

Efectos hidrogeomorfológicos de la represa “Casa de Piedra”. Variación témporo espacial en hidrología y drenaje

Héctor Walter Cazenave*

Resumen

La construcción del dique Casa de Piedra, sobre la parte final del alto valle del río Colorado, alteró drásticamente el comportamiento del fluvio, en cuanto al arrastre de sólidos aguas debajo de la represa. Por acción de su gran embalse se produce la deposición del material trasportado en suspensión, dándole una nueva condición física y en parte también química, a las aguas emergentes del dique, que han dejado en el lago las arcillas y el limo que trasportaban.

El agua emergente del dique Casa de Piedra, casi carente de sedimento, tiene una mayor capacidad erosiva que la que fluía antes del embalse; esta condición permite reducir el tiempo de formación de un meandro en el área estudiada con respecto a sectores de aguas arriba de la presa. Estas circunstancias han generado el fenómeno conocido como “aguas claras”.

Con el propósito de probar esta acción en forma cuantitativa, se consideraron períodos de aproximadamente 25 años previos y posteriores al levantamiento del dique, en los que se comparó la aparición y desaparición de meandros. Las modificaciones hidrográficas detectadas a través de fotografías aéreas y el incremento del número de meandros son significativos para el lapso analizado.

Palabras clave: meandro, sedimentos, erosión, represa

*Fundación Chadileuvú, Santa Rosa, La Pampa. E-mail: walcazen@cpenet.com.ar

Hydrogeomorphological effects of “Casa de Piedra” dam. Temporal and spatial variations in hydrology and drainage

Abstract

The construction of Casa de Piedra dam in the final section of the high Colorado River Valley drastically modified the fluvial behavior regarding the downstream transportation of solids. Deposition of sediment material occurs due to the action of the large reservoir and gives the dam a new physical condition and some changes to the chemical characteristics of the emerging dam water which leaves the clay and silt behind.

The emerging water from Casa de Piedra dam almost devoid of sediments has a greater erosive capacity than before flowing into the dam. This condition can reduce the time of formation of a meander in the area covered by this study with respect to upstream sectors of the dam. These circumstances have also generated the well-known “clear water” phenomenon.

In order to test this action in a quantitative way, 25-year periods before and after the dam construction were considered. The appearance and disappearance of meanders were compared and the hydrographic changes detected through aerial photographs. The increasing number of meanders was significant for the analyzed period.

Key words: meander, sediment, erosion, dam

Introducción

La consideración de los elementos témporo-espaciales básicos del río Colorado aguas abajo de la presa Casa de Piedra, que permitió la determinación sistemática y cuantificada de las anomalías en el funcionamiento del cauce fluvial y su área de influencia aguas abajo de la obra a partir de la construcción del dique y la formación del embalse. La determinación de esos cambios en el flujo fluvial (cambios hidrológicos) y en la morfología del cauce (cambios hidrogeomorfológicos) constituyen el tema del presente artículo.

A fin de comprobar y cuantificar los efectos témporo-espaciales en el diseño del drenaje por aceleración en la evolución de las curvas del río, se optó por trabajar sobre un segmento, entre los meridianos 65° 45' y 66° 09' Oeste, ubicado aguas abajo de la presa. El mismo está en condiciones de obrar como “testigo” de esos cambios al contarse con registros cartográficos y de sensores remotos secuenciales y fiables, anteriores y posteriores a la obra.

En la figura 1 se consignan la localización del río Colorado en el contexto nacional, la ubicación del dique Casa de Piedra y las provincias de Buenos Aires, La Pampa y Río Negro directamente implicadas en la problemática del río.



Figura 1. Ubicación del dique Casa de Piedra
 Fuente: realizada por Dr. H. Walter Cazenave

Métodos y materiales

Los materiales utilizados para el desarrollo del trabajo en lo que hace al estudio del tramo testigo comprenden: cartografía antigua fiable (Industria y Minería, 1948) imágenes satelitarias (CONAE, 1975; 2000/01; Servicio Minero Geológico de los EE.UU., 2011) y fotografías aéreas recientes (COTIRC 1965; COIRCO, 2005). Al existir escasa bibliografía específica sobre el tema, se desarrolló una metodología capaz de conjugar los elementos disponibles (Lagasse, 1996; 2004). Esta se basa en el análisis seriado, ordenado en el tiempo y cuantificado en las formas, de los trazados hidrográficos de un mismo sector del curso, evaluando los cambios que en él se hayan registrado. A ello se debe agregar el empleo de algunos parámetros emanados de la geomorfología cuantitativa fluvial y de las necesidades del trabajo.

El estudio del comportamiento hidrológico del río Colorado se basó fundamentalmente en los registros de tres estaciones de aforos: Buta Ranquil, ubicada a la salida del sector montañoso y cuenca de alimentación; Pichi Mahuida, hacia la mitad del valle medio y Paso Alsina, en los comienzos del valle inferior (Fig. 2). Pichi Mahuida, que tenía el registro más antiguo del país, quedó prácticamente inactiva a partir de la habilitación de Casa de Piedra, desde donde se manejan los caudales. En el año 1991 se dejó de aforar el sólido en las estaciones de Buta Ranquil y Pichi Mahuida. Los datos utilizados corresponden a los registros de COIRCO (Comité Interjurisdiccional del río Colorado) y EVARSA (Evaluación de Recursos Sociedad Anónima). El contexto temporal del estudio hidrológico abarca desde 1982, cuando comienzan los registros en Paso Alsina, que permiten establecer una comparación con Pichi Mahuida, hasta el año 2000.

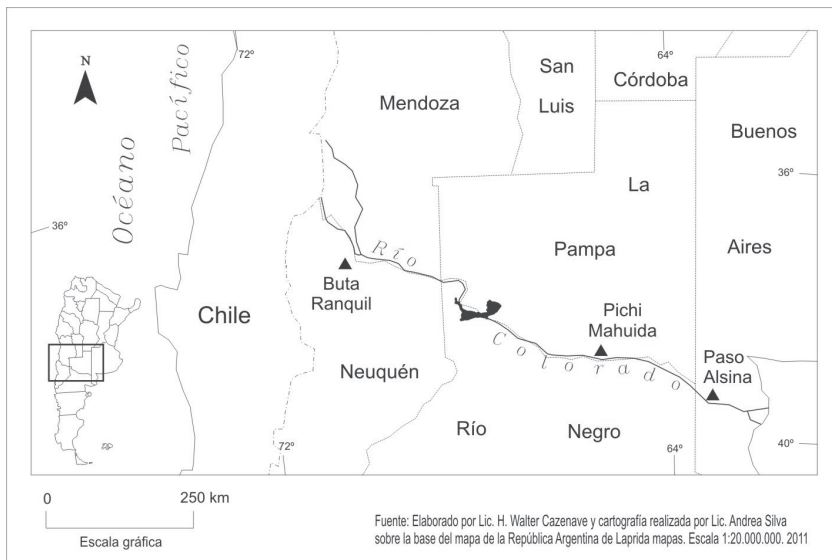


Figura 2. Estaciones de aforo sobre el río Colorado.

Fuente: realizada por Dr. H. Walter Cazenave

Para establecer una comparación en la traza hidrográfica se analizaron las imágenes del río que datan de antes de la fecha de influencia del embalse, por lo que se trabajó sobre las imágenes satelitales ERST Path 117 Row 118, del 19 de julio; Path 042 Row 043, del 2 de abril; Path 099 Row 100, del 3 de abril y Path 184 Row 185, de 24 de noviembre, todas del año 1975. También se usó un plano a escala 1:150.000 correspondiente al área de la represa de Huelches, levantado en 1948 por la dirección General de Industria y Minería, fiable en su calidad cartográfica y adecuado en su escala. Este se constituyó en el documento base del análisis y muestra un estado hidrográfico no perturbado, con medio siglo de antigüedad. El período de estudio hidrográfico quedó comprendido entre 1948 y las fotografías aéreas de 2005.

Con respecto al empleo de imágenes satelitales, se contó con las del mismo segmento referidas a los años 1973, ERST y 2001, Landsat. Por lo tanto se trabajó para un intervalo de 25 años desde el primer documento fiable (el ya citado plano de 1948) hasta el primer registro satelital de 1973 y otro espacio temporal de 27 años entre aquella fecha y la tercera, correspondiente a Landsat 2001. En medio de las dos últimas se ubica la construcción del dique y posterior llenado del embalse.

Contar con esta cartografía permitió considerar el tramo aludido como un segmento que oficia de testigo en cuanto al comportamiento de los meandros, tanto en lo que hace a su formación como a su desaparición. Se extiende sobre una longitud de 103 km siguiendo la vaguada del río. Está comprendido entre los 65° 45' Oeste, sobre la longitud geográfica del establecimiento Las Retamas (RN), en proximidades de Paso Huelches y los 66° 09' Oeste, a unos 5 km aguas abajo de la estancia La Sirena (LP), al Este de la localidad La Japonesa o Gobernador Duval.

Es lógico suponer que en lapsos tan similares, 25 y 27 años, si no hubo grandes variaciones hidrológicas entre uno y otro, la acción natural del río debería haber tenido consecuencias semejantes. Para verificar esa similitud de períodos se calculó el Coeficiente de Variabilidad, herramienta estadística resultante de asociar en un cociente la desviación estándar del promedio de las observaciones con la media de los mismos, expresándose el resultado en forma porcentual (Johnson, 1993).

Resultados

Nuevas formas hidrológicas

Por nuevas formas hidrológicas deben comprenderse los valores de caudal, gasto sólido y salinidad registrados a partir de la construcción e influencia manifiesta del dique Casa de Piedra (año 2000), considerados en forma individual o interrelacionados. A partir de esas cifras se han elaborado gráficos que los comparan en sus formas anteriores y posteriores al cierre con el dique. Los datos corresponden a los registros suministrados por el COIRCO y EVARSA.

Comparación de las series hidrológicas en Pichi Mahuida

La oscilación entre picos y simas se redujo en más de $60 \text{ m}^3/\text{s}$ reflejando las erogaciones reguladas. Se advierte que la pendiente de descenso en caudal se ha hecho más uniforme. La comparación de las curvas hace más evidente el cambio que, en lo cuantitativo y lo temporal, han sufrido los caudales a partir del cierre de Casa de Piedra (Figs. 3 y 4).

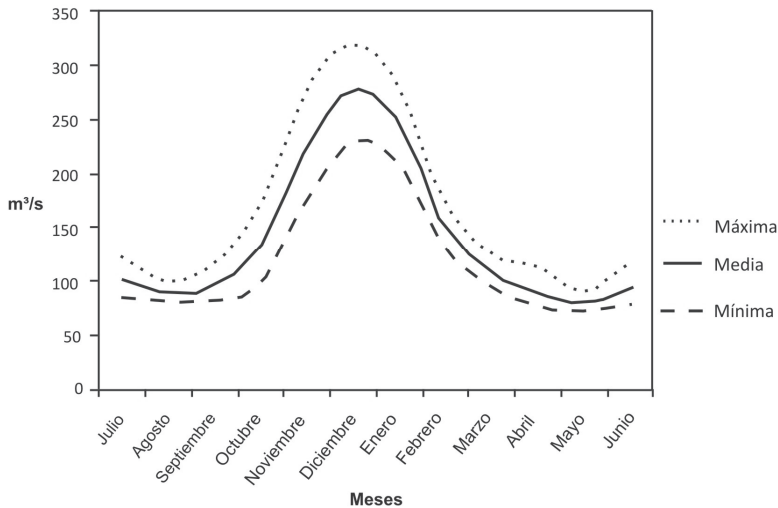


Figura 3. Pichi Mahuida. Caudal medio, máximo medio y mínimo medio anteriores al cierre. Período 1981/82 – 1992/93.

Fuente: realizada por Dr. H. Walter Cazenave

Antes del cierre de Casa de Piedra, las curvas de gasto sólido presentan como rasgo destacado la diferencia temporal de los picos de los valores medios anuales con los valores de máximos medios, en noviembre y en diciembre respectivamente (Fig. 5). Hay una tendencia amesetada en la curva de valores medios anuales y otra en sentido inverso en la de valores mínimos medios anuales. Los valores mínimos en las tres curvas son coincidentes en el mes de mayo.

Estas curvas son una de las muestras más evidentes de la acción de la obra. La gran masa de agua embalsada ha provocado la deposición de la mayoría del sólido arrastrado por el río, notándose que el pico después del cierre se ubica en el mes de agosto, en tanto que la mínima, paradójicamente, se produce en diciembre, antaño mes de los mayores registros (Fig. 6). Hay un pico significativo en abril que puede deberse a las lluvias transcordilleranas de otoño-invierno. Después del pico inicial posterior al cierre parece estabilizarse una tendencia de valores.

Antes del cierre la distribución muestra un importante pico para el mes

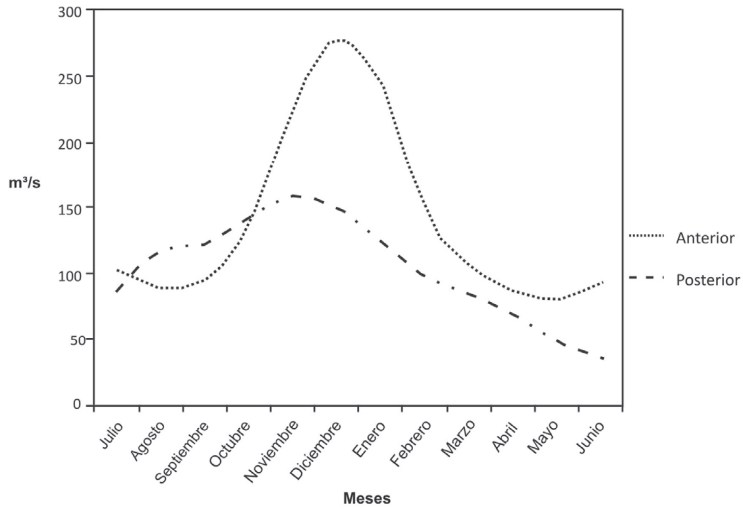


Figura 4. Pichi Mahuida. Caudal medio anterior y posterior al cierre. Período 1981/82 – 1992/93. Fuente: realizada por Dr. H. Walter Cazenave

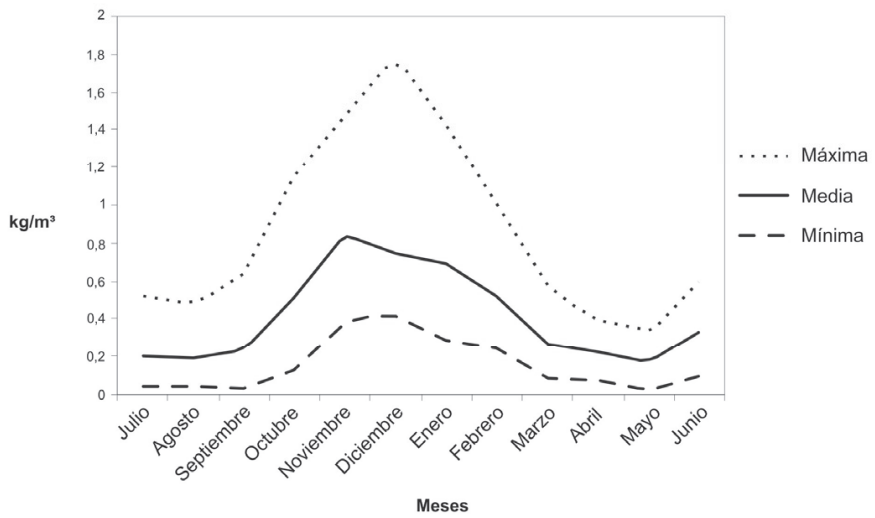


Figura 5. Pichi Mahuida. Gasto sólido medio, máximo medio y mínimo medio anteriores al cierre. Período 1981/82 – 1992/93. Fuente: realizada por Dr. H. Walter Cazenave

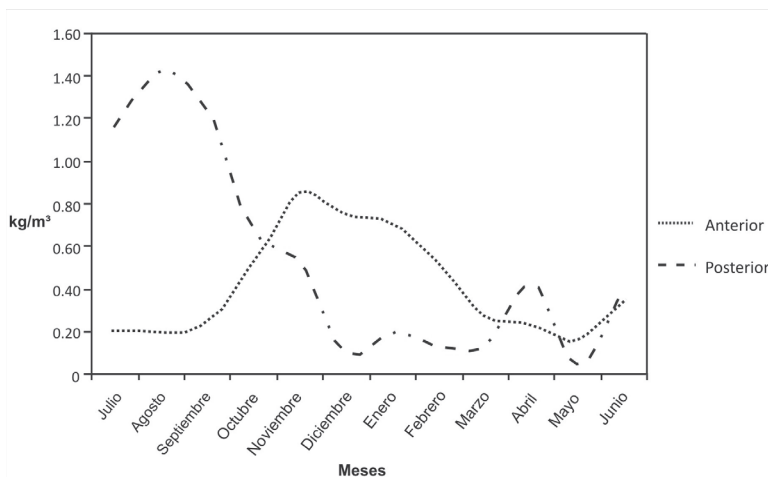


Figura 6. Pichi Mahuida. Gasto sólido medio anterior y posterior al cierre. Período 1983/84 – 1999. Fuente: realizada por Dr. H. Walter Cazenave

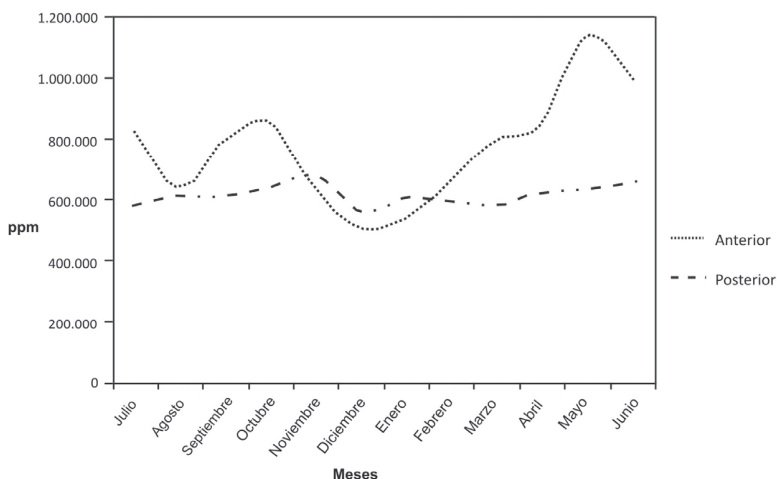


Figura 7. Pichi Mahuida. Valores medios de salinidad anterior y posterior al cierre. Período 1981/82 – 1992/93. Fuente: realizada por Dr. H. Walter Cazenave

de mayo y uno secundario para octubre (Fig. 7). Después del cierre aunque la tendencia estacional se mantiene, la curva se aplana al punto de oscilar sobre las 600 ppm, contrariamente al trazo anterior al cierre, entre las 500 y 1.100 ppm. La referencia a la salinidad utilizando como unidades las partes por millón (ppm) surgen de la utilización de los partes de COIRCO.

Con respecto a las relaciones entre el caudal y el gasto sólido medio se toma en cuenta la información correspondiente a caudal medio con anterioridad y posterioridad al cierre (Fig. 4) y el gasto sólido antes y luego del cierre (Fig. 6). Antes del cierre se advierte una tendencia similar en las formas de las curvas, con

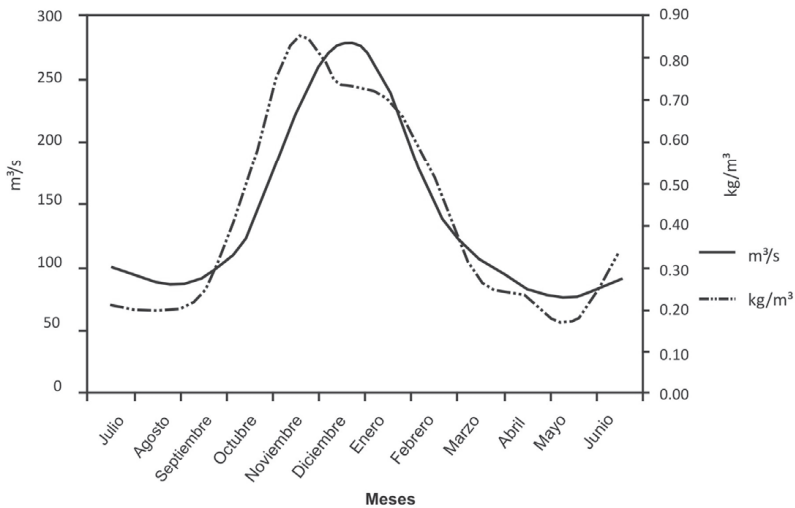


Figura 8. Pichi Mahuida. Comparación de la distribución de caudal y gasto sólido antes del cierre de Casa de Piedra. Período 1981/82 – 1992/93.

Fuente: realizada por Dr. H. Walter Cazenave

la particularidad de que el crecimiento del gasto sólido y el caudal están desfasados en un mes. Los picos se registran en noviembre-diciembre, respectivamente siendo más regular la curva de caudales líquidos (Fig. 8). Por otra parte, en las curvas para la situación posterior al cierre, aunque de traza similar (Fig. 9) resulta notable el desplazamiento temporal entre los picos de caudal y gasto sólido. El gasto sólido ha variado su pico principal de los meses de verano a los de invierno, con algunos repuntes probablemente debido a las lluvias otoñales.

Se analizó la distribución de salinidad y caudal antes (Fig. 10) y después (Fig. 11) del cierre de Casa de Piedra. En la situación después del cierre debido a la escala que debió utilizarse para poder realizar la graficación se observa una curva de caudales significativamente achatada, resulta notable señalar que inicialmente hay coincidencia de los picos de ambas magnitudes, para luego volver a la tendencia histórica y lógica de relación inversa

Se analizó la relación entre salinidad y gasto sólido advirtiéndose que antes del cierre (Fig. 12) hay una tendencia general inversa entre ambas variables. Existe concordancia inicial de salinidad y gasto sólido al iniciarse el deshielo, pero luego la salinidad decrece y sube el gasto sólido. El pico de gasto sólido se produce en noviembre en tanto que la salinidad alcanza su sima un mes después, para alcanzar su máximo en mayo. La circunstancia estaría indicando que el aumento y la disminución de sales están indirectamente relacionado con el gasto sólido y que el vínculo entre ambos es el caudal.

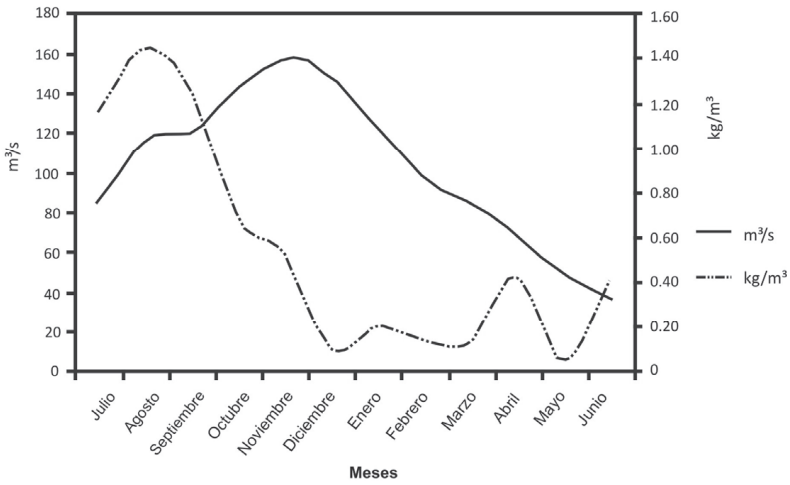


Figura 9. Pichi Mahuida. Comparación de la distribución de caudal y gasto sólido después del cierre de Casa de Piedra. Período 1981/82 – 1992/93.
Fuente: realizada por Dr. H. Walter Cazenave

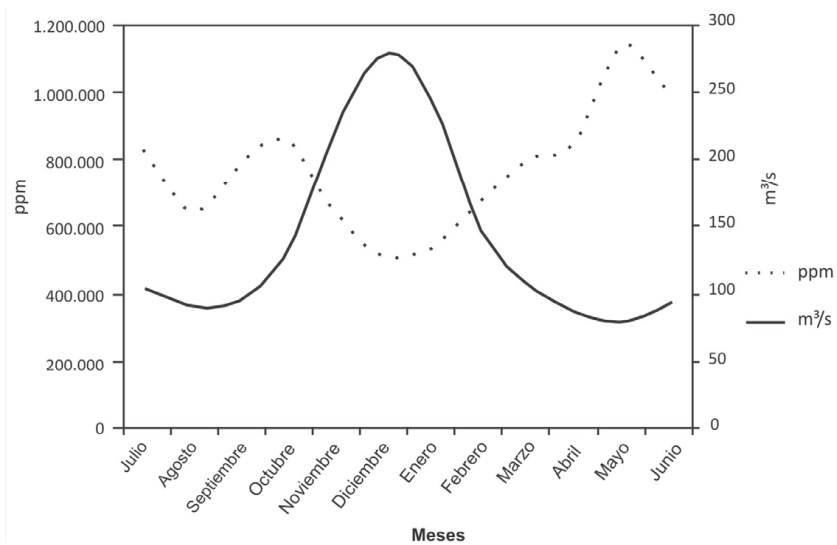


Figura 10. Pichi Mahuida. Comparación de la distribución de salinidad y caudal antes del cierre de Casa de Piedra. Período 1981/82 – 1992/93.
Fuente: realizada por Dr. H. Walter Cazenave

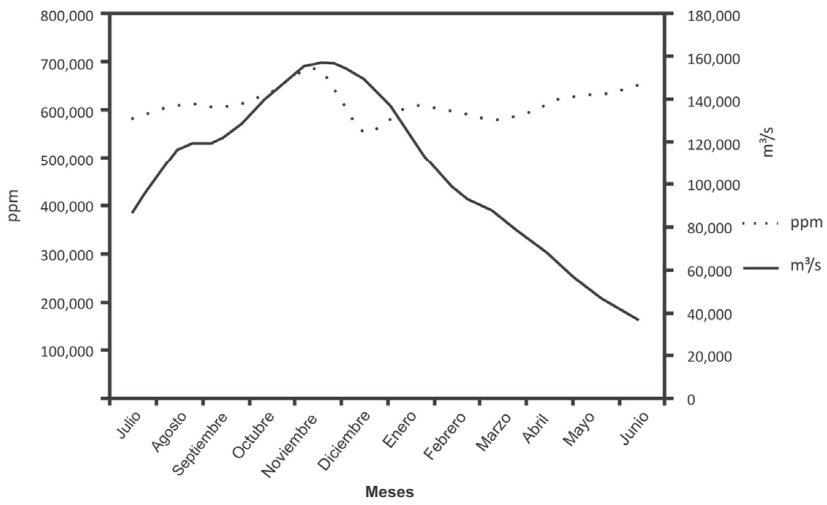


Figura 11. Pichi Mahuida. Comparación de la distribución de salinidad y caudal después del cierre de Casa de Piedra. Período 1981/82 – 1992/93.

Fuente: realizada por Dr. H. Walter Cazenave

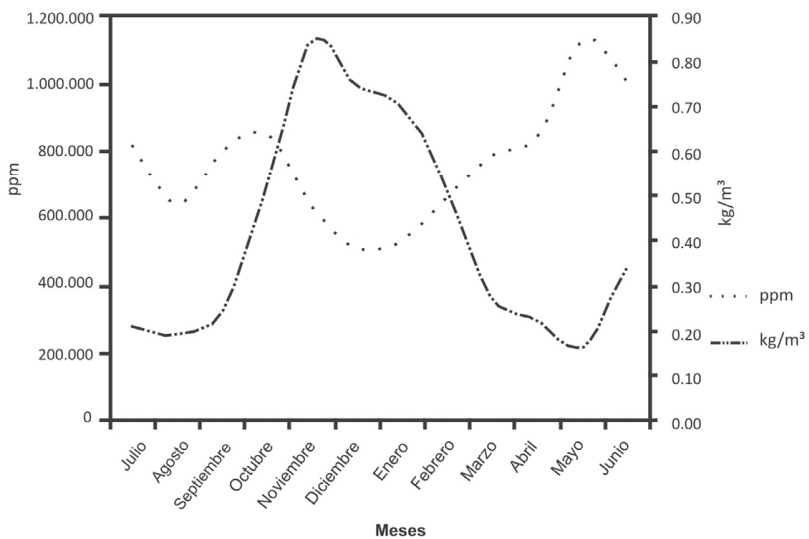


Figura 12. Pichi Mahuida. Comparación de la distribución de salinidad y gasto sólido antes del cierre de Casa de Piedra. Período 1981/82 – 1992/93.

Fuente: realizada por Dr. H. Walter Cazenave

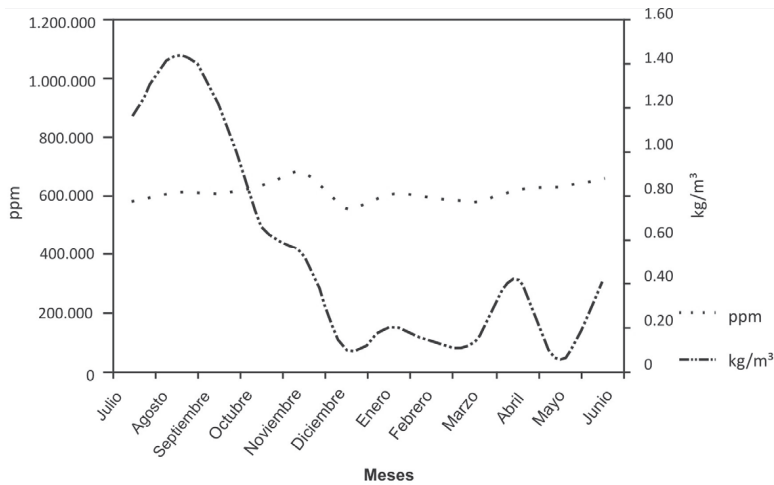


Figura 13. Pichi Mahuida. Comparación de la distribución de salinidad y gasto sólido después del cierre de Casa de Piedra. Período 1981/82 – 1992/93.
Fuente: realizada por Dr. H. Walter Cazenave

Después del cierre (Fig. 13) se comprobó el distanciamiento entre salinidad y gasto sólido aunque hay una coincidencia de mínimas en el mes de diciembre. Esto evidenció la pérdida de relación caudal/gasto sólido y el mantenimiento de la inversa de salinidad/caudal.

Estudio y comparación de las series hidrológicas en Paso Alsina

Las series de registro en Paso Alsina inician en 1982 y son considerablemente menores que las de Pichi Mahuida. Poseen la ventaja de dar un diagnóstico hidrológico final del río y toda su cuenca, ya que la estación se encuentra cercana a la desembocadura en el mar y permite una adecuada comparación con los valores de la cuenca media que se registran en Pichi Mahuida. Esta circunstancia se ve atenuada por la condición de la sección de aforos, que deforma los valores que allí se obtienen en grandes crecientes.

Análisis de caudal, gasto sólido y salinidad

Al igual que en los registros de Pichi Mahuida, todas las curvas de distribución anual de caudal se enmarcan en la misma tendencia, con picos absolutos en diciembre y mínimas en mayo. Las pendientes de ascenso también son levemente más bruscas que las opuestas. En la simultaneidad temporal se destaca la simetría de las medias y una muy leve tendencia de un sesgo a la derecha (Fig. 14).

Las diferencias son manifiestas en la sobreposición temporal; impresionan principalmente el cambio de la curva y la disminución de los picos (Fig. 15). Se advierte que la traza posterior al cierre se ha hecho menos abrupta y el pico de máxima se ha desdoblado en dos partes, tendiendo a amesetarse entre noviembre y diciembre. La oscilación entre picos y simas se redujo en más de 50 m³/s, reflejo de las erogaciones reguladas. La pendiente de descenso en caudal se hizo más suave y reiteró el cambio ocurrido a partir del cierre de Casa de Piedra. Se advierte una disminución entre los extremos de máxima y mínima pero la proporción y correspondencia entre ambos no ha tenido demasiada variación.

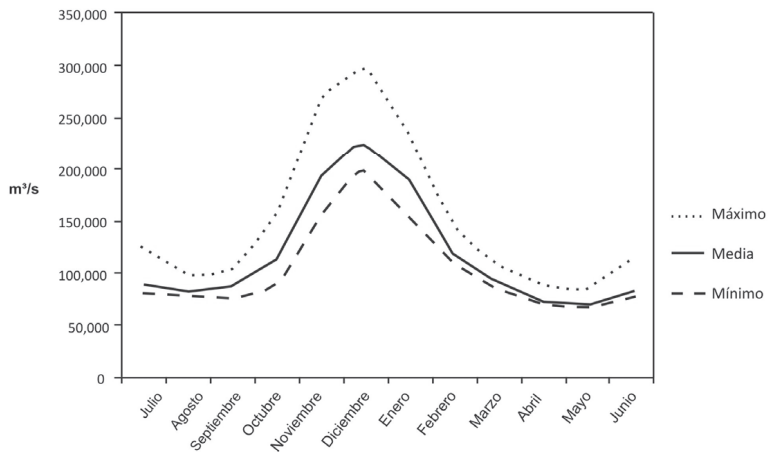


Figura 14. Paso Alsina. Caudales medio, máximo y mínimo medio anteriores al cierre. Período 1981/82 – 1992/93. Fuente: realizada por Dr. H. Walter Cazenave

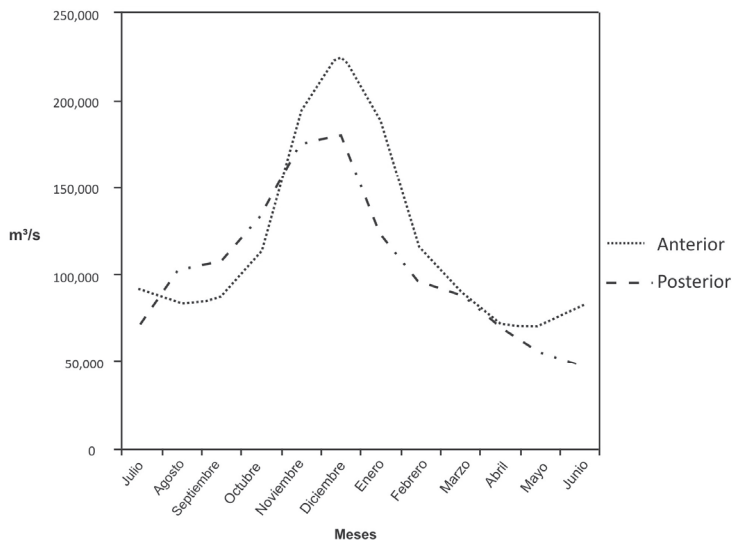


Figura 15. Paso Alsina. Caudal medio anterior y posterior al cierre. Período 1981/82 – 1992/93. Fuente: realizada por Dr. H. Walter Cazenave

La visión de conjunto subraya la tendencia general de comportamiento del sólido en el río en sus distintos estados (Figs. 16 y 17).

Las curvas de gasto sólido medio, anterior y posterior al cierre del dique son la muestra más evidente de la acción de la obra. Con la sedimentación en el embalse de la mayoría del sólido que arrastró el río se nota la diferencia al producirse el pico en el mes de agosto, con otro en octubre. La mínima se produce en junio, después de una bajante uniforme y a partir de la cual se vuelve a elevar. Es evidente la influencia del dique ya que, a igual ubicación en el gráfico, hay diferencias dos veces menores en las mínimas y tres veces en las máximas, circunstancia que corrobora la existencia de “un nuevo río” en este aspecto. Se advierten la aparición más temprana de los picos de máxima.

Con respecto a salinidad, después del cierre aunque la tendencia estacional se mantiene, la curva se desplazó y disminuyeron sus valores. El rango entre máximas y mínimas se redujo desde aproximadamente 580 a 500 ppm, lo que sugiere que no hubo un gran cambio en la dilución. Resulta notable el desplazamiento de las cimas, de diciembre a enero y de las máximas, desde mayo a julio. La reducción, tanto en una como en otra es considerable, pasando de 1.200 a 900 ppm y de poco más de 600 a 400 ppm. Según los partes del COIRCO utilizados, la unidad de referencia de la salinidad es en partes por millón (ppm) (Fig. 18).

La comparación, con el agregado de un tercer eje, permite advertir la similitud de las curvas, aunque con un desfase temporal entre las máximas del gasto sólido y de caudal líquido, que se dan en noviembre y diciembre respectivamente (Fig. 19). Las mínimas de ambas magnitudes son coincidentes en el tiempo, pero a partir de allí hay una brusca subida del Qs, probable consecuencia de las lluvias de otoño-invierno.

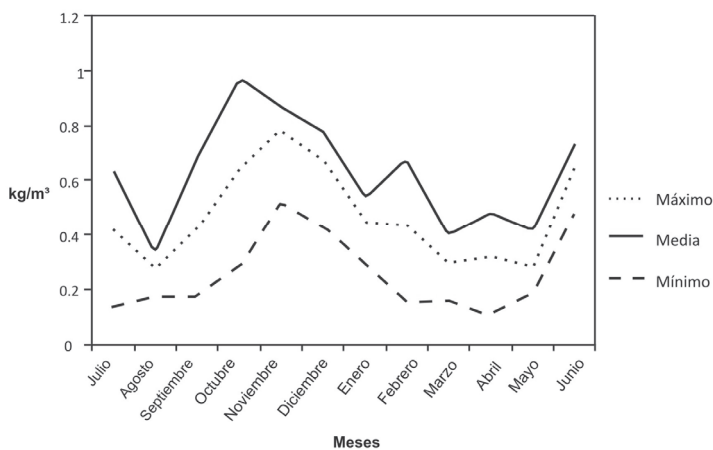


Figura 16. Gasto sólido medio y máximo y mínimo medio anterior al cierre. Período 1981/82 – 1992/93. Fuente: realizada por Dr. H. Walter Cazenave

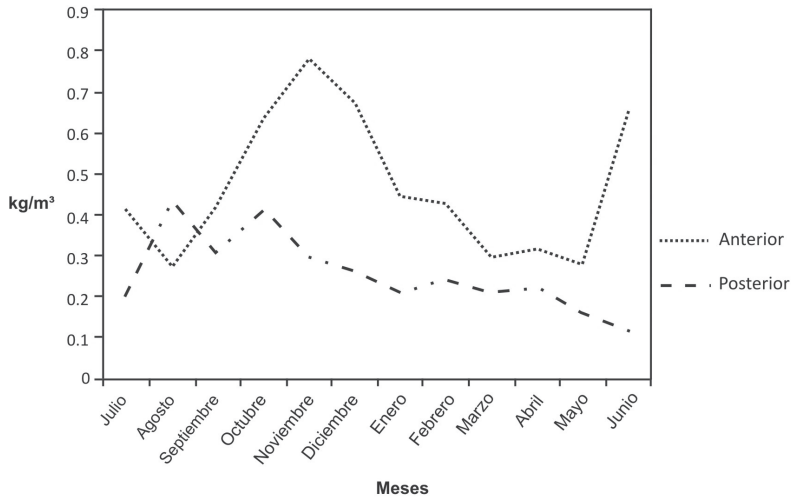


Figura 17. Paso Alsina. Gasto sólido medio anterior y posterior al cierre. Período 1981/82 – 1992/93. Fuente: realizada por Dr. H. Walter Cazenave

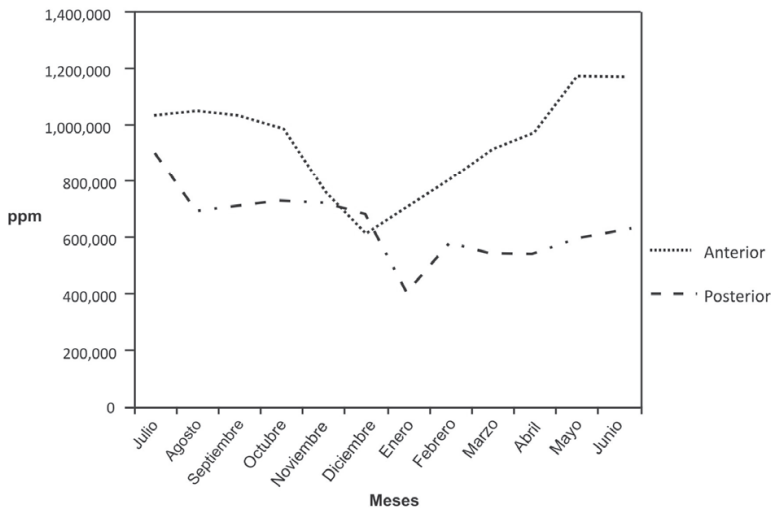


Figura 18. Paso Alsina. Sales. Valores medios anteriores y posteriores al cierre. Período 1981/82 – 1992/93. Fuente: realizada por Dr. H. Walter Cazenave

En las curvas correspondientes a la situación posterior al cierre resulta notable el desplazamiento temporal entre los picos de gasto sólido. Se dividen en dos manifestaciones desplazados sobre agosto y octubre, desde donde decrecen (Fig. 20). No hay correspondencia temporal con el pico de caudal y aparecen pequeños picos de sólidos que acaso se deban a las lluvias otoñales.

La relación entre salinidad y caudal anteriores y posteriores al cierre muestra la distribución de salinidad antes comentada y un comportamiento de caudal, que es

regular y lógico, coincidiendo su pico con la mínima de sales, en diciembre, y sus mínimas con las máximas de mayo, confirmando la relación de dependencia inversa (Figs. 21 y 22). Luego del cierre se observa que se produjo un desfase temporal notable con respecto al comportamiento de los registros anteriores al dique. El pico de caudal, en diciembre, no coincide con el seno de salinidad, en enero, rompiendo la correspondencia anteriormente señalada que tampoco existen en forma muy marcada entre el descenso de caudal y el ascenso de salinidad.

En síntesis, se destaca que en la situación anterior al cierre, la curva de caudales guarda una correspondencia inversa perfecta con la de salinidad. Al observar la comparación posterior al cierre del dique se advierte que, aunque los menores valores siguen manteniendo la tendencia estacional, se han desplazado de diciembre a enero, disminuyendo de más de 1.000 a 900 ppm. La curva de caudales ha perdido su simetría y se ha hecho más suave después del pico absoluto, que sigue manteniéndose en diciembre.

Con respecto a la relación entre salinidad y gasto sólido en la situación anterior al cierre del dique (Fig. 23), la salinidad tiene una correlación inversa con el gasto sólido estacional, aunque a partir de su mínimo asciende acompañando al gasto sólido. Se advierte que la mínima de salinidad coincide con el decrecimiento del pico de sólidos, lo que indicaría que la relación de salinidad con gasto sólido es inexistente o menor que con caudal.

En los registros posteriores al cierre, si bien la salinidad mantiene su estacionalidad y disminuye sus registros, el sólido difiere totalmente de ella, con picos atípicos y bajantes inversas (Fig. 24). No hay mayores correspondencias. El agregado de un segundo eje Y de distinta escala permite advertir un pico de gasto sólido intermedio al año hidrológico que coincide con el seno de salinidad habitual para esa época.

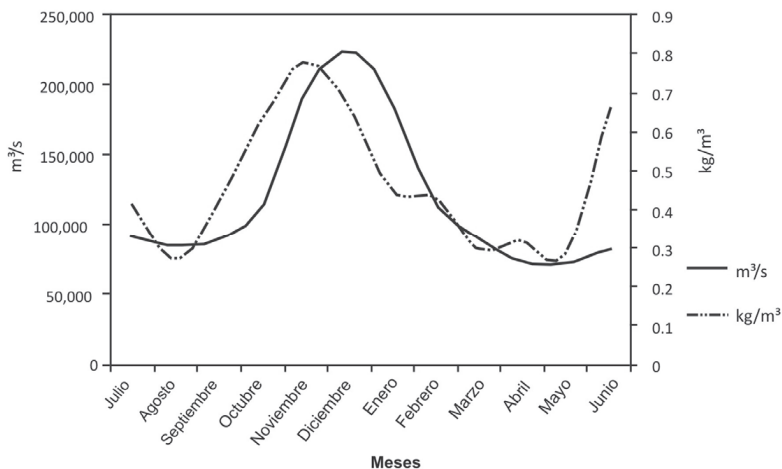


Figura 19. Paso Alsina. Caudal y gasto sólido medios anterior al cierre. Período 1981/82 – 1992/93. Fuente: realizada por Dr. H. Walter Cazenave

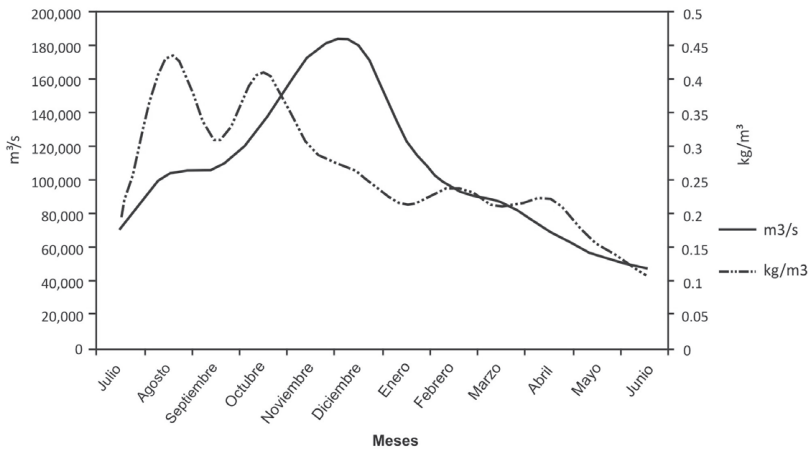


Figura 20. Paso Alsina. Caudal y gasto sólido medio posteriores al cierre. Período 1981/82 – 1992/93. Fuente: realizada por Dr. H. Walter Cazenave

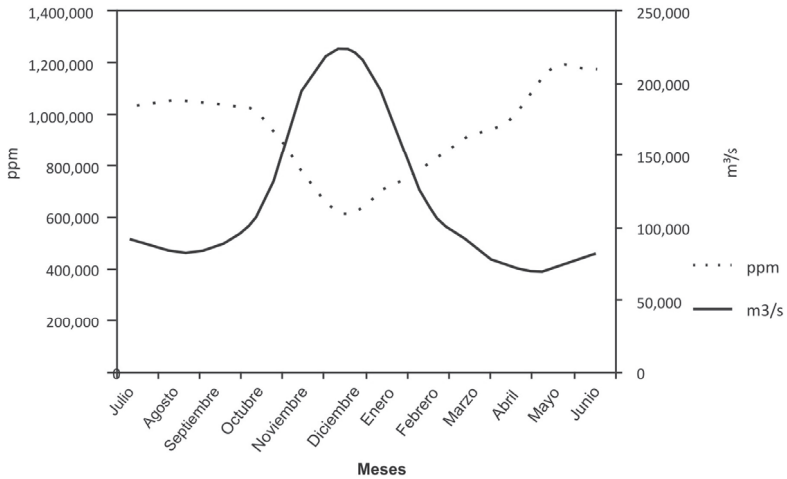


Figura 21. Paso Alsina. Valores medios de salinidad y caudal medio anteriores al cierre. Período 1981/82 – 1992/93. Fuente: realizada por Dr. H. Walter Cazenave

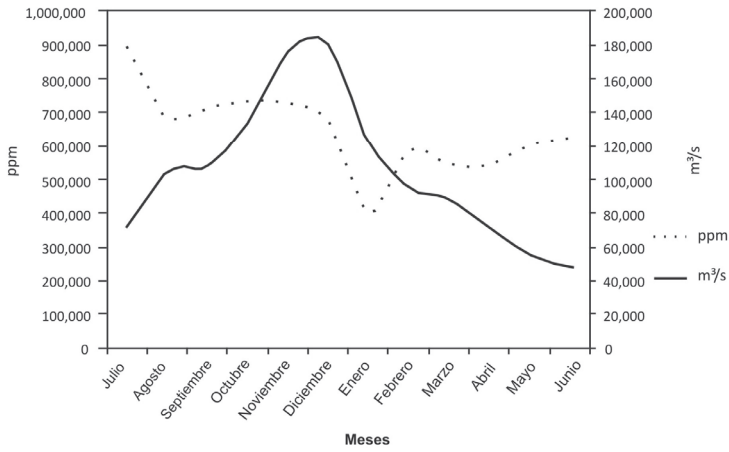


Figura 22. Paso Alsina. Valores medios de salinidad y caudal medio posteriores al cierre. Período 1981/82 – 1992/93. Fuente: realizada por Dr. H. Walter Cazenave

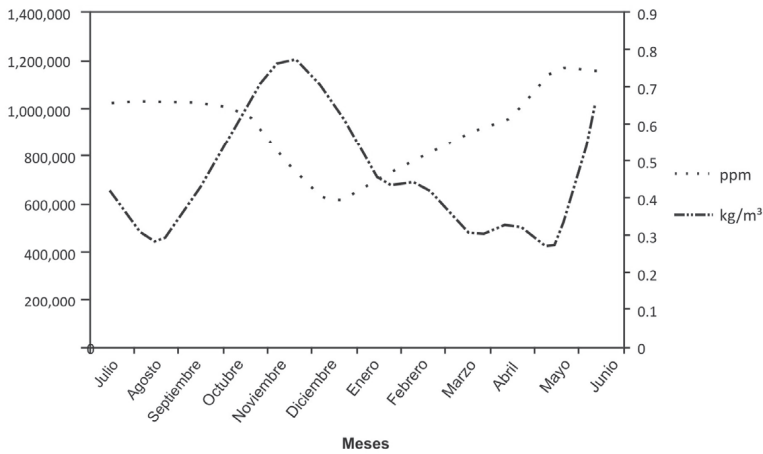


Figura 23. Paso Alsina. Valores medios de salinidad y gasto sólido medio anterior al cierre. Período 1981/82 – 1992/93. Fuente: realizada por Dr. H. Walter Cazenave

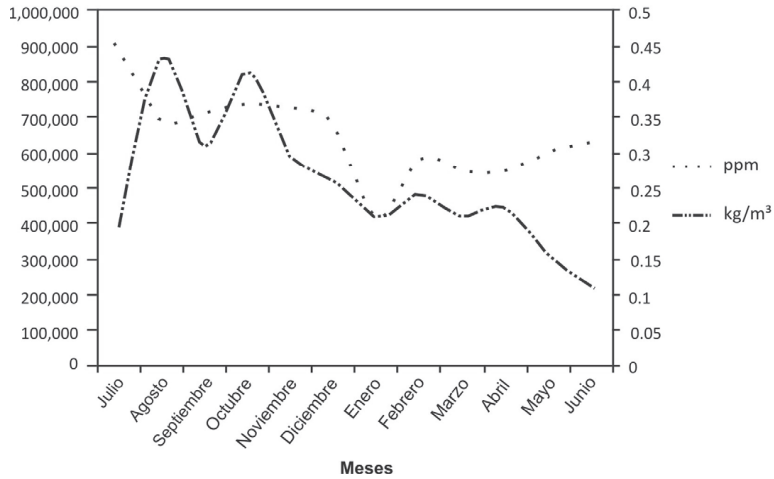


Figura 24. Paso Alsina. Valores medios de salinidad y gasto sólido medio posteriores al cierre. Período 1981/82 – 1992/93.

Fuente: realizada por Dr. H. Walter Cazenave

Nuevas formas hidrográficas

Comparación de imágenes en el tramo testigo

Las consideraciones en los gráficos precedentes evidenciaron los notables cambios sufridos por el río Colorado en su parte hidrológica a partir del inicio del funcionamiento de la represa Casa de Piedra. El mayor de esos cambios, al margen del manejo de caudales, que es una causa de orden estrictamente antropogénico, radica en la variación de la cantidad de sólidos transportados por el río cuyas aguas emergen del dique claras y transparentes, después del proceso de sedimentación sufrido en el embalse.

Desde un punto de vista estrictamente físico, esas aguas salen con una capacidad de transporte grande, por lo que su capacidad erosiva debe ser considerable. En estas condiciones se entiende el posible trabajo que realiza sobre las orillas y el lecho, pudiendo verse reflejado en la traza misma del río, a la que irán cambiando en forma perceptible.

Cada río tiene un comportamiento diferente dentro de las generalidades que les caben a todos y no existe un patrón temporal que permita predecir la variación de las formas hidrográficas que el propio río genera. Sin embargo, se desarrolla una metodología de análisis capaz de establecer la dinámica fluvial del río Colorado en un tramo testigo comprendido entre los meridianos 65° 45' y 66° 09'

Oeste, con cierta seguridad en el lapso de los últimos cincuenta años y también a partir del cierre de la presa hasta hoy. En el primero de esos casos sería con el río funcionando en su forma original en cuanto a caudal y gasto sólido; en tanto que en el segundo, lo sería analizando el resultado de los años de caudales regulados por la presa hasta la fecha de realizado este trabajo, con erogación de agua con escasa o nula carga sedimentaria. Se considera que en los años transcurridos a partir del cierre la masa de agua del embalse comenzó a funcionar como elemento capaz de alterar el escurrimiento y carga sedimentaria habituales del río. Este pudo haber sido capaz de realizar cambios perceptibles en su cauce y riberas a un punto tal que los mismos puedan ser razonablemente atribuidos a la nueva condición de las aguas.

Estudio de meandros y variaciones de la longitud del curso fluvial

Se midió la longitud del curso del río Colorado entre el dique y la desembocadura utilizando SIG ArcGIS 9.1 para los años 1973 y para 1985-2001 a los efectos de verificar las variaciones de esta magnitud como consecuencia del emplazamiento Casa de Piedra. Las longitudes obtenidas en las fechas mencionadas arrojaron un crecimiento en la longitud del cauce del 14 %, similar al que se obtiene posteriormente al analizar los meandros del tramo testigo, a mayor escala. Antes del cierre la longitud medida es 849 km y después del cierre 966 km.

Los meandros son elementos dinámicos dentro del comportamiento de los ríos; a la luz de la hipótesis sustentada sobre la nueva condición hidrológica del Colorado, con aguas de mayor poder erosivo, cabe esperar que haya habido en el cauce algunas alteraciones. A tales efectos se trabajó cuantitativamente y, en menor grado, cualitativamente, haciendo conteos de detalle sobre los bucles en el tramo Casa de Piedra – Océano Atlántico (Derraux, 1970). Un conteo detallado de la cantidad de meandros existentes, desde Casa de Piedra hasta la desembocadura en el mar arrojó 181 meandros según el análisis realizado sobre imágenes satelitales de 1973. En tanto que sobre las imágenes de 1985/2000/2001 fueron 188.

Puede aceptarse que la diferencia de siete meandros no es significativa, especialmente porque la condición estricta de meandro no es absolutamente evidente en algunas curvas. Ambas cifras indicarían un cierto equilibrio numérico en el río en el tramo considerado. Estableciendo una relación entre la cantidad de meandros y la longitud del río, que también ha variado en el tramo en cuestión, se tendría un coeficiente en parte indicativo de la actividad erosiva respecto a la meandrosidad (Heras *et al.*, 1973), que para el período anterior a Casa de Piedra es de 4,69 y posterior a Casa de Piedra es 5,14.

El empleo de un segmento testigo

La ya mencionada existencia de un relevamiento de detalle del tramo donde se pensaba originalmente levantar la presa de Huelches, que data del año 1948, permite dar un paso más en la búsqueda de la certeza sobre posibles modificacio-

nes hidrográficas a causa de la presencia de Casa de Piedra. Se acepta que el plano citado es un relevamiento prolijo y de semidetalle por lo que resulta evidente que las curvas del río en el tramo considerado están bien trazadas. Al presente, ello daría la referencia cartográfica fidedigna más antigua del estado del curso en sus curvas y bucles en el área.

El cálculo del coeficiente de variabilidad para el período 1947-48/1972-73 fue 36,42 y para el período 1973-74/1999-00 de 35,81. En el análisis de los valores correspondientes se advierte que hay una variación porcentual del derrame favorable al segundo de los períodos considerados del orden de 1,67 %, por lo que se podría considerar que los períodos son similares.

Dado que en las últimas décadas se han registrado variaciones climáticas significativas se analizó la tendencia hidrológica del río, tanto en lo que hace a caudal como a gasto sólido, a los efectos de comprobar cómo repercutían esos cambios a nivel estadístico. La tendencia del río para estos años, marca un ascenso constante en el derrame a partir de 1948 y hasta 1994 (Fig. 25). Aproximadamente a partir de la década de 1960 la tendencia supera la media de derrame anual en Pichi Mahuida de 4.200 hm³. Con el mismo año de inicio el aporte de sólidos se manifestó decreciente y hacia 1955 la línea de tendencia cruzó los 5.000.000 de tn/año que podían estimarse como media del aporte total entre 1938 y 1990, cuando cesan los registros (Fig. 26).

Es llamativo que, con una tendencia de mayores caudales que normalmente originan mayores trasportes, el sólido se muestre como decreciente a lo largo de tanto tiempo. La tendencia natural de esos años se ve complementada a partir del segundo semestre de 1989, con la presencia retentiva de sedimento por parte de Casa de Piedra.

Con lo expuesto se puede inferir que una comparación de la traza hidrográfica entre 1948-1973 y 1973-2001 permitiría una estimación de la actividad erosiva en ambos períodos. Para conseguirla se trabajó con las distintas cartografías del tramo testigo obtenidas a partir de imágenes satelitales correspondientes a esos años que, como ya se mencionó, fueron llevadas a la misma escala.

Modificaciones en la cantidad de meandros

Se debe considerar que en el segundo período, aproximadamente desde 1993, comenzó a hacerse sentir con más intensidad el efecto del embalse. Las diferencias en lo que hace a la cantidad de meandros existentes en el tramo se evidencian al hacer la comparación cartográfica de ambos períodos.

Para el período 1948/73 el número de meandros fue 3 y se advierte que el lapso 1973–2000, pese a ser mayor en dos años más, casi triplica la cantidad de

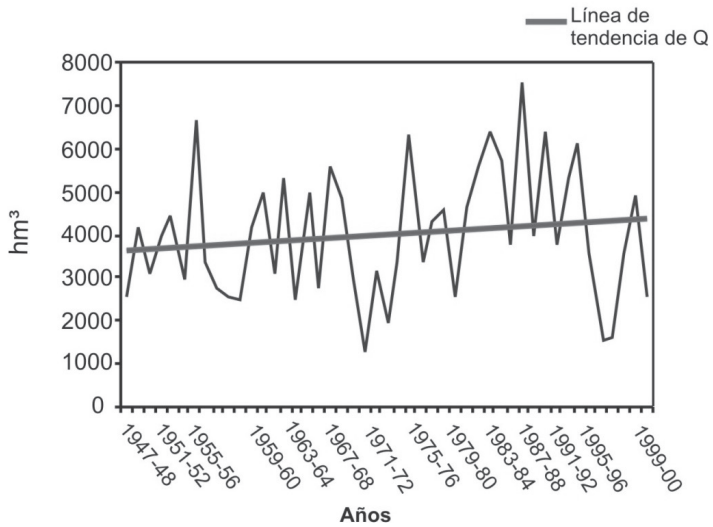


Figura 25. Pichi Mahuida. Tendencia hidrológica del río durante el período 1947 - 48/1991/92 en el tramo testigo. Fuente: realizada por Dr. H. Walter Cazenave y EVARSA 2000.

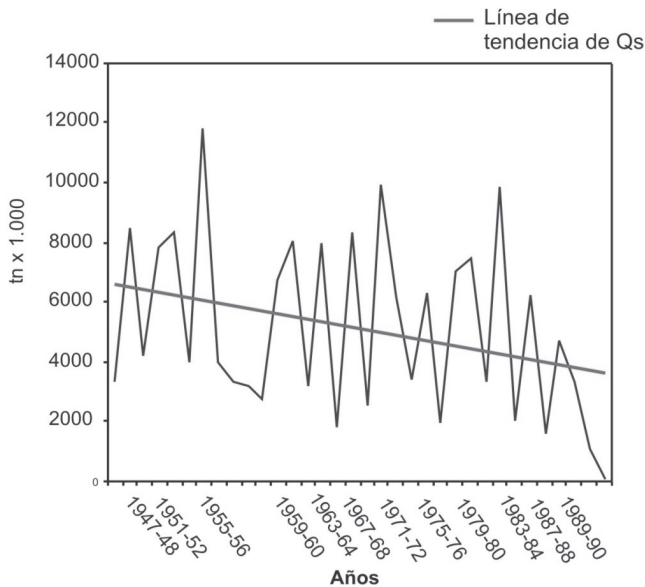


Figura 26. Tendencia del caudal sólido del río durante el período considerado en el tramo testigo 1947-48/1988 - 89. Fuente: realizada por Dr. H. Walter Cazenave y EVARSA 2000.

ocurrencias de modificaciones en la hidrografía del tramo en cuanto a meandros aparecidos (8). El suceso refuerza la presunción de la gran capacidad erosiva que poseen las aguas emergentes de Casa de Piedra, casi completamente desprovistas de sedimento y que esa condición debió manifestarse más en los últimos 8 años, cuando empezó a hacerse sentir el efecto del gran embalse.

En la tabla I se advierte la variación absoluta que ha tenido el tramo testigo en lo que al número de meandros respecta en uno y otro de los períodos considerados. El índice de meandrosidad se calcula sobre la extensión del mismo en 1948 (103 km), donde se observa la creciente variación, muy acentuada entre 1973 y 2000.

Año	Cantidad de meandros	Cantidad/Long. tramo	Índice
1948	35	35/103,95	0,337
1973	38	38/103,95	0,366
2000	44	44/103,95	0,423

Tabla I. Cambios hidrográficos en la traza del tramo testigo Huelches. Cantidad total de meandros e índice de meandrosidad. Fuente: realizada por el Dr. H. Walter Cazenave.

Por otra parte, en la tabla II se muestra la variación porcentual de la cantidad de meandros para los períodos considerados. En el primer período, 25 años previos a la construcción del dique (situación a), se señala el crecimiento en la meandrosidad del tramo. En la situación (b) se indica el aumento porcentual de todo el período documentado. Se advierte que en los 27 años del período b), con la influencia de Casa de Piedra a partir de 1989, el porcentual de aparición de meandros prácticamente se ha duplicado con relación al primer período a) y triplicado si se lo compara con los valores iniciales.

Variación	% (a)	% (b)
1948/1973	8,6	
1973/2000		15,8
1948/2000		25,7

Tabla II. Variación porcentual de la cantidad de meandros. 1948/1973, 1973/2000 y 1948/2000. Tramo testigo en Huelches. Fuente: realizada por Dr. H. Walter Cazenave.

En la tabla III se observa que, aunque en un período seis años menor, los derrames de 1974–75/94 fueron en promedio casi un 20 % mayores que los de 1947–48/73, confirmando la tendencia creciente ya mencionada. Pero aún con este

dato, significativo en cuanto a una posible mayor acción erosiva en el segundo período por crecimiento del derrame es muy llamativo el incremento de curvas en el tramo testigo ya que, aunque hubiera mayores caudales, los mismos estuvieron siempre condicionados en su fuerza erosiva por la capacidad de transporte del abundante sedimento que arrastraba el curso.

<i>Período</i>	<i>N° de años</i>		<i>hm³</i>	<i>% variación</i>
1947-48/73	26	26	3676,77	
				19,8
1974-75/94			4404,6	

Tabla III. Pichi Mahuida. Derrame y variación porcentual de los derrames anuales medios en los períodos 1947 - 48/73 y 1974 - 75/94. Fuente: realizada por Dr. H. Walter Cazenave.

En definitiva puede aceptarse que las trazas hidrográficas fiables obtenidas permiten considerar un período comprendido entre 1948 y 2001, con subperíodos: 1948-1973 (con un lapso de 25 años); 1973-1985 (12 años intermedios) y 1985-2001 (16 años). En el primero de esos subperíodos, usando como base la traza de 1948 (Fig. 27) se detecta la aparición de tres meandros.

En el segundo de los subperíodos considerados, 1973-1985 (Fig. 27) se observa la aparición de otros tres meandros. Estas hidroformas son importantes por dos razones. Primero, si bien al igual que en el período anterior son tres, han surgido en apenas 12 años, contra 25 años del anterior; segundo, todas las modificaciones han tenido lugar en la orilla norte.

El último de los subperíodos constatados, 1985–2001 registra la aparición de tres bucles en U ubicados a unos 15 km del comienzo del tramo, simétricos y equidistantes unos 0,7 km uno del otro. Todos están ubicados en la margen sur. La particularidad de este registro es que en él está comprendido el cierre de Casa de Piedra y comienzo del llenado del vaso (julio de 1989) hecho a partir del cual se podría pensar en una mayor acción erosiva del agua del río Colorado por perder el sedimento en el embalse y emerger el agua limpia y con gran capacidad de carga.

Cambios al año 2005

En diciembre de 2005 COIRCO realizó un vuelo aerofotográfico de todo el valle del río Colorado, el cual fue consultado a los efectos de contar con un nuevo elemento de diagnóstico. La realización del mismo radicó en la oportunidad de contar con una herramienta evaluativa en aguas máximas, ya que el derrame de ese año se encuadró en los correspondientes a períodos muy húmedos, constituyéndose en el tercero en magnitud de los registrados en el récord del río. A los efectos de

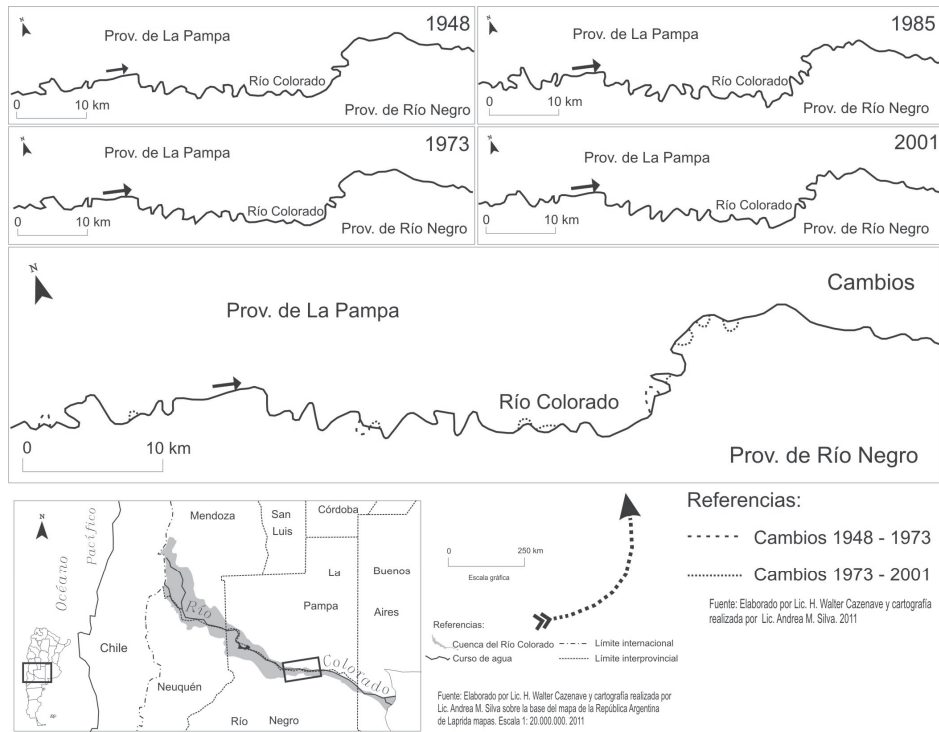


Figura 27. Formación y desaparición de meandros.

Río Colorado en el tramo testigo Huelches. Período 1948 – 2001.

Fuente: realizada por el Dr. H. Walter Cazenave.

este trabajo, ese vuelo no fotogramétrico y a escala aproximada 1:25.000, brindó la oportunidad de corroborar el supuesto inicial, el cual fue que las aguas desprovistas de sedimento que eroga el dique Casa de Piedra tienen una fuerte capacidad erosiva, perceptible en tiempo de escala humana.

Con las fotografías del vuelo se armó un mosaico que comprende el tramo testigo (Figs. 28 y 29). A los efectos de la interpretación del mismo se señala que, al decir que un meandro “se recuesta” sobre una orilla, se pretende expresar que sobre la misma se encuentra la parte cóncava de la curva, en tanto que en la orilla opuesta se ubica la cuerda del arco del bucle. El mosaico, al ser comparado con la versión similar del año 2001, arrojó las siguientes variaciones para el año 2005:

- 1.- Desde aguas arriba hacia aguas abajo: aparición de un meandro recostado en la margen izquierda, orilla norte y, a continuación del contrameandro, parece estar creciendo un nuevo bucle, más pequeño, sobre la orilla sur.
- 2.- Aparición de un nuevo y definido meandro donde existía un tramo recto, recostado sobre la orilla Norte.
- 3.- Modificación de un meandro caracterizado por rematar en una curva de

ángulo agudo, trasformándose en redondeado, recostado también sobre la orilla norte.

4.- Desaparición de un bucle en la orilla norte por estrangulamiento, trasformándose en otro recostado sobre la orilla sur.

5.- En el comienzo del lóbulo de la última formación del tramo testigo se abrió un nuevo brazo del río que obra como cuerda del arco del meandro ya existente y va tomando, a su vez, características de bucle.

6.- Las dos curvas ubicadas en esa parte final, sobre la orilla Norte y que en 2001 parecían evolucionar hacia meandros han perdido entidad como tales y casi desaparecido.

Lo observado refuerza el objetivo central desarrollado en los mapas y cuadros anteriores. Adviértase que las variaciones de la traza hidrográfica 1973–2001 indican la aparición o modificación de ocho curvas en ese período (dentro del cual Casa de Piedra empezó a funcionar plenamente en 1994). En tanto, la comparación con la traza del vuelo de 2005 indica seis (ocho si se consideran los más pequeños mencionados en 1 y 6) modificaciones pero en un período de cuatro años.

En la tabla IV se presenta una síntesis de las modificaciones de meandros en el tramo testigo del río Colorado, para los períodos analizados, con el aditamento de un relevamiento de detalle más cercano efectuado por el COIRCO en época reciente. Resulta elocuente la relación entre la cantidad de meandros aparecidos en un período y la duración del mismo. Las modificaciones en el tramo testigo han cuadruplicado las del período anterior en un lapso cinco veces menor.

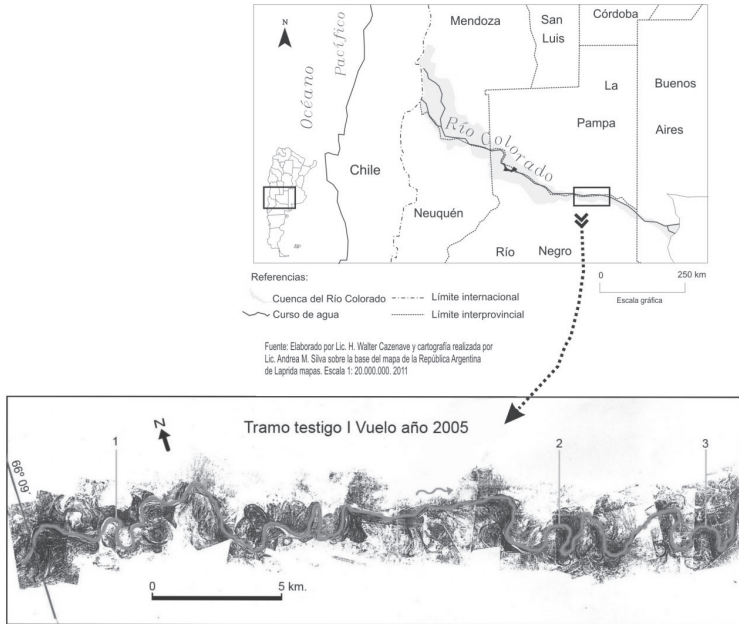
<i>Período</i>	<i>Número de meandros</i>	<i>Relación cant/tiempo</i>
1948/1973 (25 años)	3	0,12
1973/1985/2000 (27 años)	8	0,3
2000/2005 (5 años)	6	1,2

Tabla IV. Modificaciones de meandros en el curso del río Colorado.

Tramo testigo en Huelches. Períodos 1948/1973; 1973/1985/2000; 2001/2005.

Fuente: realizada por el Dr. H. Walter Cazenave.

La disponibilidad de imágenes correspondientes a 2011 (empleando un ArcGIS 9) permitió una verificación actualizada sobre curvas y longitudes en el río Colorado. Las mismas, aunque fuera del contexto temporal de este trabajo, permiten aportar datos actualizados en la materia (Servicio Minero Geológico de los EE.UU., 2011). Los nuevos valores indican 719 km desde el dique hasta el mar, con 156 bucles en el tramo, lo que arroja una relación entre longitud y cantidad de meandros de 4,61. Ese coeficiente es muy similar al registrado originalmente, sin el embalse construido, que alcanzaba a 4,69.



Fuente: Elaborado por Lic. H. Walter Cazenave y cartografía sobre la base del vuelo COIRCO. Año 2005, escala aproximada 1:25.000. 2011

Figura 28. Tramo testigo I. Vuelo año 2005.
 Fuente: COIRCO. Realizado por el Dr. H. Walter Cazenave.

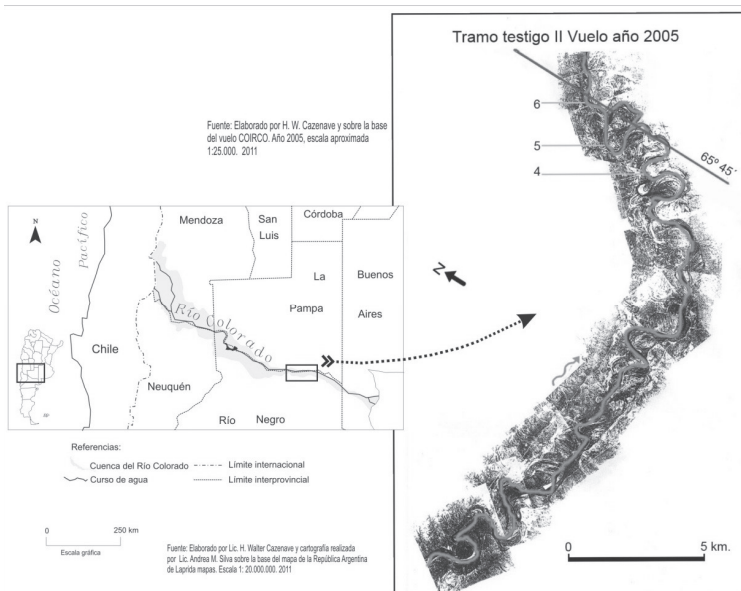


Figura 29. Tramo testigo II. Vuelo año 2005.
 Fuente: COIRCO. Realizada por el Dr. H. Walter Cazenave.

Conclusiones

Los hidrogramas de las estaciones son coincidentes en mostrar picos de caudal en los meses de verano y mínimas en los de invierno. La salinidad se presenta con valores inversos al caudal, en tanto que los sólidos se corresponden con los deshielos y con las citadas tormentas de invierno. Los hidrogramas de Pichi Mahuida y Paso Alsina se han visto alterados en sus valores y distribución temporal a partir de la puesta en funcionamiento de la represa de Casa de Piedra.

El análisis cuantitativo de los registros correspondientes a las dos estaciones de aforo ubicadas aguas abajo del dique –Pichi Mahuida y Paso Alsina– demuestra que ha habido transformaciones de fondo en la condición hidrológica del río Colorado en los años considerados en las series. En particular en lo que hace a la cantidad y distribución estacional de los caudales y la disminución del sólido transportado en el tramo entre el dique y la desembocadura, con el consecuente aumento de la capacidad erosiva del agua.

Respecto al caudal, gasto sólido y sales en forma conjunta se demostró que, al igual que en los de Pichi Mahuida, los coeficientes surgidos del promedio de máxima, mínima y media de los tres rubros en su versión anterior al cierre del dique, son inferiores comparados con los posteriores al cierre, aunque no guardan ninguna similitud con aquellos.

En el segmento fluvial utilizado como muestra se evidencian los cambios hidrográficos que el río tuvo en ocho años una actividad semejante o superior a la que normalmente le llevaba dos décadas para resultados similares. La traza hidrográfica se ha visto significativamente alterada por la rápida y frecuente aparición de nuevos meandros. El índice de meandrosidad en el tramo tomado como testigo pasó de 0,337 en 1948 a 0,366 en 1973 y de este último a 0,423 en 2000, lo que corrobora la idea de una mayor acción erosiva. Para períodos casi similares –25 y 27 años– los aumentos porcentuales fueron del 8,6 % y 15,6 %, de lo que se deduce que la causa principal del incremento debió ser el agua con mayor capacidad de transporte. Tomando los períodos ya citados, 1948 – 1973 y 1973 – 2001, se advierte que la cantidad de curvas que alcanzaron la condición de meandros se duplicó en el segundo de ellos.

Bibliografía

CONAE, 1975; 2000/01; Imágenes satelitarias multiespectrales Landsat TM5: 227-087 del 04.02.01. ; 228-087 del 03.02.01.; 229-087 del 02.02.01.; 230-086 del 31.12.00. ; ERST 184-185 24.11.75.

COIRCO. Fotografías aéreas de la cuenca del río Colorado (no fotogramétricas), 2005.

DERRUAU, Max. *Geomorfología*. Editorial Ariel. Barcelona, España, 1970.

GÆA, SOCIEDAD ARGENTINA DE ESTUDIOS GEOGRÁFICOS. *Geografía de la Argentina. Recursos Hídricos*. Tomo VII. Buenos Aires, 1975.

GOBIERNO DE LA PROVINCIA DE LA PAMPA. *Conferencia Río Colorado*. Anales de la reunión celebrada en Santa Rosa el 29 y 30 de agosto de 1956. Talleres gráficos de la Dirección de Imprenta y Boletín Oficial de la Provincia de La Pampa, 1956.

HERAS, Rafael. Manual de Hidrología. Dirección General de Obras Hidráulicas. Madrid, España, 1972.

HORTON, Robert. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America*. 1945.

JOHNSON, Robert. *Estadística elemental*. Grupo Editorial Iberoamérica. México DF, 1993.

LAGASSE, Peter. *A matter of course. Prediction River Change*. New NCHRP Report. US Army Research Office. 1975-2004.

LAGASSE, Peter, SPTZ, William; ZEVEBERGEN, Lyle. *A Methodology and View Tools for Predicting Channel Migration*. National Research Council. USA. 1996.

SERVICIO MINERO GEOLÓGICO DE LOS EE.UU en internet, <http://usgs.gov>. [21 DE MARZO DE 2011].

Fecha de recepción: 22 de noviembre de 2012

Fecha de aceptación: 21 de marzo de 2013