

# **SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA**

## **XIX CONGRESO CHILENO DE HIDRAULICA**

### **CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DEL RÍO CUERVO, AYSÉN**

**CARLOS REIHER N.<sup>1</sup>**  
**CAMILA ÁLVAREZ G.<sup>2</sup>**  
**PABLO MENDOZA Z.<sup>3</sup>**  
**ALDO TAMBURRINO T.<sup>4</sup>**  
**JAMES MCPHEE T.<sup>5</sup>**

#### **RESUMEN**

La escasez de información hidrometeorológica y dificultades de acceso para la realización de campañas de adquisición de datos, han sido obstáculos de gran relevancia para llevar a cabo estudios en la Patagonia, de manera de caracterizar sus recursos hídricos. En este trabajo, se presenta una caracterización de la cuenca del río Cuervo, al noroeste de Puerto Aysén. Desde el punto de vista hidrológico, se concluye que su régimen presenta variaciones leves durante el año, ya que la contribución de precipitaciones líquidas y derretimiento de nieves en distintas épocas del año son igualmente importantes. Se ha validado este régimen de escorrentía, así como también las estimaciones realizadas para la cuenca intermedia comprendida entre su origen y su desembocadura en el fiordo Aysén, mediante campañas de aforo. En la caracterización hidráulica, se verifica un escurrimiento de características transcricas, con frecuentes cambios de régimen producto de las condiciones de escurrimiento y controles hidráulicos presentes. Para ello, se aplican métodos indirectos para la obtención de información de difícil adquisición en terreno. La capacidad de arrastre potencial de sedimentos, al determinar el gasto sólido de fondo, presenta también una alta variabilidad a lo largo del cauce, pero dichas estimaciones se ven limitadas en la práctica por la disponibilidad de sedimentos en la cuenca, cuyo origen es un sistema lacustre.

---

<sup>1</sup>Ingeniero Civil (e), Magíster (c), Depto. de Ingeniería Civil, U. de Chile - mail: [creiher@ing.uchile.cl](mailto:creiher@ing.uchile.cl)

<sup>2</sup>Ingeniero Civil (e), Magíster (c), Depto. de Ingeniería Civil, U. de Chile - mail: [calvarez@ing.uchile.cl](mailto:calvarez@ing.uchile.cl)

<sup>3</sup>Ingeniero Civil (e), Magíster (c), Depto. de Ingeniería Civil, U. de Chile - mail: [pamendoz@ing.uchile.cl](mailto:pamendoz@ing.uchile.cl)

<sup>4</sup>Profesor Asociado, Depto. de Ingeniería Civil, U. de Chile - mail: [atamburr@ing.uchile.cl](mailto:atamburr@ing.uchile.cl)

<sup>5</sup>Profesor Asistente, Depto. de Ingeniería Civil, U. de Chile - mail: [jmcphee@ing.uchile.cl](mailto:jmcphee@ing.uchile.cl)

## **1. INTRODUCCIÓN**

Los cambios que ha experimentado el clima en la Tierra, debido a efectos naturales y antrópicos, y su efecto en la disponibilidad y sustentabilidad de los servicios ecosistémicos, ha sido uno de los grandes temas de investigación en las últimas décadas. Dentro de los servicios ecosistémicos que se han visto afectados por dichos cambios, los recursos hídricos juegan un papel trascendental, debido al gran interés, por parte de la sociedad, de los diversos productos que éstos nos brindan: energía, riego, agua potable, etc.

En Chile, los estudios de caracterización y disponibilidad del recurso hídrico se han basado en metodologías establecidas y validadas para una gran parte del territorio. Sin embargo, la zona austral del país no cuenta con ellas, ni con fórmulas empíricas para dichos estudios. Esto se debe a la baja densidad y el corto período de registros de información hidrometeorológica, además de la evidente dificultad de acceso a zonas remotas. Esta zona, cuyas características climáticas difieren considerablemente del resto del país, cuenta con cauces de gran potencial hidroeléctrico, lo que ha generado un gran interés por contar con la descripción del medio físico, requiriéndose como parte de ello contar con procedimientos para una caracterización acabada de los recursos hídricos.

Este estudio se enfoca en la cuenca del Río Cuervo, en la región de Aysén. Este río nace de las aguas del Lago Meullín, que a su vez conforma una cuenca lacustre con el Lago Yulton y las Lagunas Quetro. Este río tiene derechos constituidos de uso consuntivo por 139 m<sup>3</sup>/s, objeto de estudio para el proyecto Central Hidroeléctrica Cuervo (Energía Austral, 2009). Para este proyecto se ha desarrollado la Línea Base del Medio Físico, en el marco de su Estudio de Impacto Ambiental, de la cual forma parte el presente trabajo

## **2. ANTECEDENTES GENERALES**

La hoya hidrográfica del río Cuervo se ubica aproximadamente a 30 km al noroeste de la ciudad de Puerto Aysén, entre las latitudes 45°05' y 45°21' S y 72°45'- 73°05' W. Con un área superficial de 704 km<sup>2</sup>, la cuenca está delimitada por el Norte por la cadena montañosa que se proyecta hacia el oriente del volcán Cay; al Este está separada de las cuencas de los ríos Tabo y Arredondo y hacia el sur-poniente delimita con el volcán Macá y con la cadena de montañas que se proyectan desde su ladera sur y que además constituyen la divisoria de aguas entre el río Cuervo y el fiordo Aysén.

En la zona alta de la cuenca se ubican los lagos Yulton y Meullín –con superficies de 64.0 y 9.4 km<sup>2</sup>, respectivamente–, que reciben los aportes puntuales de los esteros Caipillán (longitud de cauce 5 km) y Barrientos (longitud de cauce 9 km) y del río Macá (longitud de cauce 15 km), además de los aportes difusos de una hoya intermedia que es comparable en área superficial a la suma de las áreas de los tres cauces antes indicados. El lago Meullín descarga sus aguas en el cauce del río Cuervo propiamente tal, y éste fluye por una distancia de 19 km a lo largo de un valle angosto y de pronunciada pendiente en dirección Sur, hacia su desembocadura en el fiordo Aysén. Aproximadamente 3 km aguas arriba de la desembocadura en el fiordo, el río Cuervo recibe los caudales del estero Marta, cuyo cauce principal alcanza una longitud de 11 km, y cuya

cuenca hidrográfica se desarrolla en dirección Nor-Este a partir de la confluencia con el río Cuervo, alcanzando elevaciones de hasta 1500 m.s.n.m.

### 3. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

#### Datos disponibles

La información recopilada corresponde a caudales medios mensuales registrados en una serie de estaciones fluviométricas, y precipitaciones diarias, mensuales y máximas diarias, en una serie de estaciones meteorológicas instaladas en la zona. Las Tablas 1 y 2 muestran su ubicación, período de registro y variables medidas, mientras que la Figura 1 muestra su ubicación en un mapa de la zona.

Tabla 1. Estaciones fluviométricas existentes incluidas en el estudio

N°	Estación	UTM SAD 69 H18		Cuenca	Variables registradas	Período de registro	
		E [m]	N [m]			Inicio	Término
1	Cuervo en Desembocadura	653,740	4,976,660	Río Cuervo	Caudal	Dic-80*	Ene-96
2	Cuervo en desagüe Lago Meullín	658,378	4,991,437	Río Cuervo	Caudal	Dic-91	Ene-96
3	Mañihuales ante junta Simpson	696,337	4,969,545	Río Mañihuales	Caudal	Abr-63	Mar-06
4	Simpson antes junta Mañihuales	696,687	4,968,792	Río Simpson	Caudal	Feb-63	May-97

\*Nota: Sin registro entre Feb-85 y Dic-91

Tabla 2. Estaciones meteorológicas existentes incluidas en el estudio

N°	Estación	UTM SAD 69 H18		Cuenca	Variables registradas	Período de registro	
		E [m]	N [m]			Inicio	Término
5	Puerto Aysén	680,007	4,969,960	Río Aysén	Precipitaciones	Ene-31	Jul-08
6	Lago Yulton	659,506	4,999,533	Río Cuervo	Velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad, precipitaciones, radiación solar	May-07	Dic-08
7	Río Cuervo	652,484	4,976,334	Río Cuervo	Velocidad y dirección del viento, precipitaciones	Ene-07	Dic-08

La información de precipitaciones es más abundante que en el caso de los datos de caudales, y se tiene datos en una ubicación cercana, como lo es Puerto Aysén. Los datos de precipitación se complementan con los observados en dos estaciones meteorológicas instaladas en la ribera del lago Yulton y en la zona de la desembocadura del río Cuervo, respectivamente. Estas últimas estaciones han registrado precipitación, entre otras variables meteorológicas, desde mediados del año 2007. Es importante contar con información proveniente de estas estaciones meteorológicas, Yulton y Cuervo, dado que la diferencia de elevaciones entre éstas es del orden de 500 m y por consiguiente la combinación de observaciones de ambas estaciones da una idea de los gradientes de precipitación con respecto a la altura existentes en la zona.

La mayoría de las estaciones de medición existentes en la zona presentan períodos de registro de corta duración, pero existen algunas cuya estadística tiene longitud aceptable y que permiten efectuar análisis hidrológicos, en particular, la estación meteorológica Puerto Aysén y la estación fluviométrica Mañihuales antes junta Simpson.

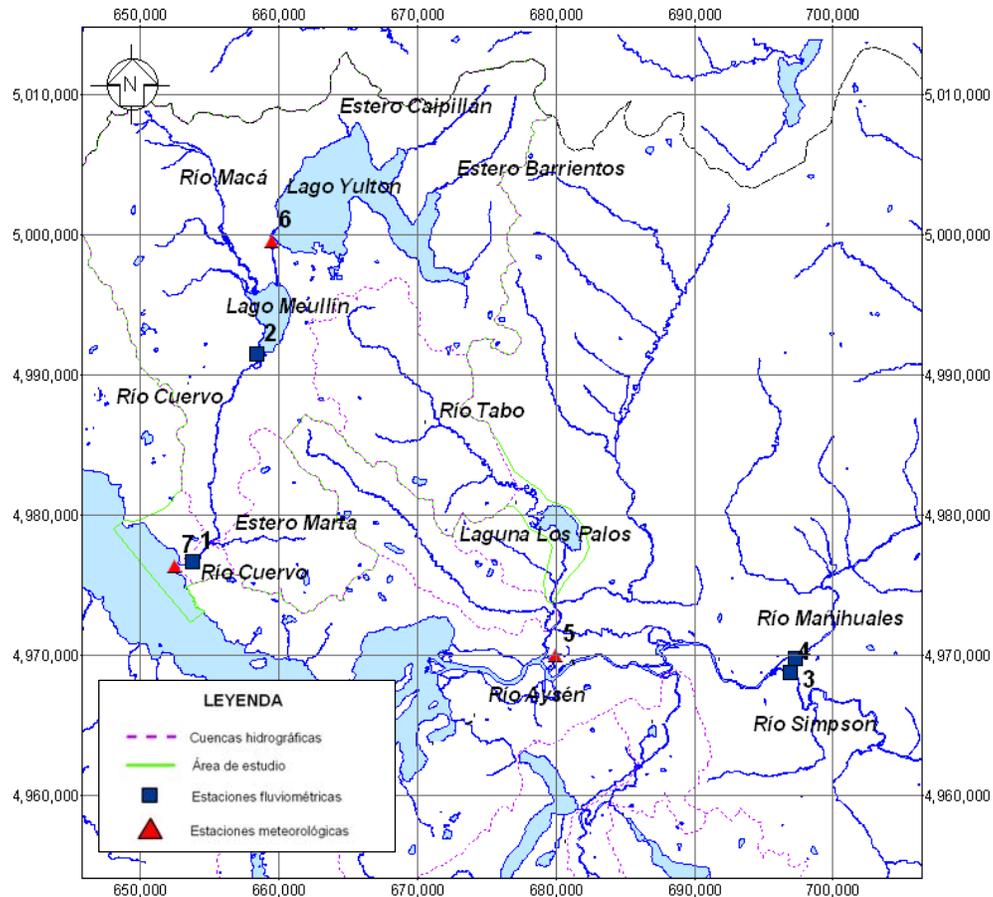


Figura 1. Ubicación puntos de estimación de caudales medios mensuales y puntos de aforo.

### Régimen de precipitaciones

La precipitación anual promedio en la estación Puerto Aysén es aproximadamente 2600 mm. El coeficiente de variación para todos los meses es menor que 1.0, lo que da cuenta de una variabilidad más bien modesta en el régimen de precipitaciones. A nivel anual, este coeficiente es aún más bajo, con un valor de 0.174. En la Figura 2 se muestra la curva de variación estacional de la estación Puerto Aysén.

El análisis comparativo de los datos medidos en las estaciones Yulton y Cuervo con respecto a los registrados en Puerto Aysén entregó como conclusión que la estación meteorológica Cuervo registra aproximadamente un 40% más precipitación que Puerto Aysén, lo cual puede explicarse por la orientación de la cuenca (dado que las elevaciones de las estaciones son similares), en un eje sur-norte, respecto a los fenómenos atmosféricos que dan origen a la precipitación en la zona. En Yulton se obtuvo un 75% más de precipitación que en Puerto Aysén durante los meses con registro concurrente. En lo que se refiere al área de estudio, las conclusiones que se extraen del

plano de isoyetas de la DGA (DGA, 1987) incluyen: i) dirección sur-poniente a nor-oriente de las tormentas, y ii) influencia significativa de la elevación sobre la ocurrencia de precipitaciones.

A partir de las metodologías descritas más adelante, el caudal medio anual afluente al lago Meullín se estima en  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ . Considerando que el área superficial de la cuenca es igual a  $536 \text{ km}^2$  (sin incluir la superficie de los lagos), el caudal anterior equivale a una escorrentía de  $5900 \text{ mm}$  anuales. Para calcular la precipitación media sobre la cuenca se utilizó el plano de isoyetas y un gradiente de precipitación con altura que resultó de promediar los resultados obtenidos a partir del mismo plano de isoyetas, y del análisis conjunto de las estaciones Puerto Aysén, Yulton y Cuervo. El gradiente adoptado se expresa como un aumento de  $30\%$  por cada  $1000$  metros de elevación respecto a su valor a nivel del mar. Ahora bien, la interpolación del plano de isoyetas y la aplicación de un gradiente de precipitación con altura que resulta del análisis conjunto de las estaciones Yulton y resulta en una precipitación media sobre la cuenca de  $6186 \text{ mm}$ . El déficit de escorrentía anual,  $D$ , que incluye pérdidas por evapotranspiración, evaporación y sublimación, se calcula como la diferencia de la precipitación y escorrentía medias anuales, totalizando  $286 \text{ mm}$ .

El Balance Hídrico de Chile (DGA, 1987) indica que la evapotranspiración potencial en la zona es del orden de  $400 \text{ mm/año}$ , valor que es del orden de la magnitud estimada para  $D$ . Por lo tanto, se concluye que el gradiente de precipitación con altura adoptado, así como la distribución espacial de precipitaciones que resulta del plano de isoyetas, son buenas aproximaciones para los fines de este estudio.

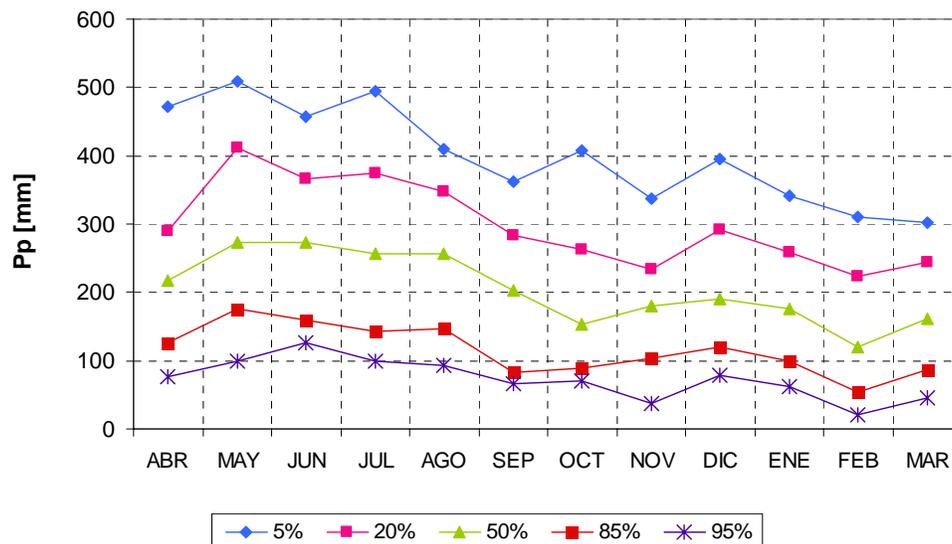


Figura 2. Curva de Variación Estacional de precipitaciones, Estación meteorológica Puerto Aysén.

### Régimen de caudales

Se estimaron regímenes de escurrimiento a nivel mensual para el período comprendido entre Abril de 1960 y Marzo de 2006, para puntos a lo largo del río Cuervo y para aportes puntuales al río y a los lagos Yulton y Meullín:

- Afluentes a lago Meullín
- Afluentes a río Cuervo en descarga lago Meullín (20)
- Estero Caipillán en desembocadura lago Yulton (15)
- Estero Barrientos en desembocadura lago Yulton (14)
- Río Macá en desembocadura lago Meullín (16)
- Estero Marta antes junta río Cuervo (17)
- Río Cuervo en desembocadura a fiordo Aysén (18)
- Río Tabo antes laguna Los Palos (19)
- Aportes incrementales a lo largo del río Cuervo (1 al 13)

La ubicación de los puntos anteriores se muestra en la Figura 3. Los dígitos identificadores de las cuencas más relevantes se muestran entre paréntesis en la lista de más arriba.

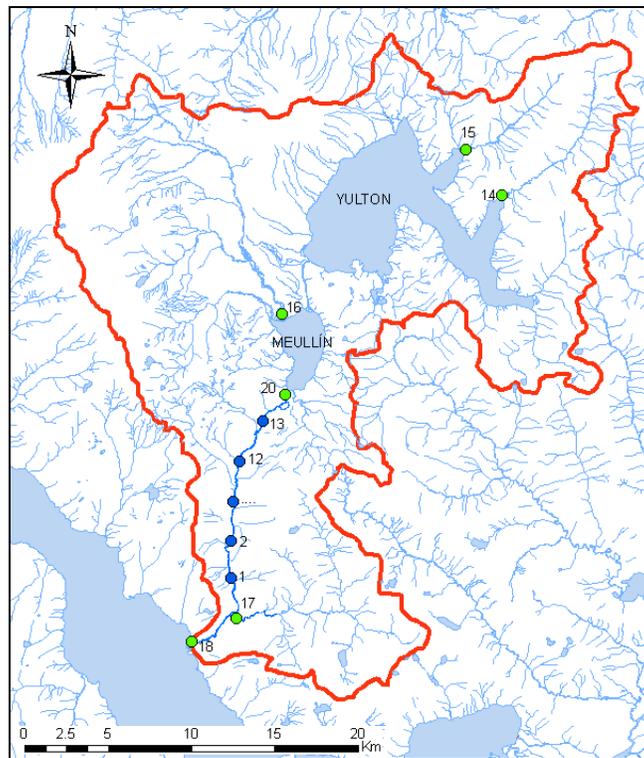


Figura 3. Ubicación de puntos de estimación de caudales medios mensuales.

Los caudales medios mensuales afluentes al lago Meullín fueron estimados a partir de correlaciones con datos observados en el río Cuervo, datos de caudales observados en el río Mañihuales, y precipitaciones observadas en Puerto Aysén.

Los caudales afluentes a río Cuervo se basan en datos observados en la estación fluviométrica en la descarga del lago Meullín, pues incluyen, en régimen natural, el efecto de regulación de dicho lago más el del lago Yulton. La estadística existente fue extendida mediante correlaciones mensuales con la estación Mañihuales antes junta Simpson y con la estación pluviométrica Puerto Aysén.

Los caudales medios mensuales para los puntos de interés fueron estimados mediante transposición por unidad de área y precipitación, considerando las áreas y precipitaciones de la cuenca del río Cuervo en Desagüe Lago Meullín y en diversos puntos de control dentro de la cuenca. La distribución espacial de precipitaciones se obtuvo del análisis combinado del mapa de isoyetas de la DGA y de un gradiente vertical de precipitaciones, validados con información de terreno como se explicó en párrafos anteriores. En el caso de los puntos de estimación de caudal a lo largo del río Cuervo, el área utilizada para la transposición se considera como el área incremental entre un punto y el anterior. En la Figura 4 se muestran las curvas de variación estacional obtenidas para los puntos más relevantes del estudio.



Figura 4. Curvas de variación estacional con aforos químicos y de molinete.

El análisis de variación estacional permite inferir que el régimen de caudales depende en cierta medida del tipo de año hidrológico. En años de alta probabilidad de excedencia (secos) el régimen de escorrentía es más bien plano, con una leve predominancia de caudales de verano (deshielos), lo que constituiría un régimen hidrológico de tipo nivo-pluvial. En cambio, en años muy húmedos, cobran más importancia los caudales de invierno, pero se mantiene alto el caudal de primavera y verano, lo que define un régimen pluvio-nival. La comparación de las curvas de variación estacional de precipitación mensual en Puerto Aysén (Figura 2) y de caudales de río Cuervo en Desembocadura (Figura 4) entrega más luces respecto a la complejidad del régimen hidrológico en los ríos de esta región. Sólo si la relación entre precipitación y caudal fuera lineal se podría esperar que la forma de las curvas que se presentan en las Figuras 3 y 4 fuera la misma. Sin embargo, dado que las cuencas presentan acumulación de nieve, el efecto de la temperatura introduce un factor de no-linealidad significativo.

### **Campañas de aforos**

Se realizaron cinco campañas de aforos en la cuenca del río Cuervo, con el fin de validar en terreno las estimaciones indirectas de caudal realizadas como parte del estudio hidrológico, así como proveer información directa referida a los aportes de cuencas de cabecera e intermedias. Los aforos realizados fueron del tipo químico y velocimétrico, donde la decisión de emplear una u otra técnica se basó principalmente en las condiciones de terreno.

La inspección de la Figura 4 muestra, en primer lugar, que los aforos validan la estimación de caudales y su variación en el río Cuervo, en el sentido que el año 2008 comenzó con condiciones hidrológicamente secas, para tender a normalizarse durante los meses del otoño. El panel central derecho, por otro lado, muestra que el aforo del mes de Febrero en el estero Marta correspondería a condiciones del orden de probabilidad de excedencia 85%. Por otro lado, el estero Marta continuó en recesión y sus caudales disminuyeron en dichos meses con respecto al valor medido en Febrero. Lo anterior sugiere que el estero Marta no presenta un régimen hídrico similar al del río Cuervo, y que la estimación de caudales en esta cuenca no controlada a partir de transposiciones de área y precipitación debe ser interpretada con cautela, al mismo tiempo que complementada con mediciones sistemáticas de caudal.

### **Comentarios**

La metodología de estimación de caudales en puntos sin información mediante transposición por unidad de área y por precipitación entrega resultados aceptables si es que se cuenta con información hidrometeorológica y topográfica adecuada. En el presente estudio, la información es escasa y las características climáticas son diferentes a las de la zona central del país, donde ha sido ampliamente utilizada dicha técnica. Sin embargo, los datos de las dos estaciones meteorológicas instaladas ayudan a validar la información entregada por el mapa de isoyetas en cuanto a la distribución espacial de la precipitación. Con los datos de precipitación media anual validados, se utiliza la técnica de transposición de caudales, que entrega resultados aceptables con respecto a los aforos realizados.

#### 4. CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA

El Río Cuervo presenta características que lo hacen particular y difícil de estudiar. Aun cuando el caudal que fluye por su cauce no es particularmente grande, su alta pendiente y su difícil acceso complican su estudio. Incluso en su último tramo, en la desembocadura al fiordo Aysén, cuando la pendiente ha disminuido, las posibilidades para acceder al cauce son limitadas. Las características hidráulicas y mecánico-fluviales de los cauces están condicionadas por las características geográficas y geológicas de la zona, así como la presencia de otros cuerpos de agua, como lo son los lagos Yulton y Meullín.

Para realizar la caracterización de las propiedades hidráulicas y mecánico-fluviales del Río Cuervo, desde su origen en el Lago Meullín hasta su desembocadura en el Fiordo Aysén, se empleó la caracterización hidrológica de la cuenca, junto a otros datos capturados en terreno. Esto permitió la modelación del eje hidráulico del río, y la posterior incorporación de elementos descriptivos del tamaño de los sedimentos para caracterizar el gasto sólido de fondo.

Para efectos de caracterizar las variables hidráulicas del Río Cuervo frente a diferentes caudales, en términos de las alturas y velocidades de escurrimiento que se observan a lo largo del cauce, fue necesario reunir una serie de antecedentes, listados a continuación:

- a) Caudales asociados a diferentes probabilidades de excedencia: provenientes de la caracterización hidrológica de la cuenca.
- b) Descripción de formas de fondo del cauce: se cuenta con información levantada de topografía del valle, que describe el entorno del cauce y planicies de inundación. Para describir la batimetría del cauce, hay escasa información en los sectores de mejor accesibilidad, pero se usan estos datos para inferir las formas de fondo para el resto del cauce, de acuerdo a procedimientos que se detallan más adelante.
- c) Caracterización granulométrica del cauce: se realizó una campaña de muestreo del sedimento representativo del fondo del cauce, también limitada a las zonas accesibles. Sin embargo, esta información se hace extensiva al resto del cauce, aplicando correcciones a la rugosidad característica del cauce según el método de Cowan: grado de variación longitudinal y transversal de las formas de fondo, nivel de meandrosidad, presencia de vegetación y obstrucciones significativas. Gracias al método de muestreo, efectuada por capas, fue posible diferenciar la coraza y el sustrato de la matriz de sedimentos.
- d) Fotografías aéreas: propias del procedimiento de levantamiento aerofotogramétrico de la información topográfica, permitieron además detectar determinadas singularidades del cauce a lo largo de su recorrido: afloramientos rocosos, zonas obstruidas por eventos de remoción en masa de las laderas del valle, presencia de sectores de mayor espuma superficial, evidenciando mayor turbulencia y aireación en sectores de mayor velocidad, etc.

La metodología para la caracterización hidráulica contempló las siguientes actividades:

- a) Caracterización geomorfológica del cauce: se analizó la información de estudios previos, y datos obtenidos a partir de las campañas de terreno, con el fin de sintetizar y revisar las consideraciones para la modelación hidráulica del sistema.
- b) Caracterización de la rugosidad y granulometría del sedimento del lecho de los cauces en estudio: se analizaron los datos de las campañas de terreno, obteniendo curvas granulométricas y tamaños característicos del sedimento. La rugosidad del cauce es caracterizada a través del número de Manning, con la obtención en primera instancia de una rugosidad base a través de la fórmula de Strickler, y aplicando correcciones posteriormente, según la morfología del cauce, de acuerdo al método de Cowan.
- c) Caracterización de la topografía y batimetría de los cauces en estudio en base a mediciones proporcionadas por el mandante: se analizó la información, a partir de la más general, hasta llegar a la más detallada. A partir del levantamiento aerofotogramétrico de la zona, se determinó la pendiente media del cauce, por tramos, como antecedente base para estimar las tendencias esperadas para los ejes hidráulicos, y cuantificar en términos gruesos las variaciones de cota de la superficie libre a lo largo de los cauces. Por otro lado, se emplearon los antecedentes batimétricos recolectados en campañas específicas para estos fines, así como las mediciones de profundidad en las campañas de aforos, para la caracterización de las formas de fondo. En base a esto, se supuso que la sección del cauce que está bajo el agua en los levantamientos topográficos, tiene una sección típica trapecial con un talud característico para cada cauce.
- d) Calibración de la profundidad del cauce: En consideración a que los levantamientos topográficos, apoyados por campañas de captura de imágenes del cauce a lo largo del río, permiten estimar una cota de la superficie libre del escurrimiento, se complementa la información de pendientes, rugosidades y geometría de la sección, para determinar la profundidad a la que se encuentra el fondo de la sección con respecto a las riberas. Las imágenes fueron capturadas en vuelo en helicóptero siguiendo el trazado del cauce, volando a una altitud controlada por el instrumental de la nave y corroborada por GPS, sirviendo ambos datos como referencia para el escalamiento de las fotografías y la superposición con las fotografías ortorrectificadas. Estas últimas permitían caracterizar de mejor forma la cota de la superficie libre del cauce, pero no tenían una medición de caudal asociada. En cambio, la nueva campaña de reconocimiento con captura de imágenes se hizo junto al aforo del Río Cuervo en Desagüe del Lago Meullín (81.17 m<sup>3</sup>/s, el día 14 de abril de 2008). Esto permite realizar una corrida de calibración, donde se ajusta el fondo del cauce, de modo de que la altura modelada coincida con la altura estimada con la información base, anteriormente detallada.

La Figura 5 muestra la comparación en términos de profundidades de escurrimiento, entre la profundidad estimada y la profundidad alcanzada en la modelación hidráulica, realizada bajo las pautas de modelación en el software HEC-RAS detalladas más adelante. Esta figura es resultante de un proceso iterativo: se supone una cota de fondo para el cauce, se efectúa la modelación hidráulica y se compara la superficie libre resultante con la esperada. En función del error cometido se corrigen las cotas de fondo, para volver a realizar la modelación del eje hidráulico. Los puntos escapados de la tendencia general que agrupa a la mayor parte de los puntos, corresponden a singularidades del cauce, secciones cercanas a controles hidráulicos

y/o zonas de cambio de régimen, donde la modificación de la cota de fondo no determina en forma predominante el eje hidráulico.

Esta metodología permite hacer uso de toda la información topográfica detallada disponible, aunque se evidencia una diferencia media de un 11%, que corresponde a una sobreestimación que se realiza al calcular el eje hidráulico, por la dependencia que hay entre la altura en una sección cualquiera y la influencia en el cálculo de las alturas de las secciones vecinas.

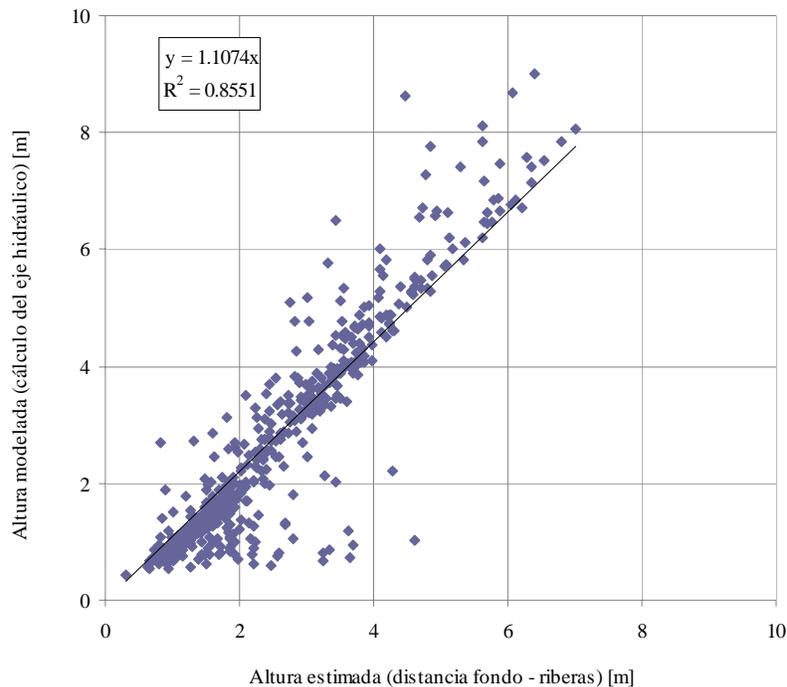


Figura 5. Comparación de alturas estimadas y modeladas en la simulación del eje hidráulico del Río Cuervo.

Los caudales empleados en esta calibración, tomando como partida el caudal del aforo de la fecha señalada, en el desagüe del Lago Meullín, varían entre 81.17 m<sup>3</sup>/s (caudal aforado en Desagüe Lago Meullín) y 93.36 m<sup>3</sup>/s (obtenido por transposición en la desembocadura al Fiordo Aysén), incrementándose hacia aguas abajo conforme el aumento de la cuenca aportante y la variación de la precipitación, según lo analizado en la caracterización hidrológica de la cuenca. Los factores con los que se aumentó el caudal corresponden a valores medios anuales para una probabilidad de excedencia del 85%, debido a que el caudal aforado tiene un valor cercano al caudal medio anual de esta probabilidad de excedencia (75.3 m<sup>3</sup>/s).

- e) Cálculo de ejes hidráulicos para caudales asociados a distinta probabilidad de excedencia: Se determinan los ejes hidráulicos mediante el software HEC-RAS, de amplia utilización en este tipo de estudio, analizándose las alturas, velocidades medias, números de Froude, esfuerzos de corte sobre el fondo y velocidades de corte. Las bases de cálculo principales de esta modelación se señalan a continuación:

- Secciones transversales cada 50 metros máximo, con batimetría obtenida indirectamente a través de la calibración de secciones (ver punto d precedente)
  - Rugosidad: Coeficientes de rugosidad de Manning diferenciados para cauce principal ( $n=0.052$ ) y zonas ribereñas ( $n=0.102$ ).
  - Caudales: Escenarios hidrológicos para probabilidades de excedencia de 5%, 20%, 50%, 85% y 95%. Además, se modelaron los ejes hidráulicos para un rango de caudales que abarca la totalidad de los valores de las series de caudales medios mensuales, con el objeto de construir posteriormente curvas de gasto sólido de fondo en función del caudal.
  - Tipo de modelación: Flujo permanente gradualmente variado, con régimen mixto.
  - Condiciones de borde: a) Aguas abajo: altura de escurrimiento constante, correspondiente a la cota media del nivel del agua del Fiordo Aysén. b) Aguas arriba: Altura normal, determinada con la pendiente del primer tramo del cauce. Las condiciones de borde son referenciales, ya que al calcular en régimen mixto, el software tiene la capacidad de relajar las condiciones de borde e imponer la altura que corresponda por la existencia de otros controles hidráulicos más significativos a lo largo del cauce. En este caso, el software determina las secciones aguas abajo del desagüe del Lago Meullín donde se produce escurrimiento crítico, y calcula el eje hidráulico desde este punto hacia aguas arriba.
- f) Cálculo de gasto sólido de fondo utilizando distintas formulaciones tomando en cuenta las características de la granulometría determinadas previamente. Estas relaciones permiten estimar la capacidad potencial de arrastre y no necesariamente las tasas reales transportadas en el sistema.

Los gastos sólidos de fondo se determinan usando resultados de ejes hidráulicos para un rango amplio de caudales, desde los mínimos hasta los máximos caudales medios mensuales. Los gastos sólidos se determinan utilizando el software MOSSEM, desarrollado por el grupo de investigación para el cálculo de sedimentación en embalses, pero cuyo uso se puede extender a la determinación de procesos de erosión y agradación en cauces. Las fórmulas que contempla este software son cuatro de las más usadas en el mundo. Particularmente en Chile, está la de Meyer-Peter y Müller (1948), la que es sustentada con una fuerte base empírica. Otro método comúnmente empleado es el conjunto de relaciones de Ackers y White (1973). Tanto este último como el de Meyer-Peter y Müller fueron deducidos para sedimentos de tamaño relativamente uniforme. Además de éstas, se emplean las relaciones de Parker (1990) y Wilcock y Crowe (2003), desarrolladas especialmente para lechos de granulometría gruesa y extendida considerando los aspectos no lineales del fenómeno y la generación de una coraza en el cauce. En particular, la relación de Wilcock y Crowe (2003) considera de mejor forma que la de Parker (1990) el efecto de la fracción de arenas presente en la capa superficial del lecho sobre el transporte de las fracciones más gruesas.

## Resultados

La Figura 6 sintetiza los ejes hidráulicos obtenidos, según la probabilidad de excedencia de los caudales circulantes. Se presenta la información como alturas medias por tramo, de acuerdo a la clasificación de tramos que permite agrupar en 26 diferentes tramos según pendientes y puntos de control hidrológicos para el aporte de caudales.

Los ejes hidráulicos determinados para el Río Cuervo permiten comprobar las condiciones de escurrimiento vistas en terreno, con una tendencia en los tramos de mayor pendiente a comportarse como flujos transcíticos, pasando por secuencias de resaltos hidráulicos y escurrimientos críticos a medida que surcan secciones estrechas y otras singularidades del cauce. Además, se verifica el escurrimiento de marcada condición subcrítica en su desembocadura al fiordo y en el desagüe del Lago Meullín.

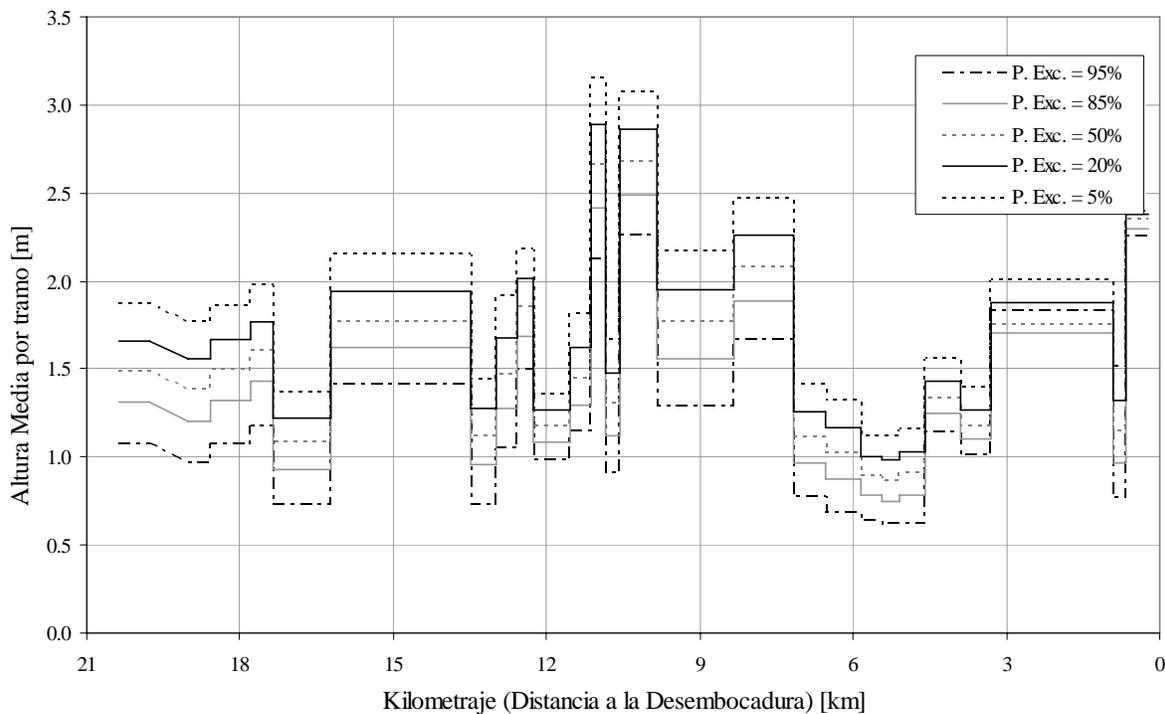


Figura 6. Alturas medias de escurrimiento por tramo, Río Cuervo.

En el tema de cálculo de arrastre potencial de sedimentos, la Tabla 3 muestra los valores potenciales esperados para los diferentes tramos del río Cuervo (se detallan valores referenciales promediando las metodologías de Parker y de Wilcock y Crowe), en tanto que la Figura 7 presenta una síntesis de los valores promedio a lo largo del río en función del caudal. Estos resultados muestran que existe una amplia variación en la capacidad de transporte de fondo de sedimentos. Como valor promedio de la capacidad de arrastre potencial de fondo, a lo largo del cauce del río Cuervo, se puede estimar un valor de alrededor de 120 millones ton/día.

Es importante recalcar que el río Cuervo presenta un cauce encajonado y con pendientes grandes en la mayor parte de su recorrido, siendo una fuente importante de suministro de sedimentos y

cambios del cauce los fenómenos de remoción en masa que ocurren en las laderas de los cerros. Estos eventos se identifican a lo largo de todo el desarrollo del cauce y, aunque esporádicos, condicionan y alteran el flujo. Sin embargo, este cauce encajonado de alta pendiente y en medio de rocas es la principal limitante a la potencialidad de arrastre que tiene este río, por lo que se espera que el gasto sólido de fondo real esté muy por debajo de la cifra anteriormente indicada.

La variación del potencial gasto sólido de fondo a lo largo del río Cuervo presenta variaciones dramáticas, de varios órdenes de magnitud entre algunos tramos. Las características del lecho, con sectores rocosos, así como la ausencia de suministro de gasto sólido de fondo en su cabecera (ya que se origina en un sistema lacustre) hacen que el gasto sólido real sea muy inferior al potencial. De no ser así, los cambios en la morfología deberían ser muy notorios en corto plazo.

Tabla 3. Resumen de gastos sólidos de fondo (Gsf) potenciales esperados para Río Cuervo.

Tramo	Kilometrajes		Gsf	Tramo	Kilometrajes		Gsf
	Inicio	Fin	[mill. ton/año]		Inicio	Fin	[mill. ton/año]
A	20.371	19.778	4.7	12	10.561	9.843	31.4
B	19.023	18.583	188.8	13	9.843	8.33	114.7
1	18.571	17.792	151.8	14	8.33	7.181	23.7
2	17.792	17.353	47.3	15	7.181	6.526	232.8
3	17.353	16.209	182.6	16	6.526	5.843	149.9
4	16.209	13.502	26.7	17	5.843	5.453	200.7
5	13.502	12.972	421.7	18	5.453	5.102	93.4
6	12.972	12.576	73.5	19	5.102	4.584	395.2
7	12.576	12.266	163.6	20	4.584	3.899	50.6
8	12.266	11.538	55	21	3.899	3.296	33.6
9	11.538	11.143	34.3	22	3.296	0.907	7.6
10	11.143	10.839	21	23	0.907	0.665	230.4
11	10.839	10.561	114.8	24	0.665	0.222	24.5

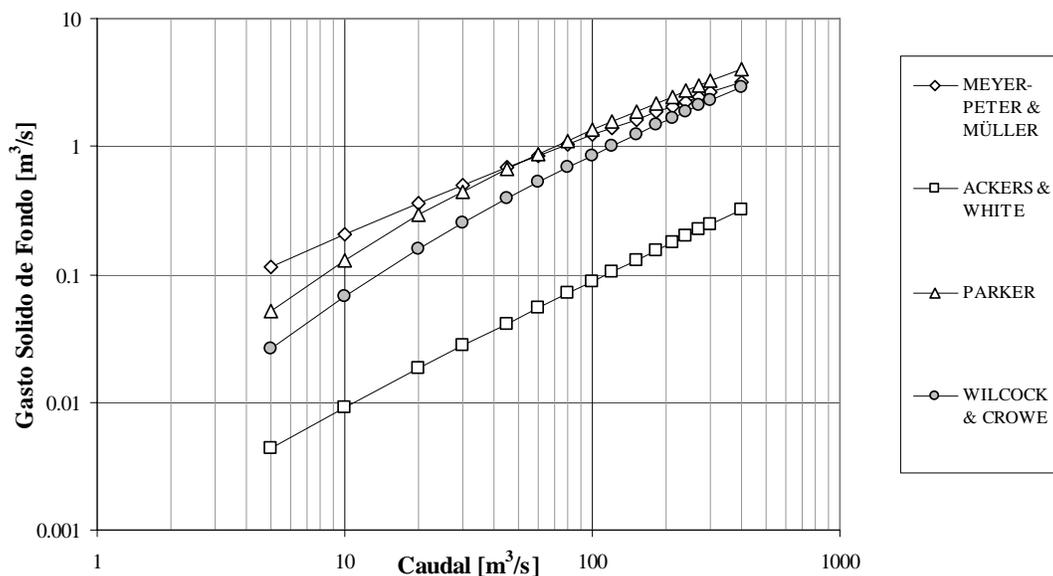


Figura 7. Valores promedio de gasto sólido de fondo en función del caudal, Río Cuervo

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a Energía Austral Ltda. por el apoyo y soporte a la divulgación científica del contenido de su Estudio de Impacto Ambiental (2009), para la realización de este trabajo.

## **REFERENCIAS**

Ackers, P. and White, W. R. (1973). "Sediment transport: new approach and analysis". J. Hydr. Div., Vol. 99, No. HY11, pp. 2041-2060.

Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas (1987), "Balance Hídrico de Chile"

Energía Austral Ltda. (2009), "Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Central Hidroeléctrica Cuervo"

Meyer-Peter, E., and Muller, R. (1948). "Formulas for bedload transport". Proceedings, 2nd Congress I.A.H.R., Stockholm.

Parker, G. (1990). "Surface-based bedload transport relation for gravel bed rivers". J. Hydr. Res. Vol 28, No 4, pp. 417-436.

Wilcock, P., and Crowe, C. (2003) "Surface-based Transport Model for Mixed-Size Sediment." J. Hydr. Engrg., Vol. 129, No. 2, pp. 120-128.