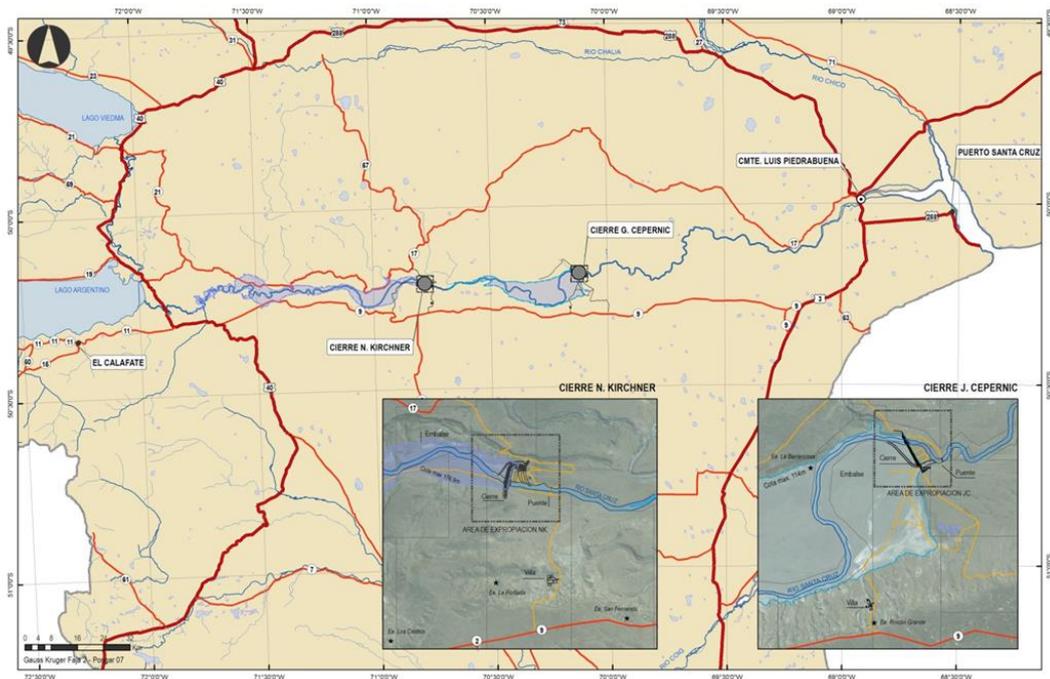




MODELACIÓN HIDROSEDIMENTOLÓGICA DEL RÍO SANTA CRUZ BAJO EL EFECTO DE LAS REPRESAS PATAGÓNICAS



Marzo 2017

RESUMEN

Se identifican los impactos de las presas Presidente Néstor Kirchner y Gobernador Jorge Cepernic sobre la dinámica sedimentológica del río Santa Cruz. Se cuantifica el impacto erosivo que la segunda de ellas generará inmediatamente aguas abajo. Se determina la caída de concentración de sólidos suspendidos totales en la cabecera del estuario del río Santa Cruz debido al efecto de atrapamiento en los embalses del material fino transportado en suspensión.

.

EQUIPO DE TRABAJO

Dr. Ángel N. Menéndez

Ing. Nicolás D. Badano

Ing. Leandro Kazimierski

INDICE

1	INTRODUCCIÓN	4
2	EROSIÓN AGUAS ABAJO DE PRESA JC	6
2.1	Modelo conceptual	6
2.2	Modelo matemático	7
2.3	Datos de base	7
2.4	Calibración del modelo hidrodinámico	12
2.5	Escenario natural.....	13
2.6	Escenario con presas	14
2.6.1	Planteo.....	14
2.6.2	Condición media.....	15
2.6.3	Condición extrema	16
3	SEDIMENTACIÓN EN LOS EMBALSES	20
3.1	Modelo conceptual	20
3.2	Modelo matemático	22
3.3	Datos de base	23
3.4	Calibración del modelo	28
3.5	Resultados	30
3.6	Análisis de sensibilidad.....	32
4	CONCLUSIONES	37

1 INTRODUCCIÓN

Las represas patagónicas sobre el río Santa Cruz es un conjunto de dos presas: Pte. Néstor Kirchner (NK) y Gdor. Jorge Cepernic (JC). El río Santa Cruz atraviesa la provincia homónima en sentido oeste-este, hasta desembocar en el Océano Atlántico. El sitio del cierre de la presa NK se ubica en el km 250 del río Santa Cruz (donde se da la transición entre el valle medio y el superior del río), a unos 170 km al este, por caminos, de la localidad de El Calafate, principal centro poblado más próximo al sitio. Por su parte, el sitio del cierre de la presa JC se localiza en el km 185 del cauce actual del río (dentro del valle medio), a unos 135 km al oeste, por caminos, de la localidad de Comandante Luis Piedra Buena, principal centro poblado más cercano (Figura 1.1). Para las condiciones de Nivel de Agua Máximo de Operación Normal (NAON), los embalses de las presas NK y JC ocuparán, unas superficies aproximadas de 262 y 206 km², respectivamente.

El emplazamiento de estas presas generará impactos sobre la dinámica sedimentológica del río Santa Cruz, que es necesario cuantificar para calificar su alcance y consecuencias sobre el tramo inferior, aguas abajo de la presa JC, que es el que queda sujeto a condiciones hidrodinámicas naturales.

En particular, en este estudio se analizan dos problemas. En primer lugar, la extensión y magnitud de la erosión esperable aguas abajo de la presa JC debido al impacto sobre el transporte de sedimentos de fondo, que constituirá un cambio morfológico. En segundo lugar, la reducción en el aporte de sedimentos finos hacia la zona del estuario del río Santa Cruz, debido al atrapamiento de parte de esa carga sólida por los embalses de las dos presas, que se manifestará en una reducción de la turbidez.

Para cuantificar estos impactos se utilizan técnicas de modelación matemática. Para el primer problema se emplea un modelo hidrosedimentológico unidimensional, capaz de simular la hidrodinámica y el eventual transporte de sedimentos de fondo del tramo no intervenido. Para el segundo problema se utiliza un modelo cerodimensional de balance de masa de agua y sedimento fino para cada uno de los embalses, capaz de determinar el volumen de material fino atrapado.

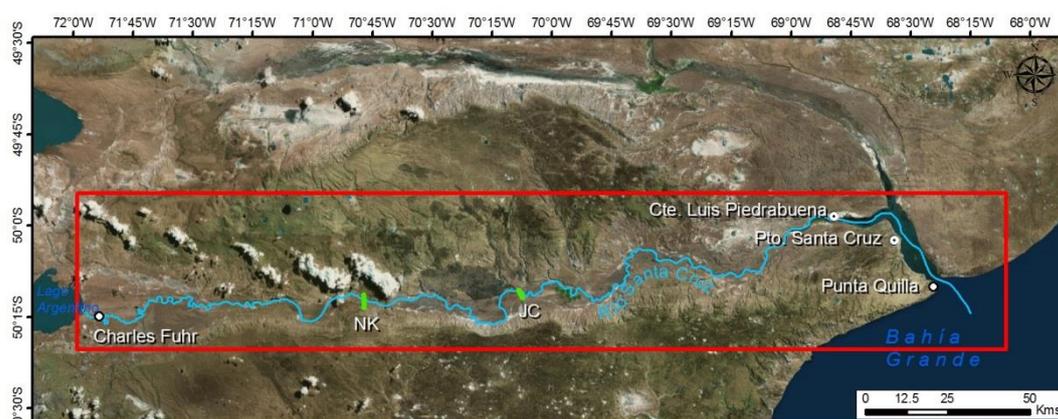


Figura 1.1. Ubicación de las presas NK y JC.

Los resultados se utilizan para construir indicadores cuantitativos de impacto, los cuales constituyen insumos para el Estudio de Impacto Ambiental del proyecto.

La organización del informe es como sigue:

- En el capítulo 2 se desarrolla el análisis del problema de la erosión aguas abajo de la presa JC. Se plantea el modelo conceptual, se describe el correspondiente modelo matemático, se presentan y procesan los datos de base, se definen los escenarios de ensayo, y se muestran y discuten los resultados obtenidos.
- En el capítulo 3 se desarrolla el análisis del problema de atrapamiento de sedimentos finos en los embalses, incluyéndose los mismos ítems que para el capítulo anterior.
- En el capítulo 4 se presentan las conclusiones del estudio.

2 EROSIÓN AGUAS ABAJO DE PRESA JC

2.1 Modelo conceptual

El sedimento de fondo del río Santa Cruz presenta una distribución granulométrica extendida, es decir, que abarca un amplio rango de tamaños de grano, desde limos hasta gravas. Bajo la acción de las corrientes de agua, particularmente intensas durante el pasaje de crecidas, las fracciones más finas de la capa superficial tienden a ser extraídas y transportadas en suspensión, mientras que las más gruesas afloran y resisten las fuerzas de arrastre, permaneciendo prácticamente inmóviles sobre el lecho o transportándose por arrastre sobre distancias mucho menores. En consecuencia, estas últimas terminan formando una coraza que blinda a las capas inferiores de ulteriores erosiones. En otras palabras, el acorazamiento, ya sea estático (sedimento inmóvil) o dinámico (sedimento arrastrado), estabiliza el nivel del lecho.

Al emplazar una presa se producen dos tipos de perturbaciones sobre el fondo. Por un lado, durante la construcción se interviene sobre un tramo de río en torno a la sección de la presa, lo cual produce el rompimiento del acorazamiento, dejando expuesta una granulometría más extendida. Entonces, en la fracción de ese tramo que se desarrolla aguas abajo de la presa se genera un proceso erosivo hasta alcanzar nuevamente una situación de equilibrio, con la formación de una nueva coraza compatible con las condiciones hidrodinámicas de una sección más profunda.

Por otro lado, si existe transporte de sedimentos de fondo, la presa lo corta. En consecuencia, los sedimentos de fondo que son arrastrados no pueden ser reemplazados por los aportados desde aguas arriba, produciéndose erosión hasta lograr el equilibrio.

2.2 Modelo matemático

Se implementó un modelo hidrodinámico/sedimentológico/morfológico unidimensional del tramo inferior del río Santa Cruz, capaz de simular la hidrodinámica, el eventual transporte de sedimentos de fondo, y el consecuente cambio morfológico.

El modelo hidrodinámico unidimensional se basa en las ecuaciones de Saint Venant¹, que expresan el balance de masa y cantidad de movimiento del flujo sobre distancias longitudinales grandes en relación a las dimensiones transversales del cauce. El modelo provee la distribución espacio-temporal del nivel de agua y la velocidad media de la corriente sobre la sección transversal.

Como modelo sedimentológico se seleccionó el de Wilcock & Crowe² para transporte de mezclas de sedimentos de diferentes tamaños.

El modelo morfológico está basado en la ecuación de Exner³, que expresa el balance de masa de sedimentos.

Se utilizó el código numérico HEC-RAS⁴, de gran reconocimiento internacional, que tiene incorporado los modelos matemáticos descriptos.

2.3 Datos de base

Se dispuso de la serie temporal de caudales medios mensuales del río Santa Cruz en la estación Charles Fuhr (ver Figura 1.1) sobre el período Set/1955 a Ago/2015. A título ilustrativo, la Figura 2.1 muestra estos datos sobre la ventana de tiempo Set/1961 a Ago/1970, que incluye el año hidrológico con mayores registros de caudal, el cual se extiende entre Set/1965 a Ago/1966, con un valor pico de 2030 m³/s en marzo de 1966. Por su parte, en la Figura 2.2 se muestra el hidrograma promedio mensual resultante de esa base de datos⁵.

Se contó con relevamientos batimétricos del río Santa Cruz desde la sección de la presa JC hasta el estuario. Se trata de un total de 110 secciones transversales, con un espaciamiento medio de 1500 m. (Figura 2.3). Todas estas secciones transversales fueron utilizadas para construir el modelo geométrico del cauce.

¹ Ven Te Chow, 1994, "Hidrología Aplicada", Maidment Mays.

² P.R. Wilcock, J.C. Crowe, "Surface-based Transport Model for Mixed-Size Sediment", Jr. Hydr. Eng., February 2003.

³ Parker, G., 2006, "1D Sediment Transport Morphodynamics with applications to Rivers and Turbidity Currents", Chapter 1, http://vtchl.uiuc.edu/people/parkerg/_private/e-bookPowerPoint/RTe-bookCh1IntroMorphodynamics.ppt

⁴ <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>

⁵ Serman & Asoc., "Estudio de impacto ambiental. Aprovechamientos Hidroeléctricos del Río Santa Cruz (Presidente Dr. Néstor C. Kirchner y Gobernador Jorge Cepernic), Provincia de Santa Cruz. Actualización", Represas Patagonia (ELING-CGGC-HCSA-UTE), 2017.

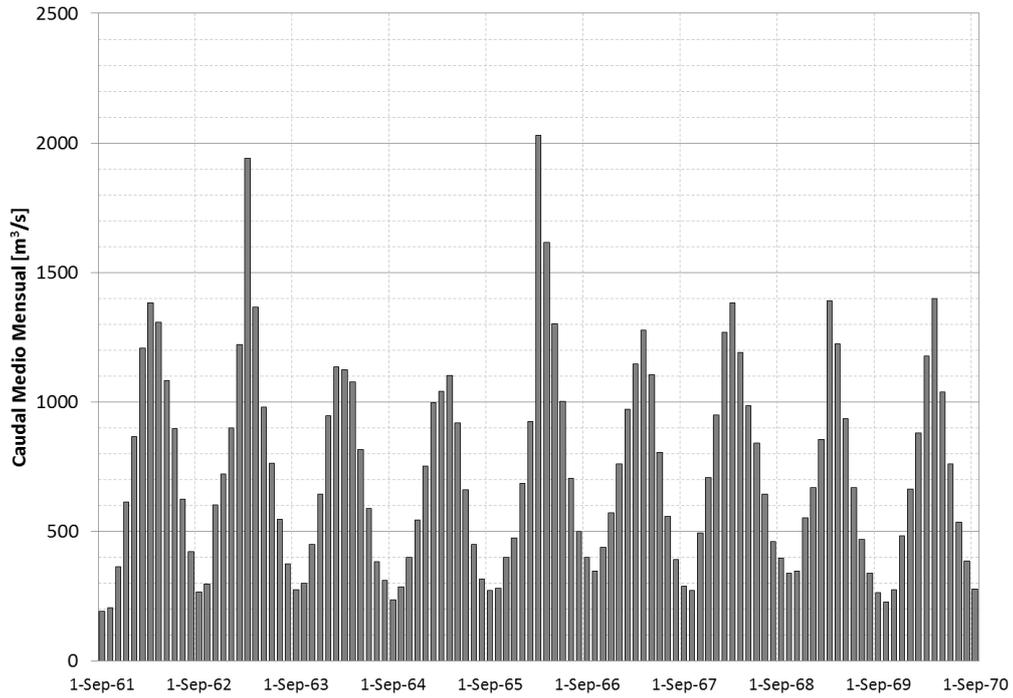


Figura 2.1. Serie temporal de caudal medio mensual en la estación Charles Fuhr.

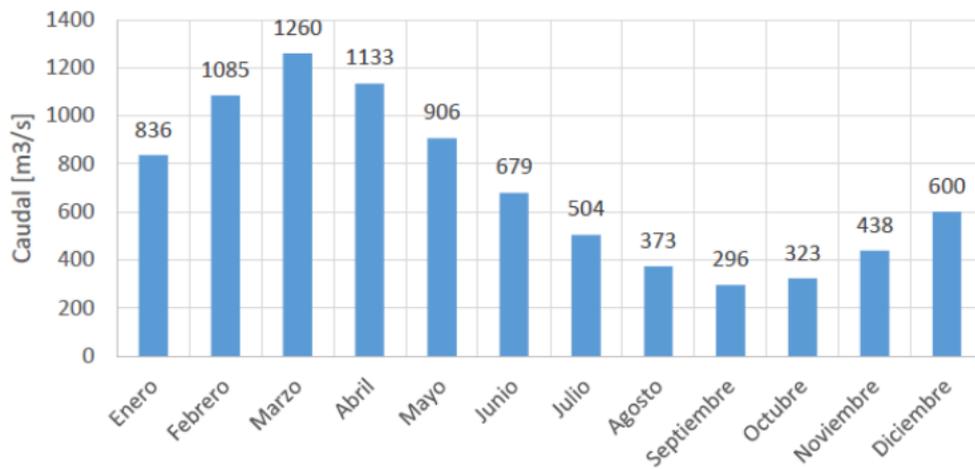


Figura 2.2. Hidrograma promedio mensual en la estación Charles Fuhr.

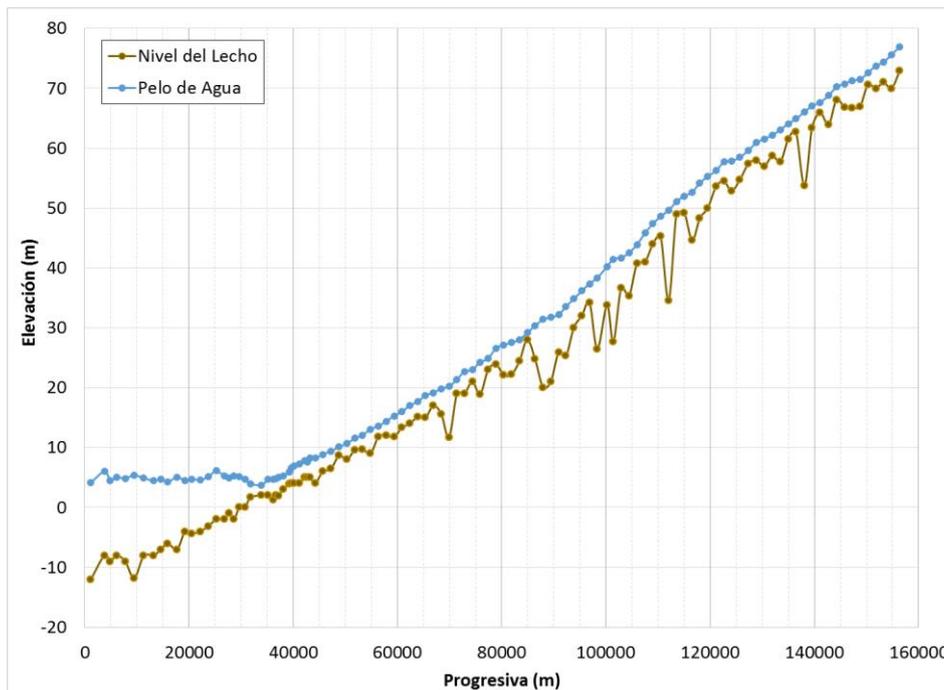


Figura 2.3. Niveles del pelo de agua y profundidades máxima del lecho del río para las secciones relevadas.

El relevamiento batimétrico se llevó a cabo durante el período del 12/Oct al 06/Dic de 2016, que corresponde a la época de caudales más bajos del río Santa Cruz. Los valores de caudal observados en la estación Charles Fuhr (Figura 1.1) para este período variaron entre $280 \text{ m}^3/\text{s}$ y $330 \text{ m}^3/\text{s}$, tal como se muestra en la Figura 2.4. Simultáneamente con el registro del perfil transversal del cauce, en cada sección se midió el nivel del pelo de agua (Figura 2.3), información que se utilizó posteriormente para la calibración del modelo.

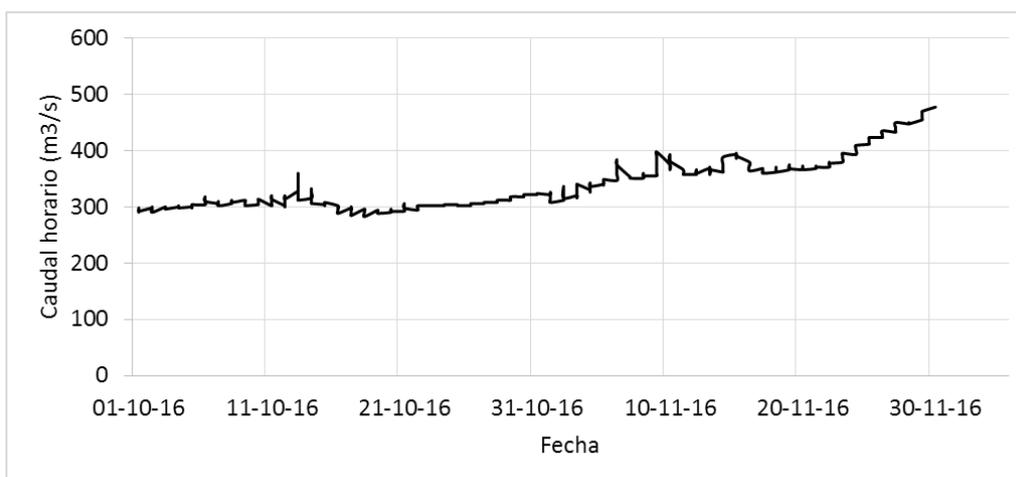


Figura 2.4. Caudal del río Santa Cruz en la estación Charles Fuhr para el período del relevamiento batimétrico.

También se contó con datos de granulometría del sedimento del cauce. Se trata de 27 muestras, localizadas desde aguas abajo de la presa JC hasta la zona cercana al estuario (Figura 2.5). Las muestras se distinguieron entre tomas superficiales y sub-superficiales y entre las ubicadas sobre margen derecha, margen izquierda y centro del cauce. En la Tabla 2.1 se presenta un listado de las muestras, ordenadas desde aguas arriba hacia aguas abajo, y el valor del diámetro medio (d_{50}) para cada una de ellas. Se aprecia una clara diferencia entre las muestras superficiales y las subsuperficiales. Las primeras tienen un d_{50} promedio de 69,4 mm, el cual se encuentra en el rango de bochas chicas, mientras que para las segundas es de 13,5 mm, que corresponden a grava media.

Tabla 2.1. Diámetro medio de muestras de sedimento de fondo.

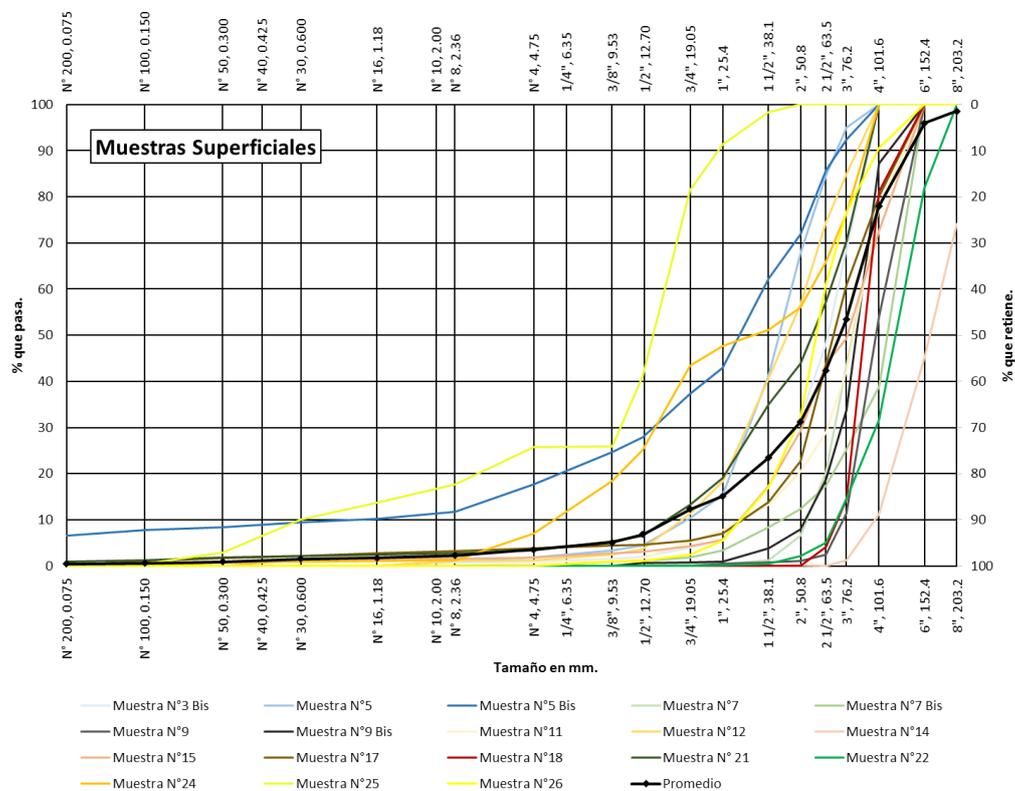
Orden	Muestra	Margen	Alcance	d_{50} (mm)
1	7	Derecho	Superficial	81.0
2	7 Bis	Derecho	Superficial	110.8
3	8	Derecho	Subsuperficial	10.5
4	21	Derecho	Superficial	56.7
5	22	Derecho	Superficial	120.1
6	23	Derecho	Subsuperficial	13.7
7	9	Derecho	Superficial	99.2
8	9 Bis	Derecho	Superficial	83.9
9	10	Derecho	Subsuperficial	3.6
10	11	Izquierdo	Superficial	81.7
11	12	Izquierdo	Superficial	45.5
12	13	Izquierdo	Subsuperficial	14.6
13	17	Izquierdo	Superficial	68.2
14	18	Izquierdo	Superficial	89.7
15	19	Izquierdo	Subsuperficial	15.0
16	20	Izquierdo	Subsuperficial	31.1
17	14	Izquierdo	Superficial	161.0
18	15	Izquierdo	Superficial	77.0
19	16	Izquierdo	Subsuperficial ⁶	4.3
20	24	Cauce	Superficial	34.0
21	25	Cauce	Superficial	13.9
22	26	Cauce	Superficial	58.7
23	5	Derecho	Superficial	42.3
24	5 Bis	Derecho	Superficial	30.0
25	6	Derecho	Subsuperficial	12.4
26	3 Bis	Izquierdo	Superficial	64.7
27	4	Izquierdo	Subsuperficial	16.5

⁶ Si bien en la planilla de datos provista se la cataloga como superficial, se considera que se trata de un error ya que el valor de d_{50} es claramente compatible con las muestras subsuperficiales.

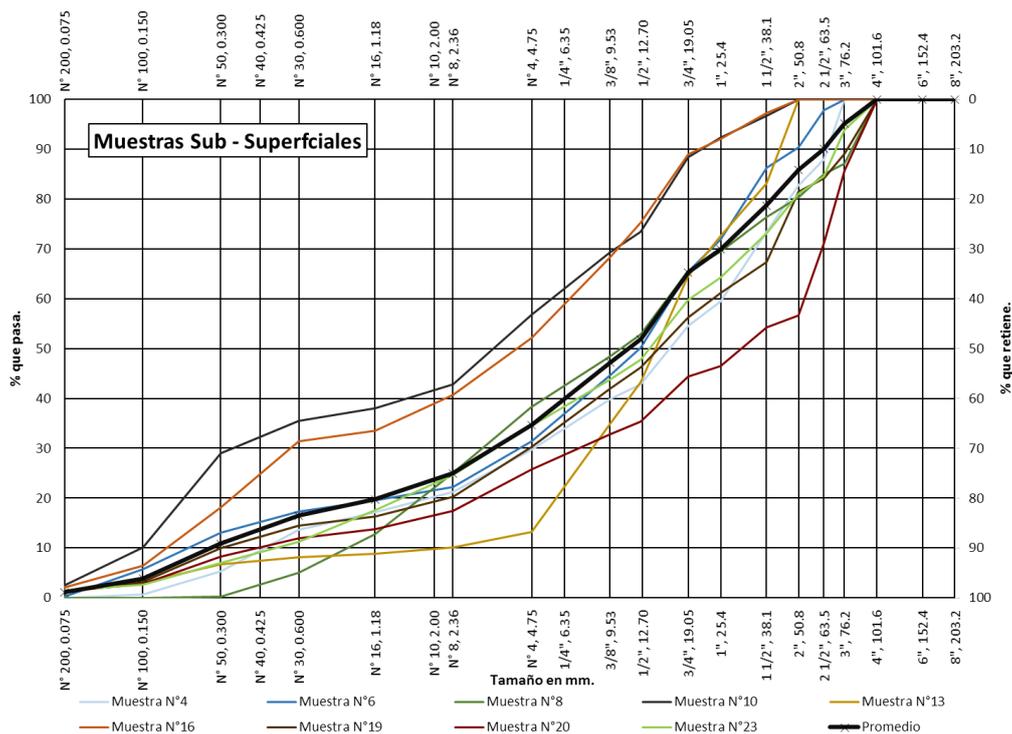


Figura 2.5. Ubicación de las muestras de sedimento del cauce.

La Figura 2.6 presenta las curvas granulométricas de todas las muestras. Se observa que las granulometrías de las muestras superficiales se concentran en el rango de gravas y bochas, con una presencia ínfima de material más fino, mientras que las de las muestras subsuperficiales son mucho más extendidas, abarcando desde una arena muy fina hasta las gravas más gruesas. Esto indica la existencia de acorazamiento.



a) Superficiales



b) Subsuperficiales

Figura 2.6. Curvas granulométricas.

2.4 Calibración del modelo hidrodinámico

Se llevó a cabo la calibración del modelo hidrodinámico en base a los datos hidrométricos obtenidos durante el período de relevamiento batimétrico (ver sección anterior). Como condición de borde de aguas arriba se aplicaron los dos caudales extremos del período de observación registrados en la estación Charles Fuhr ($280 \text{ m}^3/\text{s}$ y $330 \text{ m}^3/\text{s}$), con lo cual se apuntó a calcular el rango de variación de los niveles durante ese período. Por su parte, como condición de borde de aguas abajo se empleó el nivel promedio entre los registrados en las secciones aguas abajo de la isla Pavón (20 secciones); hay que tener en cuenta que se trata de una zona muy influenciada por la marea, la cual tiene una amplitud muy significativa, del orden de los 12 metros en sicigias.

El parámetro de calibración es el valor del coeficiente de rugosidad de Manning, variado dentro del rango físicamente aceptable en función de las características del cauce (textura, cambios de alineación, etc.). La elección final consistió en imponer valores decrecientes de ese coeficiente desde aguas arriba hacia aguas abajo, iniciando en 0,035 y finalizando en 0,025, compatible con otros informes del propio proyecto^{7,8}.

La Figura 2.7 muestra los perfiles longitudinales del pelo de agua para los dos caudales ensayados (no se detecta la diferencia entre ambos resultados a la escala del gráfico), junto con los puntos de las mediciones. El grado de acuerdo observado se considera satisfactorio a los fines del presente estudio.

⁷ Farías, H.D. Determinación de la función “Altura-Caudal” (Curva h-Q) para el río Santa Cruz a la salida del Lago Argentino. 2015.

⁸ JC-A.CV-MT.HI-(OG-00-00)-P001.

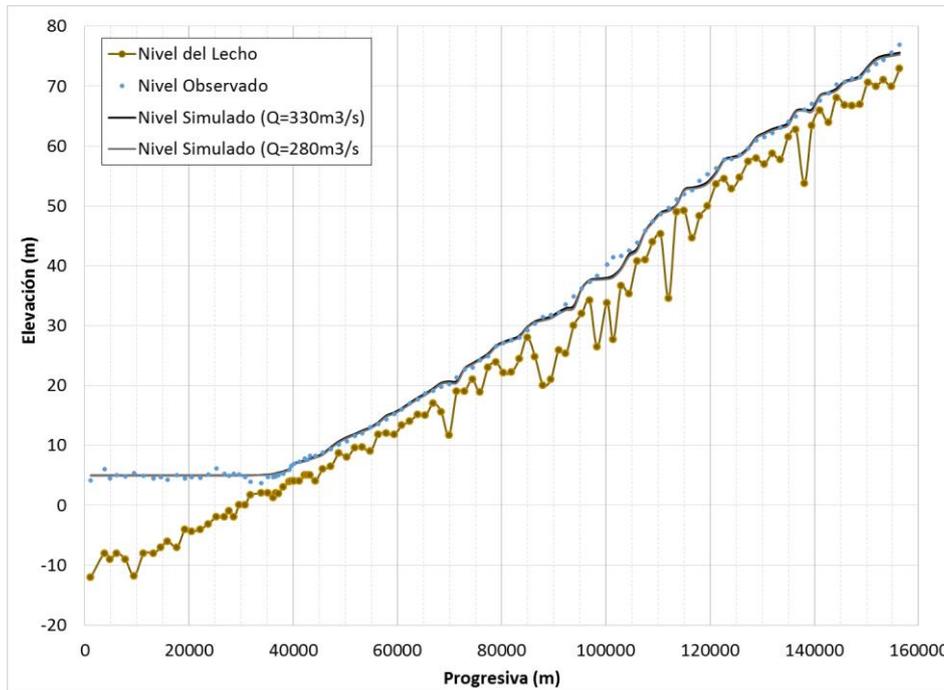


Figura 2.7. Calibración del modelo hidrodinámico para las condiciones del relevamiento.

2.5 Escenario natural

En primer lugar se analizó si el escenario natural actual (en ausencia de presas) corresponde a un acorazamiento estático o dinámico.

Se utilizó el hidrograma medio mensual en la estación Charles Fuhr (Figura 2.1) como condición de borde de caudal.

Las corridas del modelo se efectuaron en modo cuasi estacionario. Esto significa que el modelo simula cada mes a caudal constante utilizando las ecuaciones de régimen permanente. La actualización de la morfología se efectuó a paso diario.

Se probó la hipótesis de estaticidad de la coraza considerando para el sedimento de fondo la granulometría de la coraza, para la cual se adoptó la distribución promedio entre las observadas, mostrada en la Figura 2.6a y detallada en la Tabla 2.2, y suministro nulo de sedimento desde aguas arriba. El modelo indicó ausencia de transporte, verificando entonces la hipótesis de que la coraza actual es estática.

Tabla 2.2. Granulometría promedio superficial y subsuperficial.

Tamiz (mm)	Superficial (% que pasa)	Subsuperficial (% que pasa)
203.2	98.6	100.0
152.4	95.9	100.0
101.6	78.0	100.0
76.2	53.4	95.1
63.5	42.3	90.0
50.8	31.3	85.8
38.1	23.4	78.7
25.4	15.1	70.0
19.05	12.3	65.3
12.5	6.8	51.9
9.5	5.1	47.1
4.75	3.6	34.7
2.36	2.3	24.9
1.18	1.8	19.7
0.6	1.5	16.5
0.3	0.9	10.9
0.15	0.6	3.8
0.075	0.4	1.1

2.6 Escenario con presas

2.6.1 Planteo

El resultado obtenido en la sección anterior, sobre la existencia de una coraza estática, indica que el único proceso que se debe estudiar en relación a la erosión del lecho por la implantación de la presa JC es el asociado al tramo perturbado durante la construcción, ya que la ausencia de transporte de fondo torna superflua la consideración de un corte en ese transporte.

Se asumió conservadoramente una distancia de 500 m aguas abajo de la presa JC como sujeta a una perturbación tal que la granulometría representativa pasa a ser la subsuperficial. A esta se la caracterizó con la distribución granulométrica promedio, mostrada en la Figura 2.6b y detallada en la Tabla 2.2. Para evitar un salto brusco, en los siguientes 500 m se efectuó una interpolación entre los promedios superficial y subsuperficial de las distribuciones granulométricas.

2.6.2 Condición media

En primer lugar se utilizó el hidrograma promedio mensual en la estación Charles Fuhr (Figura 2.2) como condición de borde de caudal, como representativo de condiciones normales.

En la Figura 2.8 se muestra la variación temporal de la cota de fondo en 5 secciones aguas debajo de la presa a partir de la condición inicial correspondiente al escenario natural, fijada arbitrariamente en el año 2020. Se observa que se produce una fase de erosión relativamente rápida los primeros 2 años, seguida de una fase de erosión mucho más lenta, que muestra signos de estabilización luego de 20 años. La estabilización significa que se reconstruyó la coraza en cada sección, adaptada a cada una de las condiciones locales. La magnitud de la erosión es mucho más significativa al pie de la presa, disminuyendo rápidamente hacia aguas abajo.

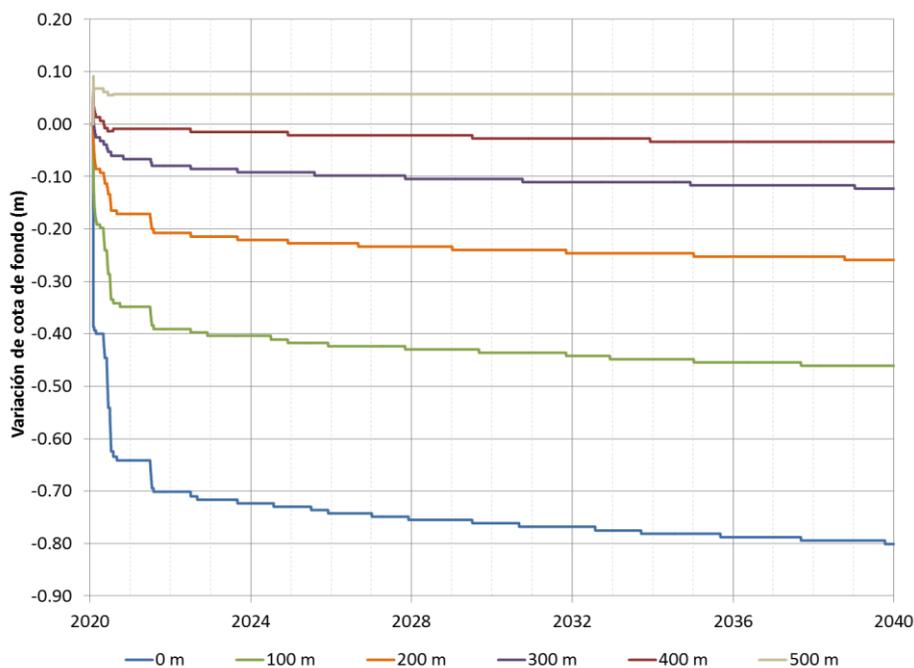


Figura 2.8. Variación temporal de la cota de fondo en 5 secciones aguas abajo de la presa para la condición media.

La Figura 2.9 presenta la distribución longitudinal de variación de cota de fondo a 10 y 20 años, ilustrando el grado de estabilización alcanzado. Se observa que la erosión al pie de presa alcanza los 0,80 m, pero a 300 m disminuye a 0,20 m. Desde los 430 m aproximadamente y hasta los 1300 m habría acumulación, cuyo valor máximo no llegaría a alcanzar los 0,20 m.

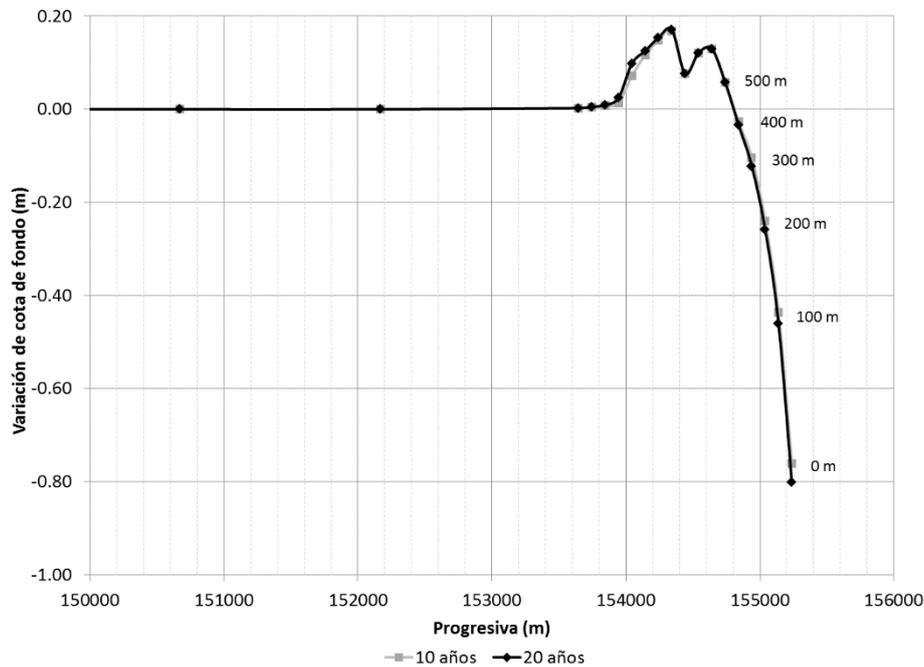


Figura 2.9. Variación longitudinal del fondo aguas abajo de la presa para la condiciones media.

2.6.3 Condición extrema

En segundo lugar se utilizó el hidrograma correspondiente al año hidrológico con mayores registros de caudal (Set/1965 a Ago/1966) (Figura 2.1) como condición de borde de caudal, para representar una condición de sollicitación hidrodinámica extrema sobre el fondo.

Se definieron dos escenarios. En ambos casos se partió de la condición media estabilizada presentada en la sección anterior (se consideró estable a los 20 años). Para el primer escenario se aplicó el hidrograma de condición extrema durante 1 año y luego se continuó con el hidrograma promedio mensual hasta la estabilización. De esta manera se cuantificó el efecto de ese año extremo.

En la Figura 2.10 se muestra la variación temporal de la cota de fondo, habiéndose fijado arbitrariamente como instante inicial el año 2041. Se observa una rápida erosión durante el primer año, bajo la condición extrema, seguida de una estabilización relativamente rápida. Nótese que el salto erosivo del primer año es mayor a 100 m de la presa que a su pie, disminuyendo luego hacia aguas abajo, e implicando incluso un leve recrecimiento a 500 m.

La Figura 2.11 presenta la distribución longitudinal de variación del lecho respecto de la condición sin presa luego del primer año y a 20 años, observándose la poca diferencia entre ambos. Se incluye como referencia la correspondiente a la condición media. Nótese que la erosión al pie de presa se incrementa a alrededor de 0,95 m, es decir, aproximadamente 0,15 m adicionales respecto de la condición media, mientras que la acumulación seguiría sin alcanzar los 0,20 m, aunque se expandiría un poco (en alrededor de 200 m) la zona de acumulación, llegando hasta los 1500 m.

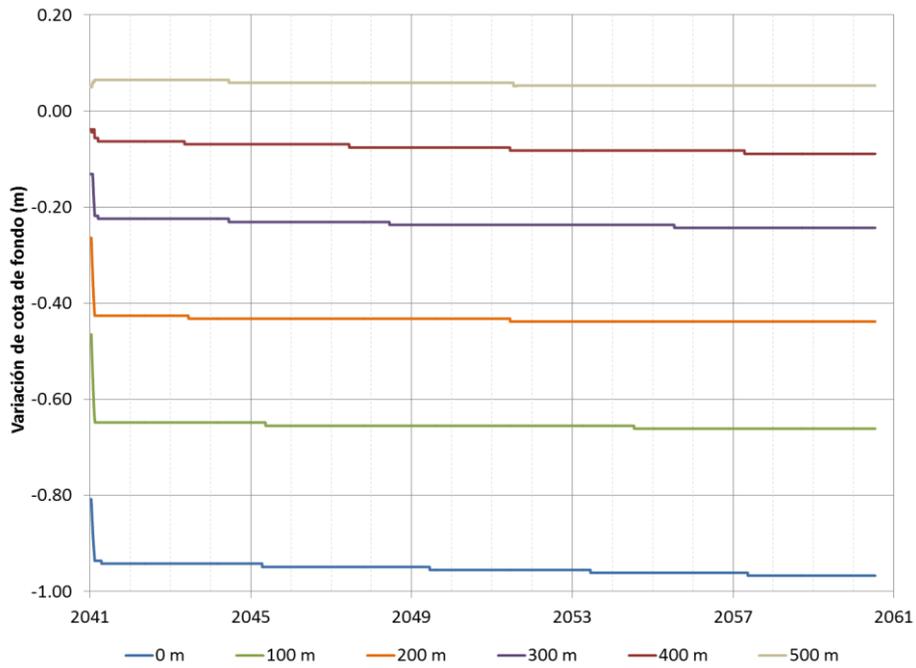


Figura 2.10. Variación temporal de la cota de fondo en 5 secciones aguas abajo de la presa para el escenario de un año de condición extrema.

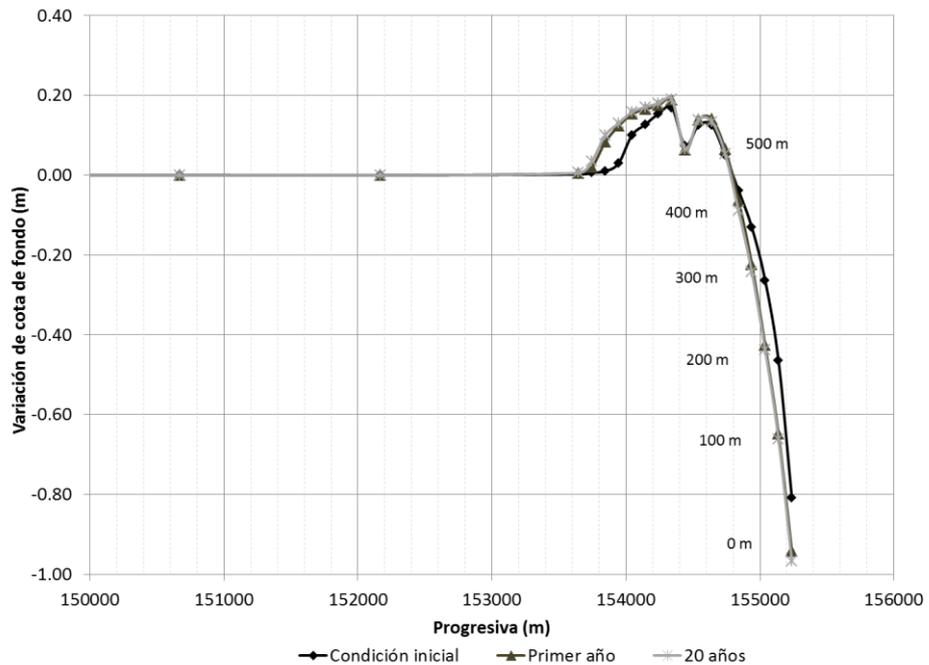


Figura 2.11. Variación longitudinal del fondo aguas abajo de la presa para el escenario de un año de condición extrema.

Para el segundo escenario se aplicó el hidrograma de condición extrema en forma continua, de modo de cuantificar el efecto acumulativo de esa condición extrema a largo plazo.

En la Figura 2.12 se muestra la variación temporal de la cota de fondo, habiéndose otra vez fijado arbitrariamente como instante inicial el año 2041. Se observa que la rápida erosión del primer año es seguida de saltos erosivos menores pero persistentes, hasta alcanzar un estado de relativa estabilidad luego de 20 años.

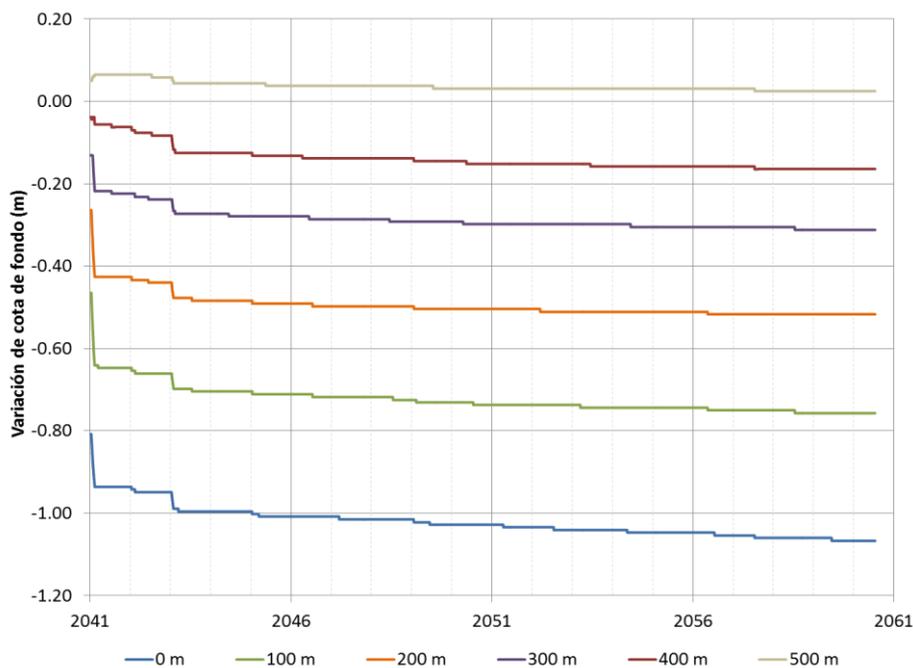


Figura 2.12. Variación temporal de la cota de fondo en 5 secciones aguas abajo de la presa para el escenario de condición extrema continua.

La Figura 2.13 presenta la distribución longitudinal de variación del lecho respecto de la condición sin presa luego de 20 años. Se incluyen como referencia las correspondientes a la condición media y al escenario de un año de condición extrema. Se observa que la erosión al pie de presa se incrementa a aproximadamente 1,10 m, es decir, aproximadamente 0,30 m adicionales respecto de la condición media (el doble que para el escenario de un año de condición extrema). Por su parte, la acumulación máxima permanecería por debajo de los 0,20 m, pero su altura se incrementaría un poco hacia el final de la zona de acumulación.

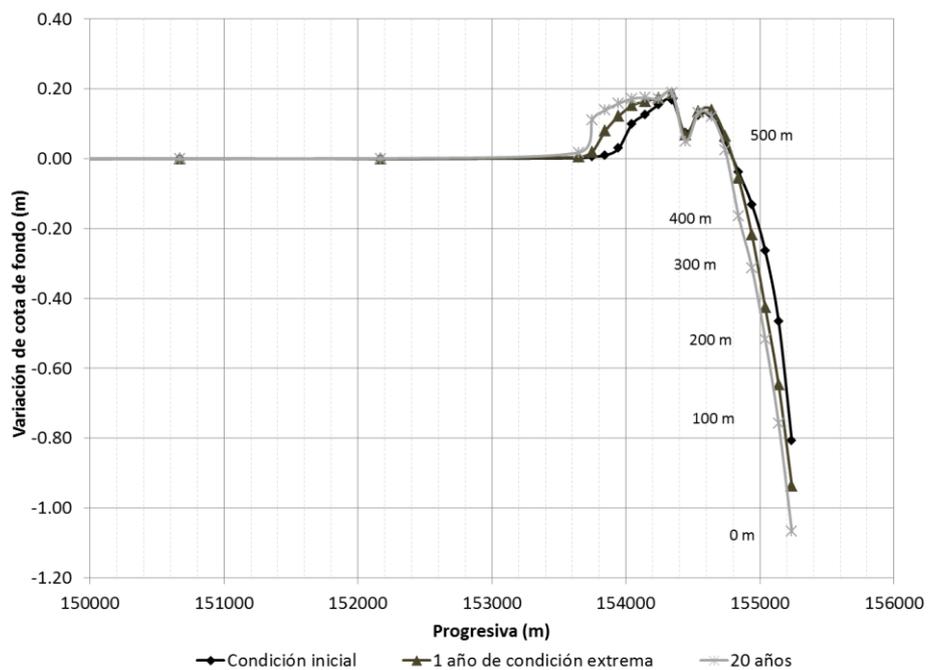


Figura 2.13. Variación longitudinal del fondo aguas abajo de la presa para el escenario de condición extrema continua.

3 SEDIMENTACIÓN EN LOS EMBALSES

3.1 Modelo conceptual

El río Santa Cruz recibe partículas sólidas generadas por erosión hídrica y eólica. El aporte por erosión hídrica (incluyendo el proveniente del descongelamiento de los glaciares) es preponderante en la cuenca alta, pero una parte significativa es atrapada por el Lago Argentino. Aguas abajo de este predomina la erosión eólica, dado el muy escaso volumen de precipitaciones anuales en la región. En la Figura 3.1 se indican las zonas de aporte con cierre en el Lago Argentino (Zona 1), la sección de la presa NK (Zona 2), la sección de la presa JC (Zona 3) y la de la ciudad de Luis Piedrabuena (Zona 4), considerada la cabecera del estuario, las cuales se hacen coincidir con las cuencas hidrográficas.

Los sólidos aportados tienen una granulometría fina. Los más finos pasan a fase disuelta, determinando la salinidad del medio (y, en consecuencia, su conductividad), mientras que el resto permanece en fase particulada, determinando su turbidez. La fase particulada es transportada en suspensión, constituyendo lo que se denomina Sólidos Suspendidos Totales (SST). Incluyen una fracción sedimentable y una coloidal.

Al emplazar las presas NK y JC parte de la fracción de sólidos sedimentables (limos y arcillas no coloidales) será atrapada en los respectivos embalses, reduciendo en alguna medida la concentración de sedimento suspendido que alcanza el estuario, y en consecuencia la turbidez de las aguas. Esto se esquematiza en la Figura 3.2, donde se comparan los escenarios natural (sin las presas) y con las presas.

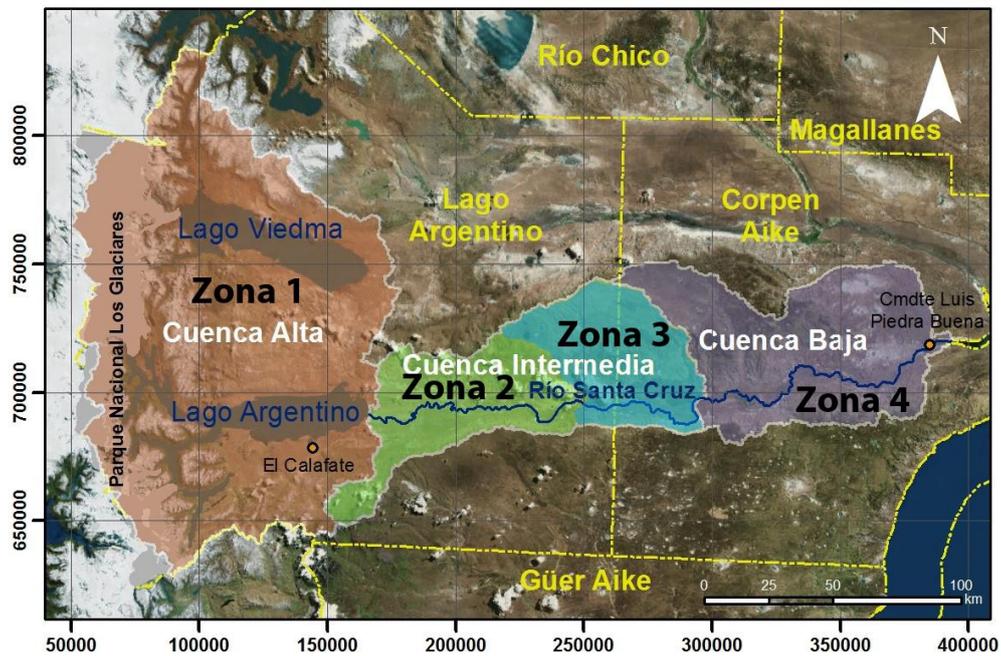


Figura 3.1. Zonas de aporte de sedimento

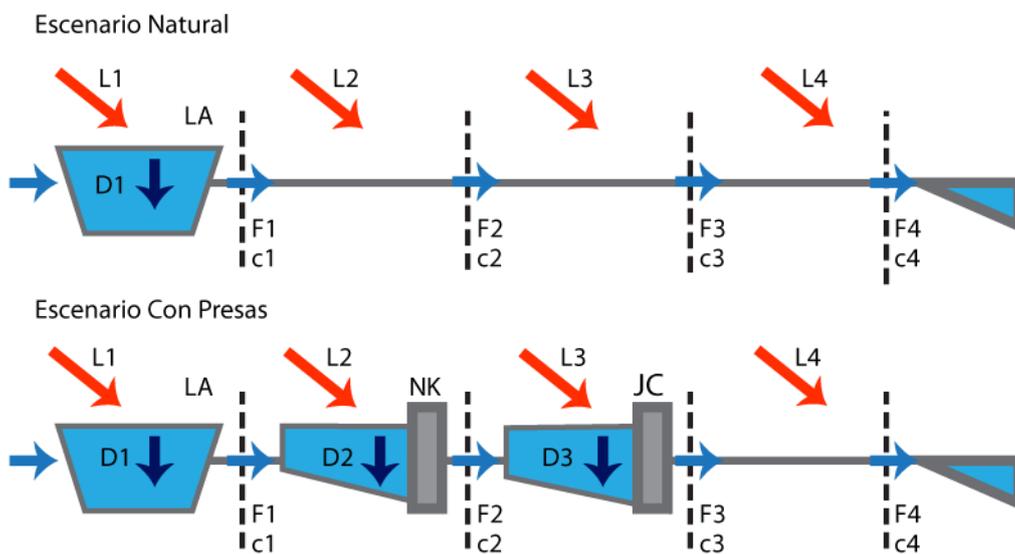


Figura 3.2. Esquema de aportes de carga de sedimentos (L1 a L4) desde las cuatro zonas y reservorios de depositación para los escenarios natural y con presas.

3.2 Modelo matemático

Para hacer el seguimiento de la fracción de sólidos sedimentables, se implementaron modelos cerodimensionales de balance de masa de sedimentos suspendidos para cada uno de los tres reservorios – el Lago Argentino y los dos embalses (NK y JC) –, capaces de calcular la concentración a la salida teniendo en cuenta los aportes (desde aguas arriba y lateral) y la sedimentación.

La ecuación general de un modelo 0D para el balance de masa del sedimento en suspensión, con una concentración c (media sobre todo el volumen del embalse), se escribe como:

$$\frac{d(cV)}{dt} = Q_e c_e - Q_s c - P + G \quad (3.1)$$

donde V es el volumen del reservorio, t la coordenada temporal, Q_e el caudal ingresante en la cabecera del reservorio, Q_s el caudal saliente, c_e la concentración de sedimento en el flujo de ingreso, y G y P las tasas de ganancia (término fuente) y pérdida (término sumidero) de sedimento, respectivamente, que tienen lugar dentro del reservorio.

Las pérdidas provienen del proceso de sedimentación:

$$P = A \cdot F_k \cdot w \cdot c \quad (3.2)$$

donde A es el área del fondo del reservorio, w la velocidad de caída del sedimento, que depende de su diámetro medio (d_{50}), y F_k el factor de Krone, que parametriza el efecto de sustentación de la turbulencia sobre las partículas finas:

$$F_k = \begin{cases} 1 - \frac{u_*^2}{u_{*d}^2} & \text{si } u_* < u_{*d} \\ 0 & \text{si } u_* \geq u_{*d} \end{cases} \quad (3.3)$$

donde u_* es la velocidad de corte, y u_{*d} su valor crítico de deposición.

Se calcula una velocidad de corte media en los embalses de acuerdo a la expresión

$$u_* = n \cdot g^{1/2} \cdot R_H^{-1/6} \cdot \frac{Q}{A_t} \quad (3.4)$$

donde R_H es el radio hidráulico de una sección transversal media del embalse, de área A_t , los cuales se calcularon a partir de valores medios del ancho, B_M , y la profundidad, h_M .

Por su parte, las ganancias provienen de los aportes laterales de carga al embalse L :

$$G = L \quad (3.5)$$

Estos aportes L_i desde cada zona ($i = 1, 2, 3, 4$) se consideraron proporcionales al área A_i de la zona de aporte, es decir

$$L_i = f_i * A_i \quad (3.5)$$

donde f_i es la tasa de erosión media del terreno aportante.

Los modelos de los tres reservorios operan en cascada: la concentración de salida de uno es tomada como concentración de entrada al tramo siguiente. Adicionalmente, cada tramo recibe un apreciable aporte lateral de sedimentos en suspensión.

Se asume que los sólidos coloidales son aportados al Lago Argentino desde los glaciares, y que no poseen una tasa de depositación significativa ni en el Lago ni en los embalses. Su carga por lo tanto permanece constante a lo largo de todo el curso del río, independientemente de la presencia de las presas.

3.3 Datos de base

La Tabla 3.1 presenta los datos geométricos de los tres reservorios. En el caso de las presas el área y volumen corresponden al Nivel Máximo de Operación Normal (NAON), y fueron obtenidos de las curvas de los embalses determinadas mediante aerofotogrametría por el IGN⁹. La profundidad y el ancho medio de las distintas secciones de los embalses son muy variables, pero se verificó que su influencia en los resultados es relativamente baja, ya que sólo intervienen en el cálculo del factor de depositación de Krone.

Tabla 3.1. Datos geométricos de los reservorios.

Parámetros		Lago Argentino	Embalse NK	Embalse JC
NAON	H (mIGN)	-	176.5	114
Volumen	V (hm ³)	219000	5798	2969
Área	A (km ²)	1415	262	206
Profundidad media	h_M (m)	150	22	14
Ancho medio	B_M (km)	20	4.5	6

A los fines de este estudio se consideró el nivel, área y volumen de los embalses constantes en el tiempo. Esta hipótesis simplificativa se considera suficientemente precisa, dado que durante la operación de ambos embalses se planea conservar el caudal medio diario del río en condiciones naturales, y que la variación intradiaria de caudales debida al emputamiento de la generación en la presa NK producirá muy bajas oscilaciones horarias de niveles en ambos embalses, que se mantendrán cercanos en todo momento a su NAON.

Se utilizó en todos los casos el hidrograma medio mensual en la estación Charles Fuhr (Figura 2.1) como forzante del ingreso y salida de agua a todos los tramos del río y los reservorios.

Se asumió, por simplicidad, que la fuente de sedimentos opera en forma constante en el tiempo, es decir, no se representa la modulación mensual de la tasa de erosión media del terreno (f_i). En la Figura 3.1 se indican las áreas de las cuatro zonas de aporte de sedimentos.

⁹ “Memoria Técnica – Ley H-V – Topografía Curvas Altura - Volumen de las Represas” . GE-A.CV-MT.TP-(OG-01-01)-P001. Represas Patagonia (China Gezhouba Group Company Limited | Electroingeniería SA | Hidrocuyo SA | UTE), Agosto 2015.

Tabla 3.2. Áreas de zonas de aporte.

Zona	Área (km ²)
1	17000
2	3101
3	2845
4	5954

Se dispuso de datos de turbidez medidos en el último tramo del río Santa Cruz y en su estuario durante el mes de diciembre de 2016¹⁰. En la Figura 3.3 se muestra la ubicación de las estaciones de medición. La Figura 3.4 presenta los perfiles verticales medidos en las seis primeras estaciones, ubicadas sobre el río Santa Cruz antes de su desembocadura en el estuario. Se observa que los perfiles de turbidez son muy uniformes en la profundidad, bastante homogéneos en el espacio, y relativamente constantes en el tiempo independientemente de las condiciones de marea. Por lo tanto, se asumió que resultan representativos de la turbidez que tiene el río en su último tramo. En función de estos datos, se adoptó como representativo de la de turbidez en la desembocadura del río Santa Cruz durante el mes de diciembre un valor de 8 NTU.

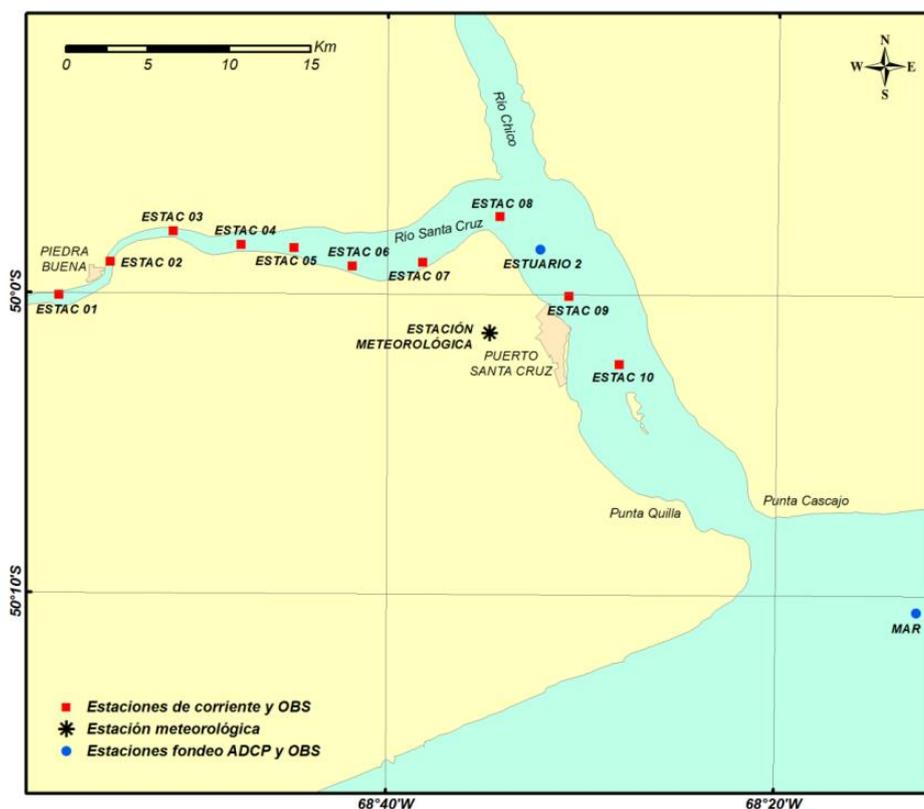
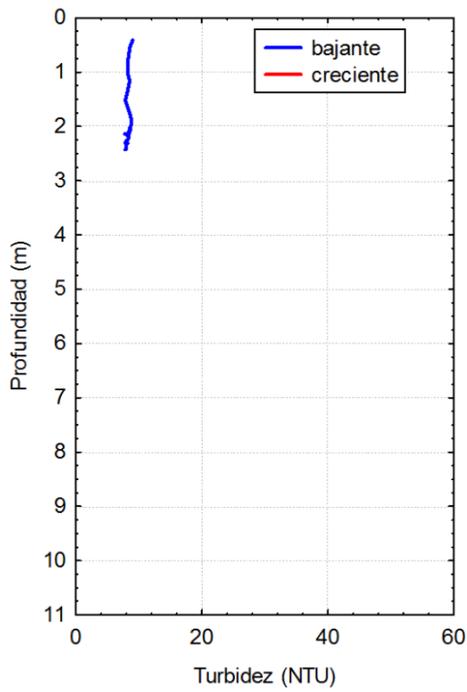
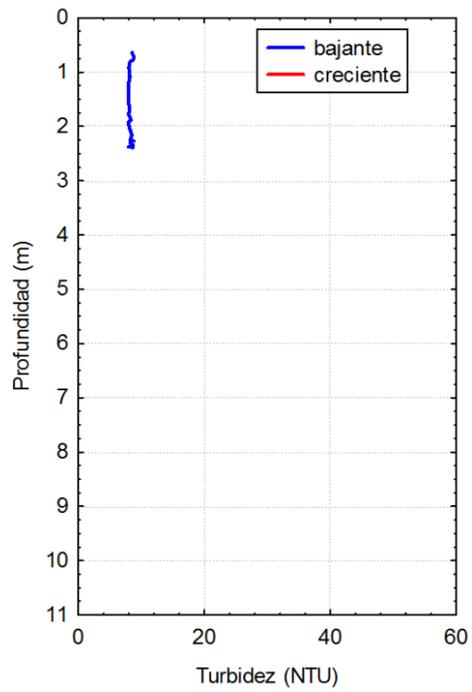


Figura 3.3. Ubicación de las estaciones de medición de turbidez.

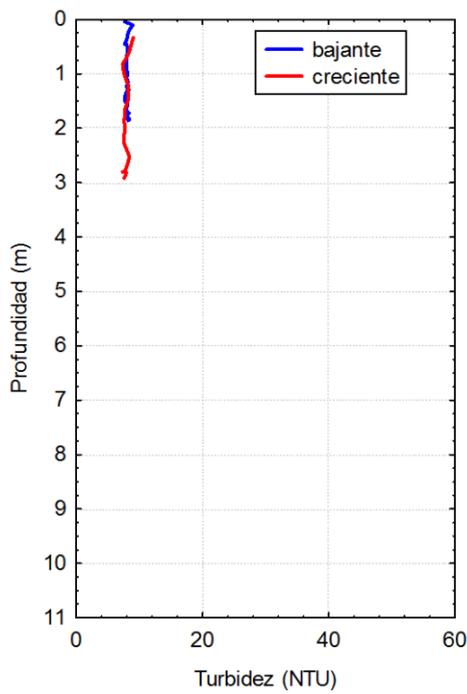
¹⁰ Ezcurra & Schmidt S.A. (ESSA), “Modelación hidrodinámica, dispersión y transporte de sedimentos. Estuario del Río Santa Cruz, Provincia de Santa Cruz”, Informe de Avance. Represas Patagonia (China Gezhouba Group Company Limited | Electroingeniería SA | Hidrocuyo SA | UTE), Febrero 2017.



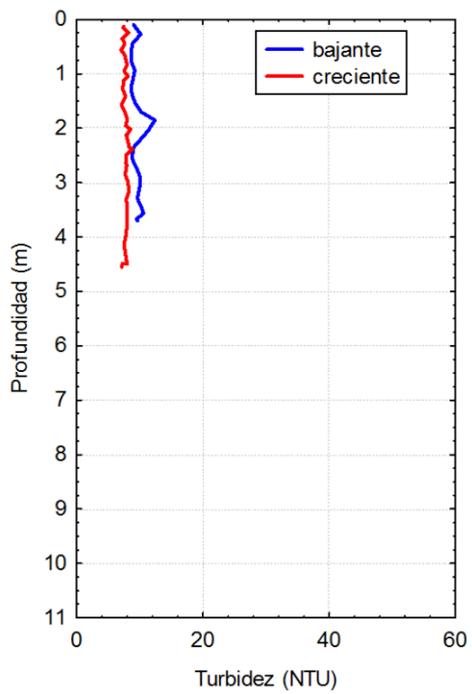
Estación 01



Estación 02



Estación 03



Estación 04

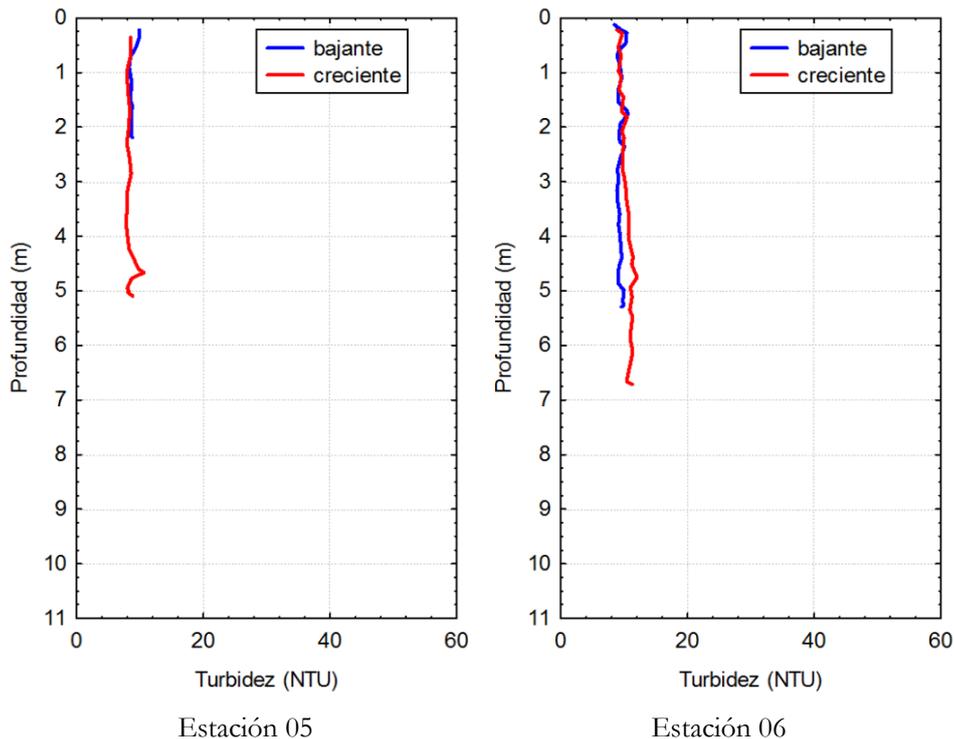


Figura 3.4. Mediciones de turbidez en las estaciones ubicadas en el río Santa Cruz.

Como complemento, en la Figura 3.5 se presentan los perfiles verticales medidos en dos estaciones ubicadas francamente en el estuario del río Santa Cruz. A diferencia de las estaciones localizadas en el río, se observa una gran variación de la turbidez en profundidad y en el tiempo, así como entre ambas estaciones. Esta variabilidad es lo típico de un estuario, que sólo puede soportar biota capaz de adaptarse a estas características.

Existen en la bibliografía un abanico de correlaciones entre la turbidez y la concentración de SST, muchas de las cuales se recogen en Murillo¹¹. Para condiciones de baja turbidez, estas correlaciones generalmente plantean una relación de proporcionalidad entre ambos parámetros, con un coeficiente de proporcionalidad que, dependiendo del autor, tiene valores en el rango 1,01 a 2,76 para transformar de NTU a mg/l. Entonces, al valor de 8 NTU adoptado como representativo de la turbidez en la desembocadura del río Santa Cruz durante el mes de diciembre, le correspondería una concentración de SST que podría variar entre 8,1 y 22,1 mg/l.

En diciembre de 2016 se llevó a cabo una campaña de recolección de muestras de agua a lo largo del río Santa Cruz y su estuario, a partir de las cuales se determinaron concentraciones de SST. Los resultados se representan en la Figura 3.6. Se observa que las tres muestras representativas de la concentración sobre el río Santa Cruz indican valores en el rango 5 a 10 mg/l, que resultan consistentes con las mediciones de turbidez descritas más arriba. Nótese que, al igual que con la turbidez, la concentración de SST muestra una gran variabilidad en el estuario.

¹¹ Murillo, J. M., 2009. Turbidez y sólidos en suspensión de las aguas de escorrentía susceptibles de ser utilizadas en la recarga artificial del acuífero granular profundo subyacente a la ciudad de San Luis de Potosí (México). Boletín Geológico y Minero, 120 (2): 169-184. ISSN: 0366-0176

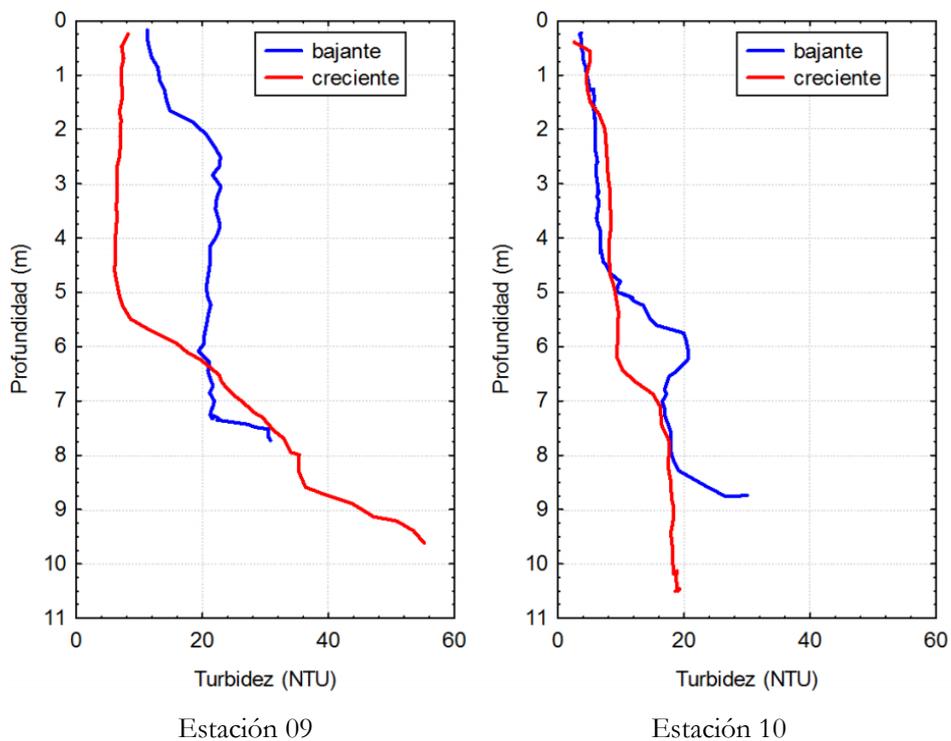


Figura 3.5. Mediciones de turbidez en estaciones del estuario.

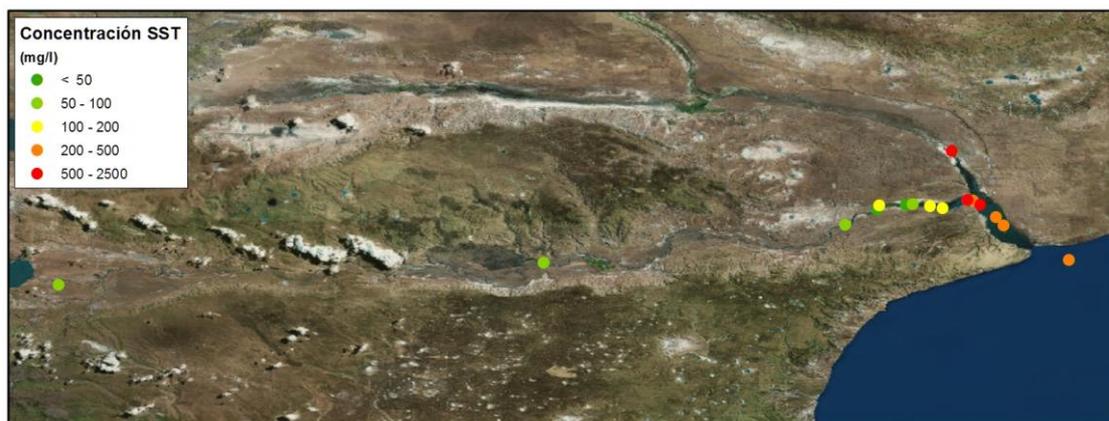


Figura 3.6. Concentraciones de SST a lo largo del río Santa Cruz.

No se contó con información granulométrica de los sedimentos sedimentables, constituidos por limos y arcillas no coloidales. Para caracterizarlos se asumió un diámetro medio $d_{50} = 4 \mu\text{m}$, es decir, relativamente bajo, apoyándose en la observación de que debe ser una fracción muy fina para subsistir a la deposición en el Lago Argentino. A posteriori se efectúan ensayos de sensibilidad de las conclusiones a esta hipótesis. La velocidad de caída asociada se calculó a partir de la ley de Stokes¹², válida para partículas de diámetro menor a $100 \mu\text{m}$, obteniéndose un valor de $1,2 \text{ m/día}$. El valor crítico de velocidad de corte de deposición se adoptó igual a $u_{*d} = 0,8 \text{ cm/s}$, que es un valor típico utilizado en modelaciones¹³.

Dado que tampoco se contó con datos sobre la partición de SST entre fracción sedimentable y coloidal, para cerrar el problema se asumió que la fracción sedimentable (es decir, la modelada) constituye el 50% de los SST en el nacimiento del río Santa Cruz. Eventualmente se efectúan ensayos de sensibilidad de las conclusiones a esta hipótesis.

3.4 Calibración del modelo

Se calibró el modelo para el escenario natural, utilizando la información disponible para el mes de diciembre.

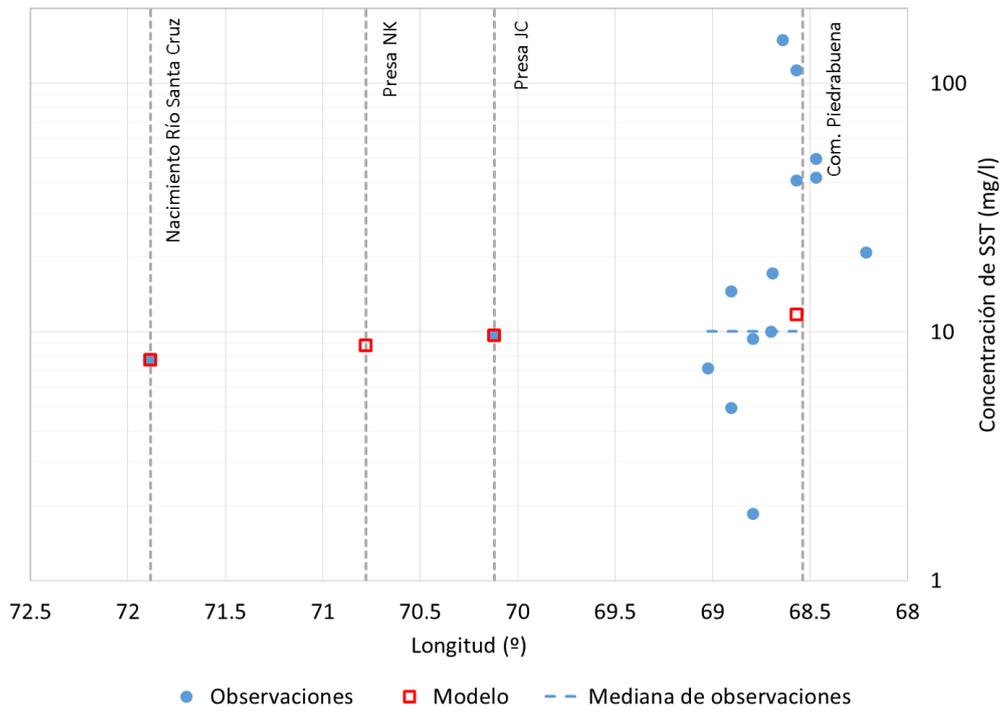
El caudal medio mensual en el río Santa Cruz para el mes de diciembre es de $600 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 2.1), algo inferior al caudal medio anual del río (por lo que la concentración media anual de sedimentos que se calculará eventualmente con el modelo resultará ligeramente superior al valor de diciembre).

Los parámetros de calibración son las tasas de erosión media por cuenca hidrográfica. Se consideró un valor para la correspondiente al Lago Argentino (f_1), asociada esencialmente a erosión hídrica, y un único valor para las correspondientes a las cuencas restantes ($f_2 = f_3 = f_4$), asociadas esencialmente a erosión eólica. En la Figura 3.7 se muestra el grado de acuerdo alcanzado entre los valores de SST medidos y modelados adoptando los siguientes valores: $f_1 = 400 \text{ kg/km}^2/\text{día}$ ($1,5 \text{ ton/ha/año}$) y $f_2 = f_3 = f_4 = 17,5 \text{ kg/km}^2/\text{día}$ ($0,064 \text{ ton/ha/año}$). La Figura 3.7a presenta la totalidad de las mediciones, para lo cual se utiliza una escala logarítmica para las concentraciones; en cambio la Figura 3.7b está en escala lineal, habiéndose filtrado los valores mayores a 20 mg/l que se dan en el estuario. El acuerdo se considera muy satisfactorio, incluyendo la comparación con el valor de la mediana en la zona de la desembocadura, afectada por la marea. Si bien las tasas medias de erosión eólica resultan relativamente pequeñas en términos absolutos, téngase en cuenta que se trata de valores promedios para una región que incluye zonas de erosión eólica severa-grave, ligera-moderada y ausente¹⁴.

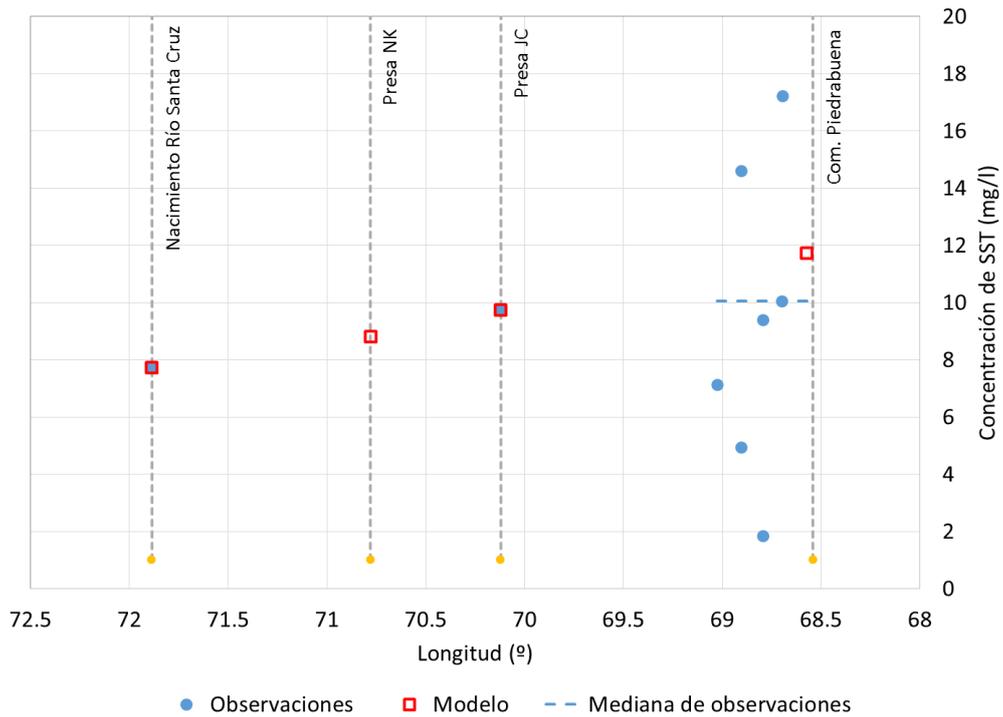
¹² Van Rijn, L. "Sediment Transport, Part II: Suspended Load Transport". Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110, No. 11, 1984.

¹³ Re, M., García, P.E., Lecertúa, E.A., Menéndez, A.N., "Hydraulic Impact Studies on the Coastal Zone of Buenos Aires City". Ocean modeling for coastal management – Case studies with MOHID, M. Mateus and R. Neves (eds.), IST Press, 2013.

¹⁴ Rostagno, C.M., del Valle, H.F., Buschiazzo, D., "La Erosión Eólica", cap. 2.2, M.A. Gonzalez y N.J. Bejerman (Eds), Peligrosidad Geológica en Argentina, Buenos Aires, ASAGAI, 2004.



a) Escala logarítmica



b) Escala lineal

Figura 3.7. Comparación entre concentraciones de SST medidas y calculadas.

3.5 Resultados

En la Tabla 3.3 se presenta el balance medio anual de la carga sólida de acuerdo al modelo para los escenarios natural y con presas. Para cada tramo se indican las cargas entrante por aporte lateral, depositada por sedimentación y saliente, correspondientes a la fracción sedimentable. En el caso de la fracción coloidal, la carga transportada no varía a lo largo del río. Se observan las presas capturan la mayor parte de los sólidos sedimentables. La Tabla 3.4 muestra las concentraciones de sólidos a la salida de cada tramo para ambos escenarios, junto con la variación porcentual de la concentración de SST por la presencia de las presas. Se observan las reducciones muy significativas de la concentración de sólidos sedimentables para el escenario con presas. Esto determina que la concentración de SST en la cabecera del estuario estará dominada por los sólidos coloidales aportados por el lago Argentino y por el aporte lateral de sólidos sedimentables desde la Zona 4. De esta manera, el valor de concentración de SST en la desembocadura del río cae un 47%, es decir, prácticamente a la mitad del correspondiente al escenario natural.

Tabla 3.3. Balance medio anual de carga sólida para los escenarios natural y con presas.

		Sólidos Sedimentables			Sól. Coloidales
		Aporte lateral (10 ³ ton/año)	Deposición (10 ³ ton/año)	Carga saliente (10 ³ ton/año)	Carga saliente (10 ³ ton/año)
Natural	L.Argentino	2482.0	2396.9	85.1	85.1
	Presa NK	19.8	-	104.9	85.1
	Presa JC	18.2	-	123.1	85.1
	Tramo inferior	38.0	-	161.1	85.1
Con presas	L.Argentino	2482.0	2396.9	85.1	85.1
	Presa NK	19.8	86.2	18.7	85.1
	Presa JC	18.2	29.0	7.9	85.1
	Tramo inferior	38.0	-	45.9	85.1

Tabla 3.4. Concentraciones medias anuales de sólidos para los escenarios natural y con presas.

		Sólidos Sedimentables (mg/l)	Sólidos Coloidales (mg/l)	S. Suspendidos Totales (SST) (mg/l)	Variación de SST (%)
Natural	L.Argentino	3.85	3.84	7.69	-
	Presa NK	4.97	3.84	8.81	-
	Presa JC	6.00	3.84	9.84	-
	Tramo inferior	8.16	3.84	12.00	-
Con presas	L.Argentino	3.85	3.84	7.69	0%
	Presa NK	0.75	3.84	4.59	-48%
	Presa JC	0.32	3.84	4.16	-58%
	Tramo inferior	2.48	3.84	6.32	-47%

Como complemento, la Figura 3.8 muestra la evolución anual de la concentración de SST al final de cada uno de los cuatro tramos de recepción de aportes, donde se visualiza la modulación estacional de este parámetro. Se observa que la presencia de los embalses disminuye las concentraciones de SST en las zonas 2 y 3 a niveles similares a los de la Zona 1, y que disminuye casi completamente su modulación mensual.

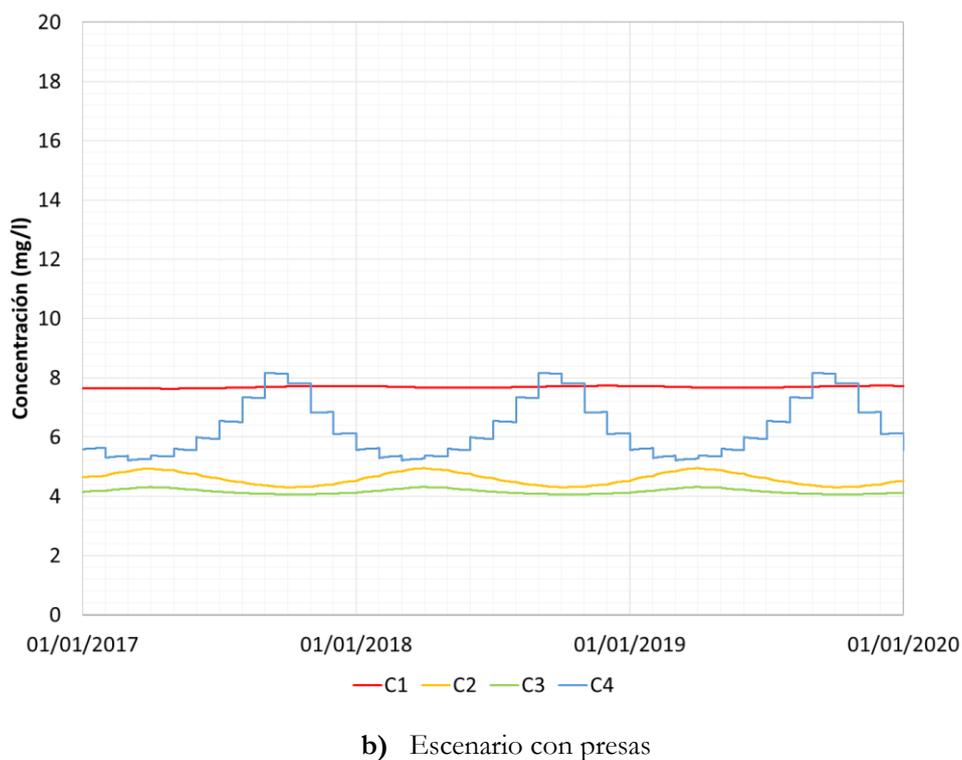
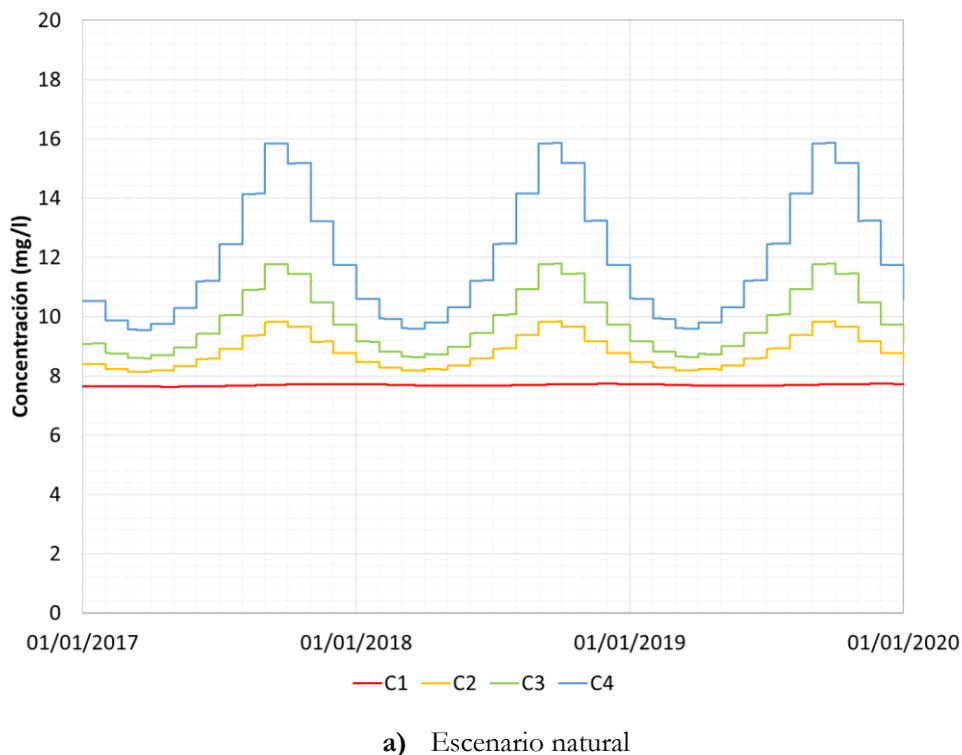


Figura 3.8. Concentración de SST a la salida de cada tramo.

En la Figura 3.9 se presenta la comparación de las concentraciones de SST en la cabecera del estuario (C4). Se observa que estas varían entre 9,6 y 15,9 mg/l para el escenario natural, pasando a una modulación de entre 5,2 y 8,2 mg/l para el escenario con presas. Para ambos necesarios esto significa variaciones de -20% y +33% respecto del valor medio.

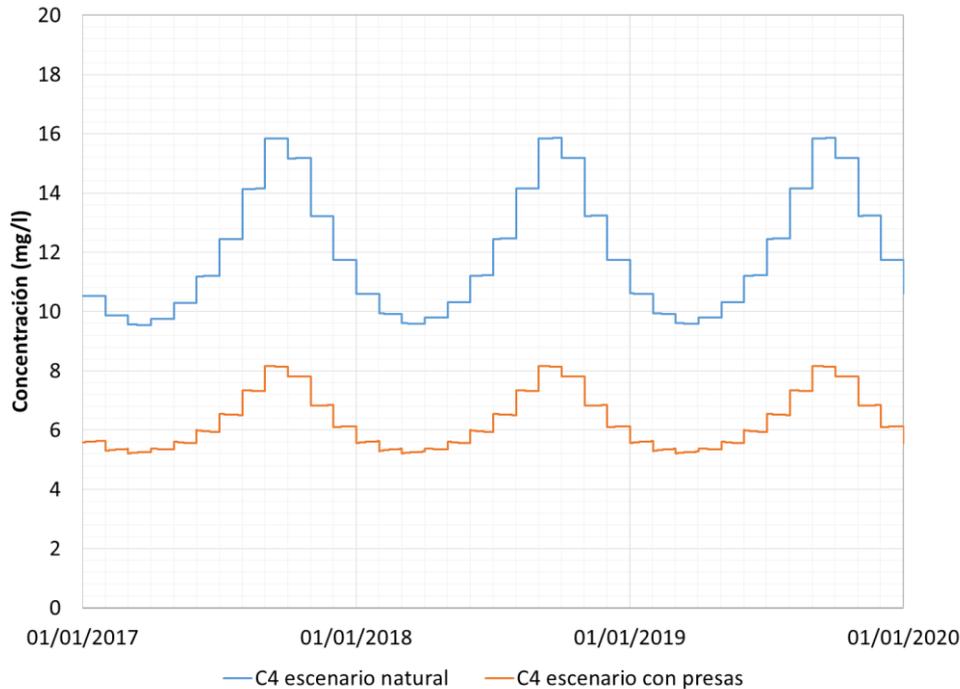


Figura 3.9. Concentración de SST en la cabecera del estuario con y sin presas.

3.6 Análisis de sensibilidad

Como una forma de proveer robustez a los resultados obtenidos, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad de esos resultados a variaciones en los valores de los parámetros más inciertos.

En primer lugar, se incrementó la fracción supuesta de sólidos sedimentables desde 50% a 80%. El modelo fue recalibrado con $f_1 = 640 \text{ kg/km}^2/\text{día}$ (2,3 ton/ha/año) y $f_2 = f_3 = f_4 = 17,5 \text{ kg/km}^2/\text{día}$ (0,064 ton/ha/año). Los resultados se presentan en la Tabla 3.5 y la Tabla 3.6. Como era de esperarse, la caída de concentración de SST en la desembocadura es mayor, de alrededor del 65%.

Tabla 3.5. Balance medio anual de carga sólida para los escenarios natural y con presas, suponiendo 80% de fracción de sólidos sedimentables.

		Sólidos Sedimentables			Sól. Coloidales
		Aporte lateral (10 ³ ton/año)	Deposición (10 ³ ton/año)	Carga saliente (10 ³ ton/año)	Carga saliente (10 ³ ton/año)
Natural	L.Argentino	3971.2	3834.7	136.5	34.1
	Presa NK	19.8	-	156.3	34.1
	Presa JC	18.2	-	174.5	34.1
	Tramo inferior	38.0	-	212.5	34.1
Con presas	L.Argentino	3971.2	3834.7	136.5	34.1
	Presa NK	19.8	128.2	28.1	34.1
	Presa JC	18.2	36.1	10.1	34.1
	Tramo inferior	38.0	-	48.2	34.1

Tabla 3.6. Concentraciones medias anuales de sólidos para los escenarios natural y con presas, suponiendo 80% de fracción de sólidos sedimentables.

		Sólidos Sedimentables (mg/l)	Sólidos Coloidales (mg/l)	S. Suspendidos Totales (SST) (mg/l)	Variación de SST (%)
Natural	L.Argentino	6.17	1.54	7.71	-
	Presa NK	7.29	1.54	8.83	-
	Presa JC	8.32	1.54	9.86	-
	Tramo inferior	10.48	1.54	12.02	-
Con presas	L.Argentino	6.17	1.54	7.71	0%
	Presa NK	1.11	1.54	2.65	-70%
	Presa JC	0.40	1.54	1.94	-80%
	Tramo inferior	2.56	1.54	4.10	-66%

En segundo lugar, se redujo la fracción supuesta de sólidos sedimentables desde 50% a 20%. El modelo fue recalibrado con $f_1 = 160 \text{ kg/km}^2/\text{día}$ (0,58 ton/ha/año) y $f_2 = f_3 = f_4 = 17,5 \text{ kg/km}^2/\text{día}$ (0,064 ton/ha/año). Los resultados se presentan en la Tabla 3.7 y la Tabla 3.8. Esta vez, como era de esperarse, la caída de concentración de SST en la desembocadura es menor, de alrededor del 30%.

Tabla 3.7. Balance medio anual de carga sólida para los escenarios natural y con presas, suponiendo 20% de fracción de sólidos sedimentables.

		Sólidos Sedimentables			Sól. Coloidales
		Aporte lateral (10 ³ ton/año)	Deposición (10 ³ ton/año)	Carga saliente (10 ³ ton/año)	Carga saliente (10 ³ ton/año)
Natural	L.Argentino	992.8	958.8	34.0	136.0
	Presa NK	19.8	-	53.8	136.0
	Presa JC	18.2	-	72.0	136.0
	Tramo inferior	38.0	-	110.0	136.0
Con presas	L.Argentino	992.8	958.8	34.0	136.0
	Presa NK	19.8	44.3	9.5	136.0
	Presa JC	18.2	22.0	5.7	136.0
	Tramo inferior	38.0	-	43.7	136.0

Tabla 3.8. Concentraciones medias anuales de sólidos para los escenarios natural y con presas, suponiendo 20% de fracción de sólidos sedimentables.

		Sólidos Sedimentables (mg/l)	Sólidos Coloidales (mg/l)	S. Suspendidos Totales (SST) (mg/l)	Variación de SST (%)
Natural	L.Argentino	1.54	6.14	7.67	-
	Presa NK	2.66	6.14	8.80	-
	Presa JC	3.69	6.14	9.83	-
	Tramo inferior	5.85	6.14	11.99	-
Con presas	L.Argentino	1.54	6.14	7.67	0%
	Presa NK	0.39	6.14	6.53	-26%
	Presa JC	0.24	6.14	6.38	-35%
	Tramo inferior	2.40	6.14	8.54	-29%

En tercer lugar, se redujo el diámetro medio de la fracción de sólidos sedimentables (mantenida en el 50%) de 4 a 2 μm . El modelo fue recalibrado con $f_1 = 153 \text{ kg/km}^2/\text{día}$ (0,56 ton/ha/año) y $f_2 = f_3 = f_4 = 17,5 \text{ kg/km}^2/\text{día}$ (0,064 ton/ha/año). Los resultados se presentan en la Tabla 3.9 y la Tabla 3.10. Tal cual era de esperarse, la caída de concentración de SST en la desembocadura es menor, de alrededor del 40%.

Tabla 3.9. Balance medio anual de carga sólida para los escenarios natural y con presas, con diámetro medio de sólidos sedimentables igual a 2 μm .

		Sólidos Sedimentables			Sól. Coloidales
		Aporte lateral (10 ³ ton/año)	Deposición (10 ³ ton/año)	Carga saliente (10 ³ ton/año)	Carga saliente (10 ³ ton/año)
Natural	L.Argentino	949.4	858.4	91.0	91.0
	Presa NK	19.8	-	110.8	91.0
	Presa JC	18.2	-	128.9	91.0
	Tramo inferior	38.0	-	167.0	91.0
Con presas	L.Argentino	949.4	858.4	91.0	91.0
	Presa NK	19.8	62.5	48.3	91.0
	Presa JC	18.2	33.2	33.3	91.0
	Tramo inferior	38.0	-	71.3	91.0

Tabla 3.10. Concentraciones medias anuales de sólidos para los escenarios natural y con presas, con diámetro medio de sólidos sedimentables igual a 2 μm .

		Sólidos Sedimentables (mg/l)	Sólidos Coloidales (mg/l)	S. Suspendidos Totales (SST) (mg/l)	Variación de SST (%)
Natural	L.Argentino	4.20	4.10	8.31	-
	Presa NK	5.33	4.10	9.43	-
	Presa JC	6.36	4.10	10.46	-
	Tramo inferior	8.51	4.10	12.62	-
Con presas	L.Argentino	4.20	4.10	8.31	0%
	Presa NK	2.10	4.10	6.21	-34%
	Presa JC	1.43	4.10	5.54	-47%
	Tramo inferior	3.59	4.10	7.69	-39%

En cuarto lugar, se incrementó el diámetro medio de la fracción de sólidos sedimentables (mantenida en el 50%) de 4 a 10 μm . El modelo fue recalibrado con $f_1 = 2450 \text{ kg/km}^2/\text{día}$ (8,94 ton/ha/año) y $f_2 = f_3 = f_4 = 17,5 \text{ kg/km}^2/\text{día}$ (0,064 ton/ha/año). Los resultados se presentan en la Tabla 3.11 y la Tabla 3.12. Esta vez, tal cual era de esperarse, la caída de concentración de SST en la desembocadura es mayor, aunque muy levemente, permaneciendo en el orden del 50%.

Tabla 3.11. Balance medio anual de carga sólida para los escenarios natural y con presas, con diámetro medio de sólidos sedimentables igual a 10 μm .

		Sólidos Sedimentables			Sól. Coloidales
		Aporte lateral (10 ³ ton/año)	Deposición (10 ³ ton/año)	Carga saliente (10 ³ ton/año)	Carga saliente (10 ³ ton/año)
Natural	L.Argentino	15 202.3	15 117.0	85.2	85.2
	Presa NK	19.8	-	105.0	85.2
	Presa JC	18.2	-	123.2	85.2
	Tramo inferior	38.0	-	161.2	85.2
Con presas	L.Argentino	15 202.3	15 117.0	85.2	85.2
	Presa NK	19.8	101.3	3.7	85.2
	Presa JC	18.2	21.0	0.9	85.2
	Tramo inferior	38.0	-	38.9	85.2

Tabla 3.12. Concentraciones medias anuales de sólidos para los escenarios natural y con presas, con diámetro medio de sólidos sedimentables igual a 10 μm .

		Sólidos Sedimentables (mg/l)	Sólidos Coloidales (mg/l)	S. Suspendidos Totales (SST) (mg/l)	Variación de SST (%)
Natural	L.Argentino	3.86	3.84	7.70	-
	Presa NK	4.98	3.84	8.82	-
	Presa JC	6.01	3.84	9.86	-
	Tramo inferior	8.17	3.84	12.01	-
Con presas	L.Argentino	3.86	3.84	7.70	0%
	Presa NK	0.14	3.84	3.99	-55%
	Presa JC	0.04	3.84	3.88	-61%
	Tramo inferior	2.19	3.84	6.04	-50%

4 CONCLUSIONES

A continuación se sintetizan las principales conclusiones del estudio:

- El emplazamiento de las presas NK y JC generará impactos sobre la dinámica sedimentológica del río Santa Cruz. En este estudio se cuantifican esos impactos para calificar su alcance y consecuencias sobre el tramo inferior, aguas abajo de la presa JC, que es el que queda sujeto a condiciones hidrodinámicas naturales.
- En particular, se analizan dos problemas. En primer lugar, la extensión y magnitud de la erosión esperable aguas abajo de la presa JC debido al impacto sobre el transporte de sedimentos de fondo, que constituirá un cambio morfológico. En segundo lugar, la reducción en el aporte de Sólidos Suspendidos Totales (SST) hacia la zona del estuario del río Santa Cruz, debido al atrapamiento de parte de esa carga sólida por los embalses de las dos presas, que se manifestará en una reducción de la turbidez.

Las principales conclusiones para el primer problema son las siguientes:

- El sedimento de fondo del río Santa Cruz presenta una distribución granulométrica extendida, que bajo la acción de las corrientes de agua genera una coraza con las fracciones más gruesas, la cual blinda a las capas inferiores de posteriores erosiones, estabilizando el nivel del lecho. Al emplazar una presa se producen dos tipos de perturbaciones sobre el fondo. Por un lado, durante la construcción se interviene sobre un tramo de río en torno a la sección de la presa, lo cual produce el rompimiento del acorazamiento, conduciendo a un proceso erosivo aguas abajo hasta alcanzar nuevamente una situación de equilibrio. Por otro lado, si existe transporte de sedimentos de fondo, la presa lo corta, produciéndose erosión hasta lograr el equilibrio.

- Se determinó que para el escenario natural actual (en ausencia de presas), el acorazamiento del río Santa Cruz es de tipo estático, es decir, sin transporte de sedimento, por lo cual el único proceso que se debe estudiar en relación a la erosión del lecho por la implantación de la presa JC es el asociado al tramo perturbado durante la construcción.
- Se asumió conservadoramente una distancia de 500 m aguas abajo de la presa JC como sujeta a perturbación durante la construcción. Se determinó que, bajo condiciones hidrológicas medias, se producirá una fase de erosión relativamente rápida los primeros 2 años, seguida de una fase de erosión mucho más lenta, que mostrará signos de estabilización luego de 20 años. La magnitud de la erosión será mucho más significativa al pie de la presa – donde alcanzará los 0,80 m –, disminuyendo rápidamente hacia aguas abajo – a 300 m disminuirá a 0,20 m –. Desde aproximadamente los 430 m, y hasta los 1300 m, habrá acumulación – cuyo valor máximo no llegará a alcanzar los 0,20 m.
- No obstante, la ocurrencia de condiciones hidrológicas extremas conducirá a una erosión adicional. Esta alcanzará eventualmente hasta 1,10 m al pie de la presa. La acumulación máxima prácticamente no variará, aunque se expandirá la zona de acumulación hasta aproximadamente 1500 m.

Las principales conclusiones para el segundo problema son las siguientes:

- El río Santa Cruz recibe partículas sólidas generadas por erosión hídrica y eólica. La erosión hídrica (incluyendo el proveniente del descongelamiento de los glaciares) es preponderante en la cuenca alta, pero una parte significativa es atrapada por el Lago Argentino. Aguas abajo de este predomina la erosión eólica.
- Los sólidos incorporados como fase particulada (SST), que determinan la turbidez de las aguas, son transportados en suspensión hacia el estuario del río Santa Cruz. Incluyen una fracción sedimentable y una coloidal. Al emplazar las presas NK y JC parte de la fracción sedimentable será atrapada en los respectivos embalses, reduciendo la concentración de sedimento suspendido que alcanza el estuario, y en consecuencia, la turbidez de las aguas.
- Se determinó que, al igual que el Lago Argentino, los dos embalses (NK y JC) capturan la mayor parte del sedimento fino sedimentable ingresado.
- Por el efecto de atrapamiento de los dos embalses, el valor de concentración media anual de sedimento sedimentable en suspensión en la desembocadura del río Santa Cruz caerá a prácticamente la mitad del correspondiente al escenario natural.
- La variación estacional de esa concentración va de -20% a +33% respecto del valor medio, tanto para el escenario natural como para el escenario con presas.
- Se verificó que la conclusión sobre la reducción de la concentración media anual en la cabecera del estuario es relativamente robusta respecto de las hipótesis más determinantes asumidas en el cálculo. Específicamente, frente a un rango de variación de entre 20% y 80% de la fracción de sólidos sedimentables respecto de los SST, la reducción de concentración oscila entre 30% y 65%. Por su parte, frente a un rango de variación de entre 2 y 10 μm del diámetro medio de la fracción de sólidos sedimentables, la reducción de concentración oscila entre 40% y 50%.