del Laja, lugar donde se concentran las filtraciones, localizado 3 km al Oeste del lago.

Las aguas del Río Laja escurren en una dirección Este - Oeste, con una longitud total de 124,8 km. Recibe los aportes de ríos y esteros que drenan la parte alta de la cuenca. Por el norte, se encuentran los esteros Cipreses, Toro, Pichipolcura y el Río Polcura. Este último es su principal afluente, con una hoya de 922 km² aproximadamente. Por el lado Sur le tributan los esteros Trubunleo y Malalcura.

En la parte intermedia de la hoya, el Río Laja escurre a través de bancos de arena. En este sector, recibe las aguas de los ríos Manco y Rucúe. Continuando hacia el Este, el río cruza el Valle Central para entrar en contacto con la Cordillera de la Costa, lugar donde confluye con el Río Biobío, entre los pueblos de Laja y San Rosendo. Sólo 9 km antes de su desembocadura, recibe los aportes del Río Claro.

En la zona cordillerana de la cuenca, existe un clima frío de altura, sin meses secos. La precipitación media anual es superior a 2.000 mm, alcanzando a 4.000 mm en las cumbres más altas. En el Valle Central, se da un clima mediterráneo con 4 meses secos, y la precipitación media anual es de 1.300 mm. En el extremo occidental de la cuenca, producto del abrigo que ofrece la Cordillera de la Costa, se presenta el clima más seco de la hoya, y la precipitación media en esta zona es de 1.000 mm.

Respecto a la temperatura en la cuenca, ésta tiene una variación proporcional a la altitud, y en términos anuales la temperatura media es aproximadamente 11°C, variando desde 12,5°C en el valle longitudinal hasta alcanzar 6,9°C en la Laguna del Laja y 4°C en las partes más altas de la cuenca (IPLA, 1983).

La parte alta de la hoya hidrográfica del Río Laja está constituida por la Cordillera de los Andes, que se presenta con características de cordones montañosos con altitudes promedio de 2.000 m.s.n.m. Destacan algunas cimas tales como el volcán Antuco de 2.985 m.s.n.m., la Sierra Velluda de 3.585 m.s.n.m. y la Cordillera de Polcura, de menor altitud.

En la zona precordillerana cuya altitud fluctúa entre los 400 y 600 m.s.n.m, la topografía se encuentra caracterizada por la profunda penetración del valle del Río Laja en la Cordillera de los Andes. Este valle de origen glacial, alcanza un ancho superior a los 4 km.

La zona baja de la cuenca, manifiesta una topografía uniforme, con cerros de poca altitud y suaves pendientes. En el Oeste de la hoya, se alza la Cordillera de la Costa, con altitudes que no superan los 500 m.s.n.m., formando el límite occidental de la cuenca.

Respecto al aprovechamiento de la hoya del Río Laja, la cuenca está sometida a un uso múltiple de su territorio, siendo los principales usos: la generación de energía hidroeléctrica (complejo hidroeléctrico Laja: centrales Antuco, El Toro, Abanico y Rucúe) y el uso forestal y agrícola (riego).

El uso actual de los suelos de la cuenca del Río Laja se puede apreciar en la Tabla N°1, notándose que el bosque nativo, los terrenos agrícolas y las plantaciones forestales son los de mayor relevancia.

Tabla N°1. Uso actual del suelo en la cuenca del Río Laja.

Uso del suelo	Superficie (km ²)	Porcentaje (%)
Bosque mixto	16,2	0,35
Bosque nativo	1.032,6	22,44
Cuerpos de agua	182,0	3,96
Desprovistos de vegetación	230,7	5,01
Estepa andina	215,5	4,68
Humedales	29,5	0,64
Matorral	679,4	14,77
Matorral arboreo	188,6	4,10
Nieves	424,9	9,24
Plantas forestales	698,6	15,19
Praderas	117,1	2,55
Terreno agrícola	776,5	16,88
Urbano e industrial	8,9	0,19
Total	4.600,5	100,00

Fuente: Mardones (2000)

En cuanto al uso hidroeléctrico, la hoya del río Laja es una de las cuencas más importantes desde el punto de vista de la generación energética en Chile; tempranamente fue sometida a regulación hídrica, transformándose la Laguna del Laja en el elemento regulador del Sistema Interconectado Central.

Tres centrales utilizan este recurso hídrico (Abanico, Antuco y El Toro), en tanto que la recientemente construida Central Rucúe (central de paso) utiliza las aguas del río homónimo más parte importante de las aguas del Laja. Así, la potencia instalada en la cuenca del Laja es de 996 MW y la energía media anual generable es de 4997 GW. En la Tabla N°2 se muestran las diferencias y características de las centrales hidroeléctricas.

Tabla N°2. Centrales hidroeléctricas del Laja.

Nombre central	Propietario	Año puesta en servicio	Tipo central	Tipo turbina	N° Unidas	Gasto central (m ³ /s)	Altura de caída (m)	Potencia total (MW)
Abanico	Endesa	1948	Pasada	Francis	6	106,8	147	136
El Toro	Endesa	1973	Embalse	Pelton	4	97,3	545	400
Antuco	Endesa	1981	Pasada	Francis	2	190	190	300
Rucúe	Colbún S.A.	1998	Pasada	Francis	2	130	140	160

Fuente: CDEC-SIC (2000)

4. RESULTADOS

El balance hídrico, como se indicó anteriormente, abarca el período de 35 años de 1964/65 a 1998/99 y será anual. Como éste se realiza para un largo período de tiempo, se puede considerar que las variaciones de almacenamiento en la Laguna del Laja son despreciables, así como también la infiltración. Para realizar el balance hídrico de la cuenca del Río Laja, ésta se dividió en dos grandes subcuencas:

Zona cordillerana, que prácticamente no es influida por el riego y que corresponde a las subcuencas de los ríos Polcura, Pichipolcura, Rucúe y Manco.

Zona baja e intermedia, en las que existen algunos sectores con riego y que corresponde a las subcuencas de los ríos Caliboro y Claro.

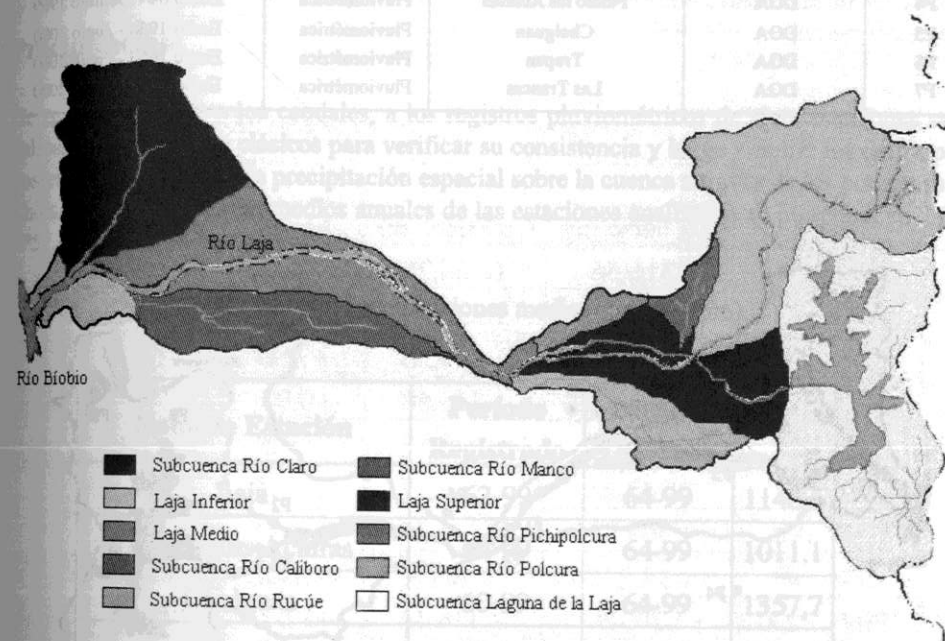


Figura N°2. Principales subcuencas que forman la cuenca del Río Laja.

5. INFORMACIÓN EXISTENTE

En la Figura N°3, se aprecia la ubicación geográfica de las estaciones fluviométricas y pluviométricas con que se cuenta para el estudio del balance hídrico de la cuenca del Río Laja. Éstas pertenecen a la Dirección General de Aguas (DGA) o a ENDESA. Sus principales características, junto a los años en los cuales se cuenta con datos históricos, se muestran en la Tabla N°3.

Además, se cuenta con las filtraciones de la Laguna del Laja, estadísticas de niveles de la Laguna del Laja (Julio 1990 - Mayo 2000), y las estadísticas de operaciones del sistema interconectado Central (SIC) desde 1990 hasta 1999.

Tabla N°3. Estaciones fluviométricas y pluviométricas.

SIMBOLO	CONTROLADA POR	ESTACION	TIPO	PERIODO
F1	DGA	Río Laja en Tucapel	Fluviométrica	Enero 16 - Marzo 94
F2	DGA	Canal Laja camino a Tucapel	Fluviométrica	Enero 33 - Abril 82
F3	DGA	Río Laja en el Salto	Fluviométrica	Enero 57 - Abril 77
F4	DGA	Río Laja en Curanilahue	Fluviométrica	Enero 14 - Agosto 31
F5	DGA	Río Laja en Longitudinal	Fluviométrica	Enero 93 - Marzo 94
F6	DGA	Río Laja en Puente Perales	Fluviométrica	Enero 57 - Diciembre 99
F7	DGA	Río Laja en La Cantera	Fluviométrica	Enero 93 - Marzo 94
F8	DGA	Río Laja en San Rosendo	Fluviométrica	Enero 71 - Septiembre 83
F9	ENDESA	Polcura en Valle 4 Juntas	Fluviométrica	Enero 79 - Marzo 2000
F10	ENDESA	C. alto Polcura A. L. Laja	Fluviométrica	Noviembre 77 - Marzo 2000
F11	ENDESA	C. Abanico Km. 0.49	Fluviométrica	Enero 79 - Agosto 2000
P1	DGA	Laja	Pluviométrica	Noviembre 61 - Julio 2000
P2	ENDESA	Polcura en Balseadero	Pluviométrica	Enero 79 - Abril 2000
P3	ENDESA	Central Abanico	Pluviométrica	Enero 79 - Abril 2000
P4	DGA	Fundo las Achiras	Pluviométrica	Enero 64 - Octubre 1999
P5	DGA	Cholguan	Pluviométrica	Enero 1956 - Junio 2000
P6	DGA	Trupan	Pluviométrica	Enero 1963 - Junio 2000
P7	DGA	Las Trancas	Pluviométrica	Enero 1961 - Junio 2000

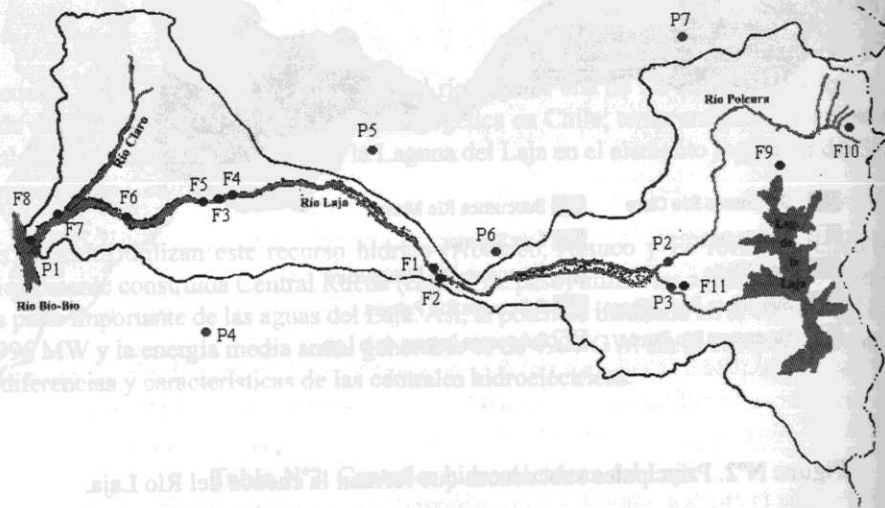


Figura N°3. Estaciones Fluviométricas y Pluviométricas.

6. ANÁLISIS DE LOS COMPONENTES

Escorrentía

La información utilizada en fluviometría proviene de los registros de siete estaciones. Una vez verificada la consistencia y tras la posterior ampliación de los registros fluviométricos para el período en estudio, se obtuvieron los caudales medios anuales (ver Tabla N°4), con lo cual se pudo determinar la escorrentía superficial en el punto de cierre, para las diferentes subcuencas.

Tabla N°4. Caudales medios anuales (m³/s).

Nombre Estación	Período Registrado	Período Utilizado	\bar{Q}
San Rosendo	71-83	64-99	196,7
Laja en Puente Perales	58-99	64-99	163,5
Laja en el Salto	64-76	64-99	145,4
Laja en Tucapel	58-76	64-99	140,9
Canal Abanico Km 0.49	79-99	64-99	36,1
Alto Polcura A. L. Laja	78-99	64-99	8,4
Polcura en Valle 4 Juntas	79-99	64-99	2,3

Precipitación

De manera análoga a los caudales, a los registros pluviométricos de siete estaciones se le aplicaron los métodos clásicos para verificar su consistencia y luego ampliar los datos, para posteriormente evaluar la precipitación espacial sobre la cuenca a través de los polígonos de Thiessen. Los valores promedios anuales de las estaciones analizadas se presentan en Tabla N°5.

Tabla N°5. Precipitaciones medias anuales (mm).

Nombre Estación	Período Registrado	Período Utilizado	\bar{P}
Laja	62-99	64-99	1140,5
Fundo Las Achiras	64-99	64-99	1011,1
Cholguán	60-99	64-99	1357,7
Trupán	63-99	64-99	1714,3
Central Abanico	79-99	64-99	1989,0
Polcura en Balseadero	79-99	64-99	2167,9
Las Trancas	61-99	64-99	2303,0

Evaporación y Evapotranspiración

En el caso de la cuenca del río Laja, al tener la Laguna del Laja una superficie relativamente importante, es necesario estimar la evaporación que se produce desde su superficie, ya que ésta influirá en su balance hídrico. Su estimación se efectuó mediante la fórmula empírica de Langbein (1956).

Respecto a la evapotranspiración, ésta se estimó como si la cuenca y subcuencas no presentaran superficies regadas, obteniéndose así solamente evapotranspiración real para superficies naturales. Se asumió esto debido a la falta de información relativa a los tipos de cultivos y superficies involucradas.

El resto de las pérdidas no fueron estimadas (despreciables), como por ejemplo las derivadas de la actividad humana.

Variación del almacenamiento de agua

De acuerdo a la trayectoria de cotas de la Laguna del Laja para el período comprendido entre los años 1990-2000, las variaciones del almacenamiento de agua en la Laguna del Laja ΔS (Tabla N°6) son despreciables frente a los otros términos involucrados en el balance. Más aún para el período de 35 años, se presume que esta variable es insignificante, por lo cual no fue considerada en el balance hídrico. Sin embargo, es conveniente notar lo que ocurre año tras año, por ejemplo para 1996/97 la laguna del Laja descendió casi 31,2 m, que equivalen a $3.120 \times 10^6 \text{ m}^3$ aproximadamente, correspondiendo a un déficit de 677,3 mm de agua para la cuenca del río Laja.

Tabla N° 6. Variaciones anuales de cota de Laguna del Laja.

Período	Cota inicio (m)	Cota final (m)	Δh (m)	ΔS (mm)
1991 - 92	1.316,56	1.328,75	+12,19	+265
1992 - 93	1.328,75	1.336,78	+8,03	+174,6
1993 - 94	1.336,78	1.344,58	+7,80	+169,6
1994 - 95	1.344,58	1.343,68	-0,90	-19,6
1995 - 96	1.343,68	1.340,53	-3,15	-68,5
1996 - 97	1.340,53	1.309,37	-31,16	-677,3
1997 - 98	1.309,37	1.325,22	+15,85	+344,5
1998 - 99	1.325,22	1.303,9	-21,32	-463,4
1999 - 2000	1.303,9	1.316,33	+12,43	+270,2
1991 - 2000	1316,56	1316,33	-0,23	-5

Resultados a nivel de cuenca y subcuencas

Los resultados del balance hídrico realizado a nivel de cuenca y subcuencas, se resumen en la Tabla N° 7. En dicha tabla se indica el tamaño del área sobre la cual se efectuó el balance, la precipitación media, la escorrentía en el punto de cierre, las pérdidas medias por evapotranspiración real de las superficies naturales, las pérdidas por evaporación desde el lago, y el término de discrepancia.

Considerando que la precipitación es la única entrada de agua al sistema (cuenca), ésta corresponde al 100% de ingreso del recurso, por lo cual las demás variables serán una fracción de éste. Es así, como en la Tabla N°8 se muestra el balance hídrico representando a un 100% la precipitación.

Tabla N°7. Balance hídrico total de la cuenca del río Laja y de subcuencas.

CUENCA	AREA (km ²)	PRECIPITACION		ESCORRENTIA		EVAPO-TRANSPIRACION REAL		EVAPORACION		DISCREPANCIA	
		(m ³ /s)	(mm/año)	(m ³ /s)	(mm/año)	(m ³ /s)	(mm/año)	(m ³ /s)	(mm/año)	(m ³ /s)	(mm/año)
Completa	4600,5	251,1	1721,1	196,7	1348,4	84,4	591,7	0,05	16,6	-30,1	-235,6
Zona alta	2798,8	184,6	2080	140,9	1587,6	48,1	541,9	0,09	27,3	-4,5	-76,8
Zona baja	1801,7	66,4	1163	55,8	976,7	35,1	614,5	-	-	-24,5	-28,2
Río Polcura	921,7	66,1	2262,4	35,7	1221,5	16,7	571,0	-	-	13,7	469,9
Río Pichipolcura	77,6	5,3	2167,9	2,9	1170,5	1,4	580,3	-	-	1,0	417,1
Río Manco	79,1	4,3	1714,3	2,3	917	1,5	579,8	-	-	0,5	217,5
Río Rucue	251,3	15,2	1909,1	8,1	1016,5	4,6	575,0	-	-	2,5	317,6
Río Caliboro	320,3	12,1	1192,7	8,9	876,3	6,4	634,4	-	-	-3,2	-318,0
Río Claro	1015,7	36,4	1128,9	26,7	829	20,6	640,8	-	-	-10,9	-340,9

Tabla N°8. Balance hídrico por cuencas, referido a porcentajes.

CUENCA	AREA (km ²)	PRECIPITACION (%)		ESCORRENTIA (%)		EVAPO-TRANSPIRACION REAL (%)		EVAPORACION (%)		DISCREPANCIA (%)	
		(l/s/km ²)	(l/s/km ²)	(l/s/km ²)	(l/s/km ²)	(l/s/km ²)	(l/s/km ²)	(l/s/km ²)	(l/s/km ²)	(l/s/km ²)	(l/s/km ²)
Completa	4600,5	100	54,6	78,3	42,8	34,3	18,3	0,96	0,01	-6,5	-13,7
Zona alta	2798,8	100	66,0	76,3	50,3	26,1	17,2	1,3	0,03	-1,6	-3,7
Zona baja	1801,7	100	36,9	84,0	31,0	52,8	19,5	-	-	-13,6	-36,8
Río Polcura	921,7	100	71,7	54,0	38,7	25,2	18,1	-	-	14,9	20,8
Río Pichipolcura	77,6	100	68,3	54,0	37,4	26,8	18,0	-	-	12,9	19,2
Río Manco	79,1	100	54,4	53,5	29,1	33,8	19,0	-	-	6,3	12,7
Río Rucue	251,3	15,2	1909,1	8,1	1016,5	4,6	575,0	-	-	2,5	317,6
Río Caliboro	320,3	12,1	1192,7	8,9	876,3	6,4	634,4	-	-	-3,2	-318,0
Río Claro	1015,7	36,4	1128,9	26,7	829	20,6	640,8	-	-	-10,9	-340,9

7. CONCLUSIONES

De los antecedentes de precipitación presentados, se observa que:

La zona alta de la cuenca presenta una precipitación anual media mayor en un 56%, que la precipitación de la zona baja.

La cuenca de mayor precipitación media anual es la del Polcura, que es mayor en un 50% que la cuenca de menor precipitación anual, que es la del río Claro.

De los antecedentes de caudales específicos presentados, se observa que:

La zona alta de la cuenca presenta un caudal específico mayor en un 62%, que el caudal específico de la zona baja.

La cuenca de mayor caudal específico es Polcura, que es un 68% mayor que la cuenca del Claro que es la de menor precipitación anual.

De los resultados del balance hídrico, se concluye que:

Al comparar la oferta de agua proveniente de la precipitación con la demanda del recurso (escurrimiento superficial más evapotranspiración), se observa que existe un déficit de agua para la cuenca total del río Laja de 235,6 mm al año. Este déficit disminuye al considerar sólo la parte alta de la cuenca a 76,8 mm anuales, es decir, a casi $215 \times 10^6 \text{ m}^3$ al año. En cambio, al referirse a la cuenca baja del Laja (Tucapel hasta San Rosendo), la falta de agua se incrementa notoriamente a 428,2 mm al año, lo que implica un déficit de $771 \times 10^6 \text{ m}^3$ anuales. Respecto de los resultados del balance hídrico referido a subcuencas, las que se encuentran en la zona alta no presentan déficit de agua, al contrario, acá la oferta del recurso hídrico supera con creces a la demanda. Por ejemplo, para la subcuenca del río Polcura se tiene un exceso de 469,9 mm anuales, que equivale a $433 \times 10^6 \text{ m}^3$ al año. Sin embargo, para las subcuencas ubicadas en la zona baja, el déficit aumenta considerablemente. Es así como en la subcuenca del río Claro éste asciende a 340,9 mm anuales, es decir, a $346 \times 10^6 \text{ m}^3$ al año.

Los resultados anteriores pueden explicarse de la siguiente forma: a pesar de que la zona alta es fuertemente influida por el uso hidroeléctrico, éste es no consuntivo por lo cual no afecta de manera global al sistema. Además, a mayor altitud las precipitaciones aumentan y el rendimiento de caudales por unidad de área también, y las pérdidas por evapotranspiración son menores, lo que originan un mejor aprovechamiento del agua. En cambio a medida que se va perdiendo altitud, aparecen otros usos como los de riego artificial a través de canales, que son consuntivos, y la entrada de agua al sistema en forma de precipitación también disminuye, además las pérdidas por evapotranspiración aumentan debido al mayor cultivo y al incremento de temperaturas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a FONDECYT, ya que a través del Proyecto N° 1000526 se obtuvo el financiamiento para efectuar la investigación en que se inserta este trabajo.

REFERENCIAS

Dirección General de Aguas. 1987. Balance Hidrológico de Chile. Ministerio de Obras Públicas. Chile.

ENDESA. 1981. Central Hidroeléctrica Antuco. Chile

Instituto Geográfico Militar. 2000. Atlas Geográfico de Chile. Chile.

IPLA, Ingenieros Consultores. 1983. Balance Hidrológico Nacional: Regiones VIII, IX y X.

UNESCO - ROSTLAC. 1982. Guía Metodológica para la Elaboración del Balance Hídrico de América del Sur. Uruguay.

Considerando que la precipitación es la única entrada de agua al sistema (escurrimiento superficial más evapotranspiración), se indica el tamaño del área sobre la cual se efectuó el balance hídrico. Es así, como en la Tabla N° 8 se muestra el balance hídrico de la cuenca del río Laja, considerando la precipitación:

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

VALIDACIÓN DEL MODELO WASP5 AL ANÁLISIS DEL ESTADO ECOLÓGICO DEL LAGO LANALHUE, VIII REGIÓN

RODRIGO ROJAS MUJICA¹
CARLOS SALAZAR MÉNDEZ²

CALIDAD DE AMBIENTES ACUÁTICOS

La aplicación del modelo de simulación de calidad de aguas WASP, que permite de un cuerpo de agua con el fin de predecir respuestas a diferentes acciones de origen natural que pudiesen alterar la calidad de sus aguas. La aplicación se realizó de dos escenarios, uno de los cuales representa la situación actual en términos de información y de las características de la cuenca, y el otro, representa la situación de ciertos parámetros, incluyendo cambios en el uso del patrón de suelo y la aplicación de cargas contaminantes puntuales al sistema lacustre. La aplicación se realizó en las estaciones representativas (período 1996-1997) para obtener información en la columna vertical de agua para un número de cuatro estaciones. Como resultado, se determina una condición oligotrófica con tendencia a la eutrofia en las estaciones Playa Blanca, Hostería y Puerto Peleco. Por otro lado, el Estero Manzano es el más comprometido en el avance de la eutrofización, presentando una condición mesotrófica con tendencia hacia la eutrofia. Por otro lado, de la comparación es posible establecer que debido a un aumento de la geomorfología superficial y a la incorporación de cargas contaminantes puntuales, aquellos comprometidos en el avance de los procesos de la eutrofización en el marco del escenario, aceleran los síntomas de este fenómeno en el contexto del escenario alterado.

¹Geografía, Dirección General de Aguas.
²Dirección General de Aguas.
³Departamento de Ingeniería Geográfica, Universidad de Santiago de Chile.