

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

**ESTIMACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS DE HÁBITAT FÍSICO Y CAUDAL  
ECOLÓGICO DEL PATO CORTACORRIENTES EN LA CUENCA DEL RÍO  
CACHAPOAL**

Rodrigo I. Meza<sup>1</sup>  
Claire Pernollet<sup>2</sup>

**RESUMEN**

El pato cortacorrientes (*Merganetta armata*) es una de las cinco especies de Anatidae del mundo que están restringidas a ríos torrentosos de montaña. En Chile, la subespecie *M. a. armata* se extiende desde Atacama hasta Tierra del Fuego y también en la Cordillera de Nahuelbuta. Este trabajo presenta la primera aproximación metodológica en Chile de estimación de los requerimientos de hábitat físico de esta especie, clasificada como “vulnerable” en el Libro Rojo de la Región de O’Higgins. Para realizar este estudio, se emplearon los antecedentes y datos de monitoreo del pato cortacorrientes disponibles en el río Cachapoal Alto, los cuales fueron cruzados con los resultados de tres modelos hidráulicos que abarcaron cuatro ríos en la zona de estudio y que fueron construidos para este fin, entregando como parámetros indicadores la velocidad total ( $V_{tot}$ ), la profundidad máxima ( $h_{max}$ ) y el Reynolds modificado ( $Re^{mod} = V_{tot} \cdot h_{max}$ ). Finalmente, se compararon los requerimientos con la modelación en un rango de caudales que comprendía desde el 5% del caudal medio anual ( $Q_{ma}$ ) hasta el 95% del mismo, en tres de los cuatro ríos analizados, con el fin de proteger a la especie ante la eventual aprobación de un proyecto hidroeléctrico de pasada en la zona. Los resultados indicaron que en el río Cachapoal, el requerimiento en la sección más crítica es de  $3,67 \text{ m}^3/\text{s}$ , lo que representa el 15% de su  $Q_{ma}$ ; en el río Cortaderal, el requerimiento en la sección más crítica es de  $5,97 \text{ m}^3/\text{s}$ , lo que representa el 27% de su  $Q_{ma}$ ; y, finalmente, en el río Las Leñas, el requerimiento en la sección más crítica es de  $2,33 \text{ m}^3/\text{s}$ , lo que representa el 36% de su  $Q_{ma}$ .

---

<sup>1</sup> Ingeniero Civil, MSc., Centro de Ecología Aplicada – e-mail: [romeza@ing.uchile.cl](mailto:romeza@ing.uchile.cl)

<sup>2</sup> Ingeniera Agrónoma, MSc., Lab. de Ecología de Vida Silvestre, Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile – e-mail: [clairepermollet@hotmail.com](mailto:clairepermollet@hotmail.com)

## **1 INTRODUCCIÓN**

El concepto de “caudal ecológico” (Qeco) ha sido el más empleado para abordar el tema de las perturbaciones antrópicas sobre los sistemas fluviales, desde el punto de vista hidráulico (Meza, 2009). En DGA (2008b) se establecen las normas, en virtud de las cuales la Dirección General de Aguas (DGA) fija criterios y procedimientos técnicos para definir los Qeco mínimos, para la constitución de nuevos derechos de aprovechamiento de aguas. Estos criterios están basados únicamente en la información de estadísticas fluviométricas del cauce, no dando cuenta de la variabilidad espacial ni de las distintas demandas –bióticas y abióticas- a las que están sometidos los distintos cursos de agua del país.

Por otro lado, los estudios de Qeco, que incluyen la base ecológica en sus cálculos, se basan habitualmente en peces nativos e introducidos como especies indicadoras del impacto de un proyecto dado, aunque en sus primeras aplicaciones la Autoridad no se mostró a favor de estas metodologías (CONAMA, 1997). Sin embargo, esta visión se ha revertido en la actualidad, como se aprecia en el estudio de DGA (2008a), donde se define el Qeco biológico como aquel caudal mensual que permite sostener los procesos reproductivos y de migración de las especies ícticas en los ríos, lo cual representa una validación de otras consideraciones en el cálculo del Qeco, además de las hidrológicas.

Este estudio surge precisamente debido al requerimiento de la DGA en el estudio de impacto ambiental (EIA) “Proyecto Hidroeléctrico Nido de Águila” (PHNA), donde le solicita al Titular del proyecto que su propuesta de Qeco asegure las condiciones necesarias de hábitat para el Pato Cortacorrientes y las demás especies que se definan como objeto de protección (DGA, 2010). De este modo, se presentan aquí los resultados de la estimación de los requerimientos de hábitat físico del pato cortacorrientes, así como el consiguiente cálculo de los Qeco que asegurarían el mantenimiento de las condiciones de hábitat que la especie frecuente. Hacia el final de este trabajo se analiza esta metodología y sus resultados, con el fin de proponer futuros estudios en la materia.

## **2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO**

Los ríos considerados en este estudio son el río Cachapoal (CA) y sus afluentes los ríos Pangal (PA), Las Leñas (LL) y Cortaderal (CO). La Figura 1 muestra la ubicación de los puntos donde se monitoreó la presencia del pato cortacorrientes y los perfiles topobatimétricos empleados en las modelaciones hidráulicas realizadas, con el fin de estimar los requerimientos de hábitat de la especie y calcular los Qeco que se presentan en este trabajo.

El área estudiada posee una típica geomorfología producida por la acción glacial, con valles anchos y en forma de U, cambios bruscos de la pendiente longitudinal, gran presencia de valles colgados, circos glaciares en las cabeceras, entre otros elementos. El análisis de imágenes aéreas permite observar los glaciares ubicados en las cabeceras de las cuencas estudiadas. El análisis de la variación diaria en la época de estiaje, en la estación DGA Río CO Ante Junta río CA (BNA 06002001-9), muestra diferencias de hasta un 40% entre el

mínimo y máximo diario (CEA, 2011). Todas las cuencas analizadas muestran un régimen predominantemente nival (CEA, 2011).

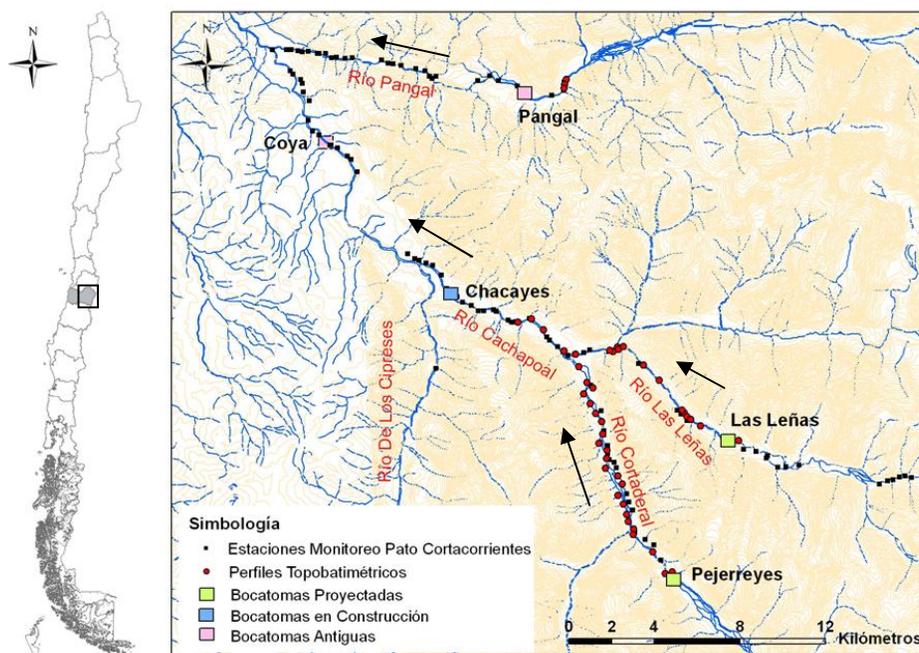


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio, puntos de monitoreo y perfiles topobatimétricos empleados (Fuente: Adaptado de Pernollet & Meza, 2011).

### 3 METODOLOGÍA Y DATOS

La metodología para la estimación de los requerimientos de hábitat del pato cortacorrientes y el cálculo del Qeco se puede resumir en los siguientes pasos, los cuales se encuentran ampliamente desarrollados en CEA (2011; 2011b):

- i. Se levantaron perfiles topobatimétricos y se realizaron aforos en las zonas de monitoreo de patos previamente seleccionadas.
- ii. Se modeló el eje hidráulico de cada uno de los ríos mediante el software HEC-RAS 4.0. La calibración se hizo por método del ajuste del  $n^{\circ}$  de Manning, minimizando la diferencia entre las alturas de escurrimiento observadas y las simuladas.
- iii. Se obtuvieron los caudales medios diarios (Qmd) de las estaciones DGA respectivas (ver Tabla 1), en aquellos días en que se realizó monitoreo de patos en las estaciones seleccionadas (ver Tabla 2).
- iv. Se realizó una revisión bibliográfica con el fin de determinar las variables físicas más relevantes para describir cuantitativamente el hábitat del Pato Cortacorrientes.
- v. Se generó una serie de parámetros físicos, a partir del modelo hidráulico, para cada caudal asociado a avistamientos positivos (A+) y negativos (A-).
- vi. Mediante dos métodos se obtuvieron los umbrales o magnitud de parámetros mínimos requeridos para sustentar un hábitat mínimo para el pato cortacorrientes.

- vii. Se calculó el Qeco en el perfil más exigente, empleando el parámetro menos restrictivo para los fines del PHNA.

Tabla 1. Estaciones fluviométricas DGA empleadas en este estudio (Fuente: CEA, 2011b).

| Estación Fluviométrica                          | Código BNA | UTM Este | UTM Norte |
|---|------------|----------|-----------|
| Río Cortaderal Ante Junta río Cachapoal         | 06002001-9 | 378320   | 6195229   |
| Río Las Leñas Ante Junta río Cachapoal          | 06000003-k | 379955   | 6196874   |
| Río Cachapoal 5 km Aguas Abajo Junta Cortaderal | 06003001-4 | 374944   | 6197967   |
| Río Pangal en Pangal                            | 06006001-0 | 377204   | 6209222   |

A continuación se detalla la explicación de los pasos más relevantes de esta metodología.

### 3.1 HABITAT DEL PATO CORTACORRIENTES Y DATOS DE MONITOREO

La Tabla 2 muestra la ubicación de las estaciones de monitoreo del pato cortacorrientes empleadas, las cuales fueron seleccionadas bajo consideraciones del n° de avistamientos, de la representatividad y la factibilidad técnica de realizar el levantamiento topobatómico y aforos (CEA, 2011b). Estas corresponden al monitoreo mensual, entre enero de 2007 y diciembre de 2010, de índices de abundancia y reproducción (CEA, 2011b).

Tabla 2. Estaciones de monitoreo del Pato Cortacorrientes empleadas en este estudio (Datum WGS84) (Fuente: CEA, 2011b).

| Río             | Estación Monitoreo | UTM Este | UTM Norte |
|-----------------|--------------------|----------|-----------|
| Cachapoal (CA)  | 6                  | 377125   | 6196661   |
|                 | 10                 | 376185   | 6197696   |
|                 | 11                 | 375591   | 6198208   |
|                 | 12                 | 375559   | 6198194   |
|                 | 12-A               | 374926   | 6198047   |
| Pangal (PA)     | 45                 | 377176   | 6209266   |
|                 | 109                | 382931   | 6193425   |
| Las Leñas (LL)  | 110                | 382651   | 6193719   |
|                 | 111                | 382480   | 6193909   |
|                 | 112                | 380673   | 6196079   |
|                 | 113                | 379674   | 6196764   |
|                 | 119                | 381377   | 6187597   |
| Cortaderal (CO) | 121                | 380484   | 6188179   |
|                 | 128                | 379222   | 6191879   |
|                 | 130                | 379037   | 6192745   |
|                 | 131                | 379056   | 6192930   |

### 3.2 MODELACIÓN HIDRÁULICA

El levantamiento topobatómico empleado en este estudio consiste en un total de 37 perfiles transversales en el área de influencia del PHNA, de los cuales 14 perfiles fueron levantados para este estudio y 23 perfiles corresponden a un estudio previo (CEA, 2011). Adicionalmente, se levantaron siete perfiles topobatómicos y se realizaron dos aforos, uno en el río PA y otro en el río CA, en las inmediaciones de las estaciones fluviométricas

DGA PA en PA (BNA 06006001-0) y CA 5 km aguas abajo de junta con CO (BNA 06003001-4) (CEA, 2011).

Se interpolaron manualmente perfiles, en base a los medidos, a través del uso de cartografía con curvas de nivel cada 2 m (ortorectificación de imágenes aéreas). Esto permitió representar con mejor detalle los cambios de pendientes y curvas del río. La metodología empleada se muestra en la Figura 2, mediante la interpolación de un perfil BB, utilizando el perfil medido AA. El proceso comienza porque (a) se desea un perfil en BB y se determina que AA muestra características morfológicas similares. No se conoce el perfil bajo el agua en BB pero (b) la configuración podría ser tal que la profundidad fuese menor que en AA. El método de traslado (c) indica que el perfil interpolado BB tendrá la misma profundidad que AA, ya que el  $\Delta Z_{Ref}$  es conocido y se obtiene de la cartografía digital (CEA, 2011).

En el río PA, la cartografía digital DEM (Digital Elevation Model) de resolución 90 m no logró representar la situación local de la pendiente, por lo cual se empleó el perfil longitudinal descrito solo por los perfiles levantados en terreno.

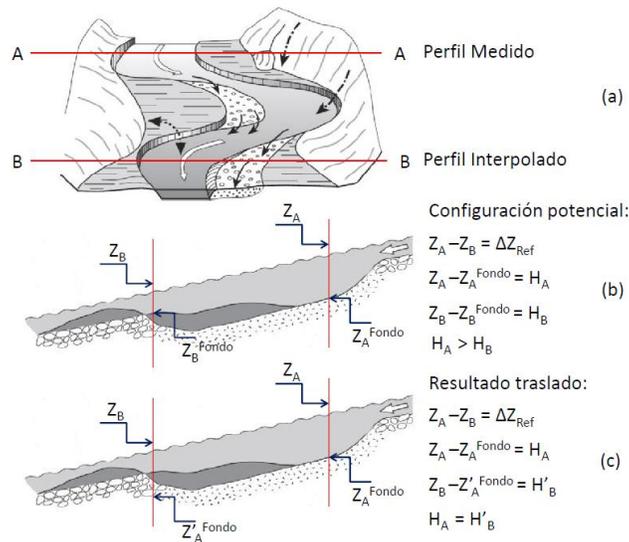


Figura 2. Método de interpolación manual, utilizando perfil medido (Fuente: CEA, 2011).

### 3.3 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE HABITABILIDAD

Mediante los modelos calibrados y el Qmd en los días de avistamientos positivos (A+) y negativos (A-), se obtuvo una serie de parámetros físicos para cada uno de los perfiles medidos e interpolados. Pese al amplio período de monitoreo, las condiciones climáticas y geográficas no entregaron un n° de muestras suficiente para realizar pruebas estadísticas más robustas que permitiesen descartar parámetros físicos poco explicativos de los avistamientos. Sin embargo, como se detalla en CEA (2011b), se realizó una división de los datos de acuerdo a intervalos de frecuencia o clases del parámetro respectivo. Se probaron varias longitudes para generar subintervalos, tal que se pudiese observar un patrón entre la distribución de frecuencias de cada parámetro y los avistamientos. Finalmente se seleccionó un subgrupo de parámetros que demostraron ser representativos de la disponibilidad de hábitat del pato cortacorrientes, de acuerdo a la literatura consultada. Una vez definidos los

parámetros a utilizar (velocidad total:  $V_{tot}$ ; profundidad máxima:  $h_{max}$ ; Reynolds modificado:  $Re^{mod} = V_{tot} \cdot h_{max}$ ), se utilizaron dos métodos para cuantificar la habitabilidad del pato cortacorrientes mediante dichos parámetros. Estos métodos se describen a continuación:

- i. Se emplearon las distribuciones de frecuencia generadas previamente para su selección. Primero, se graficaron los puntos medios de los intervalos de frecuencia y el n° acumulado de patos observados en cada caso, eliminando valores repetidos. Luego, la medida o valor de habitabilidad se obtuvo de promediar los puntos medios de los intervalos con avistamientos registrados, considerando los primeros intervalos, desde el primero con avistamientos hasta aquel con máxima frecuencia de observaciones.
- ii. La segunda metodología para estimar la habitabilidad del pato consistió en realizar un análisis de frecuencia tal que fuese posible encontrar una distribución de probabilidad que se ajustase a los datos, para lo cual se realizó el test de  $\chi^2$  para validar el ajuste. Para cada parámetro se extrajeron los valores correspondientes al 95%, 90% y 85% de probabilidad de excedencia ( $P_{exc}$ ).

## 4 RESULTADOS

### 4.1 REQUERIMIENTOS Y AMENAZAS DEL HÁBITAT DEL PATO CORTACORRIENTES

Se tiene que 5 de las 144 especies de Anatidae (patos, cisnes, gansos) del mundo están restringidas a ríos torrentosos de montaña (Madge & Burn, 1995). Una de éstas es el pato cortacorrientes (*Merganetta armata*, Gould 1842), especie que presenta seis subespecies desde Colombia hasta la Patagonia a lo largo de Cordillera de los Andes (Fjeldsa & Krabbe, 1990). En Chile, *M. a. armata* se extiende desde Atacama hasta Tierra del Fuego y también en la Cordillera de Nahuelbuta (Barros, 1967). Se le encuentra principalmente en ríos torrentosos, comúnmente claros, de agua fría y bien oxigenada, con un substrato de gravas y bolones, con una baja presencia de arena y de barro (Eldridge, 1986).

Su alimento se basa en invertebrados acuáticos que forrajea contra la corriente, descansando en las rocas que emergen a la superficie, llamadas rocas islas (Housse, 1945; Barros, 1967; Sardina *et al.*, 2007; Cerón *et al.*, 2010). En la cuenca del río CA, el n° de rápidos, la pendiente, la posición en relación a la bocatoma, el caudal, la velocidad del agua y la abundancia de conespecíficos, se identificaron como atributos relevantes en sus preferencias de hábitat (Pernollet, 2010). Se observó también un efecto positivo del n° de rápidos y de la pendiente para los puntos situados aguas arriba de las bocatomas y del n° de rápidos, del caudal y de los índices de velocidad para los puntos situados aguas abajo. Además, los patos parecerían elegir un tipo de ancho y una forma de la caja del río según el caudal del río, evitando las cajas anchas posiblemente porque disminuyen la velocidad de escurrimiento y la presencia de rápidos (Pernollet, 2010).

Se encontró que, además de la velocidad y el caudal como factores determinantes en la selección del hábitat de esta especie, la profundidad del agua también parece ser relevante,

dada la característica buceadora del pato cortacorrientes. La morfología del pato en su estado adulto es: 40-46 cm, largo alar: 132-184 cm, tarso: 38-41 cm, pico: 25-31 mm, peso: 315-440 g (Madge & Burn, 1995; Carboneras, 1992). En dos ríos de Venezuela, se observaron patos de manera más frecuente en zonas de “rápido” ( $1,12 \pm 0,13$  y  $1,34 \pm 0,36$  m/s) y “correntoso” ( $1,11 \pm 0,17$  y  $0,97 \pm 0,22$  m/s) (Vila & Aprile, 2005). Eldridge (1986) los vio chapotear a poca profundidad (0,10 y 0,20 m).

En Chile, la subespecie *M. a. armata* no se clasifica en alguna categoría de amenaza a nivel nacional (CONAF, 1993) y se describe como insuficientemente conocida (Rottmann & López-Callejas, 1992). Sin embargo, en el Libro Rojo de la Región del General Libertador Bernardo O’Higgins (Estades & Vukasovic, 2007) se la indica como “vulnerable”. Entre los factores antrópicos propuestos como amenazas están: erosión por deforestación, contaminación del agua, competencia o depredación por animales alóctonos y la actividad hidroeléctrica (Carboneras, 1992; Madge & Burn, 1995). El seguimiento de la especie en la cuenca del río CA evidenció un efecto negativo en la abundancia de patos de las bocatomas Coya y Pangal y una sensibilidad de la especie a la presencia de tráfico vehicular (Pernollet, 2010). Como amenazas naturales, las crecidas aumentan la mortalidad de los individuos. En mayo de 2008 una crecida en la cuenca del río CA, provocó una disminución de patos y una carencia de reproducción en esa temporada (Pernollet, 2010).

## **4.2 MODELACIÓN HIDRÁULICA**

Los resultados de la modelación hidráulica, para los distintos caudales en los puntos y días de monitoreo, se resumen en CEA (2011b), donde se señala la fecha del monitoreo, la estación, el Qmd, los perfiles topobatimétricos medidos cercanos a la zona de monitoreo y los valores correspondientes de los parámetros seleccionados para el análisis. En total se obtuvieron 60 datos de avistamientos positivos de patos (A+) y 30 datos de avistamientos negativos (A-).

## **4.3 SELECCIÓN DE PARÁMETROS REPRESENTATIVOS DEL HÁBITAT**

La Tabla 3 muestra los puntos medios de los intervalos de frecuencia de las variables seleccionadas para A+ y los promedios de los puntos destacados. La Figura 3 muestra los intervalos de frecuencia, graficados según los puntos medios de la Tabla 3, además de los A+ según el n° de patos observados y la magnitud del parámetro correspondiente. Se observa una mayor cantidad de A+ con baja abundancia (< 2 patos) y bien distribuidos en la longitud del intervalo total. En la Figura 3, la profundidad muestra una mayor cantidad de patos en los primeros tres intervalos, lo cual condujo a seleccionar los mismos intervalos (o solo hasta el peak) en las demás variables (valores destacados en Tabla 3).

Los resultados de velocidad, A+ versus A-, indican una velocidad máxima aproximada a partir de la cual la presencia de patos es menor. Esto podría relacionarse con la profundidad, si se considera el peak de A- como una profundidad mínima aceptable. En efecto, a menor profundidad existirían problemas para que el pato se sumerja en búsqueda de alimento. Si se conserva constante el caudal, a menor profundidad habrá mayor velocidad, indicando una limitante que relaciona dichas variables, lo cual se estaría reflejando en el peak de A- (ver Figura 3a). A velocidades pequeñas tampoco es posible

encontrar presencia de patos, lo cual sería equivalente al caso de profundidades muy elevadas.

El monitoreo y la literatura corroboran los resultados, pues se espera su presencia en zonas tormentosas y con rocas islas, lo cual indica que las profundidades no pueden ser excesivas para permitir su alimentación. Tal es el caso de crecidas importantes, como ocurrió en la crecida del año 2008, que provocó un aumento súbito del nivel de agua y un lavado del alimento de la especie (Pernollet, 2010). Estas condiciones provocan la destrucción de nidos y aumentan la mortalidad de individuos (Adams *et al.*, 1997).

Por otra parte, se generaron curvas de duración a partir de los datos señalados en el Punto 4.2 a modo de generar, mediante una metodología conocida, valores alternativos e independientes de los parámetros de habitabilidad. Se eliminaron valores repetidos y casos de A- previamente. La Tabla 4 muestra una versión resumida de las curvas de duración generadas.

Finalmente, ambos métodos señalados han permitido obtener un criterio cuantitativo para estimar la habitabilidad del Pato Cortacorrientes. La Tabla 5 muestra el resultado final obtenido a partir del primer método (promedio de valores destacados en Tabla 3) y la Tabla 6 muestra los valores estimados mediante el segundo método. Estos valores son empleados para determinar los Qeco asociados al pato cortacorrientes.

Tabla 3. Intervalos de frecuencia caracterizados por el punto medio y promedio de valores destacados (\*), representativos de los requerimientos de hábitat del pato cortacorrientes (Fuente: CEA, 2011b).

|                              | $V_{tot}$ (m/s) | $h_{max}$ (m) | $Re^{mod}$ (m <sup>2</sup> /s) |
|------------------------------|-----------------|---------------|--------------------------------|
|                              | 0               | 0             | 0                              |
|                              | 0,27*           | 0,19*         | 0,18*                          |
| Punto medio de subintervalos | 0,75*           | 0,57*         | 0,73*                          |
|                              | 1,16*           | 0,95*         | 1,46                           |
|                              | 1,57            | 1,33          | 2,19                           |
|                              | 1,98            | 1,70          | 2,92                           |
|                              | 2,39            | 2,08          | 3,65                           |
| Promedio Valores Destacados* | 0,72            | 0,57          | 0,45                           |

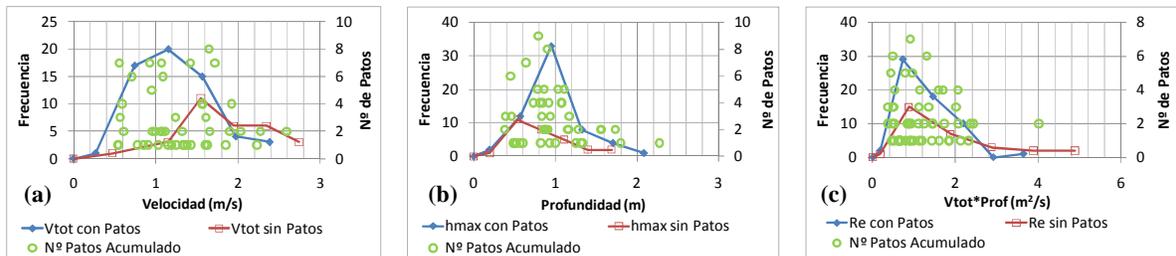


Figura 3. Intervalos de frecuencia de parámetros seleccionados (respecto a puntos medios de intervalos). En azul (rombo) valor del parámetros para A+. En rojo (cuadrado) valor del parámetros para A-. En verde (círculo) nº de patos avistados según valor de parámetros. (a)  $V_{tot}$ , (b)  $h_{max}$  y (c)  $Re^{mod}$  (Fuente: CEA, 2011b).

Tabla 4. Resumen del ajuste a una distribución de probabilidad realizado sobre los resultados de la modelación hidráulica (Fuente: CEA, 2011b).

|                             | $h_{\max}$ | $V_{\text{tot}}$ | $Re^{\text{mod}}$ |
|-----------------------------|------------|------------------|-------------------|
| Pexc (%)                    | Log-Normal | Normal           | Log-Normal        |
| 95                          | 0,44       | 0,46             | 0,40              |
| 90                          | 0,51       | 0,65             | 0,49              |
| 85                          | 0,57       | 0,77             | 0,56              |
| 80                          | 0,62       | 0,87             | 0,63              |
| 70                          | 0,70       | 1,02             | 0,75              |
| 60                          | 0,79       | 1,16             | 0,88              |
| 50                          | 0,88       | 1,28             | 1,01              |
| 25                          | 1,16       | 1,62             | 1,48              |
| 10                          | 1,49       | 1,92             | 2,08              |
| 5                           | 1,73       | 2,10             | 2,56              |
| $\chi^2(\text{calculado})=$ | 1,43       | 0,53             | 5,65              |
| $\chi^2(0,05)=$             | 11,07      | 11,07            | 12,59             |
| Test                        | Aceptado   | Aceptado         | Aceptado          |

Tabla 5. Umbrales de los parámetros seleccionados para el pato cortacorrientes, obtenidos a partir del primer criterio, basado en los intervalos de frecuencia de los avistamientos (Fuente: CEA, 2011b).

| Variable  | Nomenclatura      | Promedio |
|---|-------------------|----------|
| Velocidad Total (m/s)   | $V_{\text{tot}}$  | 0,72     |
| Profundidad Máxima (m)  | $h_{\max}$        | 0,57     |
| Reynolds Mod. = $V_{\text{tot}} \cdot h_{\max}$ (m <sup>2</sup> /s) | $Re^{\text{mod}}$ | 0,45     |

Tabla 6. Umbrales de los parámetros seleccionados para el pato cortacorrientes, obtenidos a partir del segundo criterio, basados en el análisis de frecuencia de los avistamientos (Fuente: CEA, 2011b).

| Variable  | Nomenclatura      | Distr. de Prob. | Pexc 85% | Pexc 90% | Pexc 95% |
|---|-------------------|-----------------|----------|----------|----------|
| Velocidad Total (m/s)   | $V_{\text{tot}}$  | Normal          | 0,77     | 0,65     | 0,46     |
| Prof. Máxima (m)  | $h_{\max}$        | Log-Normal      | 0,57     | 0,51     | 0,44     |
| Reynolds Mod. = $V_{\text{tot}} \cdot h_{\max}$ (m <sup>2</sup> /s) | $Re^{\text{mod}}$ | Log-Normal      | 0,56     | 0,49     | 0,4      |

#### 4.4 CAUDAL ECOLÓGICO

El criterio seleccionado para calcular el Qeco es aquel menos restrictivo para el interés del PHNA (Pexc 95% en Tabla 6), a partir de cuyos resultados se seleccionaron los caudales más favorables para la especie (la sección crítica donde el caudal requerido era máximo) (CEA, 2011). La Tabla 7 muestra los caudales calculados en los perfiles con A+. La selección final se presenta en la Tabla 8.

Como se indica en la Tabla 7, los caudales no serán los mismos en todos los perfiles, ya que las condiciones hidráulicas no son homogéneas en los ríos, por lo cual se selecciona el mayor caudal, considerando también su magnitud tras su transposición a la bocatoma respectiva. Aunque no está libre de incertidumbre, como primera aproximación se consideró la transposición por proporción de áreas. Cabe señalar que la selección del caudal máximo asegura que se cumpla la condición de habitabilidad en todos los demás perfiles analizados (con A+), por lo cual su determinación no es arbitraria en este punto.

Tabla 7. Caudales ecológicos asociados a los requerimientos de hábitat del pato cortacorrientes en todos los puntos de monitoreo disponibles en la zona de estudio (Fuente: CEA, 2011).

| Río        | N° Perfil | Qeco Basado en $V_{tot}$     |                                | Qeco Basado en $h_{max}$     |                                | Qeco Basado en $Re^{mod}$    |                                |
|------------|-----------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
|            |           | Caudal en Perfil ( $m^3/s$ ) | Caudal en Bocatoma ( $m^3/s$ ) | Caudal en Perfil ( $m^3/s$ ) | Caudal en Bocatoma ( $m^3/s$ ) | Caudal en Perfil ( $m^3/s$ ) | Caudal en Bocatoma ( $m^3/s$ ) |
| Las Leñas  | 20        | <0,33                        | <0,33                          | 0,75                         | 0,71                           | 0,95                         | 0,89                           |
|            | 17        | <0,33                        | <0,33                          | 1,10                         | 1,02                           | 1,08                         | 1,01                           |
|            | 16        | 1,805                        | 1,68                           | 0,55                         | 0,51                           | 2,33                         | 2,17                           |
|            | 7         | <0,33                        | <0,33                          | 0,87                         | 0,75                           | 1,26                         | 1,09                           |
|            | 1         | <0,33                        | <0,33                          | 1,47                         | 1,26                           | 0,70                         | 0,60                           |
| Cortaderal | 28        | 4,78                         | 4,67                           | <1,1                         | <1,1                           | 3,90                         | 3,81                           |
|            | 25        | 1,544                        | 1,49                           | <1,1                         | <1,1                           | 3,83                         | 3,69                           |
|            | 24        | <1,1                         | <1,1                           | 2,33                         | 2,00                           | 2,89                         | 2,48                           |
|            | 16        | 3,97                         | 3,22                           | <1,1                         | <1,1                           | 5,97                         | 4,84                           |
|            | 15        | <1,1                         | <1,1                           | <1,1                         | <1,1                           | 2,07                         | 1,68                           |
|            | 13        | 1,71                         | 1,35                           | 1,95                         | 1,55                           | 4,04                         | 3,20                           |
| Cachapoal  | 12        | <1,23                        | <1,23                          | 2,09                         | 2,09                           | 3,57                         | 3,57                           |
|            | 11        | 2,82                         | 2,82                           | <1,23                        | <1,23                          | 3,67                         | 3,67                           |

Tabla 8. Qeco asociados a perfiles críticos (Fuente: Adaptado de CEA, 2011).

| Río        | N° Perfil | Perfil Crítico | Caudal Medio Anual ( $m^3/s$ ) | Caudal Ecol. Oper.* ( $m^3/s$ ) | Caudal en Perfil ( $m^3/s$ ) | Caudal en Bocatoma ( $m^3/s$ ) | Condición Dominante |
|------------|-----------|----------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|--------------------------------|---------------------|
| Las Leñas  | 16        | ll03           | 6,56                           | 0,7                             | 2,33                         | 2,17                           | $Re^{mod}$          |
| Cortaderal | 16        | CO09           | 22,17                          | 0,74                            | 5,97                         | 4,84                           | $Re^{mod}$          |
| Cachapoal  | 11        | P2-LNA         | 24,69                          | -                               | 3,67                         | -                              | $Re^{mod}$          |

\*Máximo Qeco de operación propuesto por PHNA, entre noviembre y marzo. Cachapoal no contempla bocatoma para este proyecto.

Finalmente, las áreas de importancia ambiental (AIA), donde se debe vigilar que se cumpla el mantenimiento del hábitat (DGA, 2008a), han sido seleccionadas considerando que la especie ocupa territorios específicos cuya extensión es aproximadamente de un kilómetro (CEA, 2011b). De esta forma, todas aquellas estaciones de monitoreo con A+ fueron utilizadas como referencia, tomando un tramo de 500 m hacia aguas arriba y 500 m hacia aguas abajo de un punto de monitoreo, considerando el punto del río que forma una perpendicular con la estación de referencia (CEA, 2011).

## 5 SÍNTESIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los resultados (ver Tabla 8) señalaron que en el río Cachapoal (CA), el requerimiento en la sección crítica es de  $3,67 m^3/s$ , lo que representa el 15% de su  $Q_{ma}$ ; en el río Cortaderal (CO), el requerimiento en la sección crítica es de  $5,97 m^3/s$ , lo que representa el 27% de su  $Q_{ma}$ ; y, finalmente, en el río Las Leñas (LL), el requerimiento en la sección crítica es de  $2,33 m^3/s$ , lo que representa el 36% de su  $Q_{ma}$ . Estos resultados indican que el criterio hidrológico definido por la DGA (2008b), que establece como límite máximo otorgable el 20% del  $Q_{ma}$ , no permitiría preservar el hábitat del pato cortacorrientes en los ríos CO y LL, donde se está evaluando ambientalmente el PHNA.

Se define la sección crítica como aquella con el mayor requerimiento de caudal, tal que satisfaga los criterios propuestos. Dado que los Qeco propuestos atienden las necesidades de estas secciones, ya sea por su sección transversal y/o pendiente, estos satisfacen las necesidades de las demás secciones evaluadas y preservan el hábitat en todas las zonas donde se detectó la presencia de la especie.

La literatura consultada indica que el largo del pato cortacorrientes, en estado adulto, oscila entre los 40 y 46 cm (Madge & Burn, 1995; Carboneras, 1992) y que la menor velocidad en la cual ha sido reportado es de  $0,97 \pm 0,22$  m/s (Vila & Aprile, 2005). Los resultados de la Tabla 6 (Pexc95%) señalan que la profundidad mínima requerida es de 44 cm, lo cual sería apropiado a las dimensiones promedio de la especie adulta, mientras que la velocidad mínima requerida es de 0,46 m/s, lo cual está por debajo de lo mínimo reportado. Estas diferencias podrían deberse a las diferencias en la morfología de los ríos estudiados, sin embargo, se puede indicar que los requerimientos propuestos son conservadores, por cuanto estarían asegurando condiciones mínimas aceptables, dados los antecedentes empleados.

En el caso del río CO, la geometría dominante es de secciones rectangulares o anchas y pendientes altas alternadas con pendientes bajas durante largos tramos, mientras que el río LL presenta secciones más estrechas y pendientes continuamente altas, salvo las variaciones esperadas como resultado de la granulometría típicamente gruesa en ríos de alta montaña. De esta forma, pequeños cambios en el caudal son relativamente más influyentes en CO, lo cual se ve reflejado en la menor proporción de caudal ecológico requerido, respecto al  $Q_{ma}$ , necesaria para cumplir con los requerimientos del pato cortacorrientes (Gippel & Stewardson, 1998).

Debido a la complejidad de los ríos de alta montaña, además de la necesidad de contar con suficiente topobatemetría, se requiere contar con aforos que permitan calibrar los modelos hidráulicos. En este estudio, la mayor parte de los caudales empleados son medios diarios, pese al 40% de variación diaria que se observó en CO. Para desarrollar estudios de Qeco, se requiere que los consultores informen al cliente respecto de las limitaciones reales de este tipo de procedimientos, muchas veces con plazos poco realistas. Del mismo modo, se estima que la Autoridad debiera elaborar en el corto plazo requisitos mínimos para considerar como aceptable un estudio de Qeco, unificando criterios entre las regiones, previa consulta a especialistas, autoridades, stakeholders y sociedad civil en general. Hoy en día, de acuerdo a la forma en que se creó el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), corresponde al titular del proyecto la responsabilidad ex-ante de evaluar de los impactos.

El monitoreo del pato cortacorrientes, si bien pudo ser empleado para los fines de este estudio, no fue diseñado para esto. Se requiere mejorar la información de usos del hábitat mediante un seguimiento continuo de los individuos, con el apoyo del registro horario de las estaciones DGA. Los vacíos en el registro fluviométrico deben ser controlados para evitar un monitoreo infructuoso. En este sentido, es necesaria una mayor coordinación entre la autoridad encargada de las estaciones y el equipo de investigación que aborde futuras mejoras a este estudio.

Los bajos caudales calculados en el río CA deben ser revisados, pues se considera que la información disponible para su modelación es insuficiente para validar los resultados. Los ríos LL y CO, por su parte, pueden ser mejorados con una mayor cantidad de aforos, ya que el uso de caudales medios diarios en cuencas con variaciones diarias importantes introduce incertidumbre adicional.

El uso de caudales medios diarios en los días de A+ y A- no resulta apropiado, ya que el pato cortacorrientes realiza naturalmente movimientos diarios dentro de su territorio y movimientos estacionales altitudinales, dependiendo de la actividad reproductiva, de las variaciones del caudal natural y de las nevazones en altitud (Pernollet, 2010). Estas variables conductuales de la especie no pudieron ser correctamente consideradas en este trabajo. El tamaño del territorio de una pareja y su comportamiento territorial parecen variar según el periodo del año (Pernollet, datos no publicados). En este contexto, se requiere estudiar cuál es la respuesta de los individuos frente a la regulación del flujo y a la alteración de la periodicidad del río, cómo varía la calidad del hábitat hacia aguas abajo de una bocatoma y si la altitud a la cual se ubican las bocatomas influye en el nivel de impacto sobre el hábitat del pato. Frente a un río regulado por una bocatoma, se plantean cuatro hipótesis sobre la respuesta de una población de patos, entendiendo una población como aquella que habita en un cauce:

- a) Se repartirá aguas arriba y aguas abajo de la bocatoma, encontrando hábitats sustentables a lo largo del río, en ambos sectores.
- b) Se concentrará de manera preferencial en las secciones aguas arriba de la bocatoma, pero hasta una cierta densidad, a razón de una pareja/km.
- c) Utilizará los hábitats aguas abajo de la bocatoma, pero requerirá un territorio más grande ( $> 1$  km) para satisfacer sus necesidades, debido a su menor calidad, y un gasto energético mayor para defenderlo, debido a su mayor extensión.
- d) Migrará completa o una parte a otra cuenca, debido a que las condiciones alteradas del hábitat no permiten su uso.

Debido a la limitación de plazos y recursos impuestos por el proceso de evaluación ambiental que dio origen a este trabajo, la metodología y los resultados presentados aquí deben ser considerados como una primera aproximación y no como algo definitivo. Aunque Collier (1998) reportó un caso similar en Nueva Zelanda, para el pato azul, se recomienda realizar estudios adicionales en Chile que consideren al pato cortacorrientes en el cálculo del Qeco y evaluar la efectividad de los caudales presentados aquí.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores desean agradecer la colaboración de Felipe Sandoval y Humberto Gutiérrez en el trabajo de terreno y la modelación hidráulica. Así mismo se agradece el financiamiento entregado por el Centro de Ecología Aplicada para la presentación de este trabajo y las correcciones y consejos entregados por Karla González.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

Adams, J.; Cunningham, D.; Mohillo, J.; Phillipson, S. (1997). Blue Duck (Whio), *Hymenolaimus malacorhynchos*. 1997-2007. Recovery Plan. Threatened species recovery plan. Department of conservation, Nueva Zelanda.

Barros, R. (1967). El pato cortacorrientes *Merganetta armata* (Gould). Revista Universitaria 52: 121-125.

Carboneras, C. (1992). Family *Anatidae* (ducks, geese and swans). Pág. 536-628 en Handbook of the birds of the world. Vol. 1. Ostrich to ducks (del Hoyo, J., A. Elliott and J. Sargatal, Eds.). Lynx Edicions, Barcelona, España.

CEA (Centro de Ecología Aplicada). 2011. Estimación del Caudal Ecológico. Proyecto Hidroeléctrico Nido de Águila, Anexo G de Adenda 1. Preparado por el CEA para Pacific Hydro. En Línea: [http://seia.sea.gob.cl/elementosFisicos/enviados.php?id\\_documento=5524700&modo=iframe](http://seia.sea.gob.cl/elementosFisicos/enviados.php?id_documento=5524700&modo=iframe)

CEA (Centro de Ecología Aplicada). 2011b. Anexo G.5: Estimación de los Parámetros Indicadores de los Requerimientos de Hábitat del Pato Cortacorrientes. Proyecto Hidroeléctrico Nido de Águila, Anexo G de Adenda 1. Preparado por el CEA para Pacific Hydro. En Línea: [http://seia.sea.gob.cl/elementosFisicos/enviados.php?id\\_documento=5524700&modo=iframe](http://seia.sea.gob.cl/elementosFisicos/enviados.php?id_documento=5524700&modo=iframe)

Cerón, G.; Trejo, A.; Kun, M. (2010). Feeding Habits of Torrent Ducks (*Merganetta armata armata*) in Nahuel Huapi National Park, Argentina. Waterbirds 33: 228-235.

Collier, K. (1998). Defining a Suitable Flow Regime for Blue Duck on Rangipo Reach of Tongariro River. NIWA client report ELE 300/3, National Institute of Water and Atmospheric Research, Hamilton, New Zealand.

CONAF (Corporación Nacional Forestal) (1993). Libro Rojo de los Vertebrados Terrestres de Chile. A. Glade (ed.), Segunda Edición, Santiago, Chile.

CONAMA (1997). Resolución Exenta N° 023/97.

DGA (Dirección General de Aguas) (2008a). Determinación de Caudales Ecológicos en Cuencas con Fauna Íctica Nativa y en Estado de Conservación. S.I.T. N° 187. Chile.

DGA (Dirección General de Aguas) (2008b). Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos. S.I.T. N° 156. Chile.

DGA (Dirección General de Aguas) (2010). Oficio Ord. N° 1066 de pronunciamiento complementario EIA Nido de Águila. En Línea: [http://seia.sea.gob.cl/archivos/C\\_Documents\\_and\\_Settings\\_Eric\\_Escritorio\\_ORD\\_N\\_1006\\_DGA\\_NIDO\\_DE\\_AGUILA.pdf](http://seia.sea.gob.cl/archivos/C_Documents_and_Settings_Eric_Escritorio_ORD_N_1006_DGA_NIDO_DE_AGUILA.pdf)

- Eldridge, J. C. (1986). Observations on a pair of Torrent Ducks. *Wildfowl* 37: 113-122.
- Estades, C. & Vukasovic, M.A. (2007). Estado de Conservación de las Aves de la Región de O'Higgins. Pág. 53-58 en Libro Rojo de la Región de O'Higgins. (Serey, M. Ricci and C. Smith-Ramírez Eds.). Corporación Nacional Forestal – Universidad de Chile, Rancagua, Chile.
- Fjeldsa, J. & Krabbe, N. (1990). *Birds of the High Andes*. University of Copenhagen, Copenhagen.
- Gippel, C. & Stewardson, M. (1998). Use of Wetted Perimeter in Defining Minimum Environmental Flows. *Regul. Rivers: Res. Mgmt.* 14: 53–67.
- Green, A. (1996). Analyses of Globally Threatened Anatidae in Relation to Threats, Distribution, Migration Patterns, and Habitat Use. *Conservation Biology* 10: 1435-1445.
- Housse, R. (1945). *Las aves de Chile. Su vida y costumbres*. Ediciones de la Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Madge, S. & Burn, H. (1995). *Guide des canards, des oies et des cygnes*. Delachaux et Niestlè, France.
- Meza, R. I. (2009) Aplicación y Análisis de un Sistema Experto Basado en Lógica Difusa para la Evaluación del Hábitat de Peces Nativos en el Río Huequecura. Tesis para optar al grado de Magíster. Departamento de Ing. Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Pernollet, C. (2010). Selección de hábitat y efectos de las crecidas en el pato cortacorrientes (*Merganetta armata armata*) en dos ríos intervenidos de la Región de O'Higgins (Chile Central): implicancias para su conservación. Tesis para obtener el título de Magíster en Áreas Silvestres y Conservación de la Naturaleza, Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile, Santiago, Chile. 60 pp.
- Pernollet, C. & Meza, R.I. (2011). Habitat selection by *Merganetta armata* and its sustainable stream flow requirements in the headwaters of a Chilean Andean river. Student Conference on Conservation Science. University of Cambridge, UK.
- Rottmann, J. & López-Callejas, M.V. (1992). Estrategia Nacional de Conservación de Aves. UNORCH. Serie Técnica, año 1, N° 1.
- Sardina, P.; Politi, N. & Rivera, L. (2007). ¿Son los sitios de descanso un componente importante en el hábitat para el pato de los torrentes (*Merganetta armata*)? Poster Congreso de Ornitología de Tucumán, Argentina.
- Vila, A. & Aprile, G. (2005). Línea de base “Pato de los Torrentes” (*Merganetta armata*) Estancia "Los Huemules" El Chaltén, Santa Cruz, Argentina. Informe Final. Unidad Académica Caleta Olivia. Universidad Nacional de la Patagonia Austral. Argentina.