



**MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS**

**Metodología de otorgamiento de derechos de
aprovechamiento de aguas superficiales en cauces
afluentes a lagos de gran envergadura.**

INFORME TECNICO

DARH

SDT N° 384

Santiago, Julio de 2016

Equipo de trabajo

Miguel Angel Caro H.

Luis Alberto Moreno R.

Carlos Flores F.



ÍNDICE

1	Introducción.....	1
2	Antecedentes	2
3	Errores en la medida de caudal y de nivel	3
3.1	Error asociado a la medición de caudal	3
3.1.1	Determinación del caudal a través de un aforo	4
3.1.2	Error asociado a la determinación del caudal aforado	8
3.2	Error asociado a la medición de nivel	13
3.2.1	Error Instrumental	13
3.2.2	Oleaje	13
4	Efectos de la incertidumbre en caudales y niveles sobre el lago	18
4.1	Efectos de la incertidumbre en la estimación del caudal.....	20
4.2	Efectos de la incertidumbre en la estimación del nivel.	21
5	Propuesta Metodológica.....	23
5.1	Consideraciones	23
5.2	Metodología	24
6	Aplicación práctica	25
7	Conclusiones	30

1 Introducción

Varios de los grandes lagos de nuestro país presentan una situación dicotómica peculiar. Por una parte los caudales de salida están otorgados completamente a derechos consuntivos y en especial a no consuntivos, esto último debido al gran potencial hidroeléctrico que presenta la zona en donde se emplazan estas grandes masas de agua. Y por otra parte existe una creciente demanda de derechos aún no satisfecha en cuencas afluentes a estos mismos lagos. ¿Es posible tener algún margen que permita otorgar derechos en estas cuencas afluentes a lagos sin que exista afección a terceros?

El presente documento técnico muestra que existe incertidumbre en la determinación de los caudales de salida de lagos, que son objeto de derechos, aguas abajo, y que además existe incertidumbre en la medida del nivel del lago, nivel que permite estimar el volumen embalsado en él. Por tanto es posible otorgar cierta cantidad de volumen de agua anual con cargo a la incertidumbre en la medición del caudal de salida y del nivel del lago, que resuelva parte de la demanda insatisfecha y que no produzca afección a terceros.

Lo anterior está basado en que teóricamente no es posible determinar mediante mediciones los valores verdaderos de los elementos hidrológicos, ya que no es posible eliminar completamente los errores de medición.

La incertidumbre en las medidas se aborda considerando para ello, los procedimientos de medición habituales de la Dirección General de Aguas (DGA) en la medición de caudales y niveles, para luego determinar una metodología basada en la imperceptibilidad visual de los efectos de la disminución del volumen de agua afluente al lago, que asegure que el caudal posible de otorgar no produzca efectos ambientales ni menoscabo en los derechos de terceros. Finalmente se aplicará la metodología a cuatro casos de estudio: Lagos Villarrica, Rupanco, Llanquihue y General Carrera.

2 Antecedentes

Los siguientes antecedentes estuvieron disponibles para el análisis:

- REF 1. DGA/DH-1978, Normas Hidrométricas Tomo I
- REF 2. DGA/DH-1978, Normas Hidrométricas Tomo II
- REF 3. Ven Te Chow-1994, Hidrología Aplicada.
- REF 4. OMM-Nº168-2011, Guía de prácticas hidrológicas, Volumen I Hidrología-De la medición a la información hidrológica.

3 Errores en la medida de caudal y de nivel

La incertidumbre de las mediciones tiene un carácter probabilístico, que puede definirse como el intervalo en que se espera que esté situado el valor verdadero con cierta probabilidad o nivel de confianza. El ancho del intervalo de confianza se denomina también franja de error.

Si las mediciones son independientes entre sí, es posible obtener una estimación de la incertidumbre de los resultados de las mediciones efectuando un mínimo de 20 a 25 observaciones y calculando la desviación típica resultante, para luego determinar el nivel de confianza de los resultados.

La independencia rara vez se da en mediciones hidrológicas, por tanto, las observaciones, no son en general variables aleatorias independientes de una distribución estadística determinada. El caudal de una escorrentía superficial, es por naturaleza, de carácter imperfectamente aleatorio. Depende de los valores precedentes.

Sólo los errores aleatorios pueden ser caracterizados por medios estadísticos. Los errores espurios y sistemáticos no pueden ser eliminados por medio de éste tipo de análisis.

A continuación se presenta la estimación del error que se tiene en la determinación del caudal de salida de un lago, el cual es aforado con carro de aforo, y el error estimado para la determinación del nivel de la superficie del espejo de agua de lagos de gran envergadura.

3.1 Error asociado a la medición de caudal

El valor del caudal instantáneo de una sección dada de un cauce, se obtiene midiendo la altura limnimétrica en ése instante, con respecto a un punto arbitrario de referencia, o respecto al nivel del mar, y determinando su equivalencia en caudal a través de una función altura-caudal denominada curva de descarga.

Las curvas de descarga se construyen considerando varios puntos (altura, caudal) obtenidos realizando aforos sistemáticos. Si los lechos de los cauces, en el lugar donde

se realiza el aforo, no son estables, las curvas de descarga tendrán variaciones en el tiempo.

3.1.1 Determinación del caudal a través de un aforo

Las profundidades del río en la sección de aforo, para los cuatro casos de salidas de lagos en estudio, superan el metro de altura. Por tanto es necesario utilizar carros de aforo para el proceso de la determinación del caudal, determinación de las longitudes de la vertical y las velocidades de flujo a distintas profundidades.

El caudal de un río a través de una sección, está determinado por la suma discreta de caudales parciales q_i , correspondientes a cada franja vertical que compone el área de la sección.

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i$$

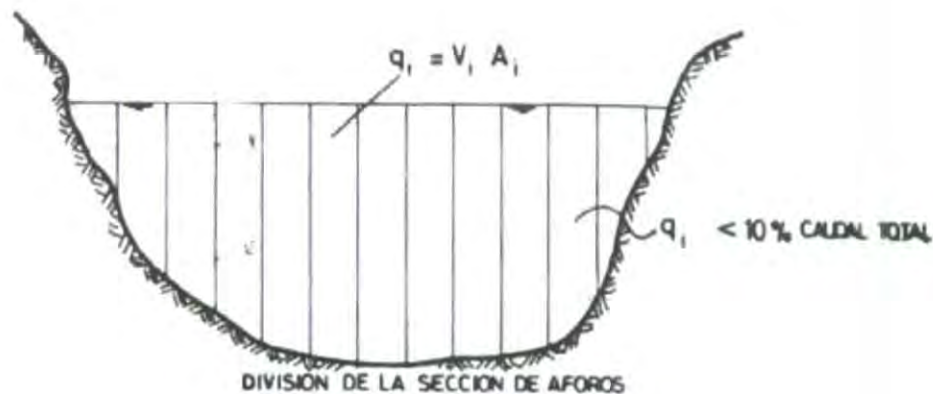


Figura 3-1 Sección de aforo dividida en franjas verticales

Dónde:

q_i : Caudal atravesado por el flujo en la franja de área A_i ,

Q : Caudal total de la sección del río.

El caudal de cada franja vertical corresponde al producto del área de cada franja por su velocidad media, es decir:

$$q_i = v_i \cdot A_i$$

Dónde:

v_i : Velocidad promedio del flujo en la franja vertical.

3.1.1.1 Área franja vertical

El área de cada franja se determina multiplicando el ancho de la sección parcial por la longitud de la vertical correspondiente. Por su parte el ancho de la sección parcial corresponde a la suma de la mitad del ancho entre franjas adyacentes.

$$A_i = w \cdot d_i$$

$$w_i = \frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{2}$$

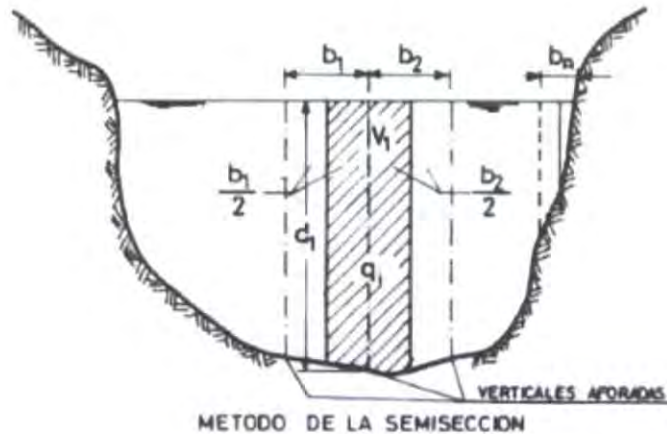


Figura 3-2 Área de una franja

Dónde:

w_i : Ancho de la sección de la franja de flujo.

d_i : Longitud de la vertical (profundidad).

$\frac{b_1}{2}$: Semi-longitud del ancho de la franja izquierda.

$\frac{b_2}{2}$: Semi-longitud del ancho de la franja derecha.

La longitud de la vertical en cada punto elegido de la línea de aforo corresponde a la distancia corregida d_i :

$$d_i = (H_m + L) \cdot \frac{\sin \alpha}{\alpha} - L \cdot \left(\frac{\tan \alpha}{\alpha} + 1 \right)$$

Donde H_m es la longitud total del cable desenrollado desde el torno, L es la altura entre la superficie del agua y el torno y α es el ángulo, medido en radianes, que forma la vertical con el cable.

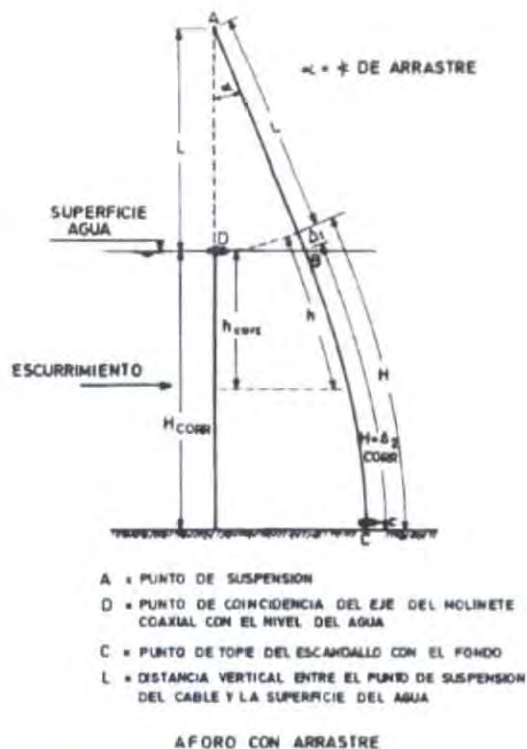


Figura 3-3 Correcciones en aforo con arrastre para obtener la longitud de la vertical

3.1.1.2 Velocidad

La distribución de velocidad del flujo en una sección no es uniforme. En los bordes de la sección es nula, en el centro cercano a la superficie (aproximadamente) es máxima y en la superficie es en general menor a la velocidad bajo ella.

Para determinar la velocidad media de una franja de la sección de aforo, se toman varias medidas de velocidad del flujo en la vertical. El número de medidas depende de la profundidad o longitud de la vertical. Si la profundidad es superior a 3 metros se toman cinco medidas (en la superficie, a 0.2, 0.6, 0.8 de la profundidad, y en el fondo), si la profundidad esta entre 1.5 m y 3 m se toman tres medidas de velocidad (0.2, 0.6 y 0.8 de la profundidad), si está entre 0.5 y 1.5 se toman dos puntos (0.2 y 0.8 de la profundidad), si la profundidad es inferior a 0.5 metros entonces se toma una medida a 0.6 de la profundidad. Todas las medidas están referidas a la superficie del espejo de agua.

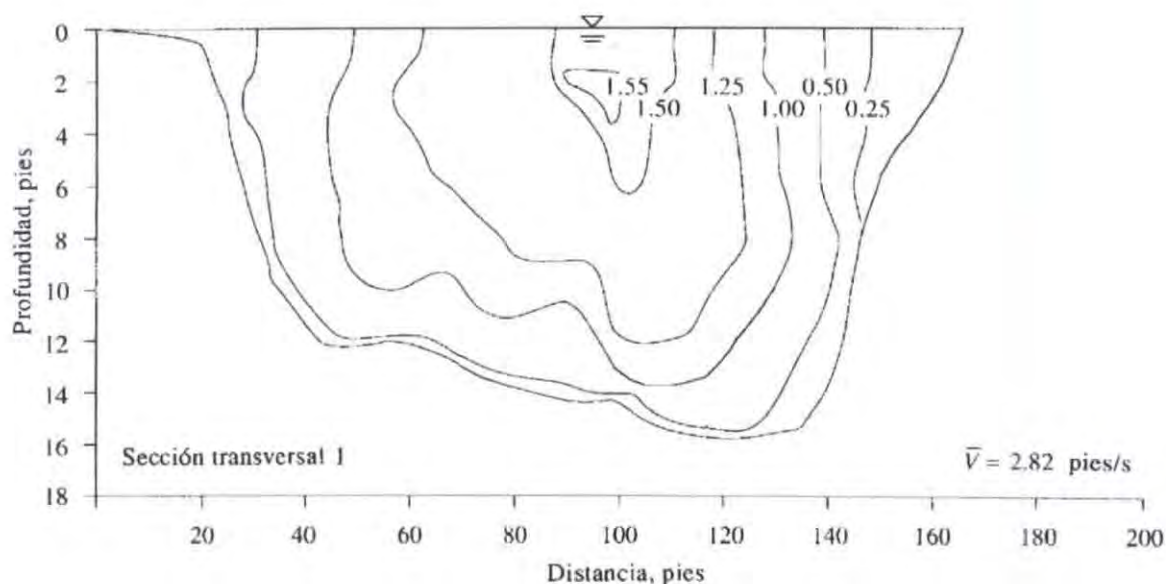


Figura 3-4 Distribución de velocidades en una sección de aforo (figura 6.3.5 Hidrología Aplicada, Ven Te Chow)

La determinación de la velocidad media a distintas profundidades se muestra en las siguientes ecuaciones:

- Profundidad superior a 3 metros ($d_i > 3 \text{ m.}$)

$$v_{mi} = \frac{v_s + 3 \cdot v_{0.2} + 2 \cdot v_{0.6} + 3 \cdot v_{0.8} + v_f}{10}$$

- Profundidad entre 1,5 y 3 metros ($1,5 \text{ m.} \leq d_i < 3 \text{ m.}$)

$$v_{mi} = \frac{v_{0.2} + v_{0.6} + v_{0.8}}{3}$$

- Profundidad entre 0,5 y 1,5 metros ($0,5 \text{ m.} \leq d_i < 1,5 \text{ m.}$)

$$v_{mi} = \frac{v_{0.2} + v_{0.8}}{2}$$

- Profundidad menor a 0,5 metros ($d_i < 0,5 \text{ m.}$)

$$v_{mi} = v_{0.6}$$

Dónde:

v_{mi} : Velocidad media en la sección vertical A_i .

v_s : Velocidad del flujo en la superficie.

$v_{0.2}$: Velocidad del flujo a una profundidad equivalente al 20% de la longitud de la vertical.

$v_{0.6}$: Velocidad del flujo a una profundidad equivalente al 60% de la longitud de la vertical.

$v_{0.8}$: Velocidad del flujo a una profundidad equivalente al 80% de la longitud de la vertical.

v_f : Velocidad del flujo en el fondo.

3.1.2 Error asociado a la determinación del caudal aforado

Los aforos han de realizarse lo más rápido posible, de manera que no varíe notoriamente el caudal pasante en la sección. Por tanto las variables involucradas solo se miden una

vez. Se sigue entonces que para cada una de las variables, el error a considerar es el error asociado a la escala o el determinado por el fabricante del instrumento.

3.1.2.1 Longitud de la vertical

Ángulo de arrastre

El ángulo de arrastre se mide con transportador, cuya mínima medida es 1 grado sexagesimal por tanto el error asociado a la medida del ángulo será:

$$\Delta\alpha = 0.00872665 \text{ rad}$$

Longitud L y H_m

El torno del carro de aforo tiene como mínima medida 1 cm para el largo del cable de arrastre, por tanto:

$$\Delta L = 0,005 \text{ m}$$

$$\Delta H_m = 0,005 \text{ m}$$

Error en la vertical

El error asociado al cálculo de la longitud de la vertical viene dado por:

$$\Delta d_i = \left| \frac{\partial d_i}{\partial H_m} \right| \cdot \Delta H_m + \left| \frac{\partial d_i}{\partial L} \right| \cdot \Delta L + \left| \frac{\partial d_i}{\partial \alpha} \right| \cdot \Delta \alpha$$

Es decir:

$$\Delta d_i = \left| \frac{\sin \alpha}{\alpha} \right| \cdot \Delta H_m + \left| \frac{\sin \alpha}{\alpha} - \frac{\tan \alpha}{\alpha} - 1 \right| \cdot \Delta L + \left| H_m \cdot \left(\frac{\alpha \cdot \cos \alpha - \sin \alpha}{\alpha^2} \right) - L \cdot \left(\frac{\alpha - \sin \alpha \cdot \cos \alpha}{\alpha^2 \cdot \cos^2 \alpha} \right) \right| \cdot \Delta \alpha$$

Considerando un aforo realizado en el río Baker a la salida del Lago Bertrand, para la profundidad máxima se tiene $H_m = 12,86 \text{ m}$ y $L = 5 \text{ m}$ y si $\alpha = 15^\circ$, entonces $\Delta d_i = 0,37\%$ es decir un error relativo menor al 1%.

Si aumentamos el ángulo a 30° se tiene que $\Delta d_i = 0,75\%$ que corresponde a una diferencia de 5 cm en el cálculo de la longitud de la vertical.

3.1.2.2 Ancho

El ancho w se mide a partir del ancho entre franjas, éstas últimas se miden considerando las marcas en el cable que sostiene el carro de aforo, marcas que en general están espaciadas cada un metro. Podemos asociar un error en la medida de la horizontal del orden de 1 cm.

$$\Delta b = 0,01 \text{ m}$$

El ancho w considerado en el área de la franja, está compuesto por la suma las mitades de los espaciamientos entre verticales adyacentes, por tanto:

$$\Delta w = \Delta b$$

$$\Delta w = 0.01 \text{ m}$$

3.1.2.3 Área de cada franja A_i

El área de la franja está dada por $A_i = w_i \cdot d_i$, por tanto el error relativo de cada área A_i es:

$$\frac{\Delta A_i}{|A_i|} = \frac{0,01 \text{ m}}{|w_i|} + 0.01$$

Para el aforo del río Baker en desagüe de Lago Bertrand más del 82% de los anchos de franjas corresponden a 5 metros siendo el mínimo 4,5 y máximo 7 metros. De esta forma el error relativo en la determinación del área de cada franja es:

$$\frac{\Delta A_i}{|A_i|} = 0.003$$

3.1.2.4 Velocidad

El molinete utilizado en la medición de caudales de salida de los lagos en estudio es el Price Gurley tipo AA el cual tiene un 2% de precisión, según especificaciones técnicas del fabricante, por tanto:

$$\frac{\Delta v}{v} = 0.02$$

Dado que en el caso de Río Baker en desagüe Lago Bertrand en más del 82% de las verticales se tomaron cinco medidas de velocidad, el error asociado a la estimación de la velocidad media de la franja es:

$$\Delta v_{mi} = \frac{\Delta v_s + 3 \cdot \Delta v_{0,2} + 2 \cdot \Delta v_{0,6} + 3 \cdot \Delta v_{0,8} + \Delta v_f}{10}$$

$$\Delta v_{mi} = 0,002 \cdot v_s + 0,006 \cdot v_{0,2} + 0,004 \cdot v_{0,6} + 0,006 \cdot v_{0,8} + 0,002 \cdot v_f$$

Considerando el perfil de velocidades medidas en las 17 verticales del aforo del río Baker en desagüe Lago Bertrand se tiene que el error asociado a la velocidad está entre 0,02 m/s a 0,05 m/s, resultando un error relativo de entre un 1,9% a 2,1%.

3.1.2.5 Caudal

El error en el cálculo del caudal que aporta cada franja, considerando el error relativo de la velocidad como 2%, está dado por

$$\Delta q_i = \frac{\Delta v_i}{|v_i|} + \frac{\Delta A_i}{|A_i|}$$

$$\Delta q_i = 0.023$$

Considerando independencia y aleatoriedad se tiene que el error asociado al caudal final Q es:

$$\frac{\Delta Q}{Q} = 0.023 \cdot \sqrt{n}$$

En donde n es el número de franjas o número de verticales de la sección de aforo.

Entonces:

$$\frac{\Delta Q}{Q} = 0.023 \cdot \sqrt{17}$$

$$\frac{\Delta Q}{Q} = 9,5\%$$

Para el caso del aforo considerado en el río Baker en desembocadura $Q = 803 \text{ m}^3/\text{s}$ resultando $\Delta Q = 76 \text{ m}^3/\text{s}$, esto quiere decir que el valor verdadero Q_v del aforo está comprendido entre 727 y 879 m^3/s ($727 < Q_v < 879 \text{ m}^3/\text{s}$).

En consecuencia, se deduce que el error asociado al aforo realizado con carro de aforo, alcanzó un valor cercano al 10%.

3.2 Error asociado a la medición de nivel

3.2.1 Error Instrumental

Históricamente la medición de niveles de la superficie de lagos se ha realizado instalando en los puntos de medición un conjunto de reglas graduadas, cuyo registro se realiza a través de un observador. Algunas de estas reglas tienen como mínima graduación 1 cm. Por su parte también es posible automatizar la toma de datos considerando la instalación de sensores de presión o ultrasónicos. La precisión para los sensores de presión corresponden en general al 0,5% de la escala, que para el caso de lagos puede variar entre 2 a 10 metros, por tanto la precisión será de entre 1 a 5 cm. Análogamente para un sensor ultrasónico su precisión estándar alcanza también a 1 cm.

3.2.2 Oleaje

El oleaje en la superficie de lagos presenta un problema para la medida del nivel medio del espejo de agua. Como nivel medio entenderemos aquel nivel que tomaría la superficie del lago en ausencia de olas (superficie plana) para un instante dado.

Las olas en lagos son formadas preferentemente por los vientos que producen fricción sobre la superficie del espejo de agua. Las fuerzas de corte levantan parte de la masa de agua formando un pulso mecánico que se convierte en una ola con una amplitud y periodo determinado, la cual se propaga disipando su energía en este proceso.

La superficie del lago la conforma la resultante de los efectos combinados de un sinnúmero de ondas, quedando de manifiesto que ésta superficie no es plana. De manera que es muy complejo asociar una determinada altura para una superficie dada del lago.

Si consideramos una sola medida de nivel en un tiempo determinado, es posible que esa medida pudiese representar el valle, la cresta o un lugar entre estos dos extremos del nivel de la ola, alejándonos del valor que representa la altura de la masa total de agua para ese instante.

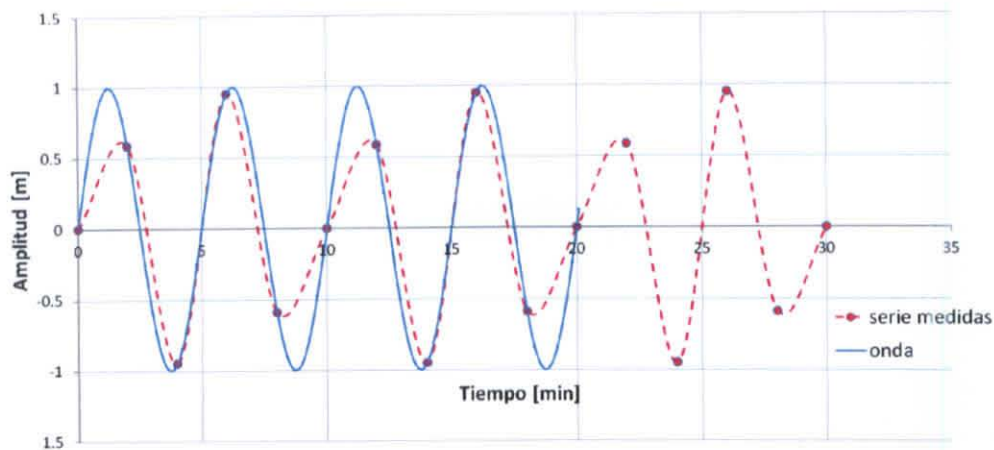


Figura 3-5 Las marcas muestran la medida de nivel espaciadas cada dos minutos

La Figura 3-5 representa un tren de ondas de periodo 5 minutos y amplitud de 1 metro. Si se toman en un lapso determinado cierta cantidad de medidas (por ejemplo cada 2 minutos), tomando el promedio de las medidas este representará aproximadamente el nivel medio de la masa de agua. En el caso ideal, si tuviéramos una sola onda (como la mostrada en la Figura 3-5), el nivel medio representaría el equilibrio perfecto, tal si no estuviera presente el tren de ondas.

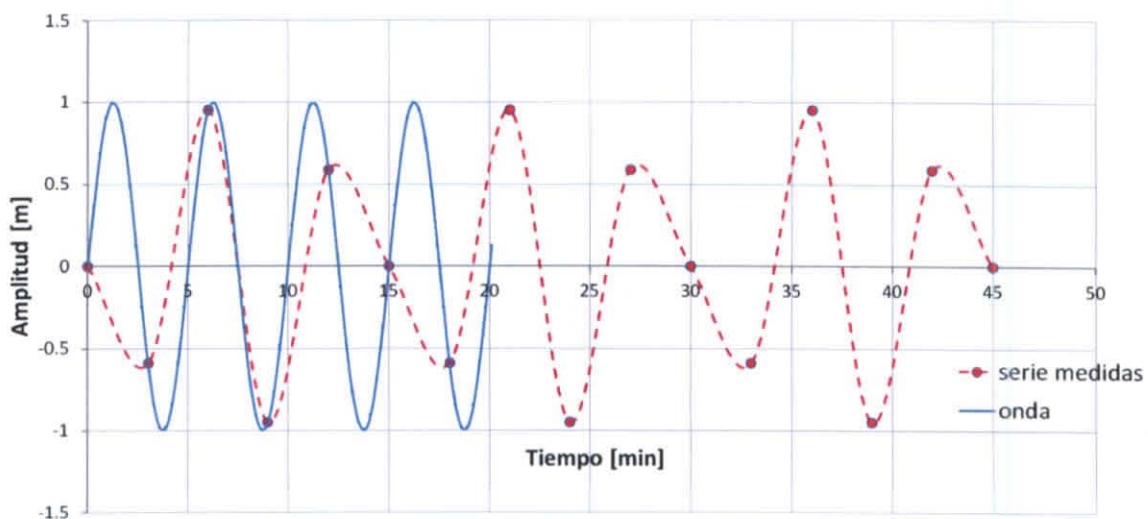


Figura 3-6 Las marcas muestran la medida de nivel espaciadas cada tres minutos

Sin embargo, si las medidas realizadas representan los valores instantáneos tomados cada cierto intervalo, por ejemplo cada dos minutos como se muestra en la Figura 3-5, entonces los datos de nivel no representarán adecuadamente la forma original de la onda, introduciendo un error con ello.

La Figura 3-6 muestra la forma de onda que se obtendría con los datos tomados cada tres minutos. De esta situación es posible concluir entonces que existe un error en la medida del nivel asociado al intervalo de tiempo elegido para capturar una medida. Una forma de estimar este error es comparar las medidas a distintos periodos con las que se obtendrían en fracciones de segundo. La diferencia de longitudes respecto de la altura de la ola será el error relativo buscado, luego como diferencia representativa en el periodo, se puede tomar el promedio de los valores absolutos de dichas diferencias. La sensibilidad del sensor de presión para actuar en fracciones de segundo es lo que restringe el análisis, sin embargo, podemos considerar un valor conservador para este error equivalente a un quinto de la altura de la ola, es decir, se tomará como error relativo un 20% de la altura de la ola.

Este error tiende a disminuir tomando las medidas de nivel a intervalos cortos de tiempo.

Para estimar la magnitud de éste error, y de esta forma asociar una variación de longitud, debemos estimar una altura de "ola tipo". Como "ola tipo" entenderemos aquella ola que se presenta en la superficie la mayor parte del tiempo en condiciones normales. Mientras menor sea el intervalo de medición utilizado, menor será el error en la determinación de la amplitud de la ola tipo.

No tenemos medidas de nivel con intervalos de tiempo menores a una hora para determinar la magnitud de las oscilaciones y definir la amplitud de una ola representativa. Sin embargo, podemos asumir que el comportamiento de las oscilaciones de la superficie del mar, en condiciones normales, es similar al comportamiento de la superficie del espejo de agua de un lago.

El sensor de nivel del mar ubicado frente a la Isla de Juan Fernández presenta valores del nivel del mar cada un minuto. Utilizaremos estas medidas para analizar el comportamiento de las oscilaciones de la superficie.

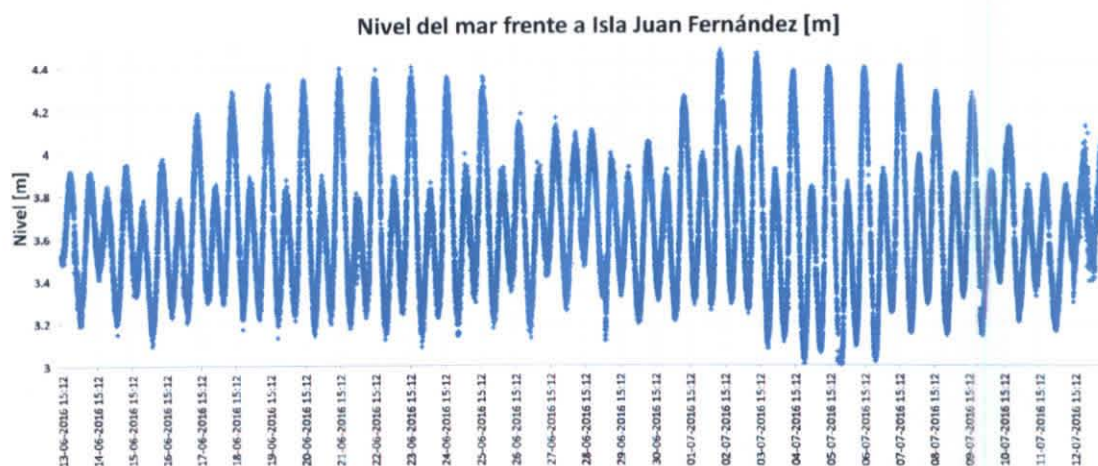


Figura 3-7 Nivel del mar, 30 días, frente a la Isla Juan Fernández, datos cada 1 minuto

La Figura 3-7 muestra el nivel del mar frente a la Isla Juan Fernández. Se han representado 30 días de datos tomados cada un minuto. Es posible notar el ciclo de mareas altas y bajas y “el ruido” u oscilación de menor amplitud sobre cada ciclo.

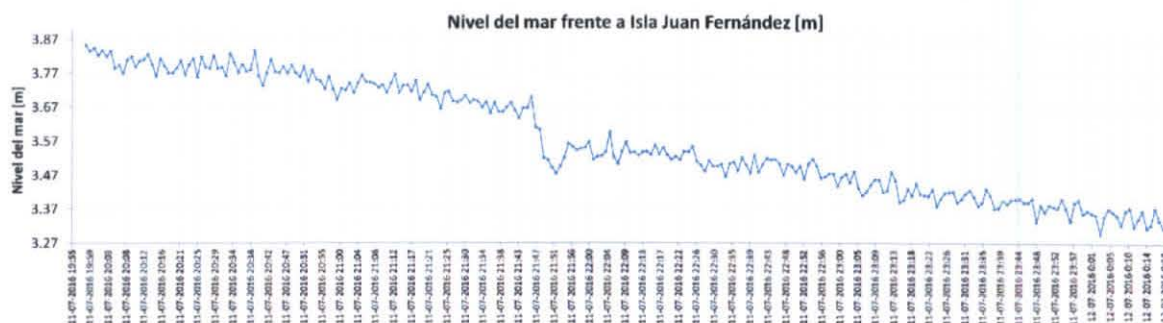


Figura 3-8 Nivel del mar frente a Isla Juan Fernández medidas cada un minuto

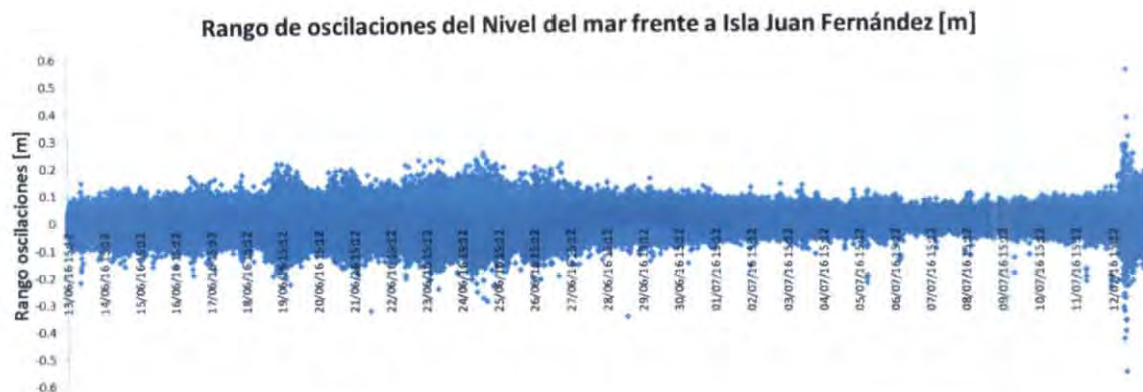


Figura 3-9 Rango de oscilaciones del nivel del mar frente a la Isla Juan Fernández

La Figura 3-8 presenta un detalle del nivel del mar frente a la Isla Juan Fernández, en él se aprecian alturas de ola que oscilan entre 1 y más de 20 centímetros. Por su parte la Figura 3-9 muestra el rango de alturas de olas frente a la Isla Juan Fernández con datos cada minuto para un periodo de 30 días. La altura promedio oscila en alrededor de 10 cm, es decir la ola promedio tiene una amplitud de 5 cm.

Por lo tanto, la magnitud del error asociado a la amplitud de la ola y al intervalo de tiempo entre medidas de nivel es de alrededor de 2 cm. (20% de la altura de la ola tipo). De aquí se infiere que el error asociado a la medida de nivel, considerando error instrumental, altura de olas y periodo de medición se estima entre 3 y 7 cm.

Si utilizamos como hipótesis que la superficie de un lago de gran envergadura, en condiciones normales de viento, se comporta como la superficie del mar frente a la Isla Juan Fernández, también en condiciones normales de viento, entonces el error asociado a la medición de nivel en lagos de gran envergadura oscilará entre 3 a 7 cm dependiendo de la escala del instrumento a utilizar, 3 cm. para un sensor de columna de agua máxima de 2 metros y 7 cm. para un sensor de columna de agua máxima de 10 m.

El valor verdadero de la medida de nivel L_v , dependiendo de la sensibilidad del sensor de presión a utilizar, estará entre $L_m - 3$ y $L_m + 3$, [cm] o $L_m - 7$ y $L_m + 7$ [cm], donde: L_m es el valor de nivel medido por el sensor.

4 Efectos de la incertidumbre en caudales y niveles sobre el lago

Se ha determinado el error asociado al aforo del caudal de salida de un lago y el error de la medición del nivel del espejo de agua del mismo. Veremos ahora como podemos relacionar estos datos en la formulación de una metodología que permita otorgar derechos superficiales adicionales, en cuencas afluentes a lagos de gran envergadura.

Debemos considerar como enfoque básico, la no afección de derechos de terceros, ubicados aguas abajo de la salida de cada lago, y evitar posibles daños ambientales. Por tanto, los usuarios ubicados aguas abajo de la salida de cada lago deberán tener la posibilidad de seguir extrayendo su caudal sin menoscabo de su derecho, y por otro lado el equilibrio natural del lago, mirado como el volumen habitual para cada época del año, no deberá ser afectado.

El presente trabajo aborda la idea de que el margen de incertidumbre en las medidas hidrológicas nos permite otorgar un determinado caudal asociado a ella. Dado que el valor verdadero de una magnitud hidrológica habitualmente no es conocido, no sabremos a priori en cuanto se está subestimando o sobreestimando los volúmenes de agua involucrados. Si suponemos una subestimación del volumen, este volumen no considerado en el balance es el que se podría utilizar en el otorgamiento de nuevos derechos sin provocar afección alguna a terceros. Sin embargo, si existe una sobreestimación se estará otorgando agua que no existe y se provocará una afección a derechos de terceros en algún momento y un posible daño ambiental del sistema. Estadísticamente en las series de tiempo de las variables de estado debería darse una u otra situación indistintamente con la misma probabilidad, de manera que no podemos afirmar que siempre se estará subestimando o al revés de que siempre se estará sobreestimando alguna de ellas. Por tanto el equilibrio natural del lago puede verse afectado, pues todas las relaciones tróficas están supeditadas al estado natural anterior del sistema, antes del otorgamiento de derechos adicionales. Si estas relaciones se afectan, habrá impacto ambiental. Debemos tener presente que la naturaleza, sin medir variables de estado, siempre ajusta su hábitat a lo que realmente tiene.

Es importante entonces considerar una condición de borde que imponga límites para no producir afección ni un desequilibrio natural en el sistema.

El principio que utilizaremos en este informe técnico es el de imperceptibilidad humana, es decir, las variaciones de un sistema deberán ser imperceptibles a los sentidos humanos. Esto se traduce en que si se otorga un cierto volumen de agua de un sistema, el estado final de éste deberá ser muy similar al estado inicial (antes del otorgamiento), siendo esta diferencia "imperceptible" a los sentidos humanos.

Para no percibir la variación del sistema, debe ocurrir que no se debe percibir variación en el nivel del lago ni se debe percibir una variación o corrimiento de la orilla para las mismas épocas de cada año. Estas dos condiciones, y sobre todo la primera, también aseguran la no afección de derechos de terceros aguas abajo de la salida del lago, pues las leyes de la hidráulica mencionan que el caudal de salida del lago depende del nivel de energía de la superficie del mismo, si este nivel tiene una variación despreciable, despreciable será la variación del caudal de salida.

Para que la variación de nivel sea imperceptible al ojo humano, ésta variación deberá ocultarse entre las vibraciones naturales de las ondas de la superficie. Dependiendo del estado del viento, las oscilaciones de la superficies pueden ser pequeñas (unos pocos centímetros) o muy significativas (de varias decenas de centímetros). Es por esto que hay que referir el nivel de oscilaciones a aquellas que ocurren la mayor parte del tiempo. A esta magnitud la hemos denominado altura de la "ola tipo", que de acuerdo al análisis anterior fue estimada en 10 cm.

Por su parte, la imperceptibilidad de la variación de la orilla del lago, tiene que ver con cuan imperceptible es para el ojo humano el corrimiento de la zona de swash o de batida de las olas en la orilla. Al igual que en el caso del nivel, ésta variación o corrimiento de la zona de swash será imperceptible si el corrimiento se encuentra dentro de la oscilación normal de esta zona. Por su parte el rango de oscilación depende del nivel de las olas y principalmente del ángulo de inclinación del fondo de orilla de cada lago. Por tanto se exige más si se considera como ángulo de inclinación aquel ángulo que se presenta normalmente en playas de estos lagos, y que para este trabajo fue estimado en 10°. Además, se ha considerado a través de inspección visual que la mayoría del tiempo, la zona de swash en playas de lagos tiene un ancho máximo de 1 metro. De manera que el corrimiento de orilla será imperceptible si éste no supera los 100 centímetros.

El nivel de imperceptibilidad de los efectos de la disminución del caudal afluente sobre el lago está directamente relacionado con la magnitud de la disminución del nivel y el corrimiento hacia el interior, de la zona de swash o de batida de oleaje. Como primer paso, para encaminarnos a una metodología para otorgamiento de derechos adicionales en lagos de gran envergadura con base en la incertidumbre de medición de caudales de salidas y niveles de lagos, se determinará en base a la información de los lagos caso de estudio, como varía el nivel y el corrimiento de la zona de swash en cada uno debido primero, al otorgamiento de un caudal continuo equivalente a la incerteza en la determinación del caudal de salida y segundo, a la disminución del nivel del lago equivalente a la incerteza en el nivel de 3 y 7 cm.

4.1 Efectos de la incertidumbre en la estimación del caudal.

Se ha determinado que el error relativo asociado a la estimación del caudal de salida de lagos de gran envergadura es, del orden de 10%, valor que se encuentra fuertemente influenciado por la precisión del molinete utilizado y el número de verticales trazadas para definir la sección de aforo. Este error debe considerarse como una cota mínima debido a que en la determinación del caudal instantáneo no se ha considerado el uso de la curva de descarga ni los cambios de geometría de la sección de flujo debido a la depositación u arrastre de material de fondo en el lecho.

En consecuencia el error asociado a un dato de caudal obtenido a través de la curva de descarga debería ser mayor al 10% estimado sólo en el aforo de la sección de flujo.

La incertidumbre asociada a la serie de caudales de salida de cada lago, por tanto, es mayor al 10%. Sin embargo, consideraremos como posición conservadora un error máximo en la determinación del caudal de 10% y como valor representativo del caudal de salida de un lago aquel dado por la probabilidad de excedencia anual del 85% de su serie de caudales de salida.

Para los lagos caso de estudio, lagos Villarrica, Rupanco, Llanquihue y Lago General Carrera, se determinará el efecto sobre el nivel del lago y sobre el corrimiento de la zona swash debido a una disminución del caudal afluente al lago, equivalente al 10% del

caudal anual de salida, considerado con un 85% de probabilidad de excedencia. Los resultados se muestran en la Tabla 4-1

Lago	Q85% [m ³ /s]	% de error de Q85 considerado	Caudal continuo equivalente [m ³ /s]	Volumen anual equivalente [m ³]	Superficie Lago [m ²]	Disminución Nivel Lago [cm]	Corrimiento zona de Swash (pendiente 10°) [m]
Villarrica	194	10	19.400	611,798,400	174,744,611	350	19.9
Rupanco	85	10	8.500	268,056,000	234,913,092	114	6.5
Llanquihue	71	10	7.100	223,905,600	867,138,579	26	1.5
General Carrera	509	10	50.900	1,605,182,400	1,862,592,762	86	4.9

Tabla 4-1 Caudal continuo equivalente y efectos sobre el nivel y orillas de lagos considerando 10% de incertidumbre

Como consecuencia de la disminución en 10% en el caudal afluente a cada lago del caso de estudio, se tiene que la disminución de nivel supera los 10 cm en todos los lagos: Villarrica (350 cm.), Rupanco (114 cm.), Llanquihue (26 cm.) y General Carrera (86 cm.), de manera que esta disminución alcanza el nivel de perceptible en los cuatro casos.

Por otra parte el corrimiento de la zona de swash alcanza los 20 metros para el lago Villarrica, 6,5 metros para el Lago Rupanco, 1,5 metros para el lago Llanquihue y 5 metros para el lago General Carrera, siendo la orilla de menor pendiente del lago Rupanco la que presenta una menor disminución en el corrimiento de esta franja, tornándose perceptible, al igual que los otros 3 casos los que superan los 100 centímetros de corrimiento considerándose el efecto como perceptible.

De aquí se deduce, de acuerdo a nuestros criterios, que si se otorga el caudal asociado a la incerteza en la medida del caudal de salida de cada lago, esto provocaría visibles descensos que podrían tener efectos ambientales no cuantificados.

4.2 Efectos de la incertidumbre en la estimación del nivel.

Se mostró que el error asociado a la estimación del nivel del lago está en un rango de entre 3 y 7 cm, supeditado a la precisión del sensor de nivel utilizado, al intervalo de medición y a la altura de la ola tipo.

Para los lagos caso de estudio, lagos Villarrica, Rupanco, Llanquihue y Lago General Carrera, se determinará el efecto sobre el corrimiento de la zona swash debido a una disminución del nivel en 3 y 7 centímetros en cada lago. Además se mostrarán los caudales continuos equivalentes correspondientes a los volúmenes asociados a éstas disminuciones. Estos caudales se obtuvieron considerando cada lago caso de estudio, como un cilindro generalizado y cuya área basal corresponde al área de la superficie del espejo de agua respectivo, y considerando como altura la disminución del nivel en 3 y 7 cm. respectivamente. En estas condiciones los caudales continuos equivalentes y el corrimiento de la zona de swash se muestran en las tablas Tabla 4-2 y Tabla 4-3

Lago	Q debido a disminución de nivel de 3 cm. [m ³ /s]	Superficie Lago [m ²]	Corrimiento de la zona de Swash pendiente 10° [m]
Villarrica	166	174,744,611	0.17
Rupanco	223	234,913,092	0.17
Llanquihue	825	867,138,579	0.17
General Carrera	1772	1,862,592,762	0.17

Tabla 4-2 Caudal continuo equivalente debido a la incertidumbre en la medición del nivel y efecto sobre la orilla del lago (error de nivel de 3 cm)

Lago	Q debido a disminución de nivel de 7 cm. [m ³ /s]	Superficie Lago [m ²]	Corrimiento de la zona de Swash pendiente 10° [m]
Villarrica	388	174,744,611	0.40
Rupanco	521	234,913,092	0.40
Llanquihue	1925	867,138,579	0.40
General Carrera	4134	1,862,592,762	0.40

Tabla 4-3 Caudal continuo equivalente debido a la incertidumbre en la medición del nivel y efecto sobre la orilla del lago (error de nivel de 7 cm)

La disminución del nivel de cada lago en 3 y 7 centímetros, se traduce en que el fondo de los lagos queda expuesto en una franja de 17 cm para una disminución de 3 cm.(Tabla 4-2) y de 40 cm. para una disminución de 7 cm. (Tabla 4-3) considerando una pendiente de fondo de 10°, como es posible notar, este corrimiento de la zona de swash es inferior a 100 centímetros.

De lo anteriormente expuesto se deduce que los efectos asociados a la incerteza en la medida del nivel son imperceptibles, tanto en el nivel, 3 a 7 cm. el cual es inferior a la altura de la ola tipo (10 cm), como en la exposición del fondo de la orilla de menor pendiente, inferior a 1 metro.

5 Propuesta Metodológica.

Los resultados obtenidos hasta el momento indican que otorgar el 10% del caudal de salida con probabilidad de excedencia de 85% en cada lago caso de estudio, provoca efectos perceptibles que podrían inducir daños ambientales no cuantificados.

Por otro lado, el otorgamiento del volumen equivalente al descenso de 3 y 7 cm. en cada lago caso de estudio, no provoca efectos perceptibles ni en el nivel, ni en el corrimiento de la zona de swash. Entendiendo como "efecto no perceptible" que la disminución del nivel sea inferior a la altura de la ola tipo (10 cm.) y el corrimiento de la zona de swash no supere los 100 centímetros.

Se sigue entonces que el caudal factible de otorgar sin efectos perceptibles, es aquel caudal que no supera el 10% del caudal de salida del lago, tomado éste último como el caudal de probabilidad de excedencia de 85%, y que además éste caudal no provoque un descenso del nivel del lago superior a 10 centímetros –equivalente a la altura de la ola tipo- y que el corrimiento de la zona de swash sea inferior a 1 metro.

Dado lo anterior, se propone la siguiente metodología para el otorgamiento de caudales superficiales adicionales en lagos de gran envergadura.

5.1 Consideraciones

Para el desarrollo de la metodología son necesarias las siguientes consideraciones:

1. La metodología será aplicable a lagos de gran envergadura que contengan cauces de salida.
2. Como lagos de gran envergadura se considerarán todos aquellos lagos con superficie superior a 100 km².

3. La altura de la ola tipo, considerada para la determinación de la imperceptibilidad en la medición del nivel será de 10 cm. para cada lago.
4. El ancho de la zona de swash, considerada para la determinación de la imperceptibilidad del corrimiento de la misma, será de 1 metro.

5.2 Metodología

En estas circunstancias se deberá:

1. Determinar el valor del caudal anual de probabilidad de excedencia de 85% de la serie de caudales del o los cauces de salida del Lago, $Q_{85_{Sal}}$.
2. Determinar el caudal de derecho posible de otorgar Q_{der} , equivalente al 10% de $Q_{85_{Sal}}$.

$$Q_{der} = 0.1 \cdot Q_{85_{Sal}}.$$

3. Determinar si el volumen equivalente del caudal anual Q_{der} provoca un descenso de nivel del lago mayor a la altura de la ola tipo (10 cm.).
4. Determinar si el descenso de nivel, provocado por Q_{der} , provoca un corrimiento de la zona de swash superior a 1 metro, para un ángulo de 10° de pendiente de fondo (considerada como pendiente de fondo típica de orilla de playa).
5. Si no se cumple el paso 3 o paso 4 se deberá volver al paso 2. Considerando una disminución del porcentaje en el error del caudal de salida, de manera de disminuir el valor de Q_{der} , hasta que se cumplan las condiciones 3. y 4.
6. El valor final de Q_{der} será el caudal posible de otorgar, el cual cumple con que el descenso de nivel provocado es inferior o igual a 10 cm., y que el corrimiento de la zona de swash inducida es inferior a 1 metro.

El detalle de cómo se materializan los pasos de este procedimiento, se muestra en el capítulo siguiente (Aplicación práctica).

6 Aplicación práctica

Aplicaremos la metodología al lago Villarrica y mostraremos los resultados finales para los lagos Rupanco, Llanquihue y General Carrera.

Para aplicar la metodología se necesita:

1. Serie de caudales medios anuales de la salida o salidas del Lago.
2. Área del lago,

Con la serie de caudales medios anuales de la salida del lago se determina el valor del caudal de salida correspondiente al 85% de probabilidad de excedencia. Para el caso del Lago Villarrica, éste tiene una sola salida y está controlada por la estación fluviométrica Río Tolten en Villarrica, tal como se muestra en la Figura 6-1. La estación fluviométrica está en funcionamiento desde enero de 1960 a la fecha. Sin embargo se tuvieron disponibles datos de caudal sólo hasta junio de 2015, de manera que sólo se consideraron años completos hasta el año 2014. La curva de variación estacional se muestra en el Gráfico 6-1



Gráfico 6-1 Curva de variación estacional de los caudales de salida del Lago Villarrica

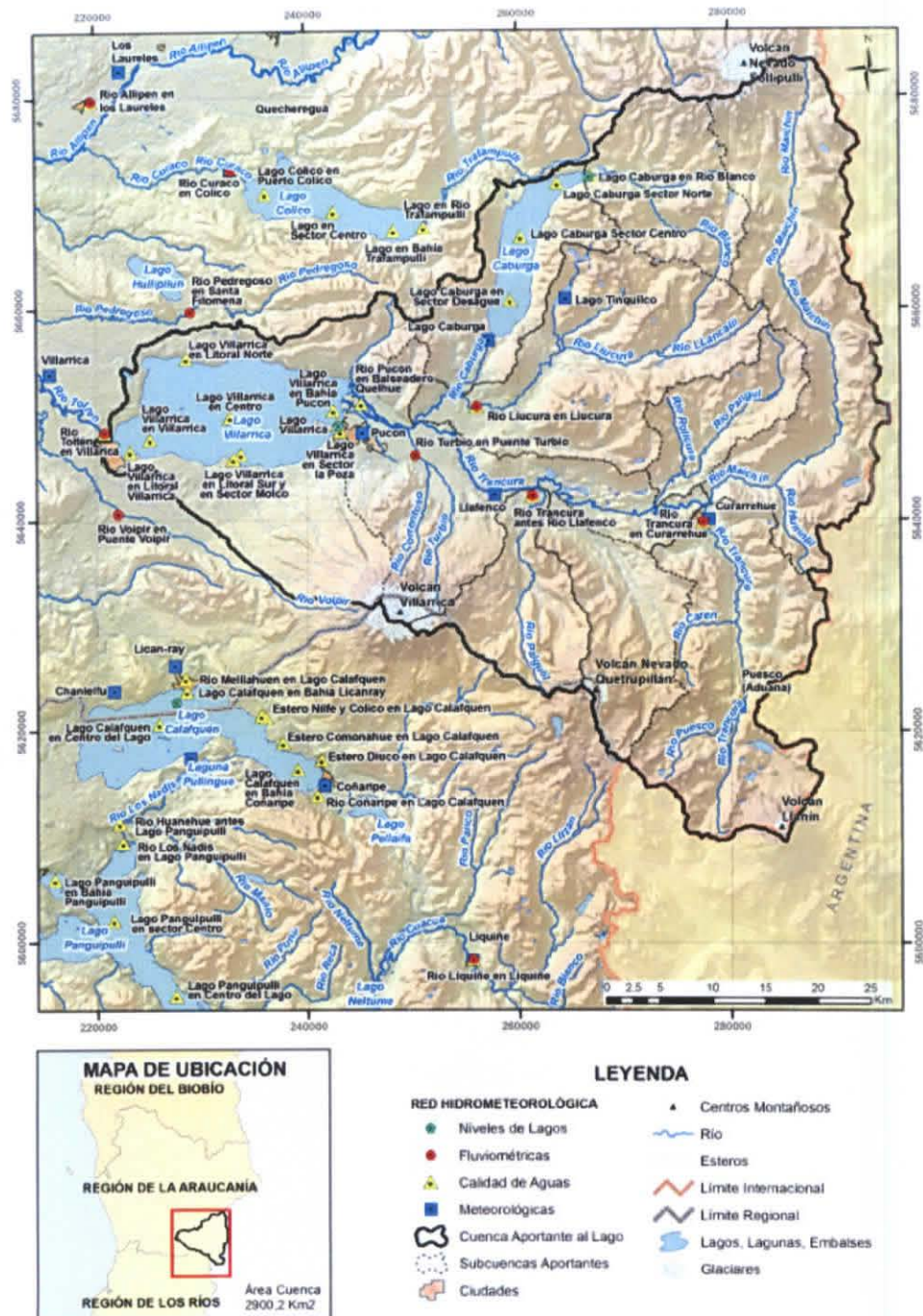


Figura 6-1 Lago Villarrica y elementos de control

Por su parte el área del lago Villarrica alcanza los 174.744.611 m²., ahora estamos en condiciones de aplicar la metodología, para esto seguiremos los 6 puntos paso a paso.

1. Determinar el valor del caudal anual de probabilidad de excedencia de 85% de la serie de caudales del o los cauces de salida del Lago, $Q_{85_{Sal}}$.

De la serie de datos medios anuales de la salida del Lago Villarrica se tiene utilizando Weibull, que el caudal de probabilidad de excedencia de 85%, equivale a 194 m³/s.

$$Q_{85_{Sal}} = 194 \text{ m}^3/\text{s}$$

2. Determinar el caudal de derecho posible de otorgar Q_{der} , equivalente al 10% de $Q_{85_{Sal}}$.

$$Q_{der} = 0.1 \cdot Q_{85_{Sal}}$$

$$Q_{der} = 0.1 \cdot 194 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{der} = 19,4 \text{ m}^3/\text{s}$$

3. Determinar si el volumen equivalente del caudal anual Q_{der} provoca un descenso de nivel del lago mayor a la altura de la ola tipo (10 cm.)

Para realizar esta comparación se debe determinar el volumen anual equivalente Vol_{der} del caudal Q_{der} y luego dividir éste por el área del Lago. Aquí estamos considerando que el lago se comporta como un cilindro generalizado, es decir, con paredes laterales verticales.

$$Vol_{der} = Q_{der} \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ m}^3$$

$$Vol_{der} = 19,4 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ m}^3$$

$$Vol_{der} = 611.798.400 \text{ m}^3$$

Luego la altura equivalente h_{der} se determina como el cociente entre Vol_{der} y el área del Lago A_{Lago}

$$h_{der} = \frac{Vol_{der}}{A_{Lago}}$$

$$h_{der} = \frac{611.798.400 \text{ m}^3}{174.744.611 \text{ m}^2}$$

$$h_{der} = 3,50 \text{ m}$$

Por tanto si se disminuye el aporte al lago en 19,4 m³/s, esto provocará un descenso de 350 cm., valor muy por encima del límite de 10 cm. (altura de ola tipo)

4. Determinar si el corrimiento de la zona de swash supera los 2 metros, para un ángulo de 10° de pendiente de fondo (considerada como pendiente de fondo típica de orilla de playa).

Para determinar el corrimiento de la zona de swash se considerará el ángulo de pendiente de fondo en la zona de playa de 10° sugerido en este trabajo y el esquema presentado en la Figura 6-2

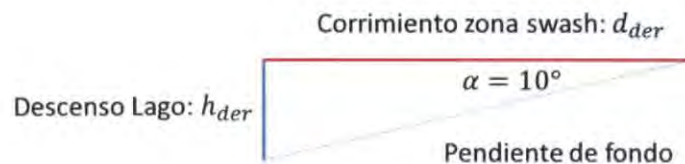


Figura 6-2 esquema para determinar corrimiento de la zona de swash

En el triángulo rectángulo de la figura se tiene que:

$$d_{der} = \frac{h_{der}}{\tan(\alpha)}$$

$$d_{der} = \frac{3,50 \text{ m}}{\tan(10)}$$

$$d_{der} = 19,9 \text{ m}$$

Este valor es muy superior a 1 metro, considerado como límite para este corrimiento.

- Si no se cumple el paso 3 o paso 4 se deberá volver al paso 2. Considerando una disminución del porcentaje en el error del caudal de salida, de manera de disminuir el valor de Q_{der} , hasta que se cumplan las condiciones 3. y 4.

Dado que el descenso es superior a 10 cm. y el corrimiento de la zona de swash es superior a 1 metro, se deberá disminuir el caudal Q_{der} e ir probando iterativamente hasta que se cumplan las condiciones anteriores.

- El valor final de Q_{der} será el caudal posible de otorgar, el cual cumple con que el descenso de nivel provocado es inferior o igual a 10 cm., y que el corrimiento de la zona de swash inducida es inferior a 1 metro.

El valor final de Q_{der} , después de varias iteraciones, para el caso del lago Villarrica es de 543 L/s caudal que provoca un descenso máximo de 10 cm. y un corrimiento de la zona de swash de 0,6 metros.

Si se realiza este proceso para los otros lagos caso de estudio, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 6-1

Lago	Q85% [m³/s]	% de error de Q85 considerado	Caudal continuo equivalente [m³/s]	Volumen anual equivalente [m³]	Superficie Lago [m²]	Disminución Nivel Lago [cm]	Corrimiento zona de Swash (pendiente 10°) [m]
Villarrica	194	0.286	0.555	17,497,434	174,744,611	10	0.6
Rupanco	85	0.876	0.745	23,481,706	234,913,092	10	0.6
Llanquihue	71	3.874	2.751	86,741,029	867,138,579	10	0.6
General Carrera	509	1.160	5.904	186,201,158	1,862,592,762	10	0.6

Tabla 6-1 resultados finales para los lagos caso de estudio

Por tanto el caudal adicional posible de otorgar que no provoca efectos perceptibles en los lagos caso de estudio es: Lago Villarrica 555 L/s, Lago Rupanco 745 L/s, Lago Llanquihue 2751 L/s y Lago General Carrera 5904 L/s.

7 Conclusiones

1. Se determinó el error asociado al aforo realizado con carro de aforo, este error alcanzó un valor en torno al 10%. No se consideró en este cálculo las variaciones u errores asociados a la determinación del área de la sección de aforo, dadas por las irregularidades de la superficie y su variación por depositación u arrastre de material de fondo en el lecho.

Tampoco se incluye el error en la construcción de la curva de descarga ni el posterior cálculo del caudal instantáneo asociado a su altura limnimétrica.

Se determinó también que mientras mayor es el número de franjas de la sección de flujo, para la determinación de un aforo, mayor será el error. Por tanto una forma de minimizar el error asociado a un aforo es minimizar el número de verticales, encontrando el número óptimo para cada sección.

Por tanto el error asociado a la determinación del caudal instantáneo utilizando la curva de descarga deberá ser superior al 10%, sin embargo en este trabajo se adoptó conservadoramente el valor máximo de 10%.

2. Se determinó el error asociado a la estimación del nivel de un lago utilizando sensor de nivel, este error alcanzó un rango de entre 3 a 7 cm. supeditado a la precisión del sensor de nivel utilizado, al intervalo de medición y a la altura de la ola tipo.
3. La altura de la ola tipo se definió como la altura de olas que se presenta la mayor parte del tiempo en la superficie de un lago. Esta altura de ola tipo alcanzó una magnitud de 10 cm.
4. Se creó una metodología para el otorgamiento de derechos adicionales en lagos de gran envergadura basada en la imperceptibilidad de cambios de nivel y zona de swash en lagos. En donde el caudal factible de otorgar sin efectos perceptibles, es aquel caudal que no supera el 10% del caudal de salida del lago, tomado éste último como el caudal de probabilidad de excedencia de 85%, y que además éste caudal no provoque un descenso del nivel del lago superior a 10 centímetros –

equivalente a la altura de la ola tipo- y que el corrimiento de la zona de swash sea inferior a 1 metro.

5. El caudal adicional posible de otorgar que no provoca efectos perceptibles en los lagos caso de estudio se muestra en la Tabla 7-1:

Lago	Caudal posible de otorgar [L/s]
Villarrica	555
Rupanco	745
Llanquihue	2751
General Carrera	5904

Tabla 7-1 Caudal adicional posible de otorgar

6. La aplicación de la metodología a los cuatro lagos caso de estudio, indica que el valor que controla fuertemente el caudal adicional máximo a otorgar es el nivel del lago supeditado a la altura de la ola tipo. (Tabla 7-2)

Lago	Caudal posible de otorgar [L/s]	% de error de Q85 considerado	Disminución Nivel Lago [cm]	Corrimiento zona de Swash (pendiente 10°) [m]
Villarrica	555	0.286	10	0.6
Rupanco	745	0.876	10	0.6
Llanquihue	2751	3.874	10	0.6
General Carrera	5904	1.160	10	0.6

Tabla 7-2 caudal adicional y variables consideradas en la metodología

Mientras se ha llegado al máximo valor de la ola tipo, el corrimiento de la zona de swash se mantiene bajo el límite de 1 metro y el porcentaje del caudal de salida de cada lago está muy por debajo del 10% considerado como incertidumbre de su valor.

