

CAMBIOS HIDROLÓGICOS Y MORFOLÓGICOS EN EL RÍO CHUBUT AGUAS ABAJO DE LA PRESA FLORENTINO AMEGHINO

Gabriel Kaless¹, Felix Matamala², Belisario Monteros¹, Winston Greco²

¹Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco

²Dirección General de Obras Hídricas de la Provincia del Chubut

Av. 9 de Julio 25, CP 9100, Trelew, Chubut; 2965 428403; dich1@tw.unp.edu.ar

RESUMEN

La implantación de una represa altera sustancialmente las variables que controlan la morfología de un río, a saber: el régimen hídrico y en el aporte de sedimentos. En la literatura han sido documentados casos típicos de fenómenos de incisión aguas abajo de las represas debido al paso de las “aguas claras”, es decir, privadas de sedimentos. En el presente estudio se expone un caso de atrofiamiento de cauce con leve ascenso del fondo en el Río Chubut en la sección del Puente Gaiman ubicada a 136 km aguas abajo de la Presa Florentino Ameghino, en la Provincia del Chubut.

A partir de mediciones realizadas en el periodo 1934-1946, previas a la construcción de la presa, y de registros actuales de aforos (periodo 1993-2007), junto con nuevos relevamientos topográficos, ha sido posible cuantificar los cambios ocurridos luego de la construcción de la presa. Se ha analizado la alteración del régimen hídrico a través de las curvas de permanencia de caudales, su distribución anual y la probabilidad de ocurrencia de crecidas. También se ha determinado el caudal de cauce lleno (bankfull discharge) para ambas situaciones con el que se analizó la evolución de varios parámetros hidráulicos (tensión de corte, velocidad media, rugosidad, potencia del flujo). Respecto a los cambios en la morfología se han empleado como herramientas de análisis la geometría hidráulica del curso, la ubicación del fondo y la inspección directa de secciones transversales.

El caudal de cauce lleno, responsable de la modelación de la geometría del canal, se redujo un 55% pasando de 97 m³/s en la situación pre-dique a 53,8 m³/s en la actualidad. Esto se condice con una sección transversal más angosta y relativamente más profunda donde la sedimentación se produjo preferencialmente en los laterales del canal. Sin embargo también se ha registrado el ascenso del lecho. Si bien la magnitud de las crecidas se redujeron dramáticamente con la implantación de la presa, los cambios morfológicos en el cauce han aumentando el riesgo de desborde. Al igual que en la situación pre-dique, hoy el valle es propenso a inundarse con eventos de recurrencia entre 5 y 10 años.

Palabras claves: atrofiamiento, acreción, Río Chubut, Presa F. Ameghino.

INTRODUCCIÓN

Todas las presas alteran el sistema fluvial que se ubica aguas abajo de las mismas, tanto en los aspectos físicos como en los ecosistemas asociados. Dentro de las alteraciones al medio físico es común encontrar casos de incisión del lecho (degradation) producto de una corriente con elevada capacidad de transporte de sedimentos y ausencia total de aportes de sedimentos porque quedan retenidos en los embalses. Este es un fenómeno conocido y que ha sido nominado como “efecto de las aguas claras”.

En nuestro país se ha documentado los efectos sobre varios sistemas fluviales. Un ejemplo del “efecto de las aguas claras” es el Río San Juan, tal como lo documentan Grimalt et al (2005). Este caso presenta descensos del nivel del cauce de 10 a 11 m en correspondencia del Azud Dique Nivelador ubicado a 4 km aguas abajo de la Presa Quebrada de Ullum. A nivel internacional las respuestas de los cursos han sido ampliamente documentados. En Italia, Da Canal et al (2007) analizan el caso paradigmático del Río Piave que se ha angostado en un 50% e incidido en 2 a 3m (Da Canal, et al, 2007). Entre las consecuencias más directas de este proceso de incisión se encuentran la pérdida de los recursos hídricos subterráneos y el riesgo de inestabilidad de numerosas obras de infraestructuras (puentes, azudes, protecciones de márgenes). También Surian y Rinaldi (2003) ilustran casos similares de incisión en el resto de Europa y Estados Unidos agregando como elemento de análisis el trazado planimétrico del río. Al respecto han identificado las instancias por las que transitan los ríos de gravas que originalmente eran del tipo entrelazado (multicursales) y han migrado a otras configuraciones morfológicas como cursos pseudomeandriiformes y rectos (monocursales).

Los factores que determinan la respuesta de los cursos naturales son: sus propias características, la distancia a la presa y el aporte de sedimentos y masa hídrica que reciben de la cuenca definida por la sección analizada y la presa. Considerando la relación entre estas variables Brandt (2000) analizó y propuso un esquema de clasificación de posibles efectos, a partir de la interpretación de la Balanza de Lane (1955). Un interesante ejemplo de una respuesta distinta a las anteriormente señaladas lo ofrecen Trush et al (2000) quienes exponen el caso del Río Trinidad (Trinity River) en los Estados Unidos. Luego de la construcción de dos presas, el río comenzó un proceso de atrofiamiento debido a la eliminación de las crecidas invernales que limitaban el avance de la vegetación en el cauce. La ausencia de aportes de sedimentos modificó la morfología del fondo eliminando los bancos con la pérdida de hábitat para la fauna. El caso del Río Trinidad resulta interesante por su similitud con el Río Chubut en relación a los cambios morfológicos. La sección estudiada del Río Chubut se ubica a 136 km aguas abajo del dique Florentino Ameghino. Se trata de un tramo de depósito no perturbado por el “efecto de las aguas claras”. En él la sección ha experimentado un profundo proceso de atrofiamiento adaptándose al nuevo régimen de caudales impuesto por la central hidroeléctrica y al aporte de sedimentos proveniente del mismo cauce y de las cuencas aluvionales (ver figura 1).

El objetivo del presente artículo es informar los cambios morfológicos ocurridos en el Río Chubut en los últimos 63 años, de los cuales los últimos cuarenta corresponden a la operación del aprovechamiento hidroeléctrico Florentino Ameghino. Se aportan datos cuantitativos del fenómeno de atrofiamiento y acreción (agradation); y se analizan las implicaciones de las variaciones morfológicas en la seguridad hídrica en el Valle Inferior del Río Chubut.

GENERALIDADES DEL ÁREA DE ESTUDIO

Cuenca hidrográfica y Valle Inferior del Río Chubut

El Río Chubut tiene sus nacientes en los sectores cordilleranos de las provincias del Chubut y Río Negro. La cuenca abarca una superficie de 53.234 km² extendiéndose hasta el Océano Atlántico donde el Río Chubut encuentra su desembocadura. Al dejar el ambiente cordillerano, el río atraviesa la meseta patagónica sin recibir aportes de ningún tributario permanente. Solamente durante las esporádicas tormentas, los arroyos efímeros se activa y descargan torrencialmente en el río.

En el extremo oriental de la provincia del Chubut, a 190 km aguas arriba de la desembocadura en el Océano Atlántico, se encuentra la presa Florentino Ameghino (figura 1). La presa regula las aguas del Río Chubut y los aportes temporarios del Río Chico, que confluían a pocos kilómetros aguas arriba, antes de crearse el embalse. Hacia aguas abajo, a lo largo de 75,5 km, el río transita por un estrecho valle flanqueado por numerosas cuencas torrenciales. Estas cuencas se desarrollan en un área de 92.402 ha y aportan importantes volúmenes líquidos y sólidos al Río Chubut cuando se producen intensas tormentas de corta duración. Al final del tramo el valle se ensancha abruptamente para constituir el Valle Inferior del Río Chubut (V.I.R.Ch.).

El V.I.R.Ch. posee 42.000 ha de suelos fértiles aptos para actividades agrícolas y ganaderas. También es sede de numerosos asentamientos poblacionales como las ciudades de Rawson (capital de la provincia del Chubut), Trelew, Gaiman, Dolavon y varias zonas rurales. El clima en el V.I.R.Ch. es árido, templado frío y ventoso. Las escasas precipitaciones se producen a lo largo de todo el año con un leve acento en los estaciones de otoño e invierno. La precipitación anual asciende a 185 mm.

Aspectos geológicos del VIRCh

El valle del Río Chubut, entre el Dique Florentino Ameghino y el mar, está labrado sobre rocas volcánicas riolíticas (F. Marifil, Jurásico) y sedimentitas marinas y continentales (F. Puerto Madryn, F. Sarmiento y equivalentes, Terciario). Las vulcanitas afloran entre el Dique F. Ameghino y las cercanías de 28 de Julio y las formaciones sedimentarias aparecen en el subsuelo, desde la desaparición de las vulcanitas hasta el mar. Sobre ese sustrato rocoso, al final del Cuaternario se produjeron los fenómenos geológicos que terminaron modelando el valle.

En el Pleistoceno se produjo la pedimentación de las formaciones sedimentarias y su cubierta con un manto de rodados (F. Tehuelche), para formar las mesetas que flanquean el valle. Al Holoceno se atribuye la descarga en el mar de un río antecesor o “protochubut”, de mayor caudal y energía, que depositó sedimentos gruesos en tres niveles de terrazas, ubicadas aproximadamente a 20, 40 y 110m por encima del valle actual. A este Período pertenecen también las oscilaciones del nivel del mar, que dejaron paleo relieves de cordones litorales, albuferas y médanos, en los relieves más bajos del valle.

La actual planicie de inundación del Valle Inferior del Río Chubut se ha desarrollado bajo estas condiciones geológicas complejas. Así, por ejemplo, a la altura de Gaiman se ha descrito el siguiente perfil de suelo, constituido por cuatro horizontes distintivos (Hernández, M. 1983):

0,0 – 3,0m	Arena gruesa con grava fina intercalada
3,0 – 8,0m	Limo de alta plasticidad (MH) negro
8,0 – 21,0m	Grava fina a gruesa con niveles arenosos

21,0 – 24,0m Toba cinerítica

El manto de grava aflora desde el inicio del VIRCH hasta las proximidades de Dolavon y yace en el fondo del valle, desde esta localidad hasta el mar. Su origen se atribuye a la sedimentación que produjo el río “protochubut” antecesor. Sobre él se encuentran los sedimentos provenientes del Río Chubut actual, de las intrusiones del mar y de los aportes eólicos, constituidos limos de alta plasticidad, limos arenosos y arenas finas.

Las arenas finas y los limos arenosos dominan en los albardones que bordean el cauce, mientras que los limos MH negros aumentan en potencia hacia el Este alcanzando 16m en Trelew, donde inician el perfil desde la superficie, reemplazando a los suelos arenosos que saltuariamente aparecen en Gaiman.

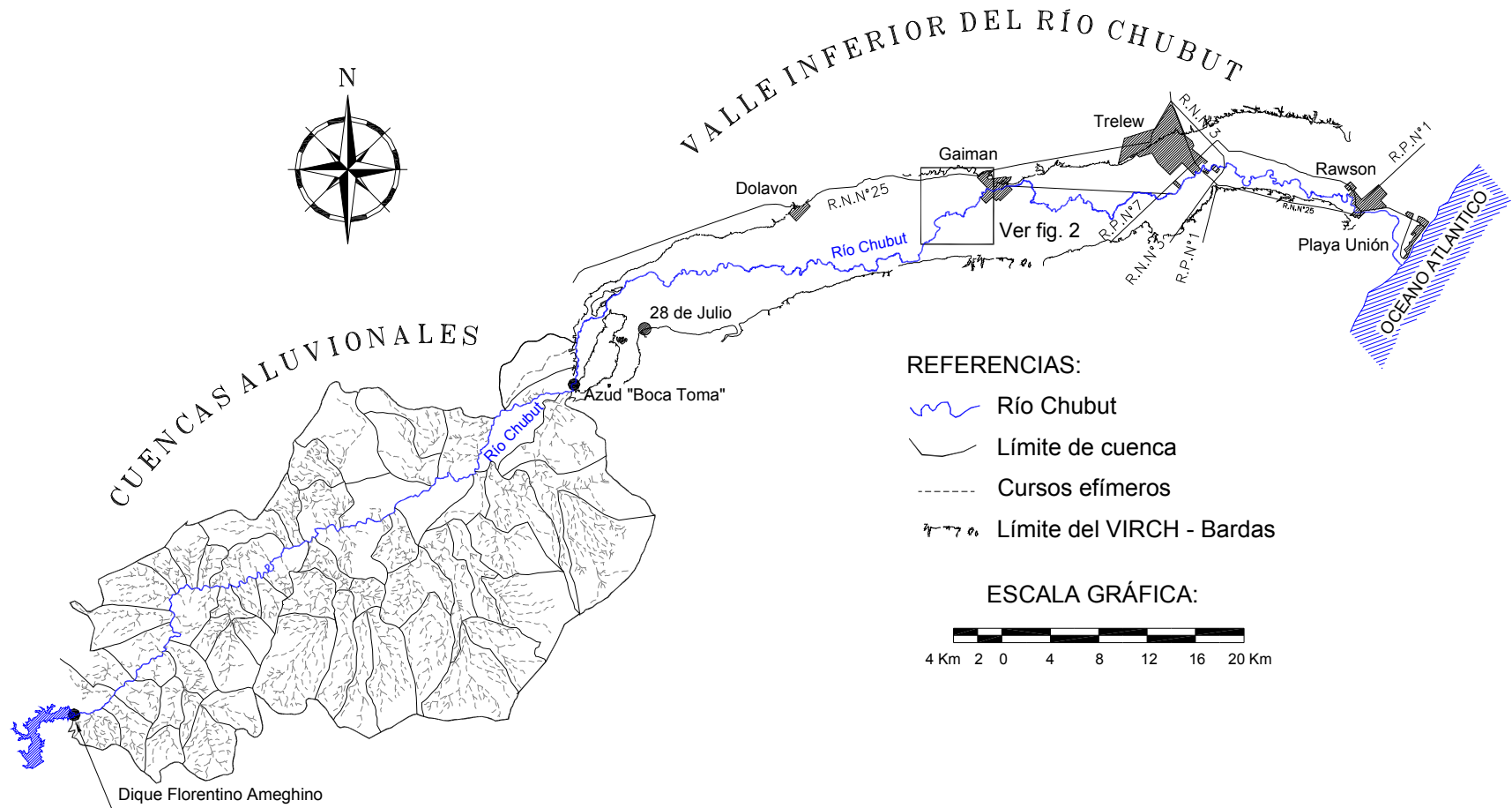
Las inundaciones en el VIRCh

En el año 1865 se inicia el proceso de poblamiento del V.I.R.Ch con la llegada de los primeros colonos galeses. El desarrollo productivo estuvo fuertemente condicionado por la disponibilidad hídrica (provista exclusivamente por el río) y las periódicas inundaciones del valle. Los primeros años de los colonos fueron particularmente difíciles debido a una serie de crecidas extraordinarias que ocurrieron en un corto lapso de tiempo. Son memorables las crecidas de los años 1889, 1901, 1902 y 1904 tal como fueron relatadas vívida y dramáticamente por sus protagonistas (Hughes, 1993). Pronsato (1950b) clasifica la crecida de 1889 como “máxima extraordinaria” al inundar completamente el valle. Según nuestros cálculos le corresponde una recurrencia de 20 años, aproximadamente. Durante el periodo 1904-1946 se verificaron 2 “crecidas extraordinarias” con grandes desbordes en el valle y 7 “crecidas altas” con desbordes en sectores ribereños mayormente aguas abajo de Trelew (Pronsato, 1950b). De acuerdo al nuevo análisis hidrológico, las “crecidas altas” poseen una recurrencia entre 4,7 y 8 años, mientras que a las “crecidas extraordinarias” se presentan, en media, cada 8 a 10,4 años.

A 100 años del arribo de los colonos, una obra de ingeniería permitió regular el caudal del Río Chubut y así dominar las crecidas. En el año 1963 se inauguró la presa Florentino Ameghino mientras que cinco años después se puso en operación la central hidroeléctrica. Este proyecto fue concebido con tres propósitos, con el siguiente orden de importancia: 1) control de crecidas del Río Chubut; 2) disposición de un volumen para asegurar la provisión de agua al V.I.R.Ch. durante el estiaje y años secos; 3) generación de energía eléctrica.

En la actualidad el riesgo hídrico en el V.I.R.Ch. está definido por la ocupación de la planicie de inundación (aumento de la vulnerabilidad) y por la amenaza hídrica. El desborde del río está sujeto a la presencia de una crecida y a la capacidad de conducción del cauce. La génesis de las crecidas puede clasificarse en 1) crecidas de embalse (crecidas en la cuenca media y superior, o por la operación de la central); 2) crecidas aluvionales por tormentas en los cuencos ubicados entre el dique y el V.I.R.Ch.; 3) crecidas aluvionales por la activación de cañadones en el V.I.R.Ch.; y 4) inundación por tormentas en áreas urbanas (Serra, 2004). Respecto a la capacidad de conducción, ésta se ha reducido sustancialmente debido a los cambios morfológicos del cauce. De esta forma, se ha incrementado la probabilidad de inundación, contrariamente a lo esperado con la construcción de la presa.

Figura 1. Ubicación geográfica del Embalse Florentino Ameghino y del V.I.R.Ch.



MORFOLOGÍA DEL RÍO CHUBUT

Los estudios comparativos se realizaron en un tramo del Río Chubut de 6 km de longitud en las inmediaciones de la localidad de Gaiman. El tramo quedó definido en función de la disponibilidad de la información histórica. En particular, se analizaron tres sectores: a) Puente de Gaiman, que constituye históricamente la sección de aforos; b) Sección “Bryn Gwyn” ubicada a 4 km aguas arriba del Puente de Gaiman; y c) un tramo de 1,8 km a partir del Puente Gaiman, hacia aguas abajo. En la figura 1 se ubica el área de estudio en el contexto del V.I.R.Ch mientras que en la figura 2 se indica con mayor detalle los sitios estudiados.

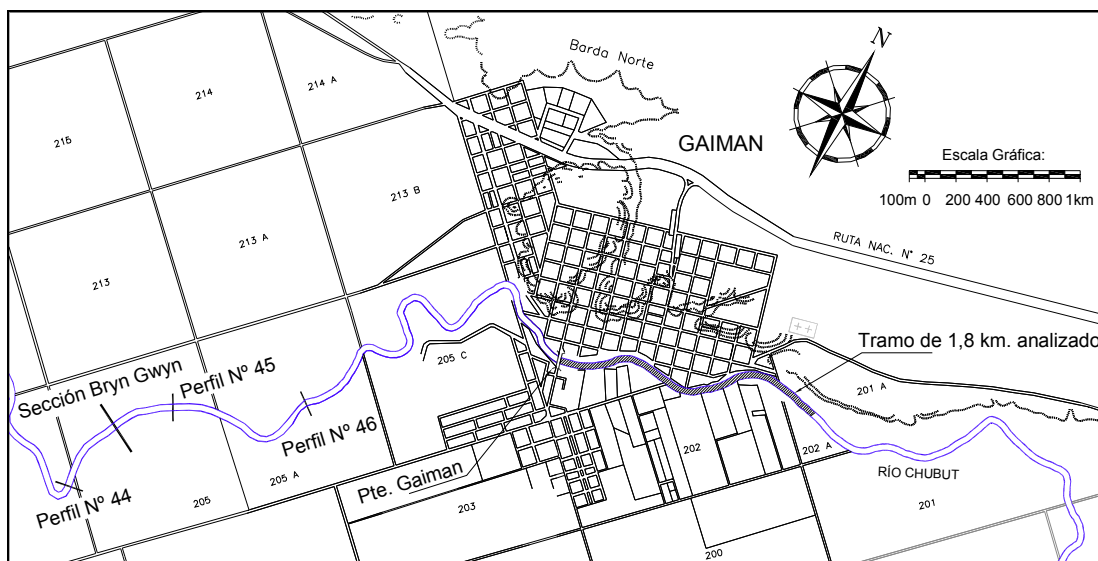


Figura 2. Detalle de los tramos del Río Chubut analizados.

Visto que el área de estudio se ubica aguas abajo de la toma de los canales de riego (Sector Boca Toma en la figura 1) el régimen de caudales responde a la combinación de la operación de la central hidroeléctrica, los aportes temporarios de los cuencos torrenciales ubicados entre el Dique y Boca Toma, y la derivación hacia la red de riego durante el periodo Septiembre-Abril.

El Río Chubut posee las características de los cursos naturales que han llegado a los estadios finales de su evolución y escurren por paisajes llanos como es el V.I.R.Ch., último recorrido antes de derramar su agua en el Océano Atlántico. El trazado planimétrico del curso es meandriforme, muy variable, presentando tramos rectos o de baja sinuosidad y otros con curvas muy cerradas. El tramo estudiado, de 1,8 km de longitud, posee una sinuosidad de 1,12.

El cauce es angosto y profundo (ver figuras 3 y 7). El ancho medio es de 28 m mientras que su profundidad media alcanza los 2,66 m. De esta forma la relación de aspecto Ancho/Profundidad es baja (10,7). La sección transversal se asemeja a un trapecio con un ancho de fondo de 15 a 20 m. Sin embargo es común observar márgenes verticales con un marcado cambio en la pendiente en correspondencia del nivel de cauce lleno (ver figuras 5 y 8). No se observan barras del tipo “point-bar” desarrolladas pero sí bancos de arena en el interior de curvas y en forma localizada. En general el curso se presenta incidido en la planicie aledaña con un nivel de cauce lleno por debajo del nivel del terreno circundante, definiéndose así esta planicie como una terraza fluvial (planicie de inundación abandonada).

El fondo presenta una sucesión rítmica de sectores profundos y someros de acuerdo a la curvatura del cauce. Se han observado rizos en el lecho del cauce. La pendiente media del fondo para el tramo Gaiman-Trelew es de 0,0276%.

El material del lecho se compone de arenas medias (diámetro medio de 0,34 mm), mientras que las márgenes presentan arenas limosas o arcillosas (SM, SC) y sectores de limos y arcillas (CL y ML). Sobre las márgenes se desarrolla una profusa vegetación arbórea (sauces, mimbres y álamos) y arbustiva que llegan hasta el nivel de cauce lleno. Cuando el caudal es superior al de cauce lleno ($54 \text{ m}^3/\text{s}$) comienza la interacción del flujo con la vegetación al anegarse los sectores ribereños.

Empleando los sistemas de clasificación de cursos naturales desarrollados por Rosgen (1994) y Montgomery y Buffington (1997), es posible sintetizar las características morfológicas. Así, el Río Chubut en el tramo analizado se clasifica como un curso tipo “E5” (Rosgen, 1994) y de “dunas-rizos” (Montgomery y Buffington, 1997).

REGISTROS HIDROMÉTRICOS EN EL PUENTE DE GAIMAN

El puente de la ciudad de Gaiman ha sido históricamente un punto privilegiado en la observación de los niveles del Río Chubut dada la proximidad del asentamiento humano en dicho sitio que data de fines del siglo XIX (figura 3). Las observaciones y registros sistemáticos comenzaron en septiembre de 1904. Sin embargo la falta de mantenimiento de la escala que dificultaba su lectura y la ausencia de mediciones directas de caudales reduce el periodo disponible, y se considerarán los datos a partir del año 1934. Pronsato (1950a) publicó los valores de alturas hidrométricas máxima, media y mínima mensual para el periodo Enero/1934 a Octubre/1946. Es decir que se cuenta con prácticamente 13 años de registros continuos y completos.



Figura 3. Río Chubut en la “Sección Gaiman”.Izquierda: vista desde el centro del cauce hacia aguas arriba en la sección de afloras ubicada aguas abajo del puente Gaiman en el año 1946 (Pronsato, 1950a). Derecha: mismo sector en el año 2007. Ambas fotografías fueron tomadas en el mes de septiembre, sin embargo los niveles son notablemente diferentes. El caudal medio de septiembre en 1946 fue de $144,8 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que cuando se tomó la foto en 2007 el caudal era de sólo $18,1 \text{ m}^3/\text{s}$.

La campaña sistemática de aforos en la sección Puente Gaiman se inició en el año 1943 con el Ing. Pronsato y se extendió durante tres años. La información publicada por Pronsato (1948) para cada aforo consiste en: lectura de escala, caudal, área de la sección, y profundidad media. A partir de 51 aforos fue posible obtener la curva Altura-Caudal.

$$Le = 0,0892 \cdot Q^{0,7475} \quad (1)$$

$$Q = 25,582 \cdot Le^{1,3304} \quad (2)$$

$$R^2 = 0,9945$$

En donde Le es la lectura de escala (m) y Q el caudal (m³/s).

Finalizada la campaña de Pronsato, no se prosiguió el registro de altura de escala, ni el aforo sistemático en la sección de Puente Gaiman, hasta el año 1993. Luego de la crecida extraordinaria del Río Chubut en el año 1992 se vio la necesidad de contar nuevamente con registros de niveles en Gaiman. Por lo que se agregó la estación Nro 2295 – VIRCH al Sistema de Información Hídrica administrado por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación. Para el presente trabajo se contó con la serie de caudales medios diarios en el periodo 1/Febrero/1993 a 31/Marzo/2005; y 92 registros de aforos del periodo Mazo/1993 – Enero/2007, con datos de escala hidrométrica, área de la sección, ancho superficial y perímetro mojado. En función de esta información se calculó la relación Altura-Caudal.

$$Le = 0,2514 \cdot Q^{0,6225} \quad (3)$$

$$Q = 9,771 \cdot Le^{1,5392} \quad (4)$$

$$R^2 = 0,9581$$

Con el significado de las variables indicado anteriormente.

Por lo expuesto, el grado de detalle de las dos series de datos no es el mismo. Para realizar las comparaciones de regimenes de caudales se construyó una serie sintética de caudales medios diarios para el periodo 1934-1946. Teniendo en cuenta que las variaciones en el nivel se producen lentamente se utilizó una expresión del tipo $y = a \cdot x^n + b$, en donde “y” es la altura hidrométrica y “x” es el paso temporal normalizado (varia entre 0 para el primer día del mes y 1 para el último). Esta expresión debe cumplir los siguientes requisitos: ordenando las alturas de menor a mayor a) para x igual a 0, y debe ser igual al valor mínimo registrado, b) para x igual a 1, y debe adoptar el valor máximo registrado y c) el valor medio de “y” que surge de la expresión debe ser igual al indicado en los registros. Con estas tres condiciones se obtienen los coeficientes a, b y n.

A continuación se indican las expresiones de cálculo empleadas. Se distinguen dos situaciones: Caso A, cuando la lectura promedio (y_{med}) es mayor al promedio de y_{max} y y_{min} ; y el caso B, cuando ocurre lo contrario

Caso A

$$y = a \cdot x^n + b \quad (5)$$

$$a = y_{max} - y_{min} \quad (6)$$

$$b = y_{min} \quad (7)$$

$$n = \frac{y_{\max} - y_{\min}}{y_{\text{med}} - y_{\min}} - 1 \quad (8)$$

Caso B

$$y = b - a(1 - x)^n \quad (9)$$

$$a = y_{\max} - y_{\min} \quad (10)$$

$$b = y_{\max} \quad (11)$$

$$n = \frac{y_{\max} - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\text{med}}} - 1 \quad (12)$$

$$x = \frac{t - 1}{N - 1} \quad (13)$$

En donde t representa el día del mes y N, la cantidad de días del mes.

A modo de ejemplo se presentan los cálculos aplicados al mes de Junio de 1945 para el que se cuenta con las lecturas diarias de la escala (Pronsato, 1950b). En dicha ocasión se produjo una crecida de 225 m³/s variando la altura hidrométrica entre un valor mínimo de 3,23 m y un máximo de 5,45 m. A partir del valor medio indicado por Pronsato, igual a 4,52 m, y considerando el caso “B” se determinaron los coeficientes a, b y n obteniéndose los valores de 2,22, 5,45 y 1,384, respectivamente. En la figura 4 se representan las alturas observadas y ordenadas en forma ascendente y aquellas calculadas mediante la expresión propuesta. Se destaca una muy buena concordancia, razón por la que se decidió su aplicación a toda la serie.

En base a la aplicación de las expresiones anteriores se determinaron las alturas hidrométricas diarias para el periodo 1934-1946. Al igual que Pronsato, se consideró válida la relación Altura-Caudal obtenida para el periodo 1943-1947 y se la aplicó a la serie de alturas, obteniéndose así los caudales diarios del periodo 1934-1946.

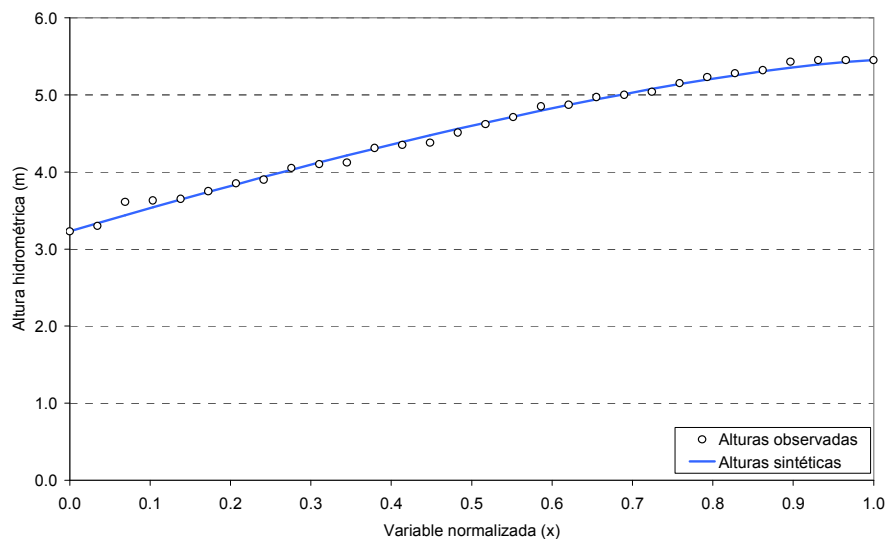


Figura 4. Comparación entre las alturas observadas para el Río Chubut en el mes de Junio de 1945 y las alturas calculadas con la función de ajuste propuesta.

DETERMINACIÓN DEL CAUDAL DE CAUCE LLENO

El caudal de cauce lleno (bankfull discharge) generalmente se emplea como estimación del “caudal formativo” que sintetiza la serie de caudales que modela un cauce. Es decir, que un caudal continuo con la intensidad del caudal de cauce lleno tendría el mismo efecto que una sucesión de caudales de distintas magnitudes y duraciones. En este trabajo viene empleado como un parámetro de escala que permite analizar la intensidad de las crecidas en relación a la capacidad de conducción hidráulica del río y comparar parámetros hidráulicos para dos situaciones distintas como se desarrollará en apartados siguientes. Este caudal caracteriza un tramo de río por lo que su determinación requiere del análisis de varias secciones en el tramo. Leopold (1997) desarrolló una metodología que consiste en la identificación del nivel de cauce lleno en varias secciones transversales a lo largo del tramo de estudio. Luego, aproximando con una recta los niveles anteriores se obtiene el perfil longitudinal del pelo de agua para el caudal de cauce lleno. Si en el tramo se encuentra una escala hidrométrica con curva Altura-Caudal establecida es posible derivar el caudal a partir de la lectura de escala correspondiente al perfil del pelo de agua.

Para identificar la elevación del nivel de cauce lleno se han propuesto varias metodologías. Una geomorfológica (propuesta por Leopold, 1994), consiste en identificar en el campo rasgos morfológicos característicos. Para el presente trabajo, se observó el punto de inflexión en la margen (ver figura 5). Otros investigadores como Williams (1978) y Wolman (1955) propusieron criterios geométricos a fin de alcanzar una metodología objetiva. Sin embargo se ha demostrado que el criterio geomorfológico de campo es el más confiable (Navratil et al, 2006).

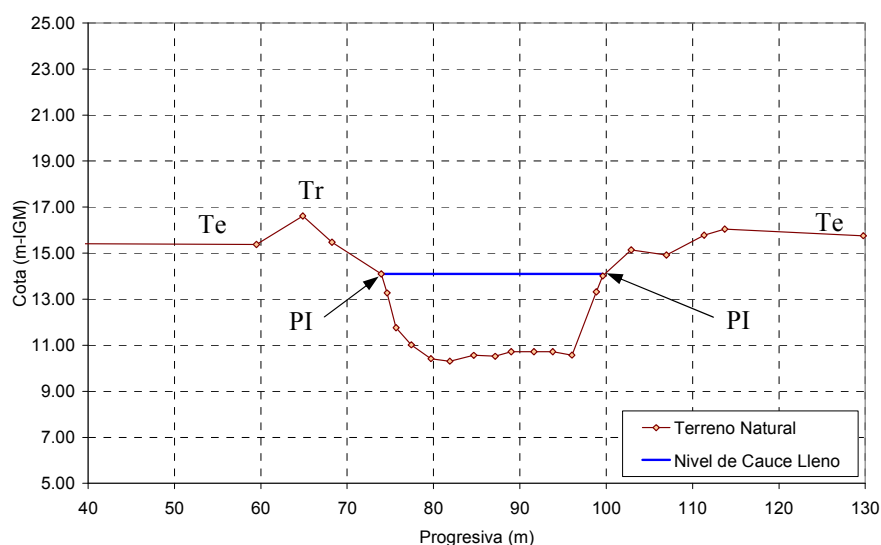


Figura 5. Sección transversal típica del tramo estudiado para la situación actual. Se ha indicado el nivel de cauce lleno identificado en campo a través de los puntos de inflexión en las márgenes (PI). Se indica también el nivel de terraza (Te) y un pequeño terraplén existente sobre la margen izquierda (Tr).

La determinación del caudal de cauce lleno para la situación actual fue posible gracias a relevamientos topográficos recientes (Fueyo, 2004) que abarcaron el tramo Gaiman-Trelew con perfiles transversales cada 250 m, en promedio. Para cada perfil se reconoció el nivel de cauce lleno (ver figura 5) que posteriormente fue corroborado en campo. Seguidamente se graficó un perfil longitudinal (figura 6) exponiendo la siguiente información: nivel de fondo del cauce, elevación del pelo de agua durante el relevamiento, niveles de cauce lleno y nivel de la terraza (planicie circundante). La recta de ajuste de los niveles de cauce lleno intersecta la escala hidrométrica en la

cota 14,31 m (IGM) que se corresponde con una lectura de 3,03 m y un caudal de 53,8 m³/s (expresión nro. 4). La pendiente del nivel de cauce lleno es de 0,0286%. Obsérvese que este nivel se ubica 2 m por debajo de la “planicie de inundación” por lo que ésta es en realidad una terraza.

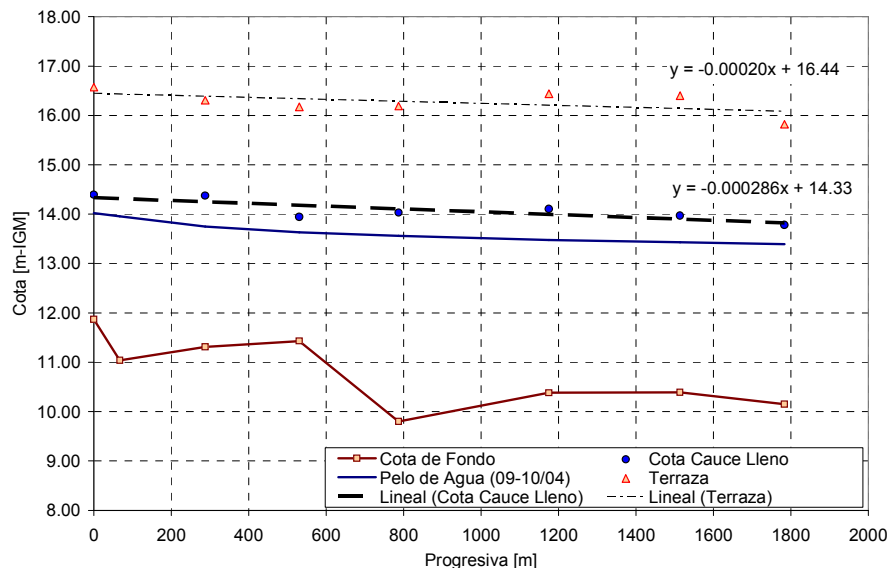


Figura 6. Perfil longitudinal en un tramo de 1,8 km desde el Puente de Gaiman. Se han indicado los niveles de cauce lleno y terraza con las rectas de ajuste respectivas. También se indica el fondo del cauce y el pelo de agua durante el relevamiento.

Para la situación previa a la construcción del dique no se cuenta con el mismo grado de detalle de información. Pronsato no indica las características de la sección de aforo. En cambio expone el perfil transversal de una sección, que denominaremos “Bryn Gwyn” (ver figuras 2 y 7) ubicada a 4000 m aguas arriba del Puente de Gaiman. También, en el informe de Pronsato (1950b) se encuentra una descripción cualitativa de la afectación de las crecidas a nivel general del valle que será de gran utilidad en el análisis de la amenaza hídrica.

En relación a la tipificación de las crecidas, Pronsato (1950b) señala que las crecientes comprendidas entre 163 m³/s y 192 m³/s escurrían normalmente por el cauce sin producir mayores desbordes. Considerando que el caudal de cauce lleno es a lo sumo, el máximo caudal que puede transportar el curso antes de ocupar la planicie, se asume el caudal de 163 m³/s como una cota superior.



Figura 7. Sección del Río Chubut “Bryn Gwyn” ubicada a 4000 m aguas arriba del puente de Gaiman. A la izquierda, vista desde margen derecha en el año 1945 (Pronsato 1950a). A la derecha, vista también desde margen derecha en el año 2008.

Considerando los datos topográficos de la sección “Bryn Gwyn”, se aplicaron los criterios geométricos de Wolman y Williams que definieron sendos niveles correspondientes a caudales de 149 m³/s y 112 m³/s, respectivamente (ver figura 8). La vinculación entre los niveles y caudales fue posible gracias a la relación indicada por Pronsato (1950a) para los niveles observados durante crecidas en la sección de Bryn Gwyn y la altura en la escala de Gaiman. Finalmente, analizando documentos fotográficos de dicha sección se estableció un tercer nivel con fundamento morfológico que resultó en un caudal de 97 m³/s. Este último valor es el que se adoptó continuando con el criterio empleado para la situación actual. Vale resaltar que el caudal de cauce lleno ha sido estimado en función de los datos de una sección y no como resultado de varias secciones como sería más adecuado a fin de reducir errores producto de la variabilidad natural de los parámetros geométricos y morfológicos del cauce.

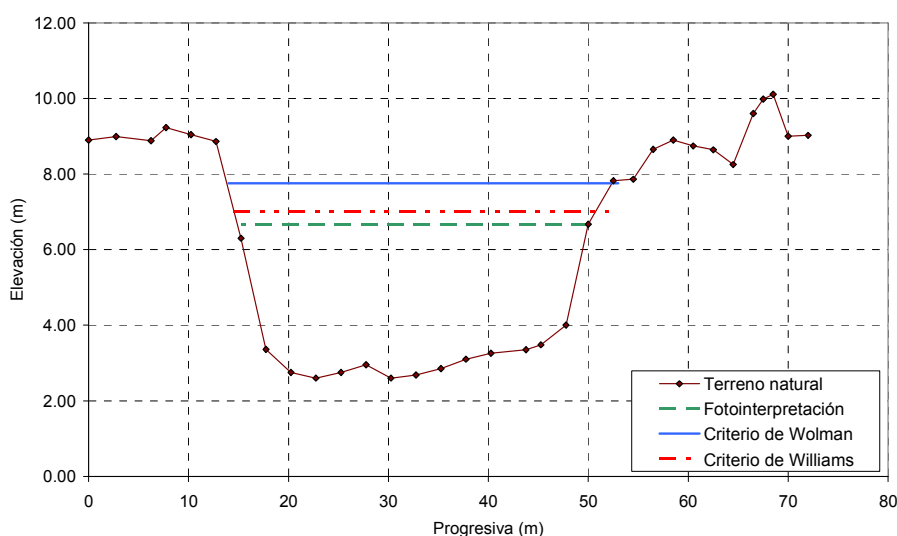


Figura 8. Sección transversal de Bryn Gwyn con la indicación de los niveles de cauce lleno según los distintos criterios.

En resumen, previo a la construcción del dique F Ameghino un caudal de 97m³/s modelaba y mantenía la sección del Río Chubut. Posteriormente, este caudal formativo se redujo al 55%, teniendo en la actualidad una magnitud de 53,8 m³/s.

CAMBIOS EN EL RÉGIMEN DE CAUDALES

Tres aspectos fueron analizados a fin de describir la alteración del régimen hídrico producto de la operación del embalse Florentino Ameghino, a saber: la distribución anual de los caudales medios mensuales, la permanencia de los caudales diarios, y la magnitud y frecuencia de las crecidas. Los resultados muestran los efectos típicos de la regulación de caudales de un curso natural, como son la uniformización de la distribución anual y la reducción de la magnitud de las crecidas.

Distribución anual de caudales.

A partir de las dos series de caudales medios diarios se procedió al cálculo de los caudales medios mensuales y para cada mes, su valor medio, mínimo y máximo. Hasta la construcción del dique el tramo inferior del Río Chubut contaba con un régimen típicamente pluvio-nival (figura 9). Los máximos de la serie de caudales medios mensuales presentan un pico en Junio, de 193,08 m³/s debido a precipitaciones y un segundo pico, esta vez nival, en Septiembre de 146 m³/s. El estiaje comenzaba

en Diciembre y se prolongaba hasta el mes de Marzo, cuando se alcanzaba el mínimo flujo. El promedio de los caudales medios mensuales indica un mínimo de $6,38 \text{ m}^3/\text{s}$ en marzo y un máximo de $68,5 \text{ m}^3/\text{s}$ en septiembre. La diferencia en el momento de ocurrencia del máximo entre la serie de los máximo y de los promedios, indica que las crecidas de deshielo eran más sostenidas en el tiempo (crecidas volumétricas) que las pluviales (crecidas de magnitud).

Con la operación del embalse se logró una mayor uniformidad en la distribución de los caudales. El promedio de los caudales medios mensuales es prácticamente constante con un valor de $40 \text{ m}^3/\text{s}$. Lo mismo ocurre con los mínimos, con un caudal de $21 \text{ m}^3/\text{s}$ (se garantiza un caudal mínimo ecológico). En la curva de máximos medios mensuales, se observa que en septiembre se ha presentado un caudal de $96,26 \text{ m}^3/\text{s}$.

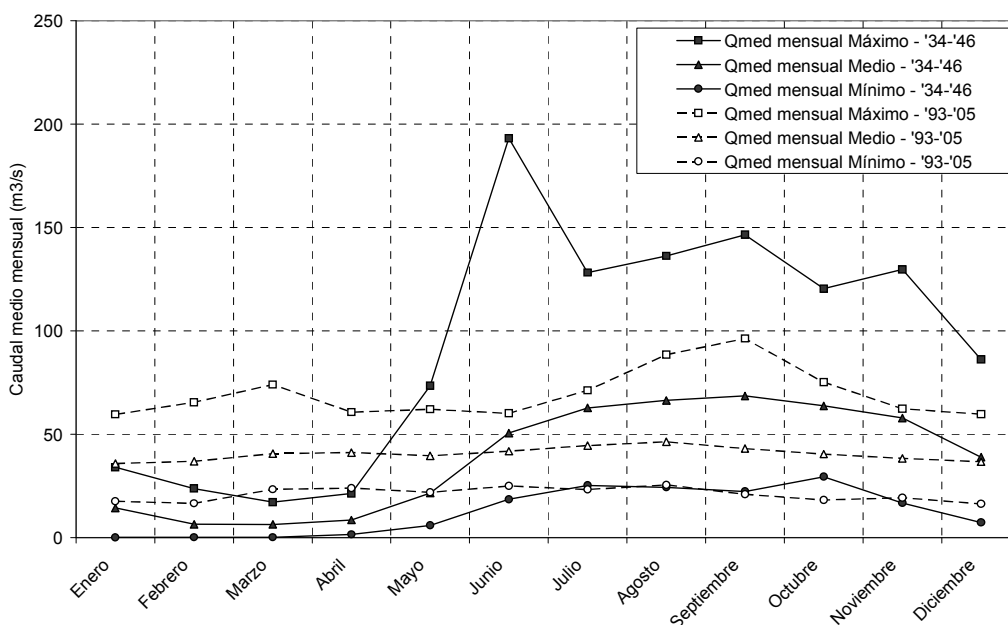


Figura 9. Distribución anual de los caudales medios mensuales para los periodos 1934-1946 y 1993-2005.

Permanencia de caudales y niveles

También la permanencia de los caudales medios diarios refleja el efecto de la operación de la central y la regulación anual de caudales. Como era de esperar se redujo la duración de los caudales elevados (desciende la curva en la figura 10) para incrementar la permanencia de los caudales bajos (sube la curva). Se destaca para la curva actual un cambio de pendiente a partir de $75 \text{ m}^3/\text{s}$, que se atribuye a caudales no erogados por la central sino producto de precipitaciones en los cuencos aluvionales, visto que tienen una muy baja duración. Previo a la construcción del dique durante un 10% del año el caudal que escurría por la sección de Gaiman era igual o inferior a $1 \text{ m}^3/\text{s}$ (meses de estiaje con derivación de caudales hacia la red de riego).

En la tabla 1 se indican los caudales mínimo y máximo característicos, y semipermanente que se corresponden con permanencias de 95%, 5% y 50%, respectivamente. El módulo de los dos periodos estudiados resulta ser muy similar, siendo el actual tan sólo un 4% superior al precedente. Sin embargo los caudales semipermanentes (mediana de la distribución) presentan una diferencia más marcada producto de la regulación.

Tabla 1. Caudales y niveles característicos para cada periodo analizado.

Duración	Caudal (m ³ /s)		Niveles (m - IGM)	
	Periodo 1934-1946	Periodo 1993-2005	Periodo 1934-1947	Periodo 1993-2006
5%	117.8	68.7	14.39	14.78
50%	28.3	36.4	12.33	13.64
95%	0.2	16.7	11.27	12.73
Módulo / Media	38.8	40.4	12.62	13.79

La regulación ha reducido la amplitud de la variación anual de caudales. Esta amplitud se la define como la diferencia entre el caudal máximo característico y el mínimo característico. En la situación pre-dique se presentaba, en promedio, una variación de 117,6 m³/s en el año entre estiaje y crecidas, mientras que en la actualidad dicha amplitud se ha reducido a la mitad aproximadamente, es decir a 52,0m³/s.

En la figura 11 se han adimensionalizado los caudales diarios con el caudal de cauce lleno incluyendo para la comparación otro caso de curso no regulado: el Río Mayo en la localidad homónima, que también posee un régimen pluvio-nival. La curva del Río Chubut en la situación pre-dique y la del Río Mayo son similares en la tendencia general mientras que la de éste último presenta una menor constancia en los caudales (menor área de aporte que sostenga los caudales de estiaje). En ambos casos de ríos no regulados el caudal de cauce lleno posee una duración menor al caso regulado (Río Chubut actual), por lo que son más importantes las crecidas con mayor intensidad. También se destaca la linealidad en la distribución de los caudales regulados mientras que los cursos naturales presentan aproximadamente una relación de proporcionalidad inversa entre caudales y duración.

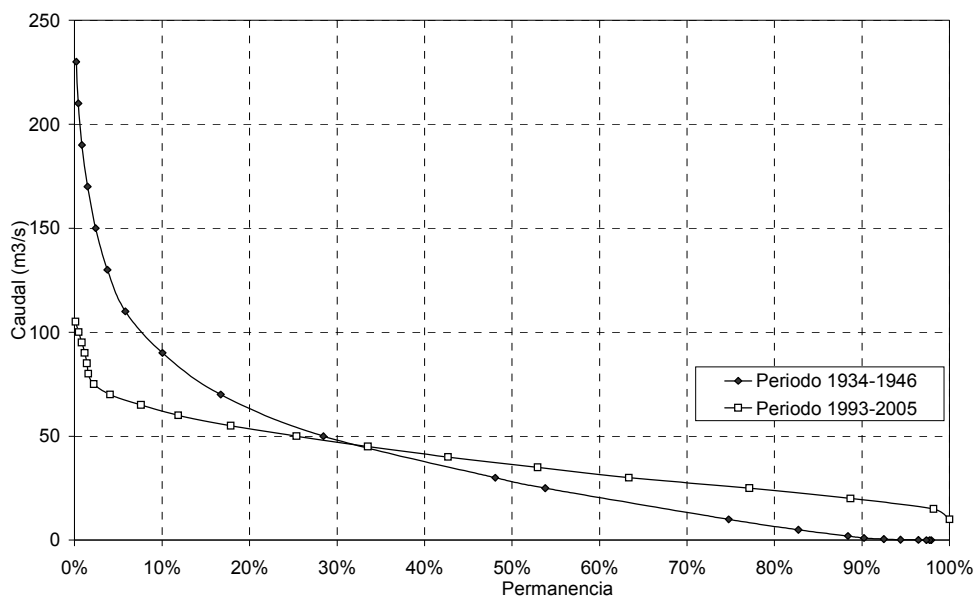


Figura 10. Curvas de permanencia de caudales medios diarios de los periodos 1934-1946 y 1993-2005

También se analizó la permanencia de los niveles. Esto fue posible combinando la curva de duración de caudales con las curvas de aforo (expresiones 1 y 3) y la vinculación a un mismo plano de comparación de las lecturas de escala (cero del I.G.M.). Los resultados se exponen en la figura 12. Debido a cambios en la forma de la sección y al ascenso del fondo, durante el 97% del año se observa actualmente un nivel del pelo de agua superior al que se verificaría sin la presa. Cabe destacar que los

caudales actuales superan a los anteriores sólo el 67% del año. La diferencia entre el 97% para los niveles y el 67% para los caudales se encuentra en los cambios morfológicos del río. Como se verá en el siguiente apartado, esto también será una de las razones para el aumento en la probabilidad de desbordes.

Es interesante el efecto de la regulación en el extremo derecho de la curva de duración de caudales y niveles (figuras 10 y 12) que se corresponden con los meses de estiaje. Durante el verano el Río Chubut funcionaba como un drenaje natural del valle. En la actualidad este comportamiento se ha reducido al elevarse la superficie libre en 1,45 m para dicho periodo.

Además, la amplitud de la variación anual en el nivel se ha reducido con la regulación de caudales. Con el mismo criterio establecido para el caudal, se ha calculado una amplitud de 3,12 m en la situación pre-dique y otra de 2,05 m para la actualidad. En media el nivel actual se encuentra 1,16 m por arriba del nivel de la superficie libre antes del Dique (diferencia de medias en la tabla 1).

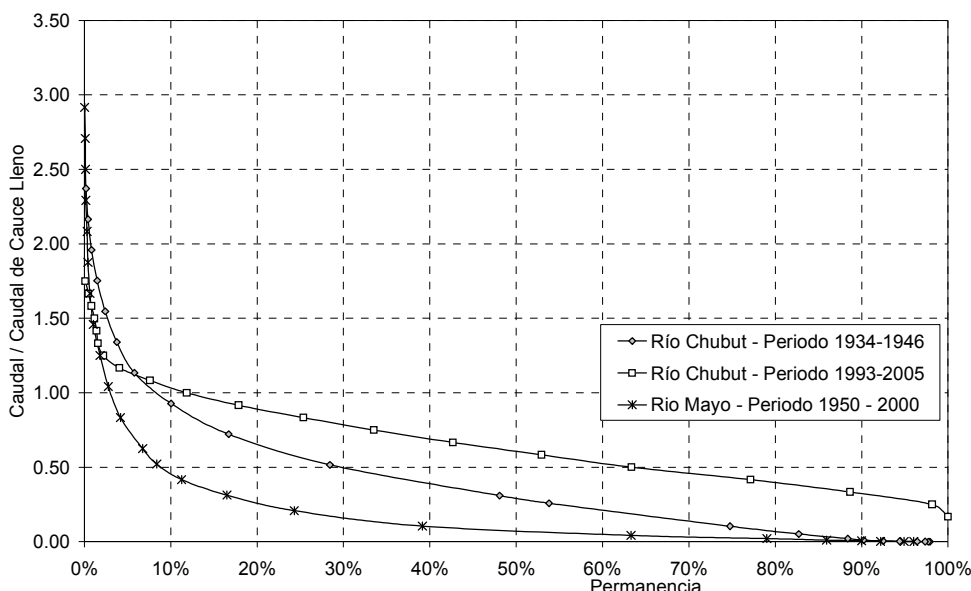


Figura 11. Curvas de duración de caudales diarios adimensionalizadas con el caudal de cauce lleno.

Magnitud y frecuencia de las crecidas

La probabilidad de ocurrencia de crecidas fue evaluada, en ambas situaciones con series de 13 datos, razón por la que el análisis no se extenderá más allá de un periodo de retorno de 25 años. La frecuencia empírica fue calculada con la expresión propuesta por Gringorten y se ajustó la función de distribución de probabilidad de Gumbel a ambas series, dando mejores resultados el método de mínimos cuadrados (MC) para la serie 1993-2006 y momentos ponderados (MP) para la serie 1934-1946 (Chow et al, 1994).

El objetivo de evitar las crecidas en el V.I.R.CH. se traduce en la figura 13 con el descenso de la curva o la reducción de la probabilidad para un mismo caudal (aumento del tiempo de retorno). Por ejemplo, una crecida que se presentaba en promedio una vez cada dos años ($136 \text{ m}^3/\text{s}$, probabilidad de excedencia del 50%), posee en la actualidad un tiempo de retorno de 20 años aproximadamente (probabilidad de excedencia del 5%). Sin embargo la amenaza hídrica asociada con la posibilidad de desborde es distinta debido a las variaciones morfológicas antes reseñadas.

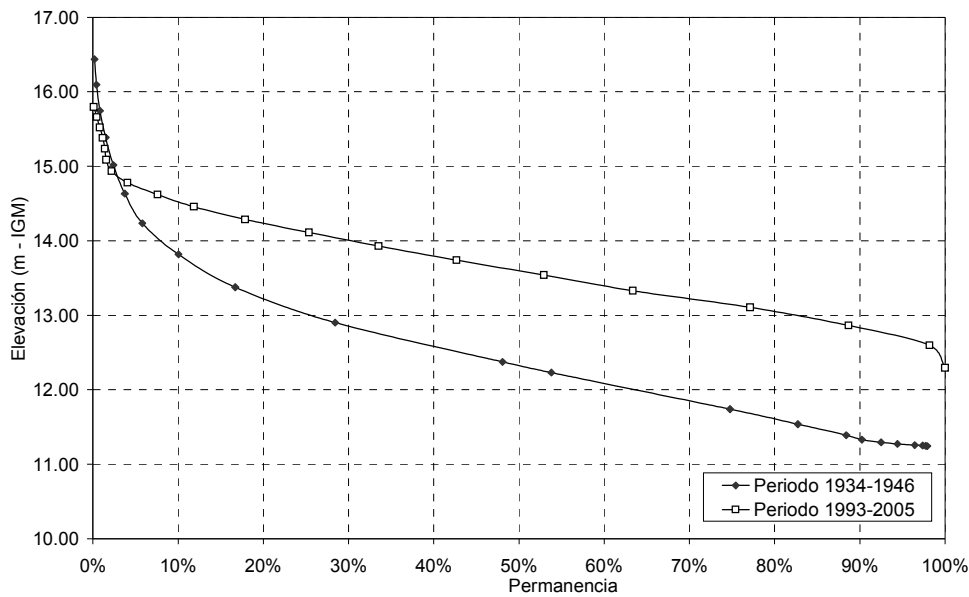


Figura 12 Curvas de permanencia de niveles en los periodos 1934-1946 y 1993-2005.

Recientes estudios (Serra et al, 2005) indican que para caudales de $75 \text{ m}^3/\text{s}$ ya comienzan a presentarse situaciones críticas localizadas en el tramo Gaiman-Rawson. Hasta caudales de $105 \text{ m}^3/\text{s}$, la situación podría controlarse con obras menores, mientras que para crecidas de $120 \text{ m}^3/\text{s}$ se prevén derrames en un elevado porcentaje de sectores. Las recurrencias de estos caudales son de 1,8; 6 y 12 años respectivamente.

Haciendo una caracterización de la magnitud de las crecidas en relación a su impacto en el valle, Pronsato (1950b) señala que las crecidas “ordinarias” (hasta $189 \text{ m}^3/\text{s}$) transitaban sin producir mayores desbordes, mientras que las crecientes “altas” ($218 \text{ m}^3/\text{s}$) producían desbordes en las partes bajas ribereñas aguas abajo de Trelew. Estas crecidas tienen recurrencias de 4,7 y 8 años, respectivamente.

Comparando las cifras de Serra et al (2005) y Pronsato (1950b) se arriba a la conclusión de que la amenaza hídrica aún persiste y más llamativo es que la recurrencia de los eventos capaces de inundar el valle se encuentre entre 5 y 10 años tanto para la situación previa a la construcción del dique como en la actualidad. Nuevamente la razón debe buscarse en el atrofiamiento del cauce producto del cambio en el régimen de caudales y de sedimentos.

A pesar del cambio en la probabilidad de ocurrencia de las crecidas, cuando se emplean caudales adimensionados con el caudal de cauce lleno, se obtiene una notoria similitud (figura 14). Para ambas situaciones se verifican estas relaciones aproximadamente:

$$Q_2 = 1,45 \cdot Q_{bk} \quad (14)$$

$$Q_5 = 1,95 \cdot Q_{bk} \quad (15)$$

$$Q_{10} = 2,30 \cdot Q_{bk} \quad (16)$$

En donde Q_2 , Q_5 y Q_{10} son los caudales asociados a eventos de crecidas con recurrencias de 2, 5 y 10 años, respectivamente; Q_{bk} es el caudal de cauce lleno.

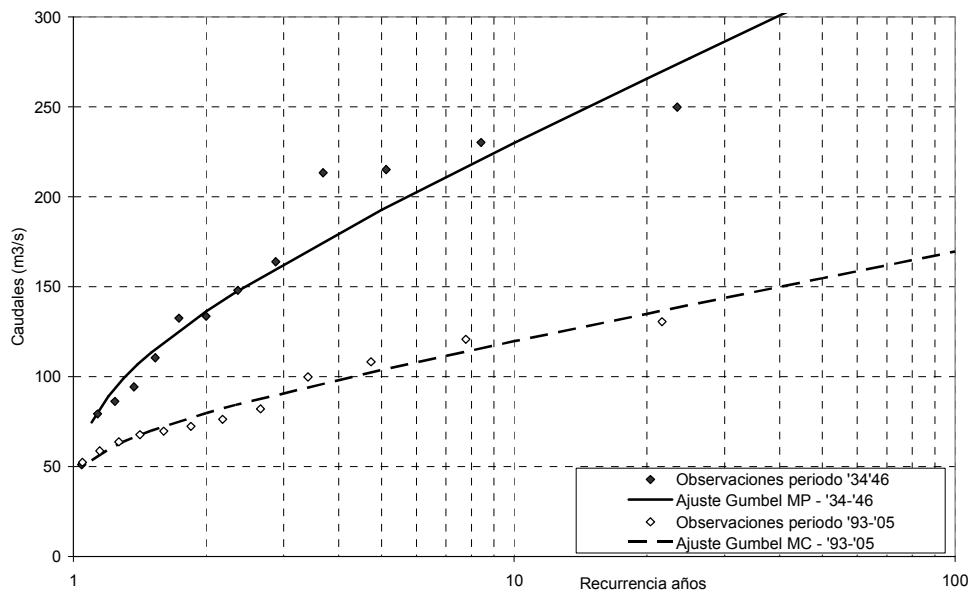


Figura 13 Probabilidad de excedencia de caudales de crecidas.

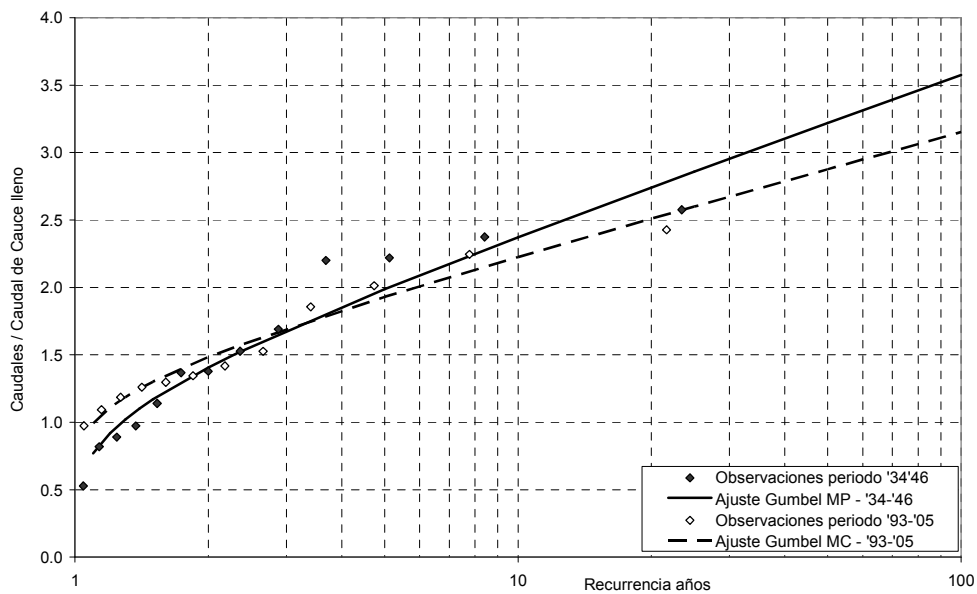


Figura 14 Probabilidad de excedencia de caudales de crecidas adimensionalizados con el caudal de cauce lleno.

Características del caudal de cauce lleno

El caudal de cauce lleno actual tiene una permanencia anual del 17,9% (65 días del año viene igualado o superado) y constituye prácticamente una crecida de recurrencia anual ($Tr = 1,105$ años). Mientras que previo al dique la permanencia era menor, sólo el 7,1% (26 días del año) y el periodo de retorno era algo mayor, igual a 1,28 años.

CAMBIOS EN LA GEOMETRÍA HIDRÁULICA

Desde el punto de vista morfológico los cambios han sido analizados empleando el criterio de Leopold y Madock (1953) quienes en sus trabajos pioneros de morfología fluvial innovaron con el desarrollo de la geometría hidráulica, una aproximación cuantitativa a los trabajos propiamente cualitativos de esa actividad. También se analizó el cambio en la elevación del lecho refiriendo todas las observaciones a un mismo plano de comparación (cero del Instituto Geográfico Militar). Con la misma metodología se compararon las secciones en Bryn Gwyn.

La geometría hidráulica permite describir la forma del cauce considerando como variable independiente el caudal. La elección de esta variable por Leopold y Madock (1953) responde a una analogía con la teoría de régimen desarrolla por la escuela inglesa de ingenieros para el diseño de canales de riego en India. Las variables dependientes son el ancho superficial (B), la velocidad media (U) la profundidad media (H) calculada como el cociente entre el área de la sección y el ancho superficial. Considerando los datos de aforos para ambas situaciones, pre-dique y actual, se aplicó un ajuste de una relación potencial minimizando el cuadrado de las diferencias. En la figura 15 se muestran los datos junto con las curvas de ajuste. Las expresiones encontradas son las siguientes:

Situación pre-dique:

$$B = 29,27 \cdot Q^{0,0593} \quad (R^2 = 0,4297) \quad (17)$$

$$H = 0,1283 \cdot Q^{0,6647} \quad (R^2 = 0,9810) \quad (18)$$

$$U = 0,2681 \cdot Q^{0,2744} \quad (R^2 = 0,9423) \quad (20)$$

Situación actual:

$$B = 15,51 \cdot Q^{0,198} \quad (R^2 = 0,7191) \quad (21)$$

$$H = 0,3196 \cdot Q^{0,4886} \quad (R^2 = 0,9077) \quad (22)$$

$$U = 0,2003 \cdot Q^{0,3154} \quad (R^2 = 0,8127) \quad (23)$$

Respecto al ancho superficial, en la situación pre-dique se observa una constancia para un amplio rango de caudales aforados (de 36 m³/s a 215 m³/s), para el que el ancho varía sólo de 37 m a 40 m. En cambio, la situación actual presenta una mayor variabilidad, tal como lo indica el mayor exponente en la expresión 21. Para el rango de caudales de 11 m³/s a 120 m³/s, el ancho aumenta de 26 a 54 m. Este último valor (el doble del anterior) se debe a la inundación de la planicie aledaña cuando el caudal supera el nivel de cauce lleno (ver figura 18).

A igualdad de caudales, la profundidad media actual resulta ser superior. Además, teniendo en cuenta la variación en el ancho superficial el factor de forma (cociente B/H) ha disminuido, indicando que la sección actual es mas “angosta y profunda”. Por ejemplo, en el rango de caudales de 20 m³/s a 70 m³/s el factor de forma variaba entre 37,2 y 17,4 para la situación pre-dique, tal como se calcula de las expresiones 17 y 18. Para los mismos caudales, la sección actual presenta un factor de forma entre 20,3 y 14.

Sin embargo, un aumento en la profundidad debería conllevar un aumento en la velocidad media, tendencia que no se ve reflejada en los datos de aforo. De hecho, para un mismo caudal la velocidad actual de la corriente es levemente menor. Sobre este punto se volverá en la sección siguiente.

También se ha analizado la relación entre la profundidad del flujo y el caudal (figura 16). En este caso se trata de la diferencia altimétrica entre el pelo de agua y el nivel medio del fondo. En la sección pre-dique, donde el ancho presentaba una baja variabilidad, la profundidad coincide con la profundidad media, sin embargo en la situación actual, dada la pendiente de las márgenes, resulta que la profundidad media es menor en un 22% a la profundidad del flujo. Efectuada esta corrección se puede ubicar correctamente el fondo del cauce. Resulta evidente que en la actualidad, a igualdad de caudal que escurre, el flujo se verifica con una mayor profundidad. Por ejemplo, el caudal de cauce lleno actual ($53,8 \text{ m}^3/\text{s}$) requiere de una profundidad de 2,70m, prácticamente un metro superior a la situación pre-dique (1.80m).

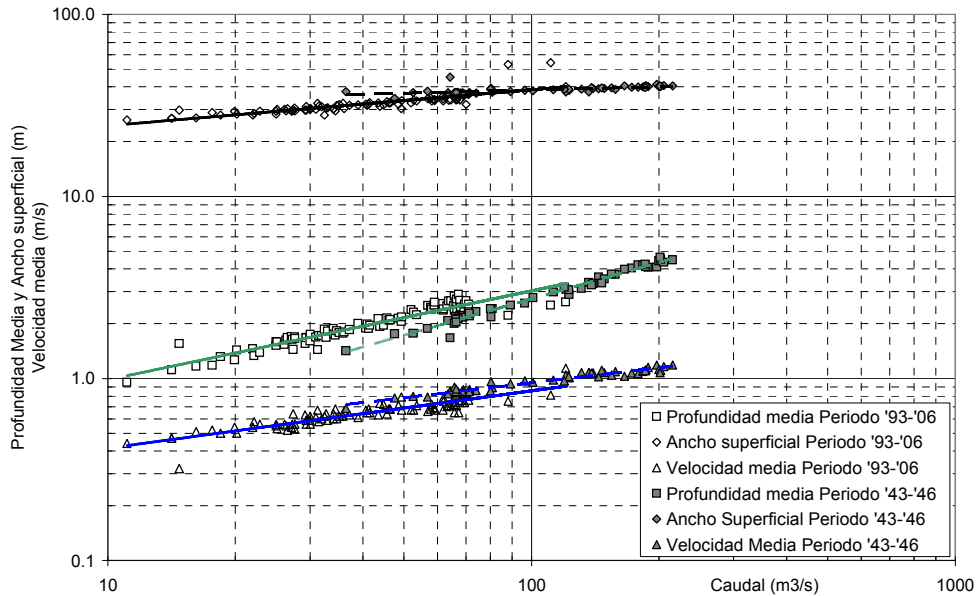


Figura 15 Geometría hidráulica. Relaciones de ancho, profundidad y velocidad en función del caudal para los periodos 1943-1946 y 1993-2006

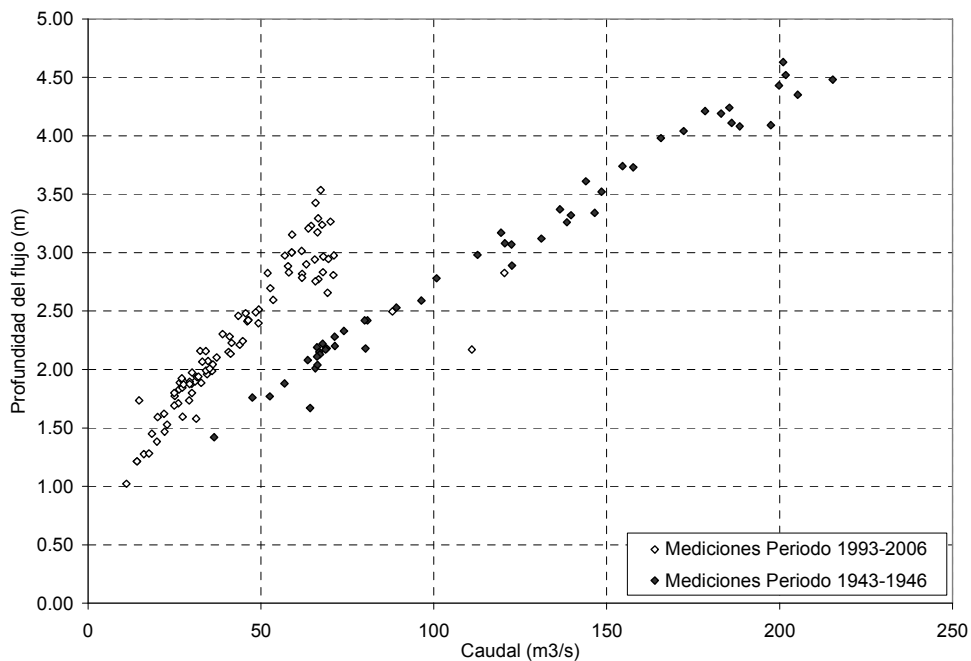


Figura 16 Profundidad de la sección de escurrimiento según los datos de aforos en los periodos 1943-1946 y 1993-2006

Para referenciar altimétricamente las observaciones se trasladó la cota del I.G.M. a la escala actual (Sistema de Información Hídrica – S.I.H.) ubicada a pocos metros aguas abajo del puente de Gaiman. El cero en la escala en el puente para las mediciones de Pronsato se estableció con el estudio de fotografías publicadas (Pronsato, 1950a).

Cota cero de escala del S.I.H.: 11,28 m IGM
 Cota cero de escala en puente Gaiman (Actual): 11,27 m IGM
 Cota cero de escala en puente Gaiman (Pronsato): 11,24 m IGM

Se puede observar en la curva altura-caudal (ver figura 17) el ascenso que ha experimentado el nivel del pelo de agua. Por ejemplo, para un caudal de referencia de $70 \text{ m}^3/\text{s}$, la cota actual es 14,82 m (IGM) y según las mediciones de Pronsato, la superficie libre se ubicaba a una cota de 13,38 m (IGM), es decir, a 1,44 m por debajo. Pronsato (1950a) señaló un aumento sistemático de los niveles de crecidas desde 1904 como consecuencia del progresivo endicamiento a lo largo de las márgenes del río. Los diques artificiales no sólo contenían las crecidas, y por ende aumentaban los niveles hasta ese momento registrados, sino que promovían la sedimentación en el espacio por ellos definidos, que de otra forma se verificaría en la planicie de inundación, con un proceso natural que daba como resultado la formación de albardones laterales longitudinales.

Combinando la elevación del pelo de agua (figura 17) y la profundidad del flujo (figura 16) es posible obtener la cota aproximada del fondo, que se ha representado también en la figura 17 para distintos caudales. En ambas situaciones se presenta una tendencia a la elevación del lecho con el aumento del caudal, fenómeno ya señalado por Pronsato (1950a). Sin embargo, en la actualidad el fenómeno aparece con una mayor magnitud y variabilidad. Considerando el rango de caudales para el que se superpone la información (de $36 \text{ m}^3/\text{s}$ a $70 \text{ m}^3/\text{s}$), es posible afirmar que luego de la construcción de la presa el lecho ha experimentado un leve ascenso, comprendido entre 0,40 m y 0,70 m, respectivamente.

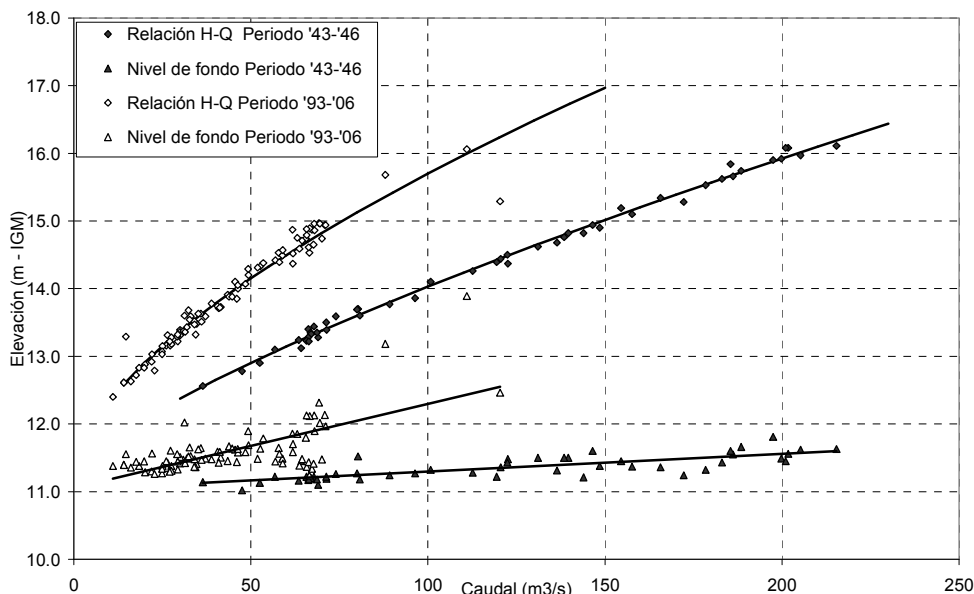


Figura 17. Curvas de elevación del Pelo de Agua y del fondo en relación con el caudal según los datos de aforos de los periodos 1943-1946 y 1993-2006.

En base a los datos de aforos fue posible reconstruir una sección media para el puente de Gaiman, tal como se muestra en la figura 18. Se han indicado los niveles del caudal de cauce lleno y el

fondo estimado. También fue posible referenciar altimétricamente la sección de Bryn Gwyn. En este caso se comparan tres perfiles transversales realizados en el año 1989 (AyEE, 1989). Los perfiles indicados como Nro 44, 45 y 46 se ubican aguas arriba del puente de Gaiman a 4,5 km, 3,7 km y 2,6 km, respectivamente (ver figura 2 y 19). Es fácil observar que los cambios experimentados por la sección Bryn Gwyn poseen las mismas características a los registrados en el puente de Gaiman: reducción en el ancho superficial producto de la sedimentación preferencial en ambas márgenes; leve ascenso del fondo (acreción general del curso); y en particular para la sección de Puente Gaiman se resalta el ascenso del nivel de cauce lleno que en la actualidad se sitúa a cota 14,31 m (IGM), mientras que en la situación pre-dique se encontraba a cota 13,96 m (IGM).

La presencia de una frondosa vegetación ribereña ha favorecido el estrechamiento del curso al propiciar el depósito del material en suspensión en las márgenes y por otro lado, aumentando su resistencia. Al respecto, Serra et al (2005) documentan, para el tramo Gaiman-Trelew, la presencia de vegetación tanto en las márgenes como en el interior del cauce, y destacan la ausencia de procesos erosivos. Fenómeno que sí se presenta en el tramo siguiente (Trelew-Rawson) en los sectores donde se la vegetación ribereña ha sido removida con recientes trabajos de dragado.

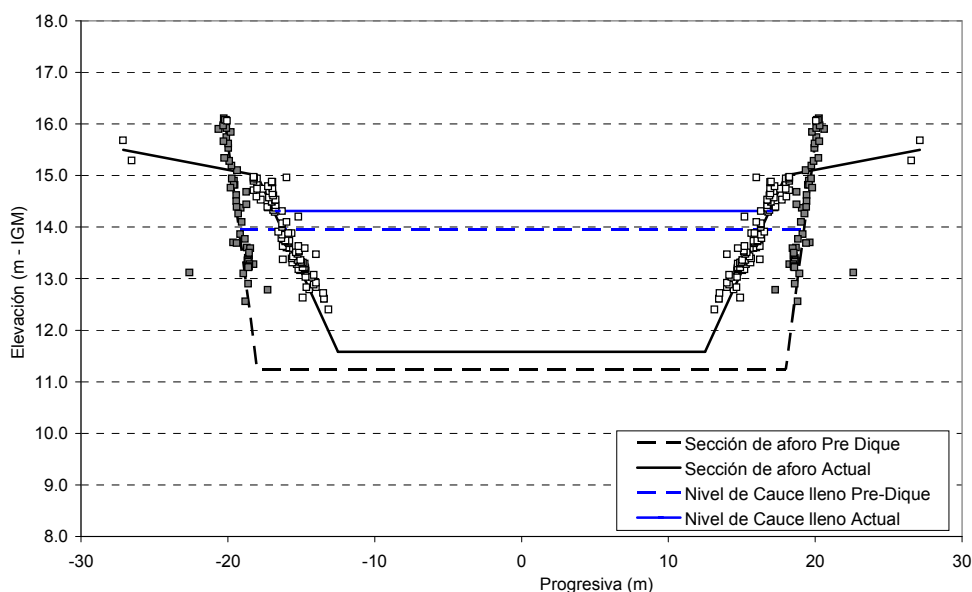


Figura 18. Reconstrucción de sección transversal a partir de datos de aforos (Ancho – Lectura de escala) donde se visualiza la geometría media para ambas situaciones Previa al Dique y actual.

Resumiendo, considerando la geometría hidráulica para la sección del puente de Gaiman y la inspección de la sección de Bryn Gwyn se concluye que la sección actual del Río Chubut ha experimentado una notable reducción del área, se presenta más angosta y profunda (disminución del factor de forma B/H), y que además se ha elevado respecto a la situación original (fenómeno de acreción). La sedimentación preferencial en las márgenes es característica de los ríos que transportan y poseen cauces con materiales finos, a diferencia de los ríos de gravas donde es común la sedimentación en el lecho.

Los cambios morfológicos evidenciados por el Río Chubut se corresponden con la tipología “caso 3” de la clasificación de Brandt (2000) para los efectos geomorfológicos aguas abajo de presas. Brandt (2000) elaboró un sistema de clasificación atendiendo a la variación en el caudal y la relación capacidad de transporte/alimentación de sedimentos. En el caso 3, el atrofiamiento y acreción del curso

son un efecto característico de la reducción en el caudal líquido y de una capacidad de transporte inferior a la alimentación de sedimentos desde aguas arriba.

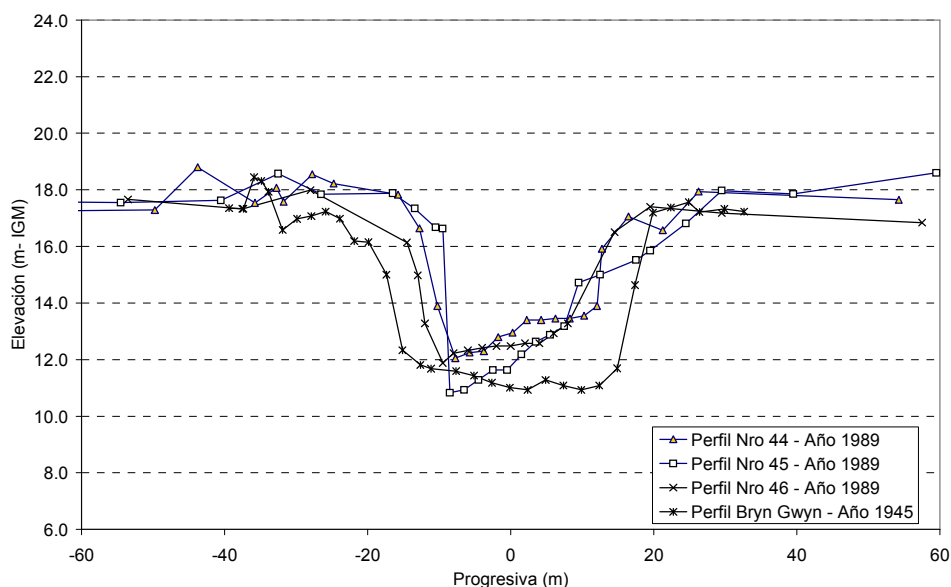


Figura 19. Sección transversal del Río Chubut en "Bryn Gwyn". La sección del año 1945 se ubica a 4 km aguas arriba del Puente Gaiman mientras que las correspondientes al año 1989 se encuentran entre 2,6 km y 4,5 km aguas arriba del mismo puente.

ANÁLISIS DE LA PENDIENTE LONGITUDINAL

La pendiente longitudinal actual, promedio en el tramo Gaiman-Trelew, asciende a 0,0276% según los últimos relevamientos topográficos del lecho (Fueyo, 2004). Este valor resulta ser levemente superior (4%) al que surge de los relevamientos realizados con 15 años de anterioridad (pendiente de 0,0265%; AyEE, 1989). Dadas las irregularidades del fondo estas pendientes constituyen un valor promedio en un tramo de 32 km de longitud (figura 20). Respecto al pelo de agua, también existe una variabilidad de sección a sección. Se relevó el pelo de agua en cuatro secciones del tramo Gaiman-Trelew con distintos caudales (entre 50,5 y 75,3 m³/s) y se obtuvieron pendientes locales comprendidas entre 0,0226 % y 0,0374% (EVARSA, 2005). Es decir, que los valores de pendiente local sólo reflejan las características geométricas e hidráulicas específicas del sector y no pueden extrapolarse a un tramo de río más extenso.

Para la situación pre-dique también se cuenta con relevamientos de pelo de agua para distintos caudales en la sección Bryn Gwyn (Pronsato 1950a). La pendiente varía entre 0,0225% y 0,024% para caudales entre 18 m³/s y 199 m³/s, respectivamente. Sin embargo no se cuenta con relevamientos del fondo para esta situación. Únicamente, Pronsato (1950b) indica el pelo de agua para la crecida del 6 de Junio de 1945 en un tramo de 12 km, aguas arriba del puente de Gaiman. En la figura 21 se compone este relevamiento y el perfil del fondo del año 1989. La pendiente media de la superficie libre durante la crecida de 1945 es 0,0323%, superior en un 20% a la pendiente del fondo de 1989 (0,0269%).

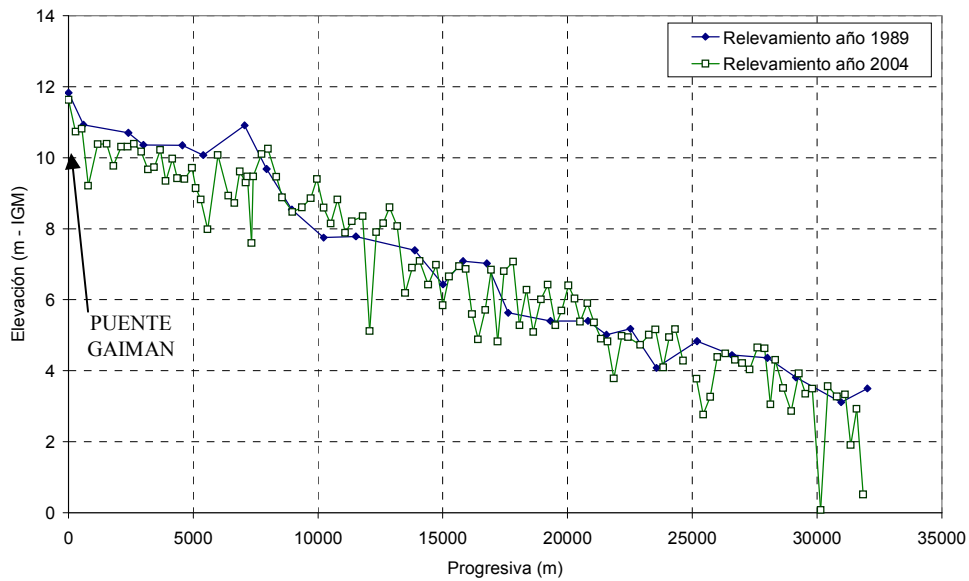


Figura 20. Perfil longitudinal del fondo del Río Chubut en el tramo comprendido entre las ciudades de Gaiman y Trelew.

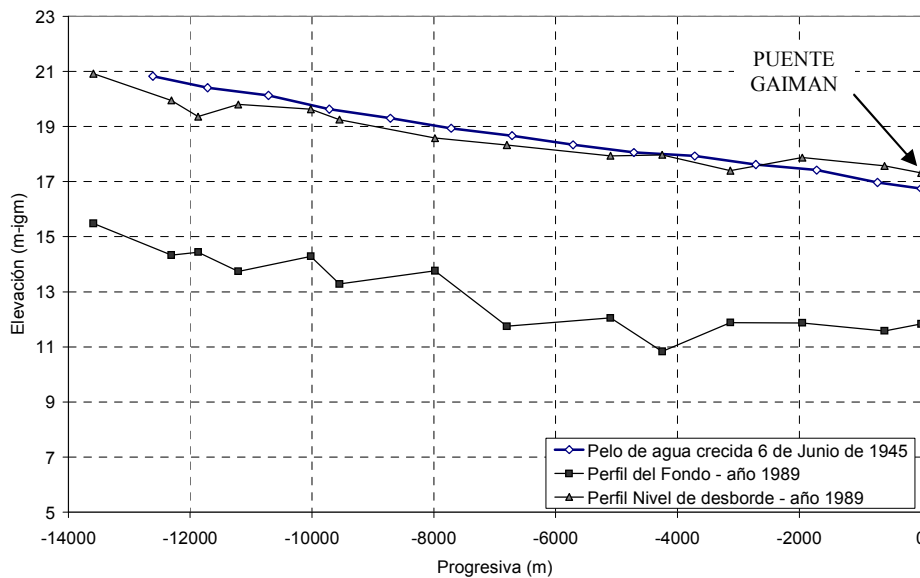


Figura 21. Perfil longitudinal aguas arriba del puente de Gaiman.

En la tabla 2 se han consignado los distintos valores obtenidos. Resulta difícil emitir un juicio sobre un posible cambio en la pendiente del curso visto que los valores responden a finalidades distintas. Los bajos valores de la Sección Bryn Gwyn se deben a las características geométricas locales, tal como sugiere el perfil actual donde existe una depresión local. Los valores actuales de pendientes (relevamientos 1989 y 2004) son muy similares. Respecto a la diferencia en la pendiente del tramo de aguas arriba al puente de Gaiman podría deberse a un fenómeno local de acreción en los primeros 3 km (figura 21). De hecho, la pendiente entre las progresivas -3,1 km y -13,6 km asciende a 0,034%, muy similar al de la crecida del año 1945.

Tabla 2. Resumen de valores de pendientes hallados según distintas metodologías

Tramo : Aguas Arriba de Gaiman (L = 12 km)	
Pelo de agua (1945)	0.0323%
Perfil del Fondo (1989)	0.0269%
Rango sección Bryn Gwyn (1945):	0,0225%-0,024%
Tramo : Gaiman - Trelew (L = 32 km)	
Perfil del Fondo (1989)	0.0265%
Perfil del Fondo (2004)	0.0276%
Rango de 4 secciones (2005):	0,0226%-0,0374%
Tramo : Aguas Abajo de Gaiman (L = 1,8 km)	
Perfil Nivel de cauce lleno (2004)	0.0286%

CAMBIOS EN LAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS

Se consideró el caudal de cauce lleno de cada situación como base para la comparación, y se calculó la velocidad media de la sección, la tensión de corte, la potencia del flujo y la rugosidad del cauce. En la tabla 3 se expone un resumen con los valores obtenidos. Para la situación pre-dique se analizaron dos secciones: Puente Gaiman (columna 1) y Bryn Gwyn (columna 2), mientras que para la situación actual los valores corresponden a la sección de aforo de Puente Gaiman (columna 3) y al promedio del tramo ubicado aguas abajo (1,8 km de longitud, columna 4).

Le tensión de corte se calculó empleando el radio hidráulico o la profundidad media según la disponibilidad de esta información.

$$\tau = \gamma \cdot R \cdot S \quad (24)$$

$$\tau = \gamma \cdot H \cdot S \quad (25)$$

En donde τ es la tensión de corte; γ , el peso específico del agua; R, el radio hidráulico; H, la profundidad media y S, la pendiente longitudinal.

La potencia del flujo (Ω) se define como:

$$\Omega = \gamma \cdot Q \cdot S \quad (26)$$

En donde Q es el caudal. Esta variable cuantifica la potencia que debe disipar el flujo por unidad de longitud de recorrido. La potencia unitaria (ω) se define como la potencia del flujo (Ω) por unidad de ancho del río (B).

Con respecto a la pendiente longitudinal se han empleado los valores característicos de los tramos. En la situación actual se adoptó la pendiente del nivel de cauce lleno, que asciende a 0,0286% (figura 6) y para la situación pre-dique la pendiente corresponde a las nivelaciones del pelo de agua

para distintos caudales (Pronsato, 1950a). Para el caudal de cauce lleno corresponde una pendiente de 0,023%.

La velocidad media actual es levemente inferior. Descendió de un valor medio de 0,88 m/s a 0,71 m/s. Como el caudal de cauce lleno es menor, también lo es la cantidad de potencia que el curso debe disipar. La potencia del flujo pasó de un valor original de 218,9 W/m a 147 W/m. También se observa una reducción en la potencia unitaria, pero de menor entidad (80%) dado que el canal se ha angostado: 6 W/m² para la situación original y 4,8 W/m² para la actual. Sin embargo resulta muy interesante el caso de las tensiones de corte. A diferencia de los parámetros anteriores, la tensión depende de la profundidad del escurrimiento que ha aumentado como se ha indicado en párrafos anteriores. Esta condición influye notablemente al punto de no producirse una variación significativa: 6.5 Pa para la situación Pre –dique (valor medio de 6,0 y 7,0 Pa) y 6,4 Pa para la situación actual (valor medio de 6,2 y 6,7 Pa).

Tabla 3. Resumen de características hidráulicas y morfológicas para el caudal de cauce lleno.

Descripción			Situación Pre Dique		Situación Actual	
			Puente Gaiman (1)	Sección Bryn Gwyn (2)	Puente Gaiman (3)	Tramo Aab Pte Gaiman (4)
Parámetros geométricos - Sección para Caudal de cauce lleno						
Bbk	Ancho	(m)	38.4	35.11	34.1	28.0
Hbk	Profundidad media	(m)	2.68	3.35	2.24	2.66
Bbk/Hbk	Relación de aspecto	(--)	14.3	10.5	15.2	10.5
Abk	Area	(m ²)	102.91	117.8	76.38	74.3
Pbk	Perímetro mojado	(m)		38.07		30.3
Rbk	Radio hidráulico			3.09		2.45
S	Pendiente	(m/m)	0.00023		0.000286	
Parámetros hidráulicos						
Qbk	Caudal de cauce lleno	(m ³ /s)	97		53.8	
	Permanencia anual	(%)	7.1		17.9	
	Recurrencia	(años)	1.28		1.105	
U	Velocidad media	(m/s)	0.94	0.82	0.70	0.72
Ω	Potencia de la corriente	(W/m)	218.9		150.9	
ω	Potencia unit. de la corriente	(W/m ²)	5.7	6.2	4.4	5.4
τ	Tensión de corte	(Pa)	6.0	7.0	6.3	6.9
n	Rugosidad (Manning)	s/m ^{1/3}	0.031	0.041	0.041	0.045

Respecto a la rugosidad del canal, se observa un marcado aumento. Se aplicaron varias metodologías para arribar a los valores consignados en la tabla 3. Para la situación pre-dique Pronsato (1950a) mediante medición directa obtuvo un valor medio del coeficiente de rugosidad de Manning igual a 0,030 (rango entre 0,028 y 0,032) mientras que aplicando la ecuación de Chezy-Manning con datos de la geometría hidráulica se determina un valor de 0,037. Aplicando esta última metodología con los valores medios de las secciones actuales del tramo de estudio, el valor asciende a 0,043. También se realizaron mediciones directas de campo para cuantificar el caudal, la geometría y la pendiente del pelo de agua, dando como resultado un coeficiente de 0,042 para la sección del Puente Gaiman (EVARSA, 2005). También se realizaron mediciones en varias secciones del tramo Gaiman-Trelew obteniendo coeficientes de Manning comprendidos entre 0,0193 y 0,0558, con una media de 0,0392.

Para ambas situaciones, pre-dique y actual, la resistencia de grano es muy baja. Si se emplea la fórmula de Strickler para las arenas halladas en el lecho se puede dar cuenta de un coeficiente de

rugosidad de sólo 0,012. La diferencia se atribuye a la sinuosidad del canal, las formas de fondo (dunas y rizos), la variación de la sección transversal, y especialmente a la vegetación ribereña y los obstáculos en el interior del curso. Estas dos últimas causas se han intensificado en la actualidad, y al ser el canal más angosto, el efecto hidráulico se transfiere a una mayor sección de escurrimiento, tal como lo demuestran distintas pruebas de laboratorio (ver Armanini, 2005).

CONCLUSIONES

El Río Chubut ha cambiado sus características morfológicas como respuesta a la regulación de caudales en la Presa Florentino Ameghino. El tramo estudiado se encuentra en el Valle Inferior del Río Chubut a 136 km aguas abajo de la represa. Los datos disponibles han permitido caracterizar la situación previa a la construcción y la actual que se presume en equilibrio, en un ambiente propio de depósito y por lo tanto no sujeto al fenómeno de “aguas claras”.

La regulación del Río Chubut modificó la distribución anual de caudales pasando de un típico régimen pluvio-nival con picos de crecidas en los meses de Junio y Septiembre, a otro muy uniforme. Los módulos son muy similares, con un valor aproximado de $40 \text{ m}^3/\text{s}$.

La curva de duración de caudales tiende a aplanarse evidenciando la eliminación de los altos caudales de crecidas y el sostenimiento del flujo en estiaje. El caudal máximo característico descendió de 117 a $68,7 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que el caudal mínimo característico aumentó de 0,2 a $16,7 \text{ m}^3/\text{s}$.

En la actualidad, durante el 68% del año se observan caudales superiores a la situación pre-dique, pero con los cambios en la geometría, los niveles actuales superan a los anteriores durante el 97% del año. Durante el periodo de estiaje los niveles actuales son 1,45 m superiores a los precedentes.

El caudal de “cauce lleno” refleja los cambios morfológicos e hidrológicos. Se redujo en un 55% pasando de $97 \text{ m}^3/\text{s}$, previo a la construcción de la presa, a $53,8 \text{ m}^3/\text{s}$ en la actualidad (recurrencia 1,1 años y permanencia de 65 días en el año).

La respuesta morfológica del cauce, ante los cambios en los caudales, se materializó con una reducción en el ancho, una mayor profundidad para los mismos caudales y el ascenso del lecho. La relación de forma (B/H) es en la actualidad más baja que en la situación pre-dique. La sedimentación se produjo entonces preferencialmente al pie de la márgenes, favorecida por el efecto estabilizador de la vegetación ribereña.

Los cambios morfológicos se condicen con las previsiones del sistema de clasificación de Brandt (2000) para el “caso 3” en el que el caudal formativo disminuye y la capacidad de transporte es inferior a la alimentación de sedimentos desde aguas arriba.

Desde el punto de vista hidráulico el cauce es más rugoso. Se ha evidenciado un aumento en la rugosidad cuantificado con un N de Manning entre 0,031 y 0,041 en la situación pre-dique y un rango de 0,041 a 0,045 en la actualidad.

Por último, la presencia de la presa Florentino Ameghino redujo dramáticamente la intensidad de las crecidas, tal como había sido concebida. Por ejemplo, en la situación pre-dique la crecida bianual ascendía a $136 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que hoy posee una magnitud de $80 \text{ m}^3/\text{s}$ (la “antigua” crecida bianual posee en la actualidad una recurrencia de 20 años). Sin embargo, luego de 40 años de

regulación de las aguas del Río Chubut el curso experimentó un atrofiamiento de la sección modificando la relación entre caudales y niveles. Como consecuencia, existe en la actualidad una amenaza hídrica por desborde con recurrencia comprendida entre 5 y 10 años, similar a la situación previa a la construcción de la presa.

BIBLIOGRAFÍA

- Armanini A.** (2005). *Principi di idraulica fluviale*. Ed. Bios. Castrolibero. Italia.
- AyEE** (1989). *Optimización del uso del agua en el Valle Inferior del Río Chubut. Limpieza del Río Chubut, Etapa I. Tomo III*. Convenio Provincia del Chubut – AyEE. Ministerio de Obras y Servicios Públicos, Secretaría de Energía.
- Brandt S. A.** (2000) “*Classification of geomorphological effects downstream of dams*”. Catena Nro 40, 375-401.
- Chow V T, Maidment D. R., Mays L. W.,** (1994) *Hidrología aplicada*. McGraw Hill. Colombia.
- Da Canal M, Comiti F, Surian N, Mao L, Lenzi M.** (2007) “*Studio delle variazioni morfologiche del fiume Piave nel Vallone Bellunese durante gli ultimi duecento anni*”. Idronomia Montana 27/1. Nuova Editoriale Bios, Italia.
- EVARSA,** (2005). *Aforos sobre el Río Chubut, tramo Gaiman – Rawson*. Dirección General de Obras Hídricas de la Provincia del Chubut.
- Fueyo J.,** (2004). *Ejecución de perfiles transversales sobre el Río Chubut – Tramo II*. Dirección General de Obras Hídricas de la Provincia del Chubut.
- Grimalt F, Grimalt M. E.** (2005). *La evolución del Río San Juan aguas abajo del Azud I. de la Roza, luego de la puesta en marcha de la presa de Ullum al año 2004*. XX Congreso Nacional del Agua, Mendoza, Argentina.
- Hernández M. A.** (1983). *Informe complementario sobre el resultado de ensayos geohidrológicos practicados en una unidad acuífera semiconfinada en el valle inferior del Río Chubut*. Consejo Federal de Inversiones, Provincia del Chubut, Convenio VIRCH
- Hughes W.** (1993). *A orillas del Río Chubut en la Patagonia*. Editorial El Regional.
- Lane E. W.** (1955) “*The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering*”. Proceedings A.S.C.E.
- Leopold L** (1994) *A view of the river*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.
- Montgomery D. R. y Buffington R.** (1997) “*Channel-reach morphology in mountain drainage basins*”. Nature, Vol 381.
- Narvatil O, Alvert M.B., Herouin E, Gresillon J.M.,** (2006) “*Determination of bankfull discharge magnitude and frequency: comparison of methods of 16 gravel-bed river reaches*”. Earth Surface Processes and Landforms 31, 1345-1363.
- Pronsato A. D.** (1948). *Ecuación de gastos para la escala de Gaiman*. Dirección General de Agua y Energía.
- Pronsato A. D.** (1950a). *Estudio geohidrológico del Río Chubut. Parte II*. Dirección General de Agua y Energía Eléctrica. Revista Agua y Energía. Año IV. N° 29.
- Pronsato A. D.** (1950b). *Estudio geohidrológico del Río Chubut. Parte III*. Dirección General de Agua y Energía Eléctrica. Revista Agua y Energía. Año IV. N° 30.
- Rosgen D.** (1994). “*A Classification of natural rivers*”. Catena, Nro. 2.
- Serra J.** (2004). “*Urbanización e inundaciones en sistemas hídricos del centro de la región patagónica*” en Inundaciones Urbanas en Argentina, Editor: J. C. Bertoni. Editorial Universitatis. Córdoba, Argentina.

- Serra J., Malnero A., De Pablo P.** (2005) *Análisis de la capacidad de conducción actual de cauce inferior del Río Chubut*. Convenio, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco – Secretaria de Infraestructura, Planeamiento y Servicios Públicos de la Provincia del Chubut.
- Surian N., Rinaldi M.**, (2003). “*Morfological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy*”. *Geomorphology*, 50, 307-326.
- Trush W. J., McBain S. M., Leopold L. B.** (2000) “*Attributes of an Alluvial River and Their Relation to Water Policy and Management*”, en *National Academy of Science Proceedings*, v.97, No.22, 11858-11863.
- Williams G. P.**, (1978). “*Bankfull discharge of rivers*”. *Water Resources Research* 14 (6), 1141-1154.
- Wolman M. G.**, (1955). “*The natural channel of Brandywine Creek, Pennsylvania*”. *US Geological Survey Professional Paper* 271.