



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**ADAPTACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO Y
NUMÉRICO, PARA EL ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DEL LECHO EN UN
CAUCE NATURAL**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DANIELA ALEJANDRA ABARCA ARGOMEDO

**PROFESOR GUÍA
SR. YARKO NIÑO CAMPOS**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN
SR. ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS
SR. JAVIER GONZÁLEZ SANDOVAL**

**SANTIAGO DE CHILE
ABRIL 2008**

RESUMEN

La construcción de la presa de un embalse altera significativamente la capacidad de un río para transportar sedimentos, causando la degradación del lecho aguas abajo, poniendo en riesgo las obras en esta zona, y causando el acorazamiento del lecho en respuesta a la interrupción de gasto sólido en la zona de la presa. De esta forma, resulta de interés contar con una herramienta que permita modelar los posibles efectos que tendría la realización de un proyecto ingenieril como éste, en la morfología del río afectado.

Es así como en este trabajo, implementó en el modelo matemático y numérico *Mossem*, la capacidad de modelar la evolución espacial y temporal de la granulometría del lecho. *Mossem* fue diseñado por González (2006), y corresponde a una herramienta que permite estudiar la sedimentación en embalses considerando en forma conjunta el transporte y depositación de sedimentos finos y gruesos. Además incorpora el desarrollo de corrientes de turbidez y los efectos de granulometrías extendidas en el caso de sedimentos gruesos.

Mossem por simplificación no considera la evolución temporal de la granulometría en la superficie del lecho, dado que en el caso de sedimentación en embalses, ésta no influye en forma considerable en el fenómeno. En caso de degradación en cauces naturales, los efectos de dicha evolución no son despreciables y por lo tanto fue preciso adaptarlo para este tipo de casos.

De esta forma se adaptó el modelo a través de la incorporación de la capacidad de cálculo de los procesos de degradación del cauce que considere la evolución temporal de la granulometría del lecho. Esto se logró incorporando al modelo un módulo de evolución granulométrica basado en las formulaciones de capa activa, capaz de reproducir la evolución temporal de la granulometría superficial del lecho y la estructura granulométrica vertical del lecho generado por situaciones de degradación.

La adaptación del modelo fue sometida a diversas aplicaciones ficticias como forma de evaluación, abarcando situaciones de degradación y de sedimentación. A partir de los resultados obtenidos, se realizó un pequeño ajuste a la adaptación realizada con el fin de alcanzar resultados que fuesen esperables teóricamente. De esta forma, se obtuvieron resultados que podrían perfectamente representar un resultado real, en el cual se consideran condiciones permanentes de escurrimiento y topografía regular a lo largo del cauce.

La adaptación del modelo fue aplicada a un cauce natural a partir de registros topográficos, granulométricos e hidrológicos del Río Maule aguas abajo de la Presa Colbún, que corresponden al inicio de operación de la presa en 1985 y a la situación actual del cauce en Diciembre del 2007, obteniéndose resultados conservadores que son del orden de magnitud de situación real medida actual.

AGRADECIMIENTOS

A los profesores de la comisión Yarko Niño, Aldo Tamburrino y Javier González, por su apoyo y valiosas observaciones entregadas en este trabajo.

A Colbún S.A., en especial al Sr. Hans Heyer por su desinteresado aporte en esta memoria, el cual fue fundamental para su desarrollo.

A mis padres y hermano por su apoyo, amor y comprensión en estos 6 años de carrera.

A mi esposo Aitor por su infinita paciencia, amor y apoyo incondicional tanto en este trabajo como en los años que llevamos juntos.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 MOTIVACIÓN	1
1.2 OBJETIVOS Y ALCANCES	3
1.2.1 <i>Objetivo general</i>	3
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i>	3
1.2.3 <i>Alcances</i>	3
2. ANALISIS DEL MODELO MOSSEM (2006)	4
2.1 INTRODUCCIÓN	4
2.2 DESCRIPCIÓN GENERAL	4
2.2.1 <i>Resolución del flujo</i>	4
2.2.2 <i>Cálculo gasto sólido de fondo</i>	5
2.2.3 <i>Resolución numérica</i>	13
3. EVOLUCION TEMPORAL DE GRANULOMETRIA DEL LECHO	17
3.1 FORMULACIÓN TEÓRICA	17
3.1.1 <i>Concepto de Capa Activa</i>	17
3.1.2 <i>Incorporación de concepto de capa activa a la ecuación de Exner</i>	18
3.1.3 <i>Distribución granulométrica</i>	21
3.1.4 <i>Estimación espesor capa activa L_a y fracción granulométrica de intercambio f_{fi}</i>	22
3.2 RESOLUCIÓN NUMÉRICA.....	24
3.2.1 <i>Esquemas numéricos existentes</i>	24
3.2.2 <i>Esquema numérico adoptado e incorporación a Mossem</i>	27
4. APLICACIÓN DEL MODELO	31
4.1 SITUACIÓN AGUAS ARRIBA DE UN EMBALSE	31
4.1.1 <i>Nivel constante del embalse aguas abajo</i>	31
4.1.2 <i>Descenso del nivel aguas abajo del embalse</i>	42
4.2 SITUACIÓN AGUAS ABAJO DE LA PRESA DE UN EMBALSE	47
5. VALIDACION DEL MODELO.....	57
5.1 INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	57
5.1.1 <i>Recopilación de antecedentes</i>	57
5.1.1.1 <i>Información topográfica 1984</i>	57
5.1.1.2 <i>Información granulométrica 1981</i>	58
5.1.1.3 <i>Información hidrológica 1985-2007</i>	61
5.1.1.4 <i>Información hidráulica 1984</i>	62
5.1.1.5 <i>Situación del lecho del Río Maule aguas abajo de Presa Colbún en el año 2007</i>	64
5.2 APLICACIÓN DEL MODELO AL CAUCE DEL RÍO MAULE	68
5.2.1 <i>Consideraciones especiales y simplificaciones adoptadas</i>	68
5.2.2 <i>Resultados de la simulación</i>	72
5.2.2.1 <i>Resultados de evolución del lecho 1985-2007</i>	72
5.2.2.2 <i>Resultados evolución granulométrica del lecho 1985-2007</i>	77
5.2.2.3 <i>Resultados Modelo de Simulación 1981</i>	84
5.2.2.4 <i>Comparación resultados considerando sección transversal trapecial</i>	85
6. CONCLUSIONES	87
6.1 CONCLUSIONES DE ADAPTACIÓN REALIZADA A MOSSEM	87
6.2 MÓDULO DE EVOLUCIÓN GRANULOMÉTRICA	87
6.3 APLICACIONES Y VALIDACIÓN	89
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

ÍNDICE DE ANEXO DIGITAL

ANEXO A-1: Base de datos de simulación de cauce aguas arriba de una presa.

ANEXO A-2: Base de datos de simulación de cauce aguas abajo de una presa.

ANEXO A-3: Base de datos de perfiles del Río Maule aguas abajo de la Presa Colbún, 1984

ANEXO A-4: Estadística de vertimientos de Embalse Colbún, 1985-2007.

ANEXO A-5: Planos de perfiles transversales levantados en Diciembre del 2007.

ANEXO A-6: Fotografías aéreas del Río Maule aguas debajo de la Presa Colbún.

ANEXO A-7: Base de datos de simulaciones para la validación.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

El carácter natural de muchos cauces aluviales ha sido significativamente alterado por distintos proyectos ingenieriles, como captaciones, encauzamientos, regulación de flujos, estabilización de bancos de depósito, construcción de obras de proyectos hidroeléctricos, extracción de áridos, etc. Estas actividades promueven la inestabilidad de los cauces al afectar directamente la cantidad y calidad de los sedimentos y agua que conducen, lo que puede traducirse en adversos efectos, tanto sobre otras obras como sobre el sistema ecológico o potenciales zonas recreacionales. Tales repercusiones pueden ser económicamente costosas y estéticamente desagradables.

En particular, la construcción de la presa de un embalse altera significativamente el transporte de sedimento, interrumpiendo el aporte de gasto sólido y causando degradación aguas abajo, lo cual pone en riesgo las obras emplazadas en esta zona y adicionalmente causa el acorazamiento del lecho. Es el caso de la barrera de Islam, obra de regadío del Valle Sutlej en Punjab (India) y de un tranque de sedimentación construido sobre el Río Yuba, Marysville, California (EEUU). En ambos casos, a los pocos años de la puesta en funcionamiento de las obras se produjo su falla total por degradación del lecho. Un ejemplo de acorazamiento puede ser apreciado en la Figura 1.1, donde se muestra un sector del lecho aguas abajo de la Presa Lewiston en USA, donde las zonas oscuras del cauce corresponden a partículas de gran tamaño que evidencian la formación de la coraza estática.

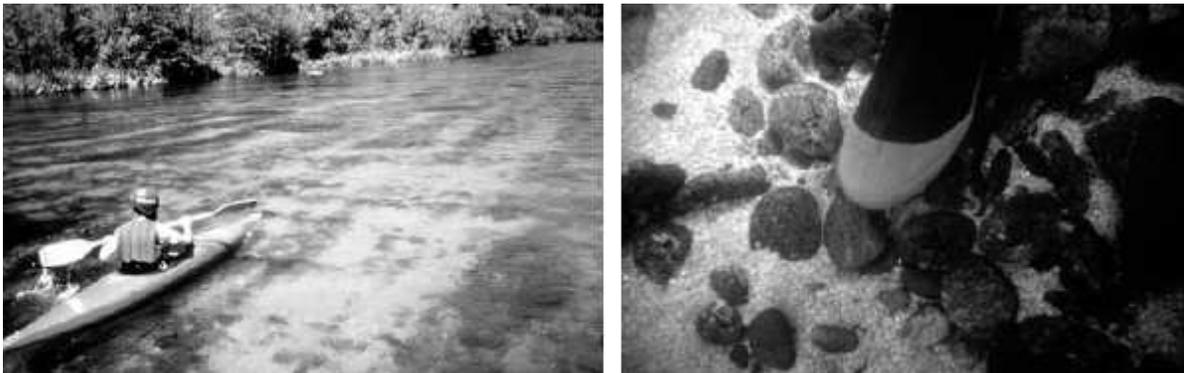


Figura 1.1: Río Trinity, aguas abajo de Presa Lewiston, California, USA.

Dados los impactos que producen las alteraciones del equilibrio dinámico de cauces naturales, se ha llegado a la conclusión que es preciso desarrollar un análisis basado en los conocimientos básicos de los procesos que experimenta éste. De esta forma, la evaluación de la realización de algún proyecto como los mencionados anteriormente, requiere la capacidad de predecir la respuesta del cauce a cambios en el caudal, carga de sedimento o morfología debido a actividades naturales o antropogénicas. Solo entendiendo la dinámica del río será posible predecir las probables respuestas del sistema a los trabajos ingenieriles.

Actualmente, los modelos matemáticos unidimensionales son frecuentemente usados en el análisis de los posibles efectos de un proyecto ingenieril en la morfología del río afectado. Así, en este trabajo, se analiza la evolución de la topografía longitudinal y composición granulométrica del lecho de un cauce natural, debido a cambios en el caudal y carga de sedimento, mediante el modelo matemático *Mossem*.

Mossem, diseñado por González (2006), es una herramienta de modelación de sedimentación en embalses que considera en forma conjunta el transporte y depositación de sedimentos finos y gruesos, incorporando el desarrollo de corrientes de turbidez y los efectos de granulometrías extendidas en el caso de sedimentos gruesos. Para el cálculo de las tasas de arrastre de sólidos utiliza alternativamente distintas fórmulas, incluyendo las más clásicas y más modernas disponibles en la literatura. Éstas son las propuestas por Meyer-Peter y Müller (1948), Ackers y White (1973), Parker (1990), Wilcock y Crowe (2003). Además tiene la capacidad de tratar escurrimientos en régimen supercrítico o cercano a la crisis, característicos en los ríos de este país. Sin embargo, el modelo por simplificación no considera la evolución temporal de la granulometría en la superficie del lecho, dado que en el caso de sedimentación en embalses, ésta no influye en forma considerable en el fenómeno. En caso de degradación en cauces naturales, los efectos de la evolución granulométrica son muy importantes debido a que la granulometría del lecho condiciona el gasto sólidos de fondo, y éste a su vez condiciona la evolución del lecho, por lo que no es posible obtener una buena representación de la evolución morfológica de un cauce natural sin considerar la evolución granulométrica de su superficie.

1.2 Objetivos y alcances

1.2.1 Objetivo general

- Implementar en el modelo matemático y numérico *Mossem*, la capacidad de modelar la evolución espacial y temporal de la granulometría del lecho, y validar dicha capacidad.

1.2.2 Objetivos específicos

- Seleccionar, desarrollar e implementar un modelo matemático que permita representar la evolución de la granulometría del lecho de un cauce natural.
- Incorporar el modelo matemático desarrollado, a la estructura del modelo numérico *Mossem*.
- Validar el modelo desarrollado, aplicándolo a un cauce que se encuentran en estado de degradación debido a la presencia de una presa (Presa Colbún en Río Maule).

1.2.3 Alcances

- La adaptación del modelo no contempla una modificación sustancial de los métodos de resolución numérica de las ecuaciones que gobiernan el problema.
- El análisis de evolución del lecho, considera la variación unidimensional de la topografía longitudinal del cauce, no incorporando procesos de degradación en la dirección transversal al escurrimiento.

2. ANALISIS DEL MODELO *MOSSEM* (2006)

2.1 Introducción

En la actualidad existen pocos softwares comerciales capaces de integrar el transporte hidráulico de sedimentos finos y gruesos para simular procesos de evolución morfológica de cauce naturales. Aquellos que lo hacen, generalmente presentan problemas en la resolución de flujos supercríticos o cercanos a la crisis, o no consideran una distribución granulométrica extendida del lecho. Estas dos últimas características son propias de los cauces chilenos, y por lo tanto es difícil lograr un análisis integral y adecuado de la evolución de lecho de cauces nacionales a través de herramientas comerciales. Sin embargo, el modelo matemático y numérico diseñado por González (2006), *Mossem*, cuenta con todas las cualidades carentes de los softwares comerciales en la aplicación a cauces chilenos. El modelo se enfoca principalmente al análisis de sedimentación en embalses, considerando un desarrollo unidimensional que aborda en forma conjunta el transporte y depositación de sedimentos finos y gruesos, incorporando el desarrollo de corrientes de turbidez y los efectos de granulometrías extendidas en el transporte de sedimentos gruesos.

2.2 Descripción General

Mossem (2006) posee tres partes principales, las que corresponden a:

- i) Resolución del flujo.
- ii) Cálculo de los gastos sólidos de fondo con la correspondiente evolución del lecho
- iii) Cálculo de la corriente de turbidez y depositación de los finos.

Este último no es relevante para el desarrollo de los objetivos planteados en este estudio, y por lo tanto no es incluido en el análisis del modelo. La descripción detallada del modelo se encuentra en González (2006) y se presenta en este trabajo de forma resumida con fines descriptivos.

2.2.1 Resolución del flujo

La resolución del flujo es realizada a través de una versión unidimensional de las ecuaciones de Saint – Venant, adecuadas para el flujo de cauces naturales. La obtención de estas ecuaciones considera un enfoque integral, en el cual la ecuación de transporte de Reynolds es aplicada a la masa y al momentum del flujo.

La aplicación de la ecuación de transporte de Reynolds a la masa de un volumen de control del flujo, considera el principio de conservación de la materia y supone que no existen aportes laterales de agua, resultando de esta forma la ecuación (2.1).

$$\begin{aligned}\frac{dm}{dt} &= \frac{\partial}{\partial t} \left(\iiint_{V_c} \rho \cdot dV \right) + \iint_{S_c} \rho \vec{V} \cdot \hat{n} dA = 0 \\ \Rightarrow \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} &= 0\end{aligned}\quad (2.1)$$

Donde, m representa a la masa del fluido, ρ es la densidad del fluido, V es el volumen del fluido, \vec{V} es el vector velocidad, \hat{n} es el vector unitario normal a la superficie de control del fluido, A es el área transversal de escurrimiento y t es el tiempo.

En la aplicación de la ecuación de transporte de Reynolds al momentum del flujo, se hacen las siguientes consideraciones:

- La profundidad y la velocidad varían solo en la dirección longitudinal.
- El flujo es gradualmente variado, y por lo tanto se puede suponer válida la distribución de presiones hidrostática.
- El efecto de curvatura del eje longitudinal del canal es despreciable.
- Aproximación cuasi-estática: Las escalas de tiempo asociadas a los cambios del lecho son muchos menores que las escalas de tiempo asociadas a los cambios de flujo.
- La fórmula de Manning es aplicable localmente para la descripción de resistencia al escurrimiento, considerando el caso impermanente no uniforme.

De esta forma, la segunda ley Newton y la aplicación de la ecuación de transporte de Reynolds al momentum del flujo, llevan a la ec. (2.2), donde Z corresponde a la elevación de la superficie libre respecto al nivel de referencia horizontal, R_h al radio hidráulico, A es el área de la sección de escurrimiento, Q es el caudal y n el coeficiente de Manning.

$$\begin{aligned}\frac{d(m \cdot V)}{dt} &= \sum F_x = F_{\text{gravedad}} + F_{\text{fricción}_\text{fondo}} + F_{\text{presión}} \\ \frac{d(m \cdot V)}{dt} &= \frac{\partial}{\partial t} \left(\iiint_{V_c} \rho V dV \right) + \iint_{S_c} \rho V \cdot \vec{V} \cdot \hat{n} dA \\ \Rightarrow \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2 / A)}{\partial x} &= -g \cdot A \cdot \frac{\partial Z}{\partial x} - g \cdot \frac{n^2 Q |Q|}{A \cdot R_h^{4/3}}\end{aligned}\quad (2.2)$$

2.2.2 Cálculo gasto sólido de fondo

Para la estimación de la evolución del lecho, se considera el principio de continuidad de masa de sedimento, que indica que la depositación de las partículas o erosión del lecho en un volumen de control dado, está determinada por la relación entre gastos sólidos afluentes y efluentes, suponiendo que el movimiento de los sedimentos ocurre en dirección del flujo y

el flujo transversal es despreciable. De esta forma se llega a la expresión (2.3), en la cual se estima que la evolución temporal del lecho está ligada al gradiente longitudinal de gasto sólido volumétrico de fondo, donde A_S corresponde a la sección transversal del volumen efectivo de sedimento depositado, Q_S al gasto sólido de fondo y λ_S es la porosidad del lecho.

$$\frac{\partial m}{\partial t} = G_S|_x - G_S|_{x+dx} = \rho_S \cdot Q_S|_x - \rho_S \cdot Q_S|_{x+dx}$$

$$\frac{\partial A_S}{\partial t} + \frac{1}{1 - \lambda_S} \cdot \frac{\partial Q_S}{\partial x} = 0 \quad (2.3)$$

El modelo utiliza para la determinación del gasto sólido de fondo, 4 relaciones opcionales de cálculo, las que corresponden a las de Meyer-Peter y Müller (1948), Ackers y White (1973), Parker (1990) y Wilcock y Crowe (2003). González (2006) justifica la utilización de estas 4 relaciones como una forma de evidenciar las diferencias que se obtienen con cada una de ellas, estableciéndose los principios sobre los que se desarrolla cada una y su aplicabilidad en los cauces chilenos.

Para estimar el gasto sólido de fondo a través de las relaciones mencionadas, se introducen una serie de parámetros adimensionales, que involucran la fracción granulométrica de sedimentos p_j de tamaño j , en el caso de considerar granulometría extendida, el diámetro de las partículas representativas de cada fracción D_j , el gasto sólido de fondo por unidad de ancho q_s , la gravedad específica del sedimento R y la pendiente de la línea de energía S_f (obtenida a través de la ecuación de resistencia de Manning). En la Tabla 2.1 se muestran los parámetros adimensionales que involucran las variables recién mencionadas.

Tabla 2-1: Parámetros necesarios para la estimación del gasto sólido de fondo

Nombre	Expresión	Número expresión
Densidad Específica Sumergida del sedimento	$R = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$	(2.4)
Gasto sólido de fondo adimensional	$q_s^* = \frac{q_s}{\sqrt{R \cdot g \cdot D_j^3}}$	(2.5)
Esfuerzo de corte	$\tau = \rho \cdot g \cdot R_h \cdot S_f$	(2.6)
Velocidad de corte	$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$	(2.7)
Esfuerzo de corte adimensional	$\tau_j^* = \frac{\tau}{\rho \cdot g \cdot R \cdot D_j} = \frac{u_*^2}{g \cdot R \cdot D_j}$	(2.8)
Fracción granulométrica de cada tamaño	$p_j = \frac{q_{sj}}{q_s} = \frac{q_{si}}{\sum_j q_{sj}}$	(2.9)
Gasto sólido de fondo adimensional por fracción	$q_{sj}^* = \frac{q_{sj}}{p_j \sqrt{RgD_j^3}}$	(2.10)
Gasto sólido de fondo adimensional por fracción, en base al esfuerzo de corte adimensional.	$W_j^* = \frac{q_{sj}}{(\tau_j^*)^{3/2}} = \frac{Rgq_{sj}}{p_j \cdot u_*^3}$	(2.11)

La relación de Meyer-Peter y Müller (1948) tiene como base el criterio de movimiento incipiente correspondiente al enfoque Bagnold (1956), el cual establece que el gasto sólido de fondo es proporcional al exceso de esfuerzo de corte en el fondo por sobre el esfuerzo de corte crítico. La relación es obtenida en base a experimentación (251 experimentos), en la cual se presentaban las siguientes condiciones:

- Transporte de fondo en equilibrio.
- Flujo uniforme y permanente.
- Utilización de sedimentos de tamaño uniforme.
- Utilización de mezclas granulométricas poco extendidas.
- Utilización de variados tipos de sedimentos, en cuanto a su densidad específica.
- Casos con o sin formas de fondo.

De esta forma, dadas las condiciones mencionadas, los autores presentan la siguiente relación, considerando un valor del esfuerzo de corte crítico adimensional de 0.047.

$$q_s^* = 8 \cdot (\tau_{s0}^* - 0.047)^{3/2} \quad (2.12)$$

González (2006) considera que la participación de los taludes laterales de la sección en el proceso de transporte es despreciable, y por lo tanto se establece que el gasto sólido

volumétrico de fondo depende solo del ancho basal de la sección de escurrimiento b_w . De esta forma la expresión que determina el gasto sólido de fondo a según Meyer-Peter y Müller (1948) corresponde a:

$$Q_s = 8 \cdot b_w \cdot \sqrt{R \cdot g \cdot D_{50}^3} \cdot (\tau_{50}^* - 0.047)^{3/2} \quad (2.13)$$

La relación de Ackers y White (1973) también utiliza el concepto de movimiento incipiente, aunque para representarlo se utilizan números adimensionales que caracterizan la relación entre fuerzas motrices del flujo y las fuerzas resistivas del fondo. De esta forma los autores establecen en esta relación una diferenciación entre sedimentos gruesos y finos, considerando una granulometría uniforme.

Al igual que la relación de Meyer-Peter y Müller (1948), la relación de Ackers y White (1973) está basada en experimentación (952 experimentos), en la cual se presentaron las siguientes condiciones:

- Flujo permanente
- Escurrimientos subcríticos, con valores del número de Froude menores a 0.8
- Rango de tamaño de sedimentos entre 0.04 mm y 2.5 mm.
- Utilización de sedimentos de granulometría uniforme.

Los números adimensionales mencionados en el párrafo anterior, corresponden al factor de movilidad F_g que posee dos términos representativos consistentes en el cociente entre el esfuerzo de corte total que actúa en el fondo y la resistencia que las partículas presentan por acción gravitacional, representada por la velocidad de sedimentación (Ley de Stokes) para las partículas finas; y el cociente entre el esfuerzo efectivo que ejerce el flujo sobre las partículas y el peso sumergido del sedimento, para las partículas gruesas.

$$F_{gr} = \frac{u_*^{n_a}}{\sqrt{R \cdot g \cdot D_s}} \cdot \left[\frac{V}{\sqrt{32} \cdot \log(\alpha \cdot h_w / D_s)} \right]^{1-n_a} \quad (2.14)$$

$$F_{gr} = \frac{(g \cdot R_h \cdot S_f)^{n_a}}{\sqrt{R \cdot g \cdot D_s}} \cdot \left[\frac{V}{\sqrt{32} \cdot \log(\alpha \cdot h_w / D_s)} \right]^{1-n_a}$$

En la expresión anterior, n_a es un número que adopta valores 1 o 0, dependiendo si el tamaño del sedimento D_s corresponde a finos o gruesos respectivamente. La constante α incorpora tanto el factor 12.3 de la ley logarítmica de velocidades, como a la constante de proporcionalidad entre la rugosidad y diámetro del sedimento.

La tasa de transporte se representa por otro número adimensional, basado en el concepto de eficiencia del flujo, denominado *eficiencia del proceso de transporte* y se muestra en la expresión (2.15). En dicha expresión el parámetro X corresponde al transporte de sedimento expresado como el cociente entre el flujo másico de sedimento y flujo másico de líquido.

$$G_{gr} = \frac{X \cdot h_w}{(R+1) \cdot D_s} \cdot \left(\frac{u_*}{V} \right)^{n_a} \quad (2.15)$$

$$X = \frac{\rho_s \cdot Q_s}{\rho \cdot Q}$$

Los autores proponen que el número adimensional G_{gr} se puede determinar en función de F_{gr} y el tamaño representativo del sedimento, representado por un valor adimensional.

$$G_{gr} = C_a \cdot \left(\frac{F_{gr}}{A_a} - 1 \right)^{m_a} \quad (2.16)$$

Donde,

$$\alpha = 10 \quad (2.17a)$$

$$1 \leq D_{gr} = D_s \cdot \left(\frac{g \cdot \rho}{v^2} \right)^{1/3} \leq 60 \quad \begin{cases} n_a = 1 - 0.56 \cdot \log(D_{gr}) \\ A_a = \frac{0.23}{\sqrt{D_{gr}}} + 0.14 \\ m_a = \frac{9.66}{D_{gr}} + 1.34 \\ \log(C_a) = 2.86 \cdot \log(D_{gr}) - (\log(D_{gr}))^2 - 3.53 \end{cases} \quad (2.17b)$$

$$D_{gr} > 60 \quad \begin{cases} n_a = 0 \\ A_a = 0.17 \\ m_a = 1.5 \\ C_a = 0.025 \end{cases} \quad (2.17c)$$

De esta forma a partir de las tres expresiones anteriores es posible determinar el gasto sólido de fondo.

Las dos metodologías descritas anteriormente están basadas en una distribución granulométrica uniforme en el cauce, y por lo tanto no son adecuadas para cauces naturales con granulometría extendida. Así, *Mossem* contempla dos relaciones apropiadas para este tipo de cauces, pudiendo de esta forma representar el fenómeno de escondimiento y sobreexposición que experimentan las partículas en el lecho, y con ello el transporte diferenciado de éstas dadas las condiciones hidráulicas del flujo y disponibilidad de partículas en la superficie.

Una de estas relaciones corresponde a la propuesta por Parker (1990) y que tiene como antecedente la relación de Parker, Klingeman y McLean (1982). Ésta última, que está basada en la granulometría del sustrato, utilizando el principio de autosimilaridad, establece que la granulometría del gasto sólido de fondo es idéntica a la del sustrato, siempre y cuando el flujo sea capaz de movilizar completamente la capa superficial del lecho, es decir, la situación se encuentre en un estado de equilibrio, donde el transporte está determinado por las condiciones hidráulicas y no por la disponibilidad de tamaños en la superficie. Ante una situación donde las condiciones de arrastre no corresponden al equilibrio, el transporte es selectivo, siendo inadecuado utilizar una relación de gasto de fondo basado en el sustrato. De esta forma, dado que las situaciones de interés para este trabajo corresponden a aquellas en las que se altera el equilibrio dinámico de un cauce, el modelo utiliza la expresión propuesta por Parker (1990), basada en la granulometría superficial, que describe el fenómeno de escondimiento que experimentan las partículas, representando de alguna forma el transporte selectivo de los granos de la superficie.

El trabajo de Parker (1990) propone determinar el gasto sólido adimensional de cada fracción granulométrica lecho W_j^* , a través de la siguiente expresión:

$$W_j^* = W_r^* \cdot G\left(\phi_j = \frac{\tau_j^*}{\tau_{rj}^*}\right) = 0.00218 \cdot G\left(\phi_j = \frac{\tau_j^*}{\tau_{rj}^*}\right) \quad (2.18)$$

Donde W_r^* corresponde a la tasa de gasto sólido adimensional de referencia, que considera, al igual que todo el análisis, una distribución granulométrica que excluye la fracción de arenas. El argumento de esta exclusión se basa en que las arenas del lecho entran en suspensión cuando el movimiento de las gravas es significativo. $G(\phi_j)$ corresponde a la función de autosimilaridad del colapso de las curvas W_j^* / W_r^* vs $\phi_j = \tau_j^* / \tau_{rj}^*$, donde τ_{rj}^* es el esfuerzo de corte adimensional necesario para movilizar a partículas del lecho de tamaño j a una tasa $W_r^* = 0.00218$. De esta forma, el autor propone que la función de autosimilaridad puede determinarse a través de la expresión (2.19), la cual es una corrección a la función establecida en el trabajo de Parker, Klingeman y McLean (1982).

$$G\left(\phi_j = \frac{\tau_j^*}{\tau_{rj}^*}\right) = \begin{cases} 5474 \cdot \left(1 - \frac{0.822}{\phi_j}\right)^{4.5} & \phi_j \geq 1.59 \\ \exp(14.2 \cdot (\phi_j - 1) - 9.28 \cdot (\phi_j - 1)^2) & 1 < \phi_j < 1.59 \\ \phi_j^{14.2} & \phi_j \leq 1 \end{cases} \quad (2.19)$$

Para determinar $\phi_j = \tau_j^* / \tau_{rj}^*$ se incorpora un función de escondimiento, capaz de reflejar el transporte selectivo de las partículas del lecho, la cual es calibrada a partir de mediciones

realizadas en el Estero Oak Creek. De esta forma, mediante dichas mediciones e introduciendo parámetros basados en la superficie del lecho se propone lo siguiente:

$$\phi_j = \omega \cdot \phi_{sg0} \cdot \left(\frac{D_j}{D_g} \right)^{0.0951} \quad (2.20)$$

$$D_g = \exp(F_j \cdot \ln(D_j)) \quad (2.21)$$

$$\phi_{sg0} = \frac{\tau_g^*}{\tau_{rg}^*} = \frac{\left(\frac{\tau}{\rho g R D_g} \right)}{0.0386} \quad (2.22)$$

$$\omega = 1 + \frac{\sigma}{\sigma_0} (\omega_0 - 1) \quad (2.23)$$

En las expresiones anteriores, D_g corresponde al diámetro geométrico de la distribución granulométrica de la superficie del lecho y F_j a la fracción granulométrica de tamaño j de la superficie del lecho (que excluye la fracción de arenas). El parámetro ϕ_{sg0} es adimensional y se basa en el esfuerzo de corte adimensional τ_{rg}^* necesario para movilizar partículas de tamaño D_g a una tasa W_r^* . El parámetro ω , corresponde a una función que permite generalizar las calibraciones realizadas a través de las mediciones en el Estero Oak Creek a cualquier otro cauce, mediante el valor de la desviación estándar aritmética σ de la granulometría del lecho en estudio y curvas de transformación que determinan ω_0 y σ_0 en función de ϕ_{sg0} .

Siguiendo la línea de Parker (1990), Wilcock y Crowe (2003) postulan un nuevo trabajo que incorpora la fracción de arenas presente en la curva granulométrica de la coraza, con el argumento de que ésta tiene un efecto no lineal importante en la magnitud del transporte de las gravas. Esto se puede ver, al notar que un mayor contenido de arenas de una mezcla disminuye el valor del diámetro geométrico D_{sg} en una distribución de tamaños y aumenta la movilidad de todos los tamaños mayores a D_{sg} .

Las condiciones de experimentación en las cuales Wilcock y Crowe (2003) realizaron sus análisis, son las siguientes:

- Experimentos de laboratorios.
- Utilización de 5 mezclas de sedimento con contenido de arena de: 6.2%, 14.9%, 20.6% y 34%.
- Tamaño de gravas: 2 mm – 64 mm
- Tamaño areanas : 0.21 mm – 2 mm
- Profundidad del flujo en experimentos: 0.09 m – 0.12 m

Al igual que Parker (1990), utilizan el concepto de autosimilaridad, pero considerando las curvas W_j^* versus (τ/τ_{rj}) , donde τ_{rj} corresponde al esfuerzo de corte para el cual la tasa de transporte adimensional W_j^* adquiere el valor 0.002, el que se considera arbitrariamente pequeño.

El efecto de las arenas en el transporte de las mezclas es cuantificado mediante el estudio del comportamiento del esfuerzo de referencia para distintos tamaños de cada mezcla. Al graficar τ_{rj} v/s D_j con las 5 mezclas, los autores obtuvieron que aquellas con menos contenido de arenas muestran una pequeña variación de τ_{ri} en función de D_j . A medida que aumenta el contenido de arenas, la variación se hace más notoria. Es así que mediante autosimilaridad, se colapsan las curvas mencionadas para obtener una relación funcional única.

$$\frac{\tau_{rj}}{\tau_{rg}} = \left(\frac{D_j}{D_{sg}} \right)^{-\theta} \quad (2.24)$$

Esta expresión corresponde a la función de escondimiento, la cual aumenta los valores del esfuerzo de referencia para las partículas más finas y disminuye los de las más gruesas, capturándose así el efecto de contenidos de arenas. Además se propone que el exponente θ depende del tamaño considerado.

$$\theta = \frac{0.69}{1 + \exp(1.5 - D_j / D_g)} \quad (2.25)$$

El esfuerzo de referencia τ_{rg} , para las distintas mezclas con distinta fracción de arenas F_s , se determina a través de la expresión (2.26), propuesta por los autores.

$$\tau_{rg}^* = 0.021 + 0.015 \cdot \exp(-20 \cdot F_s) \quad (2.26)$$

$$\tau_{rg} = \rho \cdot R \cdot g \cdot D_{sg} \cdot \tau_{rg}^* \quad (2.27)$$

Para determinar finalmente el gasto sólido de fondo a través del trabajo de Wilcock y Crowe (2003), es necesario conocer los valores del parámetro ϕ y la función de transporte $G(\phi_i)$, a través de las expresiones (2.28), (2.29) y (2.30).

$$G(\phi_j) = \begin{cases} 0.002 \cdot \phi_j^{7.5} & \phi < 1.35 \\ 14 \cdot \left(1 - \frac{0.894}{\sqrt{\phi_j}} \right) & \phi \geq 1.35 \end{cases} \quad (2.28)$$

$$\phi = \frac{\tau}{\tau_{rj}} = \frac{\tau}{\tau_{rg} \cdot \left(\frac{D_j}{D_{sg}}\right)^{-\theta}} = \frac{\tau}{\rho \cdot R \cdot g \cdot D_{sg} \cdot \tau_{rg}^* \cdot \left(\frac{D_j}{D_{sg}}\right)^{-\theta}} = \frac{\tau_g^*}{\tau_{rg}^*} \cdot \left(\frac{D_j}{D_{sg}}\right)^{-\theta} \quad (2.29)$$

$$Q_s = b_w \cdot \frac{u_*^3}{R \cdot g} \sum_j G(\phi_j) \cdot F_j \quad (2.30)$$

2.2.3 Resolución numérica

Mossem utiliza secciones trapeziales para representar las secciones transversales de un cauce, siendo apropiado para representar los mecanismos de evolución del lecho a través las ecuaciones que rigen al modelo. Además, que no se justifica una mayor precisión en la definición de la topografía transversal, ante las variadas fuentes de incertidumbre asociadas a parámetros de gasto sólidos de fondo, coeficientes de resistencia, características de los sedimentos, etc.

El modelo, programado en lenguaje FORTRAN 90, resuelve numéricamente la ecuación de continuidad de sedimento y las ecuaciones de flujo, a través del método de volúmenes finitos propuesto por Ying (2004) y en forma secuencial considerando una aproximación cuasi-estática, que considera que la escala de tiempo asociada al cambio del lecho es menor a la escala de tiempo asociada al cambio del flujo.

La resolución numérica del flujo, considera un esquema vectorial de las ecuaciones (2.1) y (2.2), representados por los vectores U_f , F y S .

$$U_f = \begin{bmatrix} A \\ Q \end{bmatrix}, \quad F(U_f) = \begin{bmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} \end{bmatrix}, \quad S(U_f) = \begin{bmatrix} 0 \\ -gA \frac{\partial Z}{\partial x} - g \frac{n^2 Q |Q|}{AR_h^{4/3}} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

Así, el esquema numérico está basado en la siguiente ecuación vectorial:

$$\frac{\partial U_f}{\partial t} + \frac{\partial F(U_f)}{\partial x} = S(U_f) \quad (2.32)$$

La malla de discretización de resolución numérica considera una celda centrada en el nodo para las variables conservadas, definiéndose los flujos en las interfases de las celdas. De esta forma, denotando con el subíndice i a los nodos espaciales y al superíndice n a los instantes temporales, se puede obtener la siguiente expresión algebraica:

$$U_{fi}^{n+1} = U_{fi}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x_i} (F_{i+1/2}^n - F_{i-1/2}^n) + \Delta t S_i \quad (2.33)$$

Las condiciones de borde para la resolución del flujo se establecen en dos nodos adicionales, adyacentes a los nodos extremos del dominio. En estos nodos, denominados *odos fantasmas*, se establecen las variables conservadas dependiendo del régimen local del flujo. Así, si el régimen es subcrítico se debe especificar el caudal en el nodo fantasma de aguas arriba, la elevación de la superficie libre en el extremo de aguas abajo y la elevación de la superficie libre en el nodo fantasma $Z_{i=0}^n$ se determina a partir de extrapolación del nivel de los nodos interiores del dominio; si es supercrítico, se especifica tanto el caudal como la elevación de la superficie en el nodo fantasma del extremo de aguas arriba.

La malla de discretización de la resolución del gasto sólido y la respectiva evolución de fondo, corresponde a una con los nodos ubicados en la interfaz de las celdas, dado que los flujos se definen en la interfaz, de esta forma se integra la ecuación de continuidad de sedimento (2.3) entre cada par de nodos consecutivos.

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{x_{i-1}}^{x_i} \frac{\partial A_s}{\partial t} dx dt + \frac{1}{1-\lambda_s} \cdot \int_t^{t+\Delta t} \int_{x_{i-1}}^{x_i} \frac{\partial Q_s}{\partial x} dx dt = 0 \quad (2.34)$$

Reordenando y definiendo la sección media del tramo comprendida entre dos nodos consecutivos, $\overline{A_s}$, y el valor medio del gasto sólido de fondo, entre dos instantes de tiempo seguidos, $\overline{Q_s}$ (ver ecuación (2.35) y (2.36)), se tiene una expresión para el área de depositación de sedimento en el instante de tiempo $n+1$, $\overline{A_s^{n+1}}$. Así, se considera que a partir del instante de tiempo t o (n) el área de depósito inicial $\overline{A_s^n}$, es nulo; y $\overline{Q_s}$ puede aproximarse al del gasto sólido al inicio del intervalo de tiempo, justificándose por la hipótesis cuasi-estática, señalada anteriormente.

$$\overline{A_s} = \frac{\int_{x_{i-1}}^{x_i} A_s dx}{x_i - x_{i-1}} \quad (2.35)$$

$$\overline{Q_s} = \frac{\int_t^{t+\Delta t} Q_s dt}{\Delta t} \quad (2.36)$$

$$\overline{A_s^{n+1}} = -\frac{\Delta t}{1-\lambda_s} \cdot \frac{Q_{Si}^n - Q_{Si-1}^n}{x_i - x_{i-1}} \quad (2.37)$$

La definición del área media entre tramos $\overline{A_s}$, corresponde a una forma de simplificación de la ecuación de resolución numérica de la variación espacial de la sección transversal entre

odos. Sin esta aproximación la definición de dicha evolución se traduce a la expresión para el volumen de un prisma definido por dos secciones trapeciales de distinta altura y distinto ancho basal, lo cual hace muy difícil encontrar una relación explícita para la elevación del lecho η , en base a ésta. Así, se define la sección media de depositación como el área definida por el promedio de los taludes y ancho basales de las secciones consideradas.

$$\overline{A_s} = \overline{k_m} \cdot \Delta\eta^2 + \overline{b_w} \cdot \Delta\eta \quad (2.38)$$

En la expresión anterior $\overline{k_m}$ corresponde al promedio entre los promedios de los taludes izquierdo y derecho de las secciones o nodos considerados. El término $\overline{b_w}$ corresponde al promedio entre los anchos basales de los nodos considerados.

Es así como, atribuyendo la variación de la cota en la sección media al nodo i , se llega a una ecuación cuadrática para $\Delta\eta$ que depende del valor del talud promedio $\overline{k_m}$.

$$\Delta\eta_i = \begin{cases} \frac{1}{2 \cdot \overline{k_m}} \cdot \left(-\overline{b_w} + \sqrt{\overline{b_w}^2 + 4 \cdot \overline{k_m} \cdot \frac{\Delta t}{1 - \lambda_s} \cdot \frac{Q_{Si}^n - Q_{Si-1}^n}{x_i - x_{i-1}}} \right) & \overline{k_m} \neq 0 \\ -\frac{1}{\overline{b_w}} \cdot \frac{\Delta t}{1 - \lambda_s} \cdot \frac{Q_{Si}^n - Q_{Si-1}^n}{x_i - x_{i-1}} & \overline{k_m} = 0 \end{cases} \quad (2.39)$$

De lo anterior se puede ver que, en el caso de considerar secciones transversales trapeciales, existe la posibilidad de que la aproximación o simplificación de la definición de la variación espacial de la sección transversal, por una sección media, no coincida en forma exacta con el balance de gasto sólido entre nodos.

Es importante mencionar, que el esquema numérico planteado requiere una condición de borde aguas arriba que corresponde al gasto sólido afluente al primer nodo del dominio. Este valor es asignado al nodo fantasma de aguas arriba, considerando la malla espacial utilizada en la resolución del flujo. Sin embargo, es difícil contar con esta información debido a que en la actualidad no se realizan mediciones de gasto sólido en los cauces nacionales. Ante esta situación, *Mossem* da la opción de asignar al nodo fantasma el valor de gasto sólido que se obtiene a través de una extrapolación del perfil de gasto sólido presentado al interior del dominio.

2.2.4 Esquema general de Mossem

El funcionamiento general de *Mossem*, sin corriente de turbidez, se puede entender a través del diagrama de flujo de la Figura 2.1.

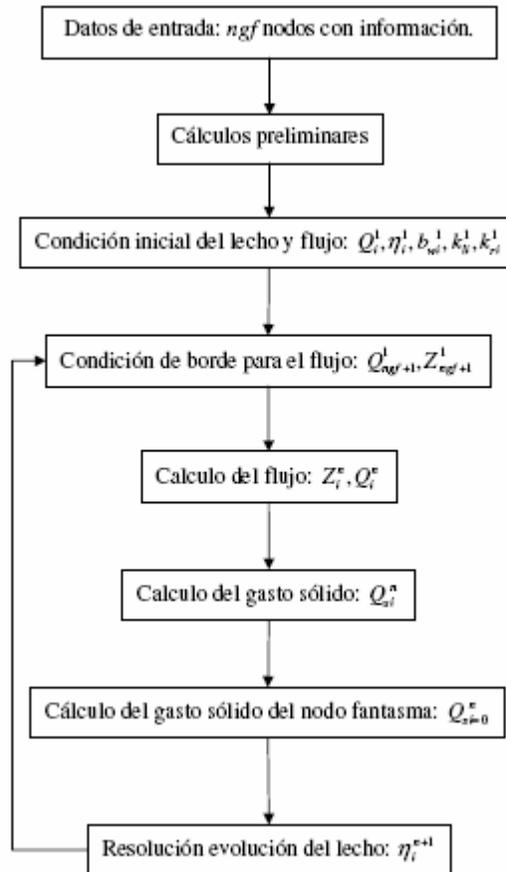


Figura 2.1: Esquema del funcionamiento general de *Mossem*

Del esquema y las secciones anteriores relativas al cálculo del gasto sólido de fondo Q_s , se puede ver que en la resolución de la evolución temporal, las fracciones granulométricas de la superficie del lecho F_j , se mantienen constantes en todo el proceso de simulación, despreciando el efecto que produce su evolución temporal. La evolución temporal de la granulometría del lecho se traduce en cambios temporales en la disponibilidad de tamaños en éste, y por lo tanto afecta directamente la granulometría y el valor del gasto sólido. La evolución temporal de la granulometría de la superficie del lecho se representa a través de las formulaciones de Capa Activa, las que fueron propuestas por primera vez por Hirano (1971).

3. EVOLUCION TEMPORAL DE GRANULOMETRIA DEL LECHO

3.1 Formulación teórica

3.1.1 Concepto de Capa Activa

Las fluctuaciones de la elevación del lecho están típicamente relacionadas a las fluctuaciones en la tasa de transporte de sedimento. Para que una partícula en el lecho entre en movimiento, debe estar expuesta en algún momento en la superficie del lecho. Así, entre mayor sea la elevación de la partícula en el lecho, mayor es la probabilidad por unidad de tiempo, de que ésta sea incorporada al gasto sólido. Por otro lado, las partículas enterradas profundamente tienen una probabilidad mínima de incorporación, debido a que la probabilidad de que el lecho alcance una cierta elevación, declina con la profundidad. Esto se puede observar en las curvas a), b) y c) de la Figura 3.1,

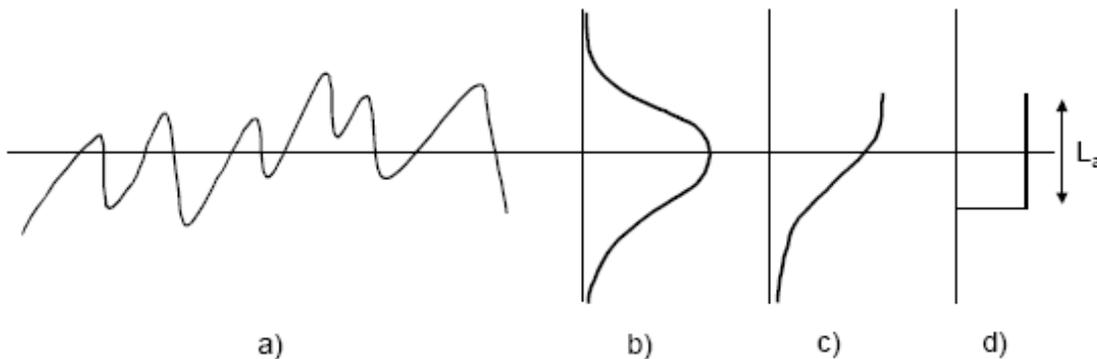


Figura 3.1: a) Perfil instantáneo del lecho, b) Densidad de probabilidad de elevación del lecho, c) Probabilidad, por unidad de tiempo, de incorporación de una partícula en función de su elevación, d) Aproximación de la curva c), incorporado en la aproximación de capa activa.

La aproximación más simple de la curva c) es a través de una función escalón, mostrada en la curva d) de la Figura 3.1, de acuerdo a la cual la probabilidad de erosión de una partícula por unidad de tiempo tiene un valor constante que se desprecia bajo una capa superficial de espesor L_a . Así, se supone que todas las fluctuaciones se concentran en esta capa.

La aproximación de la curva c) por la d) en la Figura 3.1, es la esencia de las formulaciones de Capa Activa, propuestas por Hirano (1971), para la ecuación de conservación de sedimento en el lecho (2.3).

3.1.2 Incorporación de concepto de capa activa a la ecuación de Exner

Si se considera la situación de la Figura 3.2, en la cual la sección transversal del lecho es de forma rectangular y de ancho unitario, la ecuación de continuidad de sedimento (2.3) se representanta de la siguiente forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho_s (1 - \lambda_s) \eta] \cdot dx \cdot 1 = \rho_s [q_s(x) - q_s(x + \Delta x)]$$

$$(1 - \lambda_s) \frac{\partial \eta}{\partial t} = - \frac{\partial q_s}{\partial x} \quad (3.1)$$

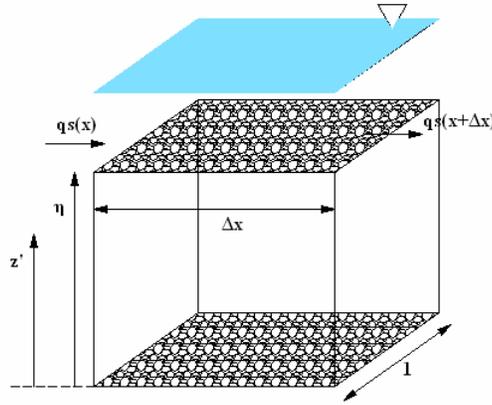


Figura 3.2: Esquema volumen de control para ecuación de conservación de sedimento

Ahora, si se considera la fracción granulométrica de tamaño j en la elevación z' en el lecho, $f'_j(x, z', t)$ y el volumen de gasto sólido de partículas de tamaño en el rango j , q_{s_j} ; la ecuación de continuidad de sedimento por fracción granulométrica queda como sigue:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\int_0^{\eta} \rho_s (1 - \lambda_s) \cdot f'_j(x, z', t) dz' \right] \cdot dx \cdot 1 = \rho_s [q_{s_j}(x) - q_{s_j}(x + \Delta x)]$$

$$(1 - \lambda_s) \frac{\partial}{\partial t} \left[\int_0^{\eta} f'_j(x, z', t) dz' \right] = - \frac{\partial q_{s_j}}{\partial x} \quad (3.2)$$

Si se considera el concepto de capa activa, hay que tener en cuenta dos regiones bien definidas en el lecho: la capa activa, en la superficie del lecho, y el sustrato, inmediatamente bajo (ver Figura 3.3). La capa activa se ubica en la región ubicada en $\eta - L_a < z' < \eta$ y su distribución granulométrica está regida por la fracción F_j , la cual al interior de la región no presenta estructura vertical. El sustrato está bajo la capa activa en $z' < \eta - L_a$, y la

probabilidad de que partículas de esta región se incorporen al gasto sólido es nula. La fracción granulométrica representativa es f_j , la cual no depende del tiempo, pero si presenta una estructura vertical, es decir no depende de z' .

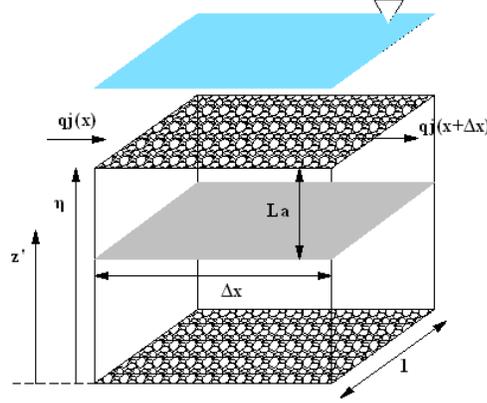


Figura 3.3: Esquema volumen de control para ecuación de conservación de sedimento, considerando capa activa.

Considerando las fracciones granulométricas de la capa activa y la del sustrato, se define la fracción granulométrica $f'_j(x, z', t)$ del lecho completo:

$$f'_j(x, z', t) = \begin{cases} F_j(x, t) & \eta - L_a < z' < \eta \\ f_j(x, z') & z' < \eta - L_a \end{cases}$$

A partir de la relación anterior, se desarrolla la ecuación (3.2) como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} (1 - \lambda_s) \frac{\partial}{\partial t} \left[\int_0^{\eta} f'_j(x, z', t) dz' \right] &= - \frac{\partial q_{sj}}{\partial x} \\ \Leftrightarrow (1 - \lambda_s) \frac{\partial}{\partial t} \left[\int_0^{\eta - L_a} f_j(x, z', t) dz' + \int_{\eta - L_a}^{\eta} f'_j(x, z', t) dz' \right] &= - \frac{\partial q_{sj}}{\partial x} \\ \Leftrightarrow (1 - \lambda_s) \frac{\partial}{\partial t} \left[\int_0^{\eta - L_a} f_j(x, z') dz' + \int_{\eta - L_a}^{\eta} F_j(x, t) dz' \right] &= - \frac{\partial q_{sj}}{\partial x} \\ \Leftrightarrow (1 - \lambda_s) \frac{\partial}{\partial t} \left[\int_0^{\eta - L_a} f_j(x, z') dz' \right] + (1 - \lambda_s) \frac{\partial}{\partial t} \left[\int_{\eta - L_a}^{\eta} F_j(x, t) dz' \right] &= - \frac{\partial q_{sj}}{\partial x} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Utilizando la regla de Liebnez la expresión se obtiene lo siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\int_0^{\eta-L_a} f_j(x, z') dz' \right] = f_j(x, z'=\eta-L_a) \frac{\partial(\eta-L_a)}{\partial t} \quad (3.3a)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\int_{\eta-L_a}^{\eta} F_j(x, t) dz' \right] = L_a \cdot \frac{\partial F_j(x, t)}{\partial t} + F_j(x, t) \frac{\partial(L_a)}{\partial t} = \frac{\partial(F_j(x, t) \cdot L_a)}{\partial t} \quad (3.3b)$$

Incluyendo las expresiones (3.3a) y (3.3b) en la ecuación (3.2) se obtiene lo siguiente:

$$\Leftrightarrow (1-\lambda_s) \left(f_j'(x, z'=\eta-L_a) \frac{\partial(\eta-L_a)}{\partial t} + \frac{\partial(F_j(x, t) \cdot L_a)}{\partial t} \right) = -\frac{\partial q_j}{\partial x} \quad (3.4)$$

En la expresión (3.4), $f_j'(x, z'=\eta-L_a)$ describe cómo las partículas son intercambiadas entre la capa activa y el sustrato, dependiendo si el lecho está en un proceso de degradación o de incremento de volumen por depositación de partículas. Así, se representa este intercambio por $f_j'(x, z'=\eta-L_a) = f_{ij}$, y la expresión (3.4) finalmente queda como se muestra a continuación:

$$(1-\lambda_s) \left(f_{ij} \frac{\partial(\eta-L_a)}{\partial t} + \frac{\partial(F_j(x, t) \cdot L_a)}{\partial t} \right) = -\frac{\partial q_j}{\partial x} \quad (3.5)$$

El gasto sólido total q_s corresponde a la suma de todos los gastos sólidos representativos de cada rango de tamaño j . Con esto se tiene una expresión para la fracción granulométrica p_j del gasto sólido de fondo.

$$q_s = \sum_{i=1}^N q_{s,i} \quad (3.6)$$

$$p_j = \frac{q_{s,j}}{q_s}$$

Con la incorporación de (3.6) en (3.5) se obtiene una relación en función de las fracciones granulométricas del intercambio en la interfaz f_{ij} , capa activa F_j y gasto sólido p_j :

$$(1-\lambda_s) \left(f_{ij} \frac{\partial(\eta-L_a)}{\partial t} + \frac{\partial(F_j(x, t) \cdot L_a)}{\partial t} \right) = -\frac{\partial p_j \cdot q_s}{\partial x} \quad (3.7)$$

La ventaja de la ecuación anterior, es que al sumar sobre todos los tamaños se obtiene nuevamente la ecuación (3.1). Así, con (3.7) y (3.1) se tiene una expresión que describe la evolución temporal de la distribución granulométrica en la capa activa, la cual fue propuesta por Parker and Sutherland (1990).

$$(1-\lambda_s) \left(L_a \frac{\partial F_j}{\partial t} + (F_j - f_{Ij}) \frac{\partial L_a}{\partial t} \right) = -\frac{\partial p_j \cdot q_s}{\partial x} + f_{Ij} \frac{\partial q_s}{\partial x} \quad (3.7)$$

3.1.3 Distribución granulométrica

Las fracciones granulométricas F_j y f_j , de la ecuación (3.7) deben estar basadas en una curva granulométrica de escala logarítmica. Parker y Andrews (1985) proponen la escala ψ para definir la división de tamaños en intervalos. Esta escala se define como:

$$D = 2^\psi$$

Donde D es el diámetro en milímetros. De esta forma se determina en primer lugar la escala total de tamaños a cubrir (D_1 y D_{np-1} , donde $D_1 > D_{np-1}$), el número de intervalos $np-1$ que la cubrirán y en base a la escala ψ se determinan los límites de cada intervalo, $\psi_j, j=1 \dots np$.

$$\psi_1 = \frac{\ln(D_1)}{\ln(2)} = \ln_2(D_1)$$

$$\psi_{np} = \frac{\ln(D_{np})}{\ln(2)} = \ln_2(D_{np})$$

$$\Delta\psi = \frac{\psi_1 - \psi_{np}}{np}$$

$$\psi_j = \psi_{j-1} - \Delta\psi$$

$$D_j = 2^{\psi_j} \quad (3.8)$$

El tamaño representativo $\overline{\psi}_j$ de cada intervalo se determina como el promedio de los extremos de éste:

$$\overline{\psi}_j = \frac{1}{2}(\psi_j + \psi_{j+1}) \quad (3.9)$$

$$\overline{D}_j = 2^{\overline{\psi}_j} = 2^{\frac{1}{2}(\psi_j + \psi_{j+1})} = 2^{\frac{1}{2}(\ln_2(D_j) + \ln_2(D_{j+1}))} = \sqrt{D_j D_{j+1}} \quad (3.10)$$

Luego la fracción en peso p_i representativa del tamaño $\overline{\psi}_j$, se determina a partir de la fracción en peso de la muestra que es más fina que el tamaño ψ .

$$p_j = p_f(\psi_{j+1}) - p_f(\psi_j)$$

$$\sum_{j=1}^{np-1} p_j = 1$$

A partir de lo anterior se definen el tamaño medio aritmético ψ_m y la desviación estándar aritmética σ de la curva granulométrica como las siguientes expresiones:

$$D_m = \sum_{j=1}^{np-1} D_j \cdot p_j \quad (3.11)$$

$$\psi_m = \sum_{j=1}^{np-1} \overline{\psi}_j \cdot p_j \quad (3.12)$$

$$\sigma^2 = \sum_{j=1}^{np-1} (\overline{\psi}_j - \psi_m)^2 \cdot p_j \quad (3.13)$$

En función de los tamaños característicos anteriores se definen el diámetro geométrico D_g y la desviación estándar geométrica σ_g como sigue:

$$D_g = 2^{\psi_m} \quad (3.14)$$

$$\sigma_g = 2^{\sigma} \quad (3.15)$$

3.1.4 Estimación espesor capa activa L_a y fracción granulométrica de intercambio f_i

La determinación de la evolución temporal de la granulometría superficial del lecho F_j a través de la ec. (3.7), requiere una especificación apropiada para L_a y f_{ij} . Respecto al espesor de la capa activa L_a , hay un grado de arbitrariedad en su especificación. Parker (1991) considera que, en la ausencia de formas de fondo, L_a puede ser escalada con algún tamaño característico de la granulometría de la superficie, tales como D_{90} o D_σ , donde D_σ es definido como:

$$D_\sigma = D_g \cdot \sigma_g \quad (3.16)$$

Si se considera el tamaño D_{90} , L_a se puede expresar de la siguiente forma:

$$L_a = n_a \cdot D_{90} \quad (3.17)$$

Donde n_a es un parámetro que requiere calibración en la ausencia de una distribución de probabilidad de fluctuaciones del lecho, sin embargo el método de Klingeman asume que este parámetro es igual a la unidad; Parker (2005) en cambio, considera este parámetro igual a 2.

Considerando que la distribución granulométrica tiene una densidad de probabilidad Log-Normal, se tiene que D_σ corresponde a D_{84} . De esta forma, D_{90} puede estar dado por $D_g \cdot \sigma_g^{1.28}$ (Cui, Parker and Paola (1996)), obteniéndose la siguiente expresión para el espesor de la Capa Activa.

$$L_a = D_g \cdot \sigma_g^{1.28} \quad (3.18)$$

Hoey (1994) define L_a como una constante en función de la granulometría de la capa activa, al igual que lo comentado en el párrafo anterior. Así, define que el espesor de la capa activa es igual $2 \cdot D_{84}$. Sin embargo, señala que otros estudio muestran que L_a varía con la intensidad del transporte de sedimento (Hassan (1990) y Hassan and Church (1992)). De este modo, sugiere la posibilidad de definir L_a como una función de la tasa de transporte, o la distribución granulométrica del gasto sólido (como por ejemplo D_{84}).

La fracción granulométrica de intercambio f_{Ij} , depende del proceso en el cual se encuentre el lecho, es decir en estado de degradación o incremento por depositación de sedimento. En situación de degradación, el sustrato se ve reducido, mientras que en el caso de depositación de partículas, una mezcla de material de la capa activa y gasto sólido es transferido al sustrato, creándose una estratigrafía. Considerando esto, se puede definir f_{Ij} como la expresión (3.19), la cual fue sugerida por primera vez por Hoey and Ferguson (1994).

$$f_{Ij} = \begin{cases} f_j(z' = \eta - L_a) & \frac{\partial \eta}{\partial t} < 0 \\ (1 - \alpha) F_j + \alpha p_j & \frac{\partial \eta}{\partial t} > 0 \end{cases} \quad (3.19)$$

El valor de α corresponde a un parámetro que indica la proporción de sedimento de la capa activa y del gasto sólido que es transferido al sustrato. Resultados experimentales de Toro-Escobar (1996) muestran que en caso de depositación de sedimento en el lecho, el sustrato debería ser más grueso que el gasto sólido, pero más cercana a éste que a la granulometría de la capa activa. Así, los resultados muestran que el valor de α es 0.7, el cual es usado para distintas simulaciones numéricas (Cui (1996), Cui (2003), Cui and Parker (2006)), con base experimental. Es importante señalar que no es posible generalizar con certeza este valor al caso de un cauce natural, ya que se espera que el parámetro dependa de muchos otros factores, pero puede ser un antecedente de importancia en el desarrollo de la adaptación del modelo.

3.2 Resolución Numérica

3.2.1 Esquemas numéricos existentes

En la resolución numérica de la ecuación (3.7) se debe tener en cuenta las relaciones de la Sección 3.1.4, es decir el espesor de la capa activa L_a y fracción granulométrica de intercambio en la interfaz f_{ij} . De esta forma, es fácil ver que la resolución de la ecuación (3.7) es necesariamente iterativa dada la dependencia de L_a con la granulometría de la capa activa F_j . Respecto a f_{ij} , se debe tener presente que después de cada paso de tiempo la granulometría del sustrato debe ser recalculada o actualizada en caso de depositación de material, en cuyo caso se crea una estratigrafía, como fue mencionado en la sección anterior (Hoey (1994)).

En el trabajo de Cui, Parker and Paola (1995) la resolución numérica de las ecuaciones (3.1) y (3.7) es realizada a través de un esquema vectorial de éstas (desacoplado del flujo) a través de diferencia finitas considerando nodos centrado en la celda. De esta forma, si (3.7) se ordena convenientemente, resulta lo siguiente:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda_s)} \frac{\partial q_s}{\partial x} = 0 \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial L_a F_j}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda_s)} \left(\frac{\partial p_j \cdot q_s}{\partial x} - f_{ij} \frac{\partial q_s}{\partial x} \right) - f_{ij} \frac{\partial L_a}{\partial t} = 0 \quad (3.21)$$

Ordenando vectorialmente estas dos ecuaciones, se obtiene el siguiente sistema vectorial:

$$w = \begin{bmatrix} \eta \\ L_a \cdot F_j \end{bmatrix} \quad f = \frac{1}{\lambda_p} \begin{bmatrix} q_s \\ p_j \cdot q_s \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -f_{ij} & 1 \end{bmatrix} \quad c = \begin{bmatrix} 0 \\ -f_{ij} \frac{\partial L_a}{\partial t} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + A \frac{\partial f}{\partial x} + c = -\mu \frac{\Delta x^4}{\Delta t} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \quad (3.23)$$

En la ecuación anterior los autores consideran una viscosidad numérica de cuarto orden, que entrega convergencia al sistema de resolución. La ecuación es resuelta considerando el esquema de Crack-Nicholson en el tiempo; así queda la siguiente expresión numérica:

$$(1+3\mu) w_i^{n+1} = w_i^{n+1} - \frac{\Delta t}{2\Delta x} A_i^{n+1/2} (f_{i+1}^{n+1/2} - f_{i+1}^{n+1/2}) - \Delta t c_i^{n+1/2} \\ - \mu (w_{i-2}^{n+1/2} - 4w_{i-1}^{n+1/2} + 3w_i^n - 4w_{i+1}^{n+1/2} + w_{i+2}^{n+1/2}) \quad (3.24)$$

Donde los subíndices n e i representan los nodos temporales y espaciales respectivamente. Los términos con superíndices $n+1/2$ representan el promedio de éstos en los dos nodos de tiempos consecutivos, es decir el promedio de los valores en los tiempos n y $n+1$. Es importante notar que el término $\Delta t c_i^{n+1/2}$ contiene el valor de L_a en el instante $n+1$, lo cual lleva a que la ecuación anterior se resuelva de forma iterativa, por lo mencionado al inicio de esta sección.

$$\Delta t \cdot c_i^{n+1/2} = -f_{1,j,i}^{n+1/2} \begin{pmatrix} 0 \\ L_{ai}^{n+1} - L_{ai}^n \end{pmatrix} \quad (3.25)$$

Para comprender el sistema de resolución implícito es conveniente ordenar la ecuación (3.24) en forma matricial. Así, se obtiene el siguiente esquema:

$$I \cdot W^{n+1} = G^{n+1/2} - I' \cdot W^n \quad (3.26)$$

Donde I , I' , G y W corresponden a los siguientes términos:

$$I = \begin{bmatrix} \frac{\mu}{2} & -2\mu & (1+3\mu) & -2\mu & \frac{\mu}{2} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\mu}{2} & -2\mu & (1+3\mu) & -2\mu & \frac{\mu}{2} & & & & & \vdots & & \\ \vdots & & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & 0 & \\ 0 & \dots & & & & & \dots & 0 & \frac{\mu}{2} & -2\mu & (1+3\mu) & -2\mu & \frac{\mu}{2} \end{bmatrix}$$

$$I' = \begin{bmatrix} \frac{\mu}{2} & -2\mu & (1-3\mu) & -2\mu & \frac{\mu}{2} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\mu}{2} & -2\mu & (1-3\mu) & -2\mu & \frac{\mu}{2} & & & & & \vdots & & \\ \vdots & & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & 0 & \\ 0 & \dots & & & & & \dots & 0 & \frac{\mu}{2} & -2\mu & (1-3\mu) & -2\mu & \frac{\mu}{2} \end{bmatrix}$$

$$G^{n+1/2} = \begin{pmatrix} \left(A_1^{n+1/2} \cdot f_1^{n+1/2} \right) \frac{\Delta t}{2\Delta x} - \Delta t c_1^{n+1/2} \\ \vdots \\ \left(A_{ngf}^{n+1/2} \cdot f_{ngf}^{n+1/2} \right) \frac{\Delta t}{2\Delta x} - \Delta t c_{ngf}^{n+1/2} \end{pmatrix} \quad W^n = \begin{pmatrix} w_1^n \\ \vdots \\ w_{ngf}^n \end{pmatrix} \quad (3.27)$$

El parámetro ngf corresponde al número de nodos de los intervalos en los cuales se divide la longitud de interés del cauce L . Así, se puede ver que la matriz I tiene dimensiones $(ngf-5) \times (ngf-1)$, y por lo tanto el sistema de resolución requiere de 4 condiciones de borde.

Más reciente es el trabajo de Parker (2005), el cual corresponde a un modelo $1D$ que simula el ajuste de un río de montaña con lecho de grava, ante una evolución hidrológica que abarca caudales bajos y crecidas.

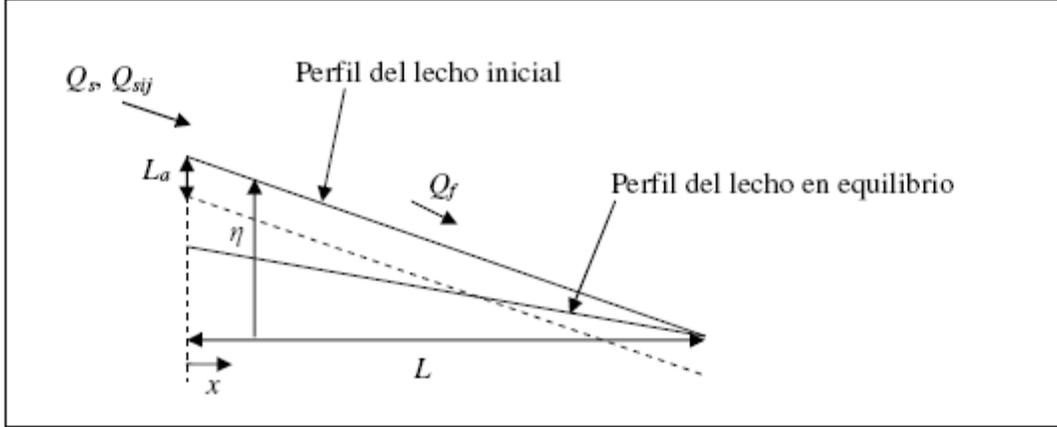


Figura 3.4: Esquema de configuración para la modelación numérica de Parker (2005)

La configuración que considera este trabajo corresponde a la de la Figura 3.4, donde hay ngf nodos espaciales y $np-1$ fracciones granulométricas. De esta forma el esquema propuesto considera las siguientes condiciones de borde:

- i) En el extremo de aguas abajo de la zona considerada, el nivel del lecho permanece constante en el tiempo de evolución, $\eta(x=L, t) = \eta_{i=ngf}^n = 0$
- ii) El gasto sólido total Q_s y el gasto sólido por fracción Q_{sj} afluente, es conocido en todo momento y asignado a un nodo fantasma, $Q_{S_{i=0}}^n = Q_{sup}$ y $Q_{S_{i=0,j}}^n = Q_{sup_{ij}}$.

Con esto, las expresiones señaladas en la Sección 3.1 son resueltas numéricamente a través de un esquema de diferencias finitas, con los nodos ubicados en la interfaz de las celdas de discretización. De esta forma se obtiene el nivel del lecho η , en el tiempo $n+1$ a través de la ecuación (3.27).

$$\eta_i^{n+1} = \eta_i^n - \frac{1}{(1-\lambda_p)} \left(\frac{\partial q_s}{\partial x} \right)_i^n \cdot \Delta t \quad i=1 \dots ngf \quad (3.28)$$

Donde,

$$\left(\frac{\partial q_s}{\partial x} \right)_i^n = \alpha \frac{q_{S_i}^n - q_{S_{i-1}}^n}{\Delta x} + (1-\alpha) \frac{q_{S_{i+1}}^n - q_{S_i}^n}{\Delta x}, \quad 0.5 < \alpha \leq 1 \quad (3.29)$$

Así, dependiendo del signo de la expresión (3.28), se actualiza la granulometría de la interfaz de transferencia f_{ij} , según la ecuación (3.19) que considera el valor de $\alpha = 0.5$.

Finalmente establecido lo anterior, se resuelve numéricamente la ecuación (3.7) a través de la ecuación (3.30), para obtener la granulometría de la superficie en el tiempo $n+1$.

$$F_{i,j}^{n+1} = F_{i,j}^n + \left[\frac{1}{(1-\lambda_p)L_{ai}^n} \left(f_{ij}^n \left(\frac{\partial q_s}{\partial x} \right)_i^n - \left(\frac{\partial q_{sj}}{\partial x} \right)_i^n \right) - \frac{(F_{i,j}^n - f_{lij}^n)}{L_{ai}^n} \left(\frac{\partial L_a}{\partial t} \right)_i^{n-1} \right] \Delta t \quad (3.30)$$

Hay que notar que en la ecuación anterior se considera la evolución temporal del espesor de la capa activa L_a en el intervalo de tiempo anterior al que se está evaluando. Parker (2005) realiza esta aproximación considerando que de no aplicarla, el sistema debería ser iterativo, como menciona Hoey (1994). Además justifica que el término $(\partial L_a / \partial t)$ es pequeño y no altera en forma importante los resultados obtenidos a través del modelo.

3.2.2 Esquema numérico adoptado e incorporación a Mossem

Dada la simplicidad del esquema de Parker (2005), se optó por éste para incorporarlo al modelo, ajustándolo a los requerimientos y consideraciones establecidas en *Mossem*. Así, calculados los gastos sólidos totales Q_s y por fracción Q_{sij} , a través de las expresiones de Parker (1990) o Wilcock & Crowe (2003), se determina su evolución espacial considerando un esquema de aproximación hacia atrás, ya que *Mossem* originalmente así lo hace.

$$\left(\frac{\partial q_s}{\partial x} \right)_i^n = \frac{1}{b_w} \left(\frac{Q_{si}^n - Q_{si-1}^n}{\Delta x} \right) \quad i = 1 \dots ngf \quad (3.31)$$

$$\left(\frac{\partial q_{sj}}{\partial x} \right)_i^n = \frac{1}{b_w} \left(\frac{b_{wi} \cdot q_{si,j}^n - b_{wi-1} \cdot q_{si-1,j}^n}{\Delta x} \right) \quad i = 1 \dots ngf, \quad j = (1 \dots np-1), \quad (3.32)$$

En las expresiones anteriores i representa un nodo espacial cualquiera de una malla de ngf nodos, j representa un tamaño granulométrico cualquiera de un total de $(np-1)$ tamaños, y n representan un instante de tiempo cualquiera.

En caso que no sean conocidos el gasto sólido fuente y su distribución granulométrica, $Q_{si=0}^n = Q_{sf}$ y $q_{si=0,j}^n = q_{jf}$, *Mossem* los determina mediante una extrapolación del perfil longitudinal de gasto sólido total que se desarrolla aguas abajo del nodo fantasma de aguas arriba, y se consideró que la granulometría se igualara a la granulometría del primer nodo interior.

Con (3.28) y (3.31) se determina la nueva elevación del lecho, con lo cual se actualiza la granulometría de la interfaz de transferencia f_{ij} , según el esquema de Parker (2005), considerando la evolución del lecho y el espesor de la capa activa L_a , que es calculada con la granulometría del tiempo n . Vale la pena mencionar que el sistema de almacenamiento de

información granulométrica del sustrato en el caso de depositación, considera una subdivisión de éste en 3 capas de espesores $es1$, $es2$ y $es3$, desde lo más superficial a lo más profundo, considerándose que esta segmentación es la mínima para representar en forma adecuada una estratigrafía vertical. Cada capa tiene una granulometría característica que corresponde inicialmente a las obtenidas en terreno. Bajo la capa 3, se considera que la granulometría es igual a la de la capa 3 medida en terreno. De esta forma en caso de depositación de sedimento se determina $f_{lij} = 0.3 \cdot F_{ij} + 0.7 \cdot p_{ij}$ y la cantidad de sedimento incorporada al sustrato, posee dicha distribución. Como resultado se obtiene una movilización de las capas 1 y 2, que conservan sus espesores originales, cambiando su granulometría debido a la incorporación de nuevo material, como muestran las expresiones (3.32) y (3.32):

$$f_{ij}^{1_despues} = \frac{f_{ij}^{1_antes} \cdot (es1 - \delta_{sus}) + f_{lij} \cdot \delta_{sus}}{es1} \quad (3.33)$$

$$f_{ij}^{2_despues} = \frac{f_{ij}^{2_antes} \cdot (es2 - \delta_{sus}) + f_{lij}^{1_antes} \cdot \delta_{sus}}{es2} \quad (3.34)$$

Donde,

δ_{sus} : Incremento del sustrato por depositación de partículas.

La medida anterior permite almacenar la estratigrafía formada por el efecto de depositación del gasto sólido, pudiendo de esta forma representar situaciones en las cuales se experimente depositación seguida de degradación y viceversa. Sin embargo, no es posible almacenar de forma precisa esta información, ya que para esto se requiere un mayor fraccionamiento del sustrato, que involucra demasiados elementos o vectores de almacenamiento. Por esto se optó por que la capa mas profunda, capa 3, absorbiera la estratigrafía que no es almacenada en un nuevo vector, aumentando su espesor en la misma cantidad de incorporación de sustrato y distribuyendo uniformemente la nueva granulometría en todo el espesor. El sistema de actualización del sustrato en la capa 3 se puede entender de forma más fácil a través de las expresiones (3.35) y (3.36).

$$es3^{despues} = es3^{antes} + \delta_{sus} \quad (3.35)$$

$$f_{ij}^{3_despues} = \frac{f_{ij}^{3_antes} \cdot (es3^{antes}) + f_{lij}^{2_antes} \cdot \delta_{sus}}{es3^{antes} + \delta_{sus}} \quad (3.36)$$

En caso de degradación, las capas no cambian su granulometría, solo su espesor debido a la disminución del lecho.

Finalmente, se actualiza la granulometría de la superficie del lecho a través de la ecuación (3.29) del esquema de Parker (2005). Puede ocurrir, que el resultado de la evolución de las

fracciones granulométricas no cumpla con la condición $\sum_{j=1}^{np-1} F_{i,j} = 1$, para un tiempo dado.

Por lo tanto, se adoptó una corrección proporcional al valor obtenido en cada fracción granulométrica.

$$F_{i,j}^c = \frac{F_{i,j}^{s/c}}{\sum_{j=1}^{np-1} F_{i,j}^{s/c}} \quad (3.37)$$

La incorporación de las ecuaciones de evolución a *Mossem* se realizó de forma que los cálculos relacionados con la granulometría, como el diámetro geométrico Dg o el $D90$, se realizan al interior del ciclo de evolución temporal. De esta forma se considera en éstos la granulometría actualizada de la superficie del lecho. En la Figura 3.5 se muestra un esquema del funcionamiento general del modelo con la incorporación de la ecuación de evolución temporal de la granulometría.

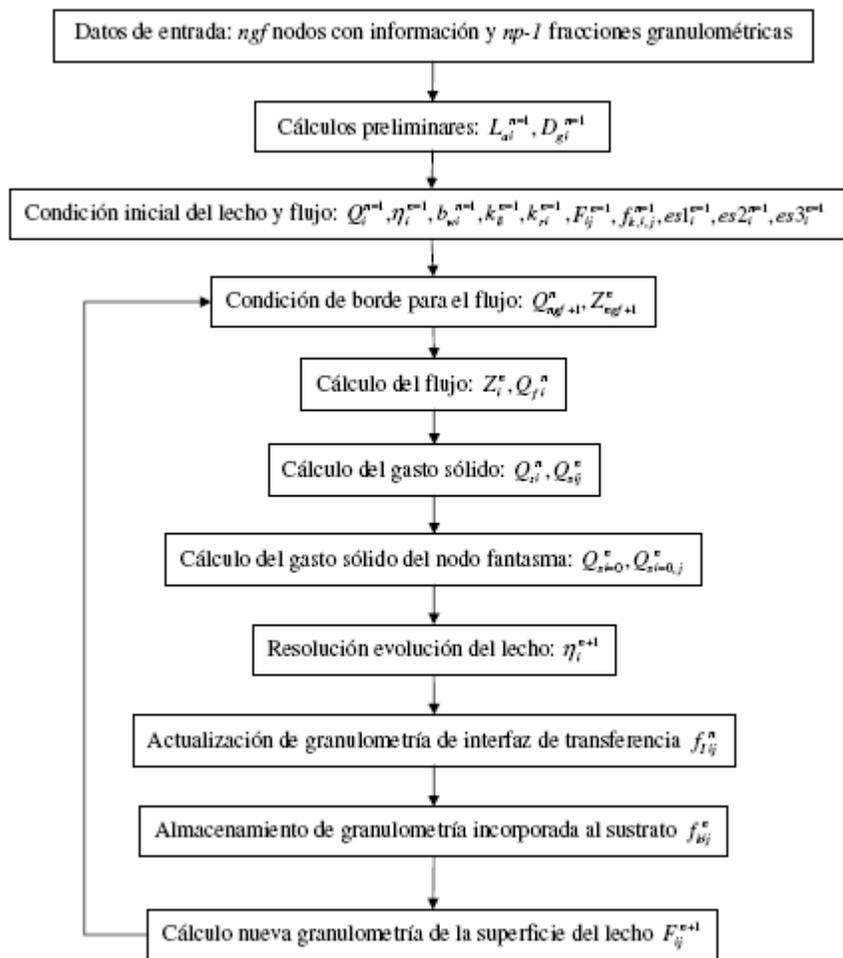


Figura 3.5: Esquema general de *Mossem* con los cambios realizados

Mossem (2006) requiere de 7 archivos de entrada, correspondientes a los parámetros de modelación (*input.dat*), condiciones iniciales como la elevación inicial del lecho (*etani.dat*), la elevación de la superficie libre y caudal de descarga iniciales (*initcond.dat*), el talud y ancho basal en cada punto considerado (*secsini.dat*), la granulometría inicial del lecho (*graindist.dat*) y 1 archivos correspondientes a datos tabulados para el cálculo de gasto sólido de fondo a través de la relación de Parker (1990). La descripción de la estructura de cada archivo mencionado se detalla en la tesis de postgrado de González (2006).

Para que el modelo desarrolle el esquema de la Figura 3.5, fue necesario modificar el formato de los archivos de entrada existente e incorporar unos nuevos. Se consideró un activador del módulo de evolución temporal granulométrica, *evgrain*, que mediante el valor *1* activa el módulo de evolución y con *0* lo desactiva; siguiendo la misma idea de los activadores de gasto sólido y corriente de turbidez que tiene *Mossem*. El activador se introduce en el archivo *input.dat*, en la tercera línea, entre los parámetros *bload* y *nbload*. La información granulométrica inicial de la superficie se introduce en el archivo *graindist.dat*, original del modelo, agregando junto al número de pares de diámetro *np*, el espesor de la zona caracterizada con dicha granulometría, *es0*.

La granulometría del sustrato se introduce en el archivo *graindist_sub.dat*, el cual sólo posee información relativa a los porcentajes más finos en peso de la curva granulométrica, y el espesor de la capa representativa con dicha granulometría. En la primera línea van los espesores de las capas de sustrato desde la mas superficial a la mas profunda, de izquierda a derecha. Bajo éstos van los porcentajes mas finos de la información granulométrica, en forma de listado vertical, de tal forma que cada columna corresponde a una capa (ver Figura 3.6).

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
0.5	0.5	0.5		
100	100	100		
90	95	98		
80	85	88		
70	75	78		
60	65	68		
53	56	59		
45	50	54		
37	42	45		
35	40	43		
27	32	35		
20	25	28		
10	15	18		
7	9	12		
4	5	7		
2	2	2		

Figura 3.6: Ejemplo de archivo *graindist_sub.dat*

Es importante mencionar que el número de pares de diámetros de todas las capas del sustrato, debe ser el mismo e igual al de la superficie (en archivo *graindist.dat*), es decir, igual a *np*.

4. APLICACIÓN DEL MODELO

4.1 Situación aguas arriba de un embalse

4.1.1 Nivel constante del embalse aguas abajo

La construcción de un embalse interrumpe el transporte de sedimentos hacia aguas abajo, causando que el lecho del cauce frecuentemente experimente depositación de material aguas arriba de la presa y degradación aguas abajo. Observaciones de la granulometría del lecho aguas arriba de la presa evidencian un afinamiento de ésta hacia aguas abajo.

Como se mencionó en la introducción, *Mossem* está enfocado a la simulación de sedimentación en embalses, por lo tanto es interesante analizar el comportamiento que adquirirá el modelo con las modificaciones incorporadas, ante esta situación. Además, es una buena evaluación del sistema de almacenamiento de la granulometría del sustrato. Con estos objetivos, se aplicó el modelo desarrollado a una situación ficticia, correspondiente a aquella que se experimenta aguas arriba de la presa de un embalse

En esta prueba se consideró un cauce con las características mostradas en la Tabla 4.1 y el perfil inicial de la Figura 4.1.

Tabla 4-1: Parámetros de modelación y condiciones iniciales del cauce de la aplicación

Parametros de modelacion y condiciones iniciales	Valores	Unidades
Caudal constante Q	80	[m ³ /s]
Seccion de escurrimiento resctangular. Ancho basal, bw	20	[m]
Condicion de borde aguas abajo: Nivel de superficie libre.	100	[m.s.n.m.]
Froude	1.03	
Pendiente	1	[%]
Courant	0.7	
Tiempo de simulación	182	[días]

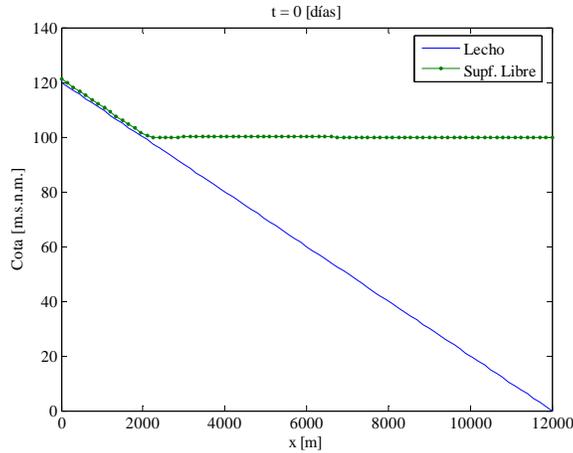


Figura 4.1: Lecho y superficie libre inicial

En esta aplicación se consideró como granulometría superficial inicial del lecho la utilizada por Parker (1990) para la superficie del estero Oak Creek, que también utilizó González (2006) en una de sus aplicaciones. La información granulométrica de las distintas capas del sustrato se estimó en base a la información granulométrica de la superficie, suponiendo un afinamiento granulométrico con la profundidad. En la Tabla 4.2 y Figura 4.2 se presenta la información señalada.

Tabla 4-2: Granulometría inicial de la superficie del lecho y capas del sustrato

	granulometría superficie		granulometría sustrato 1		granulometría sustrato 2		granulometría sustrato 3	
	Espesor = 0.5 [m]		Espesor = 0.5 [m]		Espesor = 0.5 [m]		Espesor = 0.5 [m]	
	% mas fino	ds [m]						
1	100.0	0.20300	100.0	0.20300	100.0	0.20300	100.0	0.20300
2	92.3	0.10200	95.0	0.10200	98.0	0.10200	98.5	0.10200
3	73.9	0.07600	80.0	0.07600	95.0	0.07600	96.0	0.07600
4	47.5	0.05100	60.0	0.05100	80.0	0.05100	87.0	0.05100
5	34.5	0.03800	50.0	0.03800	70.0	0.03800	78.0	0.03800
6	21.7	0.02500	30.0	0.02500	50.0	0.02500	65.0	0.02500
7	15.0	0.01900	20.0	0.01900	40.0	0.01900	58.0	0.01900
8	8.9	0.00950	10.0	0.00950	25.0	0.00950	40.0	0.00950
9	5.4	0.00480	7.0	0.00480	15.0	0.00480	25.0	0.00480
10	3.6	0.00240	5.0	0.00240	10.0	0.00240	15.0	0.00240
11	2.5	0.00120	4.0	0.00120	8.0	0.00120	10.0	0.00120
12	1.6	0.00059	3.0	0.00059	5.0	0.00059	7.0	0.00059
13	0.6	0.00030	2.0	0.00030	3.0	0.00030	5.0	0.00030
14	0.3	0.00015	1.0	0.00015	2.0	0.00015	3.0	0.00015
15	0.1	0.00007	0.7	0.00007	1.0	0.00007	2.0	0.00007

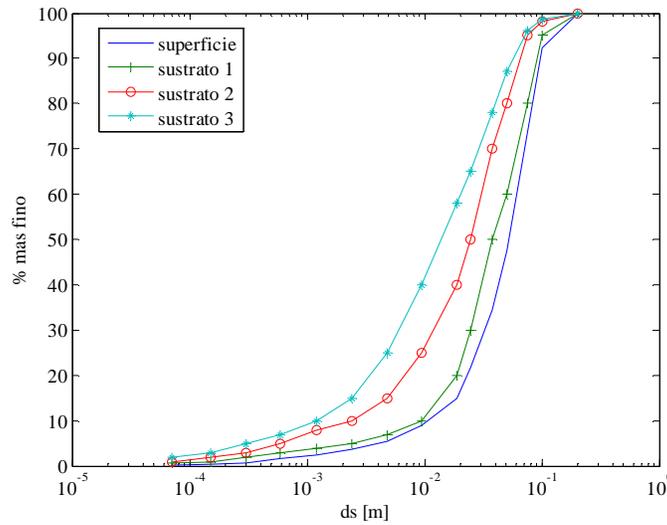


Figura 4.2: Curvas granulométricas iniciales de la superficie y capas de sustrato del lecho

Hay que notar, que para éste caso, tanto el gasto sólido afluente al primer nodo, como su granulometría son desconocidos, por lo tanto se determinan su valores a través de extrapolación de los nodos interiores, como se mencionó en la sección 3.2.2.

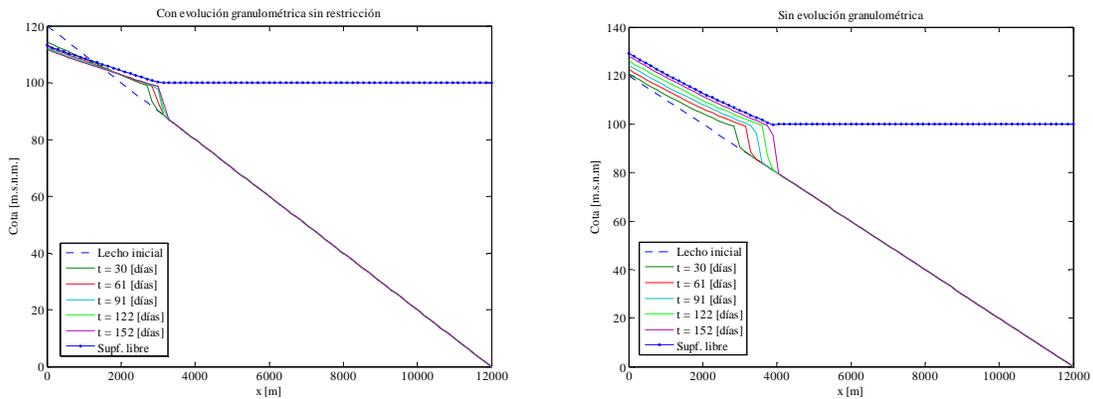


Figura 4.3: Evolución del lecho durante 152 días considerando y despreciando la evolución temporal de la granulometría.

En la Figura 4.3 se muestra la evolución del lecho durante 152 días de simulación. Se puede ver que los resultados presentan anomalías, y difieren bastante de la condición simulada con *Mossem (2006)*, es decir, sin evolución temporal de la granulometría. Considerando la evolución temporal de la granulometría, se ve que el lecho comienza a degradar aguas arriba progresivamente en los primeros 2 km, acorazándose en esa zona, a tal nivel que el gasto sólido disminuye por la menor cantidad de partículas de menor tamaño disponibles en la superficie, y que el flujo es capaz de movilizar. Ahora, todo el material degradado en la zona mencionada es depositado luego aguas abajo, por la disminución de la capacidad de arrastre en esa zona, consecuencia de la condición impuesta por el embalse. Al contrario, al no considerar evolución granulométrica, se produce una depositación de material generalizada

en el lecho, desarrollándose un delta de avance. La explicación de esta diferencia radica principalmente en la sensibilidad o el efecto que provoca la resolución numérica de la evolución granulométrica, ya que una pequeña diferencia entre la capacidad de arrastre de dos nodos consecutivos, provoca una diferencia entre sus fracciones granulométricas, que a su vez generan una mayor diferencia en los gastos sólidos en cada nodo, resultando una degradación progresiva del lecho en el extremo de aguas arriba, en lugar de la depositación generada en el caso de granulometría invariante. La forma de controlar este fenómeno fue restringir, en cada ciclo temporal, la evolución granulométrica a incrementos o disminuciones del nivel del lecho que fuesen significativas, sin que esto desactive por completo la evolución granulométrica. De esta forma, considerando que en un intervalo de tiempo el nivel lecho no podría variar en una magnitud menor al menor tamaño de las partículas disponibles en su superficie, se restringió la evolución de la granulometría a evoluciones del lecho superiores a este valor, sin embargo, dicho esto desactivó por completo la evolución granulométrica. Así, se adoptó como valor significativo de evolución del lecho, el 10% del tamaño de la partícula de menor tamaño disponible en la superficie, lo cual permitió controlar la evolución granulométrica, sin desactivarla por completo, obteniendo los resultados que se presentan en la Figura 4.4.

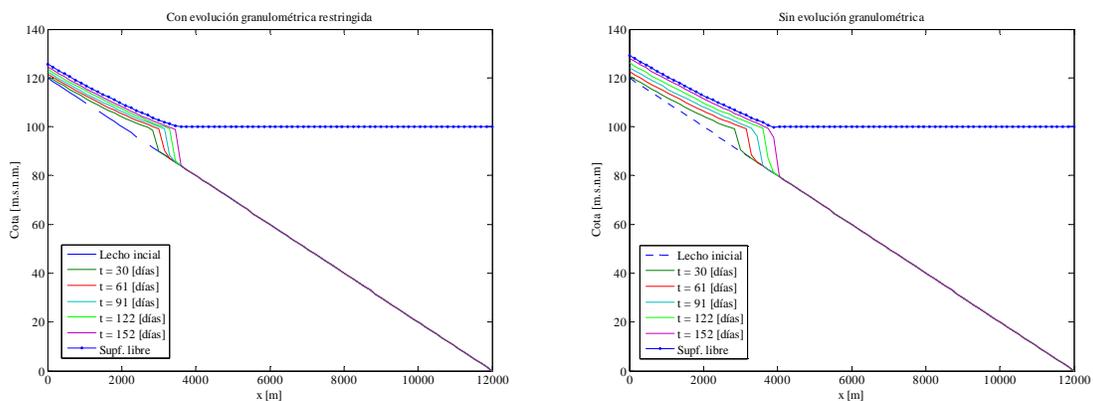


Figura 4.4: Evolución del lecho durante 152 días considerando y despreciando la evolución temporal de la granulometría, con nueva restricción impuesta.

El resultado anterior es bastante cercano al obtenido por *Mossem* (2006), lo cual es deseable, tomando en cuenta que en el caso de depositación generalizada de material, el efecto de la evolución temporal de la granulometría sólo es importante para el almacenamiento de estratigrafía en el sustrato.

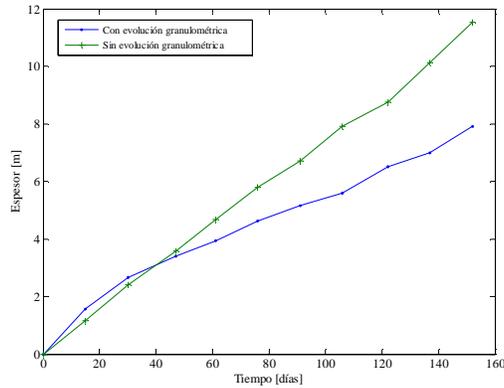


Figura 4.5: Comparación espesor medio del delta

Si se comparan los espesores del delta en el tiempo obtenidos (Ver Figura 4.5), se puede ver que en el primer mes el espesor alcanzado por el delta obtenido considerando evolución granulométrica, es ligeramente superior al obtenido sin considerar evolución de la granulometría. A partir de los 30 días, los espesores difieren en mayor magnitud, siendo mucho mayor el obtenido sin considerar evolución granulométrica. Respecto a la velocidad de avance media del delta, ésta es mayor para el caso en el que no se considera evolución granulométrica, alcanzando un valor promedio de 500 m/mes que corresponde al doble de la velocidad alcanzada por el delta cuando se considera evolución granulométrica (100 m/mes).

La granulometría resultante en distintos puntos de la superficie del lecho, luego de 152 días, se puede observar en las Figura 4.6, 4.7 y 4.8.

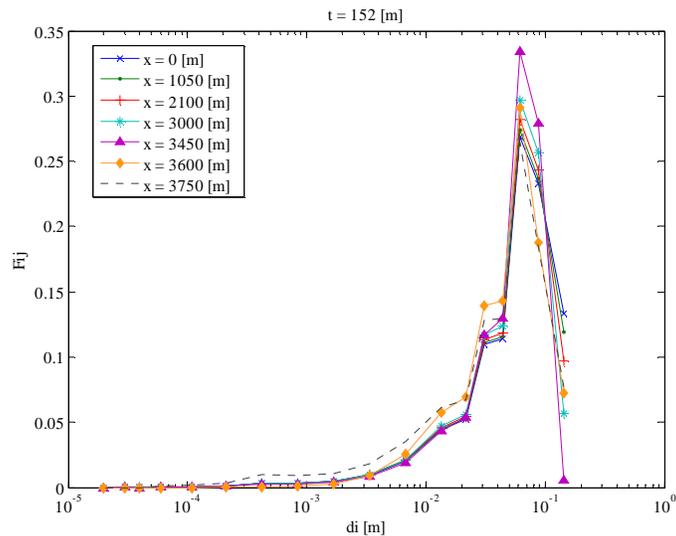


Figura 4.6: Fracciones granulométricas a los 152 días de evolución, en distintos puntos del lecho

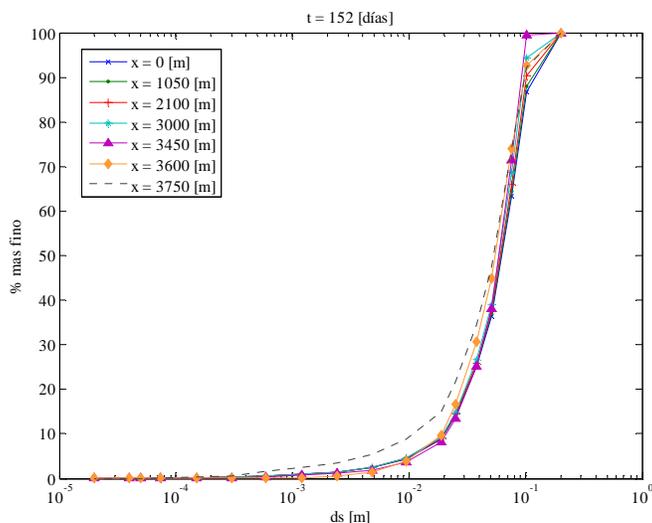


Figura 4.7: Granulometría de la superficie del lecho a lo largo de su eje longitudinal para t = 152 [días].

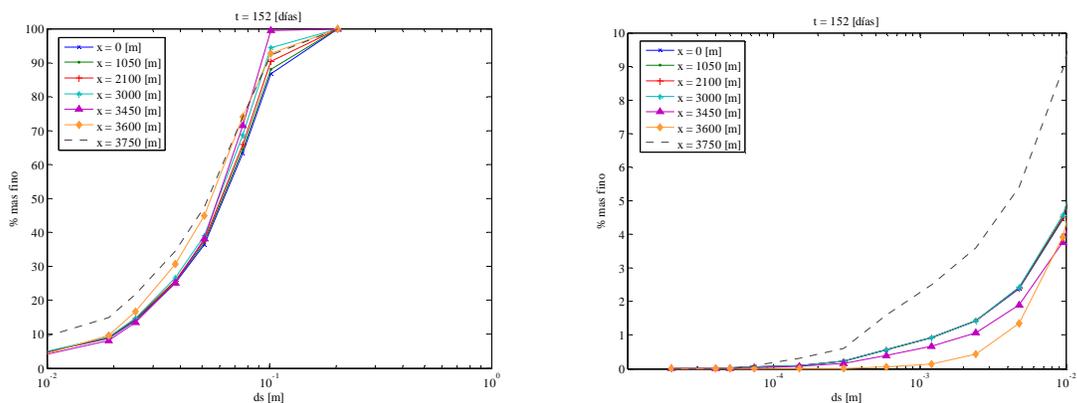


Figura 4.8: Acercamiento de las curvas granulométricas a lo largo del eje longitudinal del lecho

Se puede ver de las figuras anteriores que en la zona de aguas arriba donde se desarrolla el delta, la granulometría obtenida es más gruesa que la original (x=3750 m), aumentando la cantidad de partículas de mayor tamaño y disminuyendo las de menor tamaño. Hacia aguas abajo, para longitudes mayores a 3000 m, disminuye tanto la cantidad de partículas de mayor tamaño como las más pequeñas, y aumenta la cantidad de las partículas de tamaño intermedio. De esta forma se obtiene que la granulometría es más fina hacia aguas abajo, explicado por disminución de esfuerzo de corte que experimenta el escurrimiento debido a la condición del embalse impuesta aguas abajo, sobre la extensión del delta; pero en el tiempo es cada vez gruesa respecto a su condición inicial, en cada sector del delta debido. Sin embargo, en x = 3600 m, donde el delta empalma con el lecho del embalse (Ver Figura 4.9), se pierde la tendencia antes mencionada, siendo ésta mas gruesa que la presentada en el nodo de aguas arriba (x=3450 m). En la Figura 4.10 se compara la granulometría resultante en el empalme, con la granulometría original del lecho, observándose que las granulometrías difieren muy poco, siendo la de x = 3600 m ligeramente más gruesa que la original. Lo anterior no se puede explicar como un fenómeno físico, debido a que el mecanismo de transporte en esa zona no es representable por las ecuaciones que rigen al modelo. Pese a esta anomalía en el empalme del delta, los resultados granulométricos obtenidos son

satisfactorios, reflejando lo que físicamente podría experimentar la granulometría del lecho ante la situación planteada.

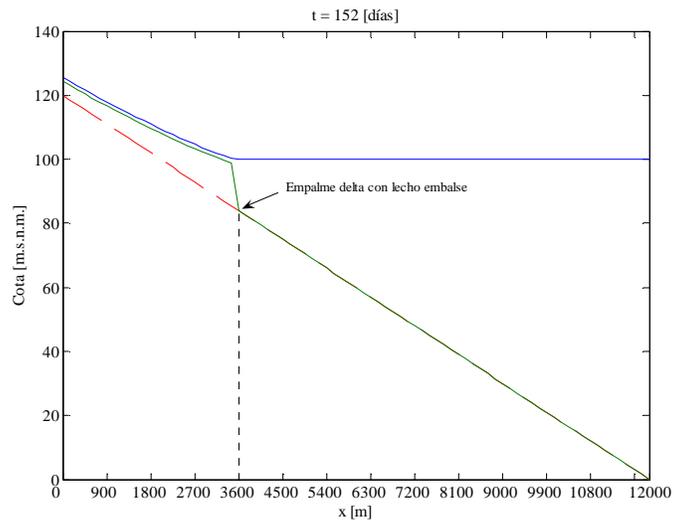


Figura 4.9: Ubicación término del delta en t = 152 [días]

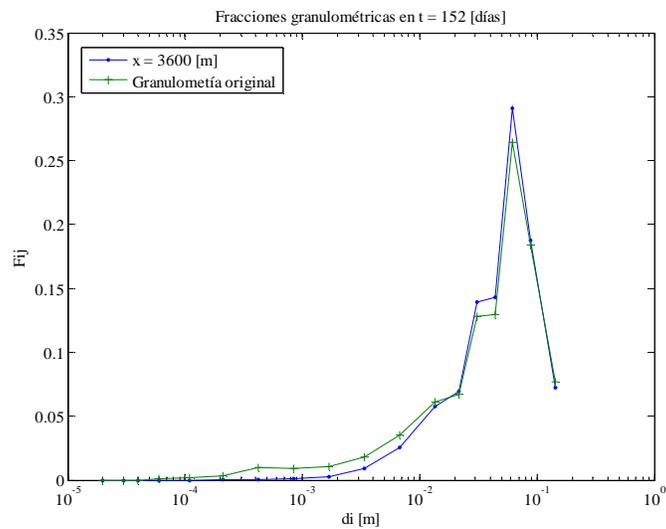


Figura 4.10: Comparación granulometría original del lecho con la obtenida en empalme del delta t = 152 [días]

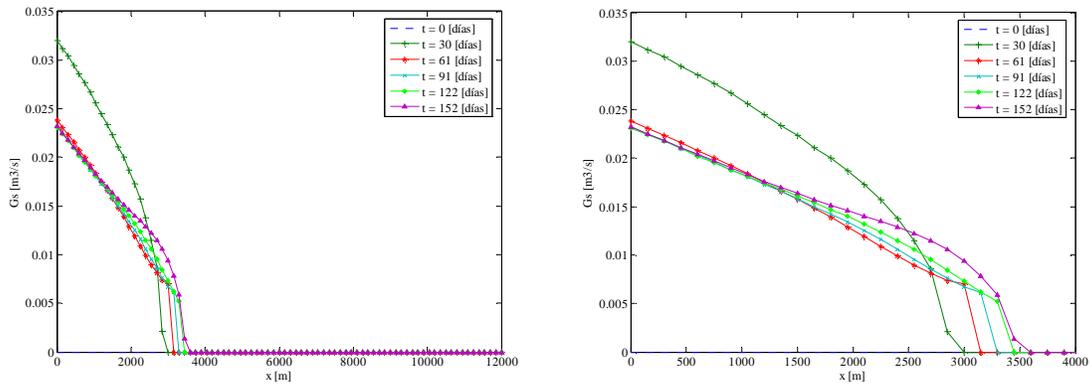


Figura 4.11: Gasto sólido a lo largo del eje longitudinal para distintos tiempos de evolución.

Analizando la Figura 4.11, se ve que en la zona de aguas arriba, el gasto sólido va disminuyendo en el tiempo, siendo más notorio en los dos primeros meses. Sin embargo, aguas abajo, para distancias mayores a 1.5 km, cambia la tendencia, y el gasto sólido aumenta en el tiempo, tendiéndose de esta forma a un perfil de gasto sólido horizontal en la zona de desarrollo del delta, con un quiebre abrupto de avance en el punto donde termina éste. Esto se puede interpretar como una estabilización del gasto sólido en el tiempo en la zona de desarrollo del delta, es decir se tiende a igualar el gasto sólido en cada nodo.

Respecto a la evolución temporal de la granulometría, en la Figura 4.9 se puede ver la evolución en el primer nodo, $x = 0$ m. La granulometría solo evoluciona hasta los 61 días, de ahí en adelante se conserva la granulometría, debido a la restricción impuesta a la evolución, mencionada anteriormente. Así, se puede decir que en los primeros 2 meses en $x = 0$ [m], la granulometría se va engrosando, aumentando las fracciones de partículas de mayor tamaño y disminuyendo por lo tanto las fracciones de tamaños mas pequeños. Esto se puede interpretar, como dado que en el nodo se experimenta depositación de sedimento, en esa zona sedimentan las partículas de mayor tamaño y las de menor tamaño son movilizadas o por lo menos no depositadas en esa zona, si no que más hacia aguas abajo, donde comienza disminuir la capacidad de arrastre.

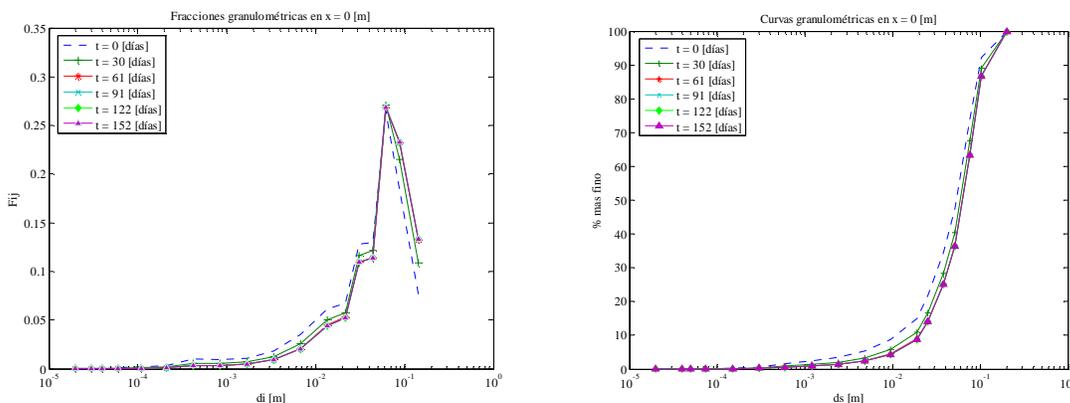


Figura 4.12: Evolución temporal de la granulometría en $x = 0$ [m] (Fracciones granulométricas y curvas granulométricas)

Más hacia aguas abajo, en $x = 1500$ m, se obtiene que la granulometría se engrosa en forma menos notoria que en el caso de $x = 0$ m, lo cual es esperable, debido a que disminuye la capacidad arrastre y la mayoría de partículas de mayor tamaño ya fueron depositadas aguas arriba, así que se depositan las partículas de tamaño intermedio. También en este punto se experimenta una evolución de la granulometría limitada a los 61 días, debido a que los incrementos de elevación del delta en esa zona, para tiempos mayores a 61 días, son muy pequeños en cada intervalo, pero acumulables en el tiempo.

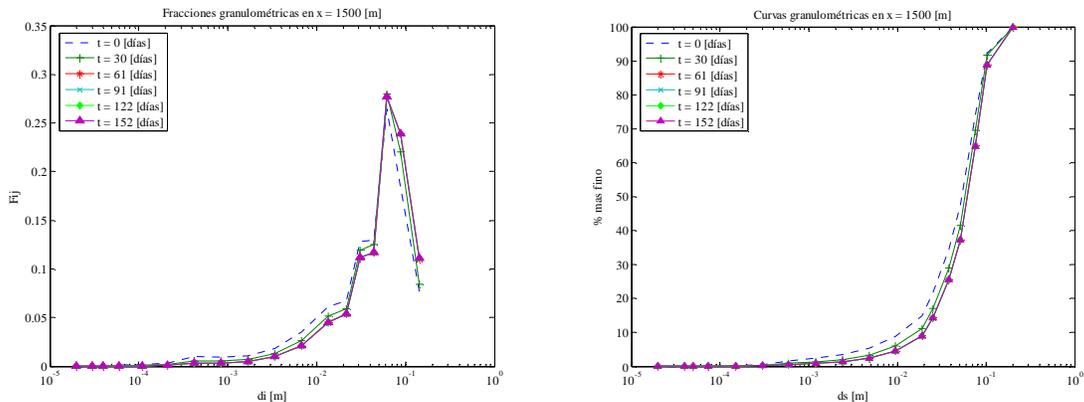


Figura 4.13: Evolución temporal de la granulometría en $x = 1500$ [m] (Fracciones granulométricas y curvas granulométricas)

En $x = 3000$ m, punto donde se encuentra en vértice del delta en $t = 30$ [días], se puede apreciar que la granulometría evoluciona en forma más notoria y en un mayor periodo de tiempo. Se observa de la Figura 4.11, que la evolución no tiene una tendencia clara, engrosándose la granulometría hasta los 61 días, y luego tiende a ser más fina. Esto se debe a que hasta ese tiempo el frente de avance se encuentra en $x = 3000$ [m] o cercano a este punto, y por lo tanto presenta la granulometría característica del empalme del delta, el cual no es representable por el modelo, como se mencionó anteriormente. Pasado ese tiempo, el frente se aleja de dicho punto, y se adquiere la granulometría de la zona del delta de aguas abajo, que es más gruesa que la granulometría original, pero más fina que la presentada aguas arriba.

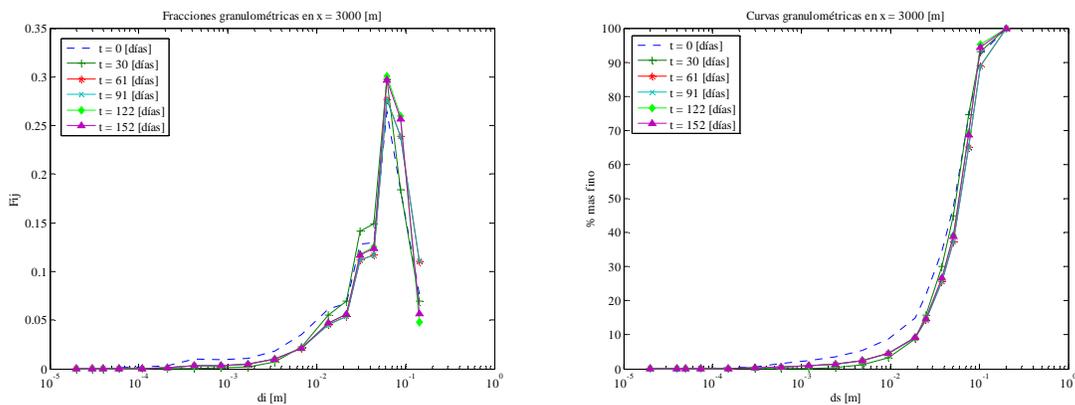


Figura 4.14: Evolución temporal de la granulometría en $x = 3000$ [m] (Fracciones granulométricas y curvas granulométricas)

Se analiza también la granulometría del sustrato, primera capa, y los resultados entregados por el algoritmo de almacenamiento de información granulométrica. De la Figura 4.12, se puede ver que la granulometría del sustrato se va haciendo más fina hacia aguas abajo, al igual que lo obtenido en la superficie anteriormente. Esto es razonable dado que en depositación hay una transferencia de sedimento desde el gasto sólido y superficie hacia el sustrato, adquiriendo en alguna medida la granulometría de la superficie.

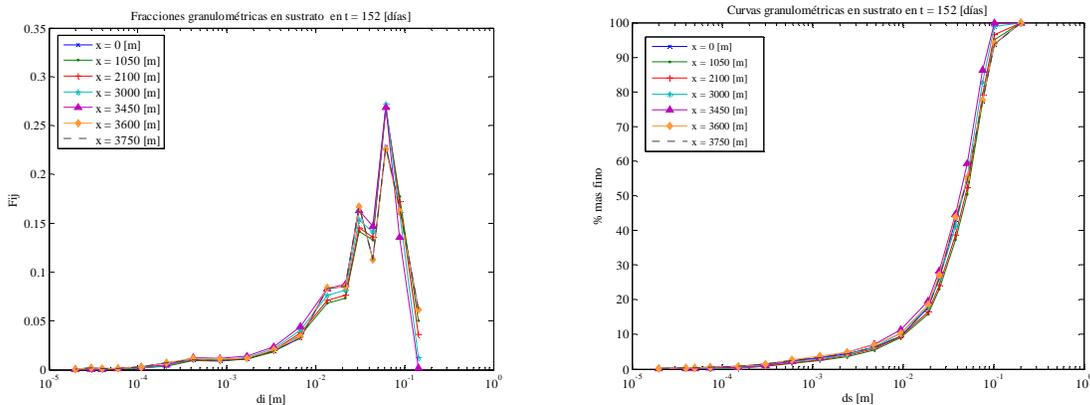


Figura 4.15: Granulometría de la primera capa del sustrato en $t = 152$ [días], en distintos puntos del delta.

En la Figura 4.13 se puede apreciar la condición de las capas de los sustratos luego de 152 días de simulación, que por lo demás, cumplen con lo esperado dado que se mantuvo constante el espesor de las capas 1 y 2; y la tercera absorbió la granulometría y el espesor de material transferido al sustrato. Sin embargo, en los dos primeros nodos se presenta un comportamiento distinto del nivel inferior de la tercera capa, en comparación con el resto de los otros nodos, que se debe nuevamente a la restricción impuesta a la evolución granulométrica, que además restringe la evolución de los espesores de las capas del sustrato según el algoritmo antes indicado.

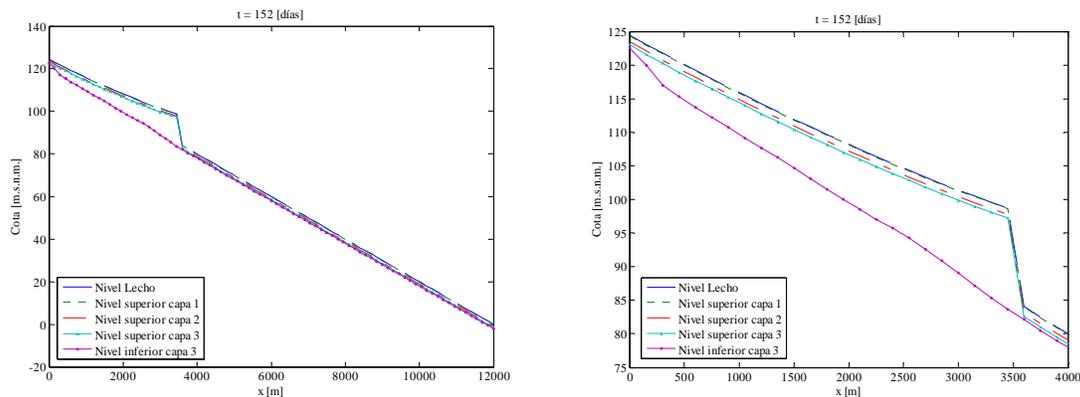


Figura 4.16: Posición y espesores de las capas de sustratos en el delta, en $t = 152$ [días]

En la Figura 4.14 se muestra la evolución del D_{90} , donde nuevamente se puede apreciar que la granulometría es más fina hacia aguas abajo, llegando a valores de D_{90} más bajos que los

originales. Si bien estos valores son más bajos que los originales, no quiere decir que hayan aumentado las partículas más finas, si no que en realidad, según los gráficos anteriores donde se compara la granulometría resultante en el tiempo con la original, disminuyen las partículas de mayor y menor tamaño, y aumentando por lo tanto aquellas de tamaño intermedio. Por lo tanto se puede desprender del perfil del D_{90} que la granulometría, en la extensión de desarrollo del delta, se hace más fina hacia aguas abajo, pero el delta se va acorazando en el tiempo.

El comportamiento del diámetro geométrico refleja de mejor forma lo que está experimentando la granulometría en el lecho, se ve claramente que a medida que transcurre el tiempo, la granulometría tiende a ser mas gruesa en la zona del delta, experimentándose un afinamiento hacia aguas abajo, pero siempre más grueso que el original; sin embargo al llegar a cierto punto del delta, en el vértice de éste, el D_g aumenta abruptamente, debido a la irregularidad en la zona del empalme del delta.

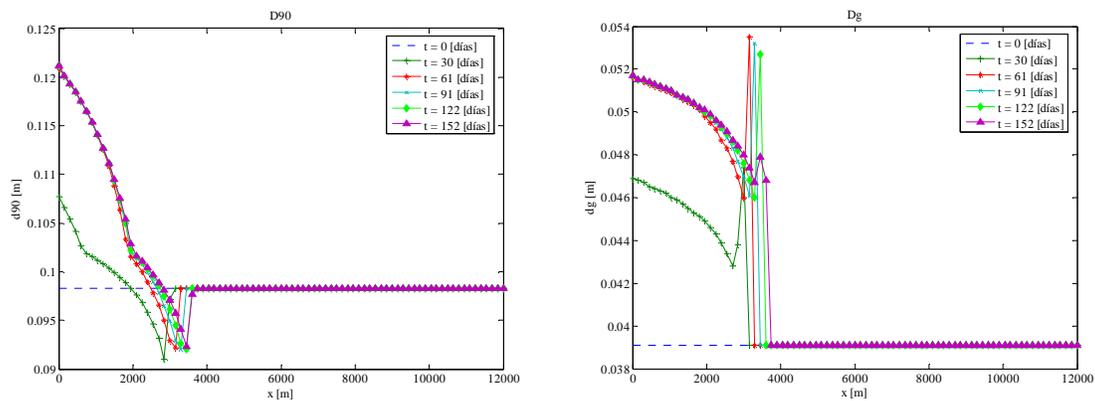


Figura 4.17: D_{90} y diámetro geométrico a lo largo del eje longitudinal en distintos tiempos

4.1.2 Descenso del nivel aguas abajo del embalse

Luego de 182 días de simulación de la situación 4.1.1, se impone una nueva condición de borde aguas abajo del embalse, consistente en una disminución del nivel de éste desde 100 m.s.n.m. hasta 80 m.s.n.m., en un tiempo de 148 días. En la Tabla 4.3 se muestra la ley de descenso del embalse o condición de borde impuesta. Notar que los resultados obtenidos en esta sección corresponden a una continuación temporal de la situación anterior.

Tabla 4-3 Ley de descenso del embalse

Tiempo [día]	Caudal [m3/s]	Nivel Embalse
0	80	100.000
182	80	100.000
187.5	80	99.000
195	80	98.000
202.5	80	97.000
210	80	96.000
217.5	80	95.000
225	80	94.000
232.5	80	93.000
240	80	92.000
247.5	80	91.000
255	80	90.000
262.5	80	89.000
270	80	88.000
277.5	80	87.000
285	80	86.000
292.5	80	85.000
300	80	84.000
307.5	80	83.000
315	80	82.000
322.5	80	81.000
330	80	80.000
337.5	80	80.000
345	80	80.000
355	80	80.000
365	80	80.000

En los resultados de la evolución del nivel del lecho con y sin evolución de la granulometría (Figura 4.18), se puede ver que el comportamiento es muy similar, salvo que en *Mossem* (2006), la evolución es mayor. Se experimenta una degradación del lecho en el vértice del delta a medida que éste avanza, disminuyendo la pendiente de su frente de avance. Se esperaba que con la condición de descenso del embalse se experimentara una degradación generalizada del lecho, sin embargo, hacia aguas arriba se mantuvo la depositación de material, aunque en menor magnitud comparado con lo obtenido cuando el nivel del embalse permanecía constante.

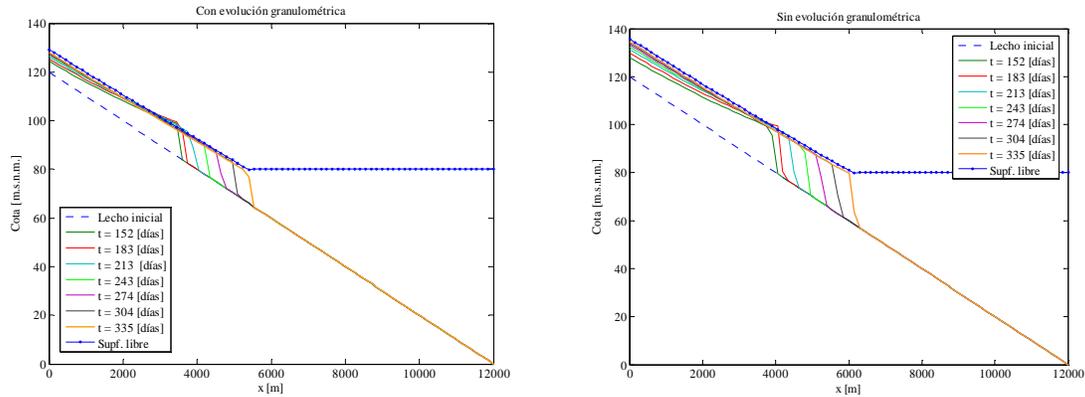


Figura 4.18: Evolución del lecho imponiendo descenso del nivel del embalse aguas abajo

De la Figura 4.19 se puede ver la velocidad media de avance del delta oscila entre los valores 300 m/mes y 450 m/mes, para el caso en el que se considera evolución granulométrica restringida. En el caso en el que no se considera evolución granulométrica, la velocidad de avance del delta es sostenida, alcanzando los 450 m/mes luego de 274 días. En cuanto a la variación del espesor medio del delta, éste es menor para el caso primer caso, manteniéndose la tendencia de la aplicación anterior de una diferencia de 8 m (Ver Figura 4.5).

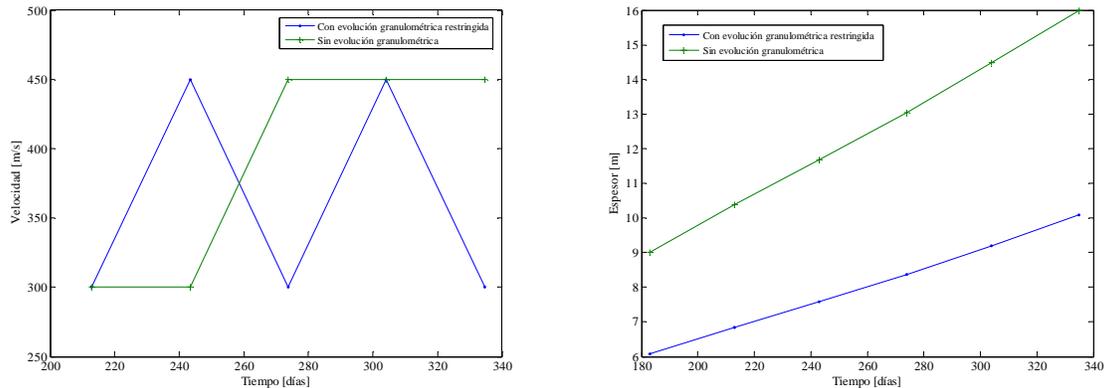


Figura 4.19: Velocidad media y espesor medio del delta en el tiempo

Respecto a la granulometría, se puede ver de la Figura 4.19, que la tendencia mencionada en el caso anterior, se mantiene en este caso. Es decir, hacia aguas abajo la granulometría tiende a ser más fina, aunque menos notoriamente. La diferencia de fracciones granulométricas para distintos tiempos sólo es apreciable para las partículas de tamaños mayores, considerando los nodos de $x = 0$ m hasta el vértice del delta, $x = 5250$ m. Sin embargo, en el empalme del delta, $x = 5400$ [m], la granulometría es distinta, siendo mucho mas gruesa que la de aguas arriba. De esta forma, al igual que en el caso anterior, el resultado obtenido en esa zona no refleja lo que podría ocurrir físicamente, debido a que el mecanismo de transporte que allí ocurre no es representable por las ecuaciones que rigen a *Mossem*. En $x = 5550$ m la granulometría corresponde a la original, mostrada en la Figura

4.2, por lo tanto en forma general se obtiene un engrosamiento de la granulometría en el lecho, en la zona del delta..

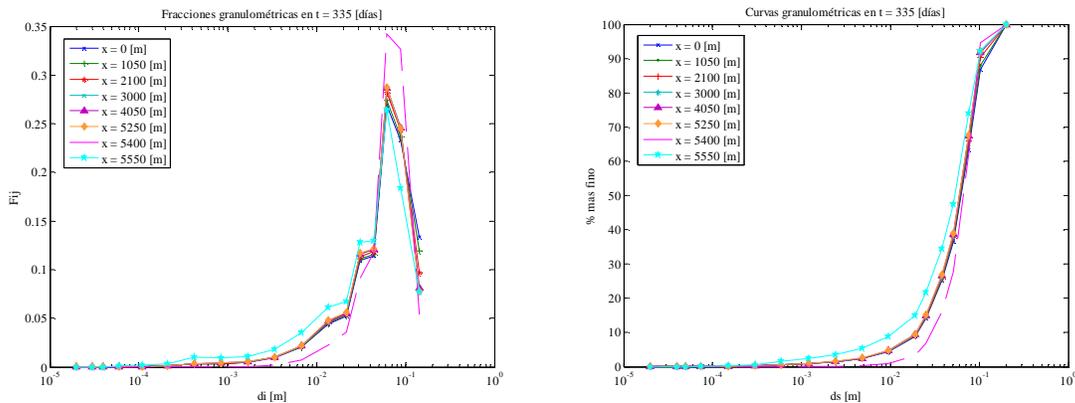


Figura 4.20: Granulometría de la superficie del lecho a lo largo de su eje longitudinal después de 335 días de simulación.

En la Figura 4.20, que muestra la evolución del gasto sólido, se corrobora lo mencionado anteriormente; donde aguas arriba el sistema se sigue depositando material, y aguas abajo se experimenta un proceso de degradación del delta que es claro al analizar las curvas. Esto es evidente para $t = 183$, 213 y 274 días, pero en los otros días, se genera un proceso de depositación de material en la zona final del delta ($t = 243$, $t = 304$ y $t = 335$ [días]). Además se puede ver que el gasto sólido aumenta en el tiempo, tendiendo a un equilibrio. El aumento en la cantidad de gasto sólido se debe al descenso de la condición de borde, que genera una mayor capacidad de arrastre.

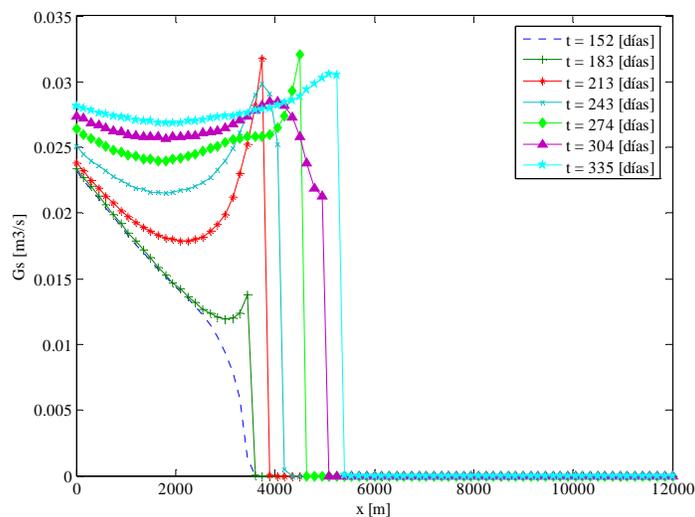


Figura 4.21 Gasto sólido a lo largo del eje longitudinal para distintos tiempos de evolución.

Una forma de apreciar el aumento en la capacidad de arrastre es a través de los resultados de la evolución de la granulometría, que debería mostrar un engrosamiento en la zona de aguas

abajo del delta. Esto se espera ya que al aumentar la capacidad de arrastre, el flujo es capaz de transportar partículas de mayor tamaño a una mayor distancia, alcanzando la zona de aguas abajo de la extensión del delta. Lamentablemente, debido a la restricción impuesta a la evolución granulométrica, no se genera evolución de la granulometría en la zona superior del delta, y por lo tanto no es posible analizar la capacidad de arrastre a través de esos resultados. De las Figuras 4.21-4.24 se puede ver que no hay evolución temporal de la granulometría en un tramo considerable del delta, y sólo a partir de los 3 km. se manifiesta una leve evolución.

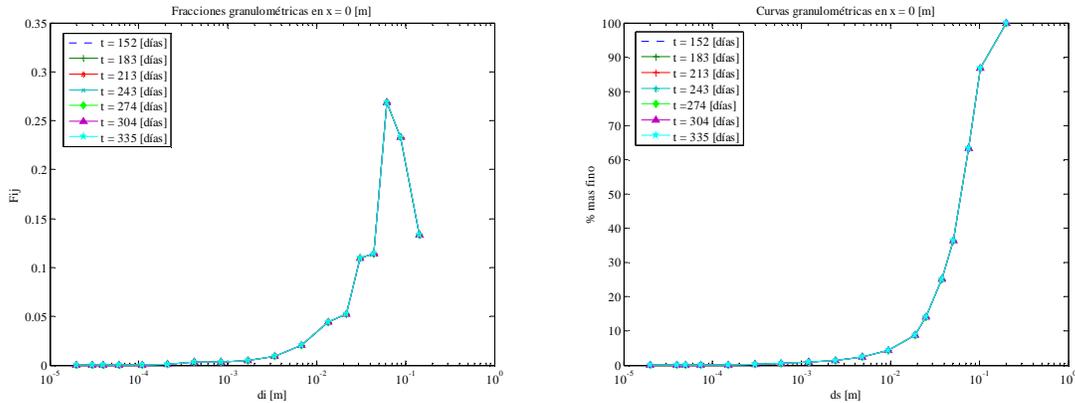


Figura 4.22: Evolución temporal de la granulometría en $x = 0$ [m] (Fracciones granulométricas u curvas granulométricas)

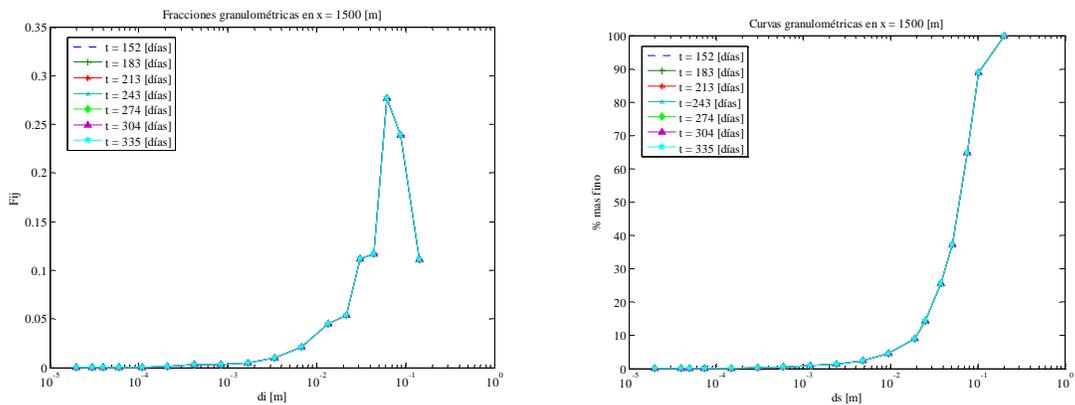


Figura 4.23: Evolución temporal de la granulometría en $x = 1500$ [m] (Fracciones granulométricas y curvas granulométricas)

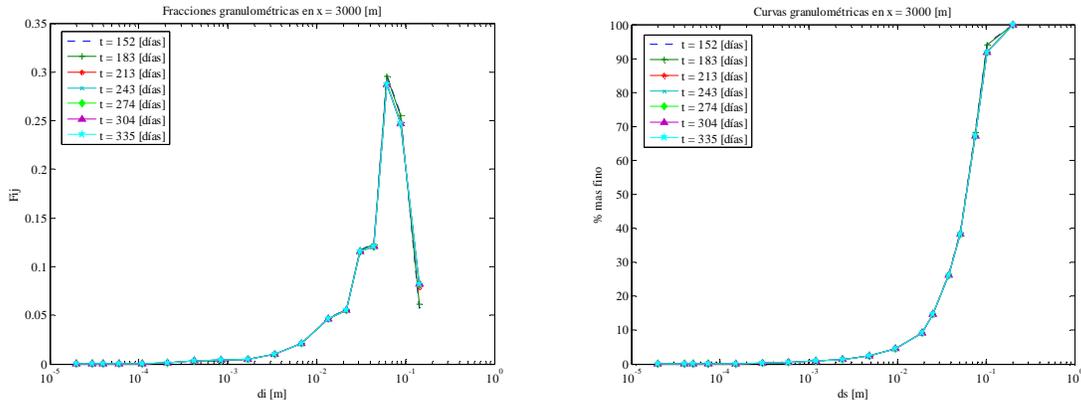


Figura 4.24: Evolución temporal de la granulometría en $x = 3000$ [m] (Fracciones granulométricas u curvas granulométricas)

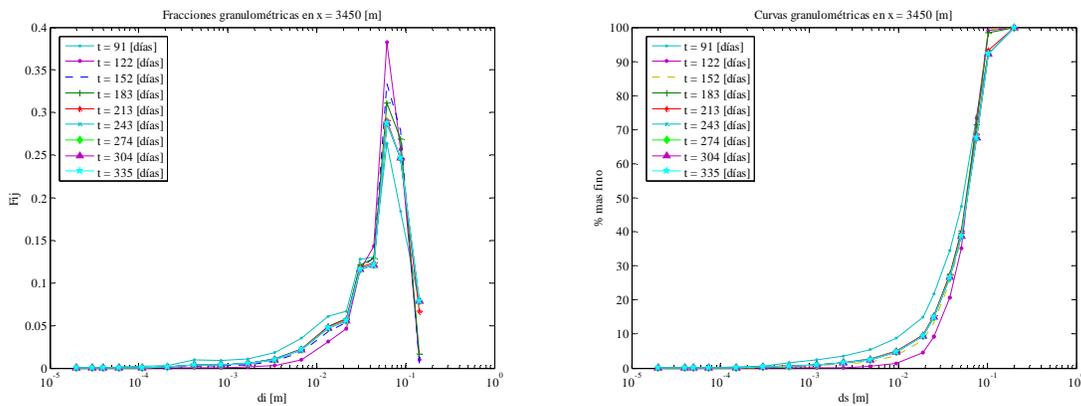


Figura 4.25: Evolución temporal de la granulometría en $x = 3450$ [m] (Fracciones granulométricas y curvas granulométricas)

En la Figura 4.25 se puede ver que la evolución del D_{90} presenta un comportamiento a lo largo del eje x similar en $t = 152$ días y $t = 183$ días, cuando no hay descenso del embalse o éste apenas comienza, y que es igual al presentado en la Figura 4.17. No obstante, para tiempos mayores a 182 días y distancias mayores a 3000 [m] las curvas cambian su comportamiento y tiende a aumentar el valor de D_{90} , explicándose por el aumento de la capacidad de arrastre generada por el descenso del embalse, que movilizar a mayores distancias las partículas de mayores tamaños. En las zonas de empalme del delta el D_{90} presenta un aumento abrupto comparado con la tendencia de la zona inmediatamente aguas arriba, lo cual puede corresponder a una anomalía generada por el modelo numérico cuando $\partial q_s / \partial x$ es muy grande, lo cual ocurre en la zona del empalme (Ver Figura 4.20).

La evolución del diámetro geométrico a lo largo del eje x para distintos tiempo, presenta un comportamiento similar al obtenido en el caso en que el nivel del estanque permanece constante (Figura 4.17). Sin embargo, para $x = 3000$ m, al igual que en el caso del D_{90} , la tendencia cambia y el D_g comienza a aumentar, verificándose nuevamente el aumento en la capacidad de arrastre. También se presenta la anomalía mencionada en el análisis del D_{90} de esta aplicación y la anterior.

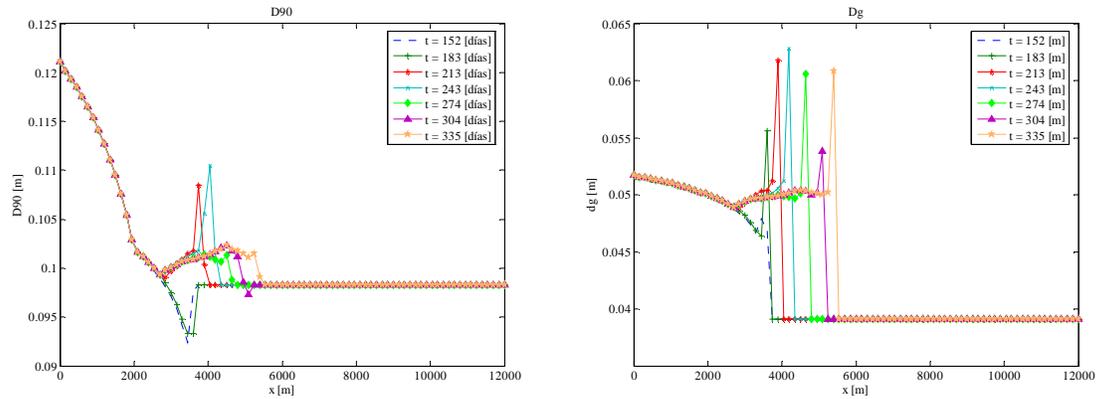


Figura 4.26: D90 y diámetro geométrico a lo largo del eje longitudinal en distintos tiempos

La base de datos de los resultados obtenidos en esta simulación y la anterior se encuentra en el anexo digital A-1.

4.2 Situación aguas abajo de la presa de un embalse

Como se mencionó en la introducción, la interrupción de gasto sólido provocado por la construcción de una presa provoca una degradación generalizada del lecho y un acorazamiento aguas abajo. Así, para simular dicha situación a través del modelo *Mossem*, se impone que el gasto sólido de fondo en el nodo fantasma de aguas arriba sea nulo, $Q_{si=0}^n = 0$.

Para esta aplicación se consideró un cauce con las características que se muestran en la Tabla 4.4, y el perfil de la Figura 4.26.

Tabla 4-4: Parámetros de modelación y condiciones iniciales del cauce de la aplicación

Parámetros de modelación y condiciones iniciales	Valores	Unidades
Caudal constante Q	200	[m ³ /s]
Sección de escurrimiento rectangular. Ancho basal, bw	20	[m]
Condición de borde aguas abajo: Nivel de superficie libre.	2.46	[m.s.n.m.]
Froude	0.68	
Pendiente	0.7	[%]
Courant	0.7	
Tiempo de simulación	1	[año]

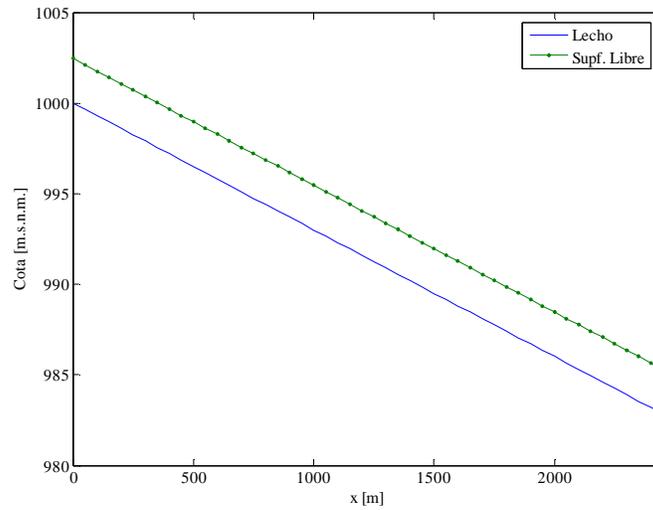


Figura 4.27: Perfil inicial del lecho

Además, se considera la granulometría de superficie y sustrato que se muestran en la Tabla 4.5 y la Figura 4.27.

Tabla 4-5: Granulometría inicial de la superficie del lecho y capas del sustrato

	granulometría superficie		granulometría sustrato 1		granulometría sustrato 2		granulometría sustrato 3	
	Espesor = 0.5 [m]		Espesor = 0.5 [m]		Espesor = 0.5 [m]		Espesor = 0.5 [m]	
	% mas fino	ds [m]						
1	100	0.50000	100	0.50000	100	0.50000	100	0.50000
2	86.8	0.20000	90	0.20000	95	0.20000	98	0.20000
3	74.5	0.12800	80	0.12800	85	0.12800	88	0.12800
4	64.5	0.10000	70	0.10000	75	0.10000	78	0.10000
5	56	0.06840	60	0.06840	65	0.06840	68	0.06840
6	47.5	0.04680	53	0.04680	56	0.04680	59	0.04680
7	39	0.03200	45	0.03200	50	0.03200	54	0.03200
8	28.8	0.01200	37	0.01200	42	0.01200	45	0.01200
9	27.8	0.01000	35	0.01000	40	0.01000	43	0.01000
10	22.4	0.00336	27	0.00336	32	0.00336	35	0.00336
11	17.3	0.00162	20	0.00162	25	0.00162	28	0.00162
12	7.5	0.00071	10	0.00071	15	0.00071	18	0.00071
13	4.8	0.00050	7	0.00050	9	0.00050	12	0.00050
14	3.2	0.00035	4	0.00035	5	0.00035	7	0.00035
15	1.7	0.00021	2	0.00021	2	0.00021	2	0.00021

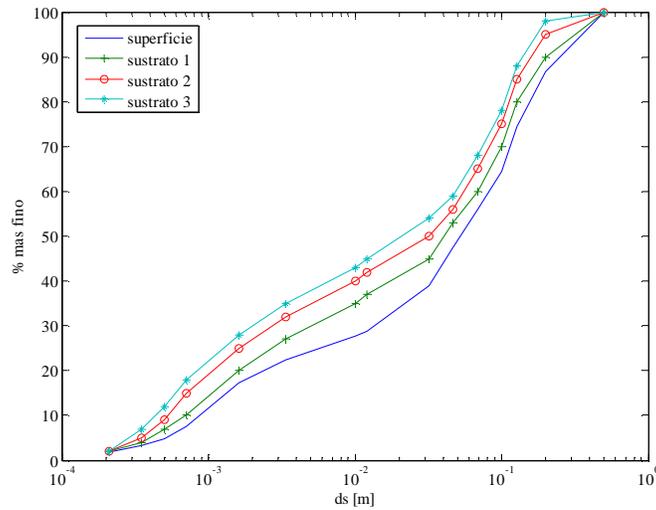


Figura 4.28: Curva granulométrica de la superficie y sustrato del lecho

Dadas las condiciones señaladas, se realizó una simulación de 365 días considerando los siguientes casos de evolución:

- i) Evolución del lecho con evolución temporal de la granulometría.
- ii) Evolución del lecho con evolución temporal de la granulometría restringida según la condición de evolución incremental significativa del lecho, que fue explicada en la aplicación anterior.
- iii) Evolución del lecho con granulometría invariante en el tiempo.

. La evolución del lecho resultante con cada una de las opciones del modelo se presentan en las Figuras 4.28, 4.29, 4.30 y 4.31.

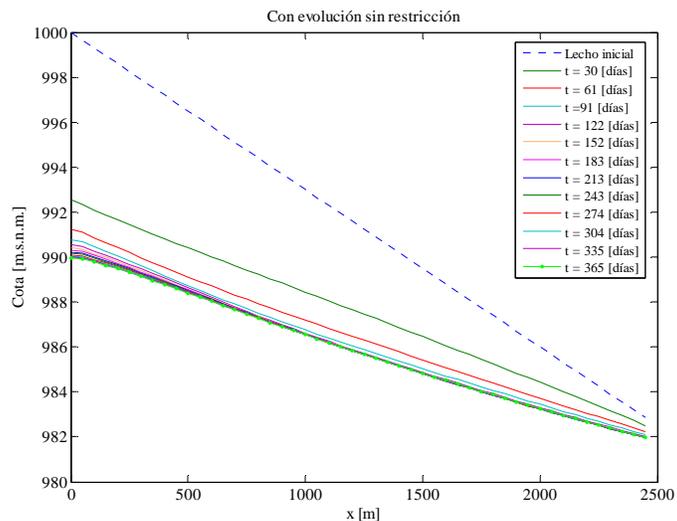


Figura 4.29: Evolución del lecho durante 365 días considerando evolución temporal de la granulometría sin restricción.

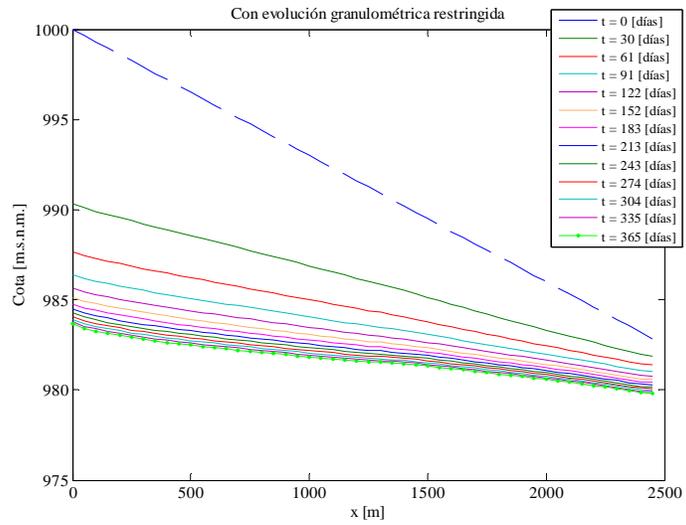


Figura 4.30: Evolución del lecho durante 365 días considerando evolución temporal de la granulometría con restricción.

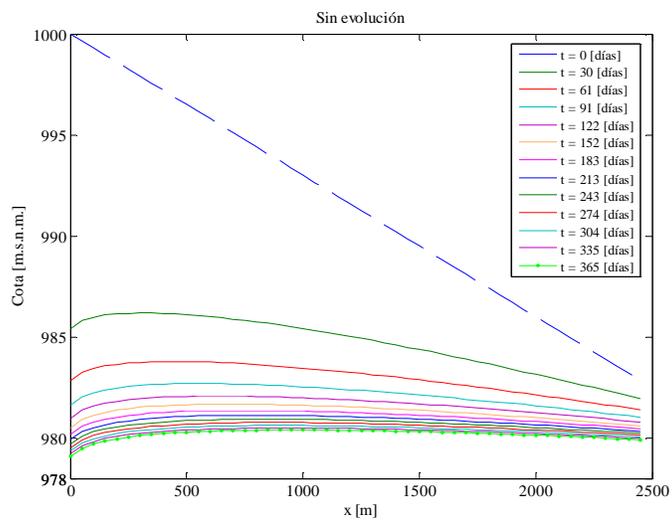


Figura 4.31: Evolución del lecho durante 365 días considerando granulometría constante en el tiempo.

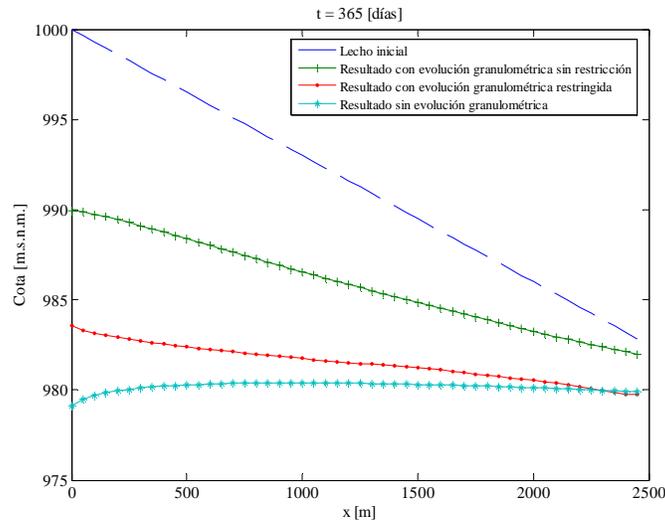


Figura 4.32: Comparación del lecho final resultante utilizando las tres consideraciones de evolución granulométrica

De las figuras anteriores llama la atención que al considerar una granulometría constante del lecho, éste evoluciona a un perfil con una contrapendiente (pendiente positiva) en el sector de aguas arriba, donde la distribución lineal de presiones no es válida y por lo tanto las ecuaciones de Saint-Venant no son aplicables. Sin embargo, una vez fuera de esa zona la resolución del flujo no tiene problemas.

Además, hay que notar la gran diferencia existente entre los resultados obtenidos con la evolución granulométrica sin restricción y sin evolución, donde la degradación del primero es mucho menor a la del segundo, lo que se explica básicamente por la misma evolución de la granulometría. Al considerar una granulometría constante del lecho, éste siempre tendrá disponible partículas de menor tamaño transportables por la capacidad de arrastre del flujo y por lo tanto el gasto sólido experimentado dependerá sólo de las condiciones hidráulicas que presente el flujo. Por el contrario, al considerar la evolución granulométrica sin restricción, las partículas disponibles en la superficie varían en el tiempo reflejándose el mecanismo de transporte diferenciado de partículas, donde el flujo se lleva las partículas de menor tamaño que es capaz de transportar y deja las más grandes que no es capaz de movilizar. De esta forma, cuando flujo ha movilizad todas o la mayoría de las partículas pequeñas del lecho, en la superficie de éste solo quedan las de mayor tamaño que el lecho no puede transportar desarrollándose una coraza estática que explica la disminución del gasto sólido, y por lo tanto, la disminución de la degradación del lecho. Cuando la evolución granulométrica es restringida, la coraza se desarrolla en forma lenta, lo que se traduce en una mayor disposición de partículas de tamaños que el flujo es capaz de sacar del lecho, correspondiendo a una degradación del lecho. Así, se espera que al considerar evolución granulométrica sin restricción, el gasto sólido al cabo de cierto tiempo sea más bajo que en el caso de las otras dos consideraciones, situación que es posible apreciar en la Figura 4.32.

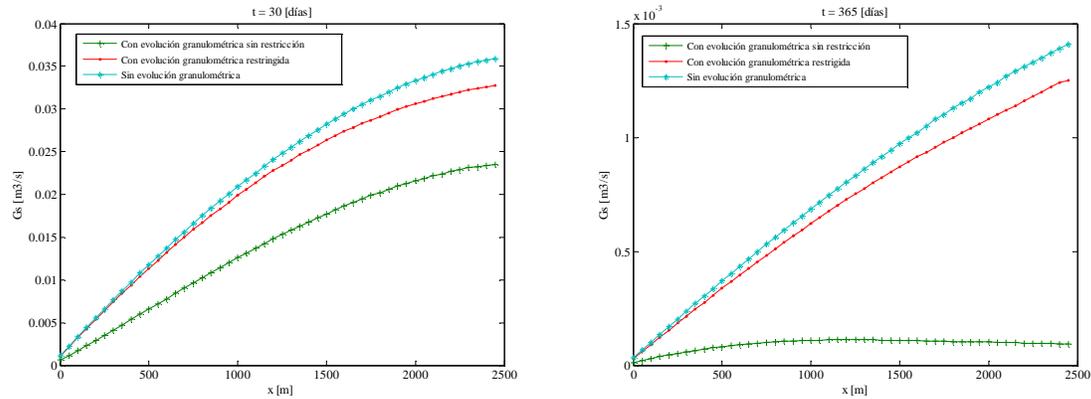


Figura 4.33: Comparación gastos sólidos obtenidos, utilizando las tres consideraciones de evolución granulométrica, en $t = 30$ [días] y $t = 365$ [días].

Respecto a la formación de la coraza en los casos de evolución granulométrica sin restricción y restringida, ésta se puede apreciar a través de la evolución de las fracciones y curvas granulométricas, que se muestran en las Figuras 4.33 y 4.34. De las figuras se ve que el acorazamiento del lecho es generalizado en el caso en que la evolución granulométrica no es restringida, y casi uniforme en todo el cauce considerado. Sin embargo, pese a que la granulometría alcanzada es similar en todos los nodos, es posible apreciar una leve diferencia entre ellas que muestran un afinamiento de la granulometría hacia aguas abajo. El patrón de afinamiento de la granulometría es más gradual hacia aguas abajo en el caso de evolución granulométrica restringida, siendo más fácil apreciar el afinamiento de la granulometría hacia aguas abajo. Pese a que un afinamiento gradual parece ser algo razonable, hay que considerar que la degradación es de gran magnitud en este caso y por lo tanto es difícil esperar un leve cambio en la granulometría.

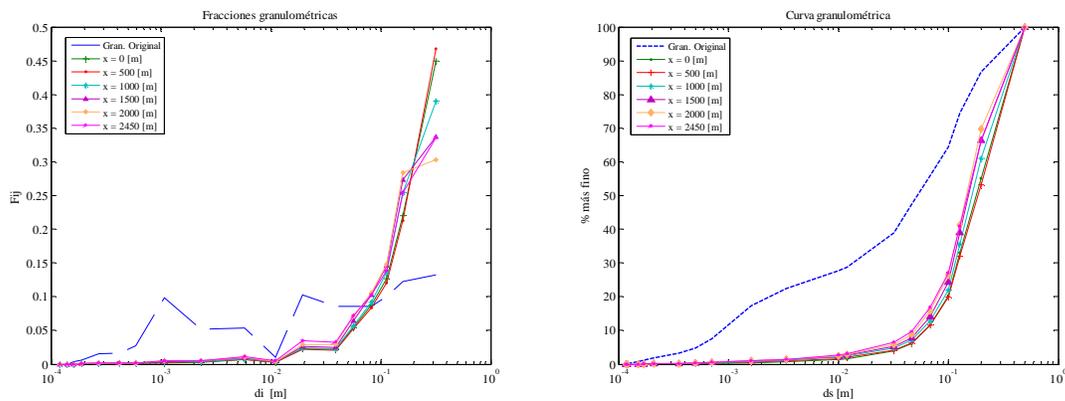


Figura 4.34: Granulometría de la superficie del lecho a lo largo de su eje longitudinal después de 329 días de simulación, considerando evolución granulométrica sin restricción

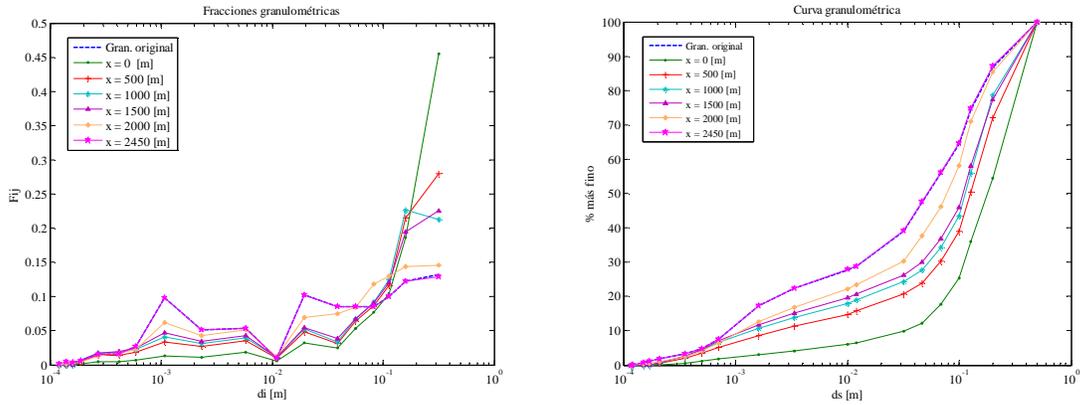


Figura 4.35: Granulometría de la superficie del lecho a lo largo de su eje longitudinal después de 329 días de simulación, considerando evolución granulométrica con restricción.

Dado que es difícil determinar cual de las dos consideraciones de evolución granulométrica es la adecuada, es conveniente analizar la evolución de la granulometría en el tiempo en puntos específicos del cauce.

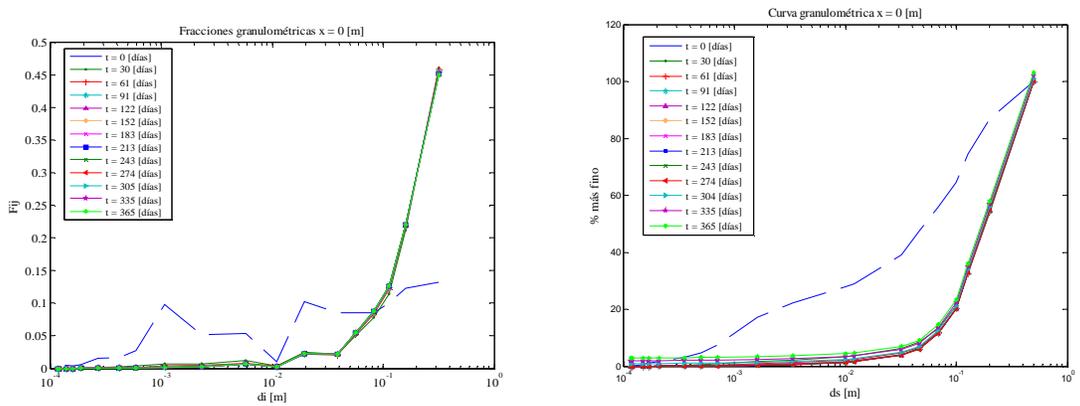


Figura 4.36: Evolución temporal de la granulometría en $x = 0$ [m] (Fracciones granulométricas y curvas granulométricas), considerando evolución granulométrica sin restricción.

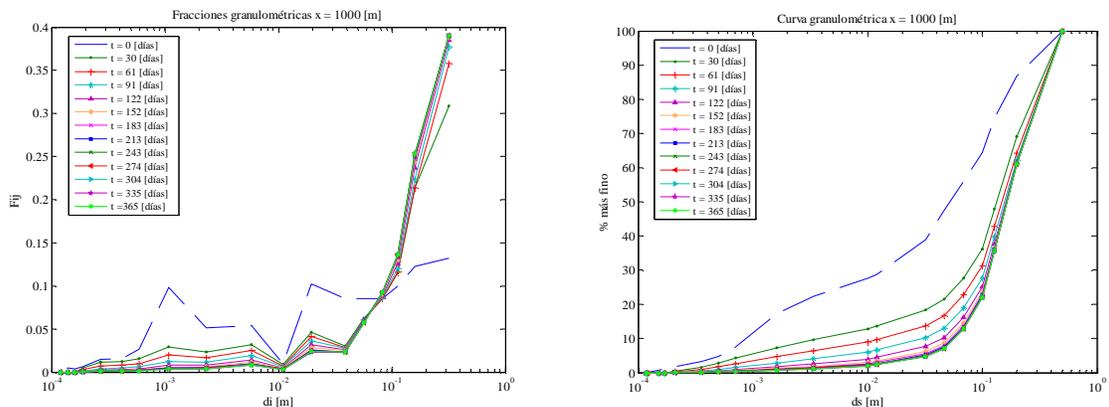


Figura 4.37: Evolución temporal de la granulometría en $x = 1000$ [m] (Fracciones granulométricas y curvas granulométricas), considerando evolución granulométrica sin restricción.

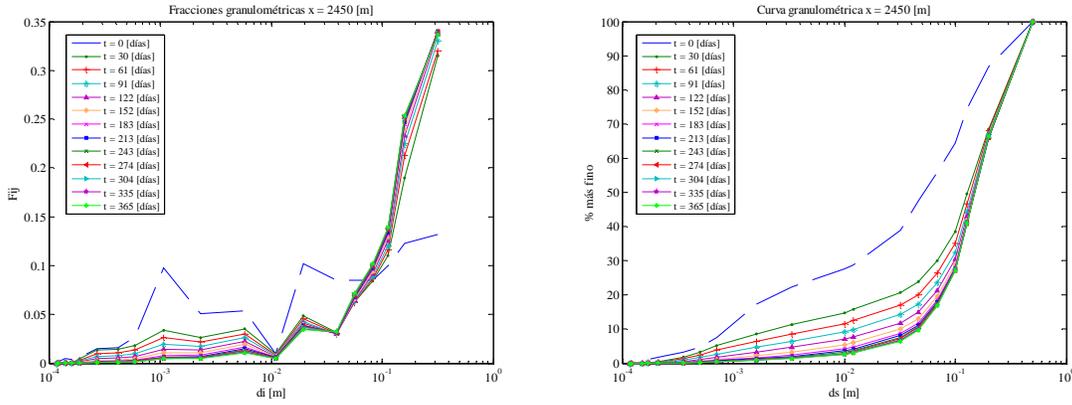


Figura 4.38: Evolución temporal de la granulometría en $x = 2450$ [m] (Fracciones granulométricas y curvas granulométricas), considerando evolución granulométrica sin restricción.

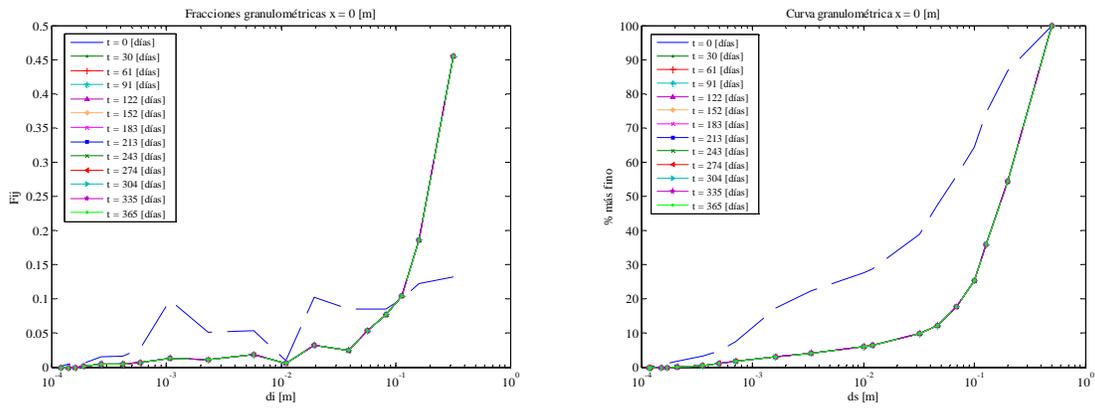


Figura 4.39: Evolución temporal de la granulometría en $x = 0$ [m] (Fracciones granulométricas y curvas granulométricas), considerando evolución granulométrica con restricción.

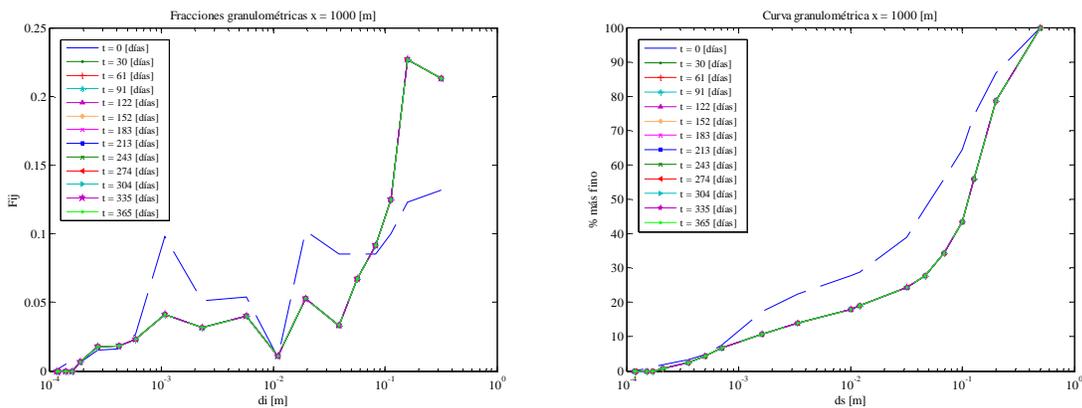


Figura 4.40: Evolución temporal de la granulometría en $x = 1000$ [m] (Fracciones granulométricas y curvas granulométricas), considerando evolución granulométrica con restricción.

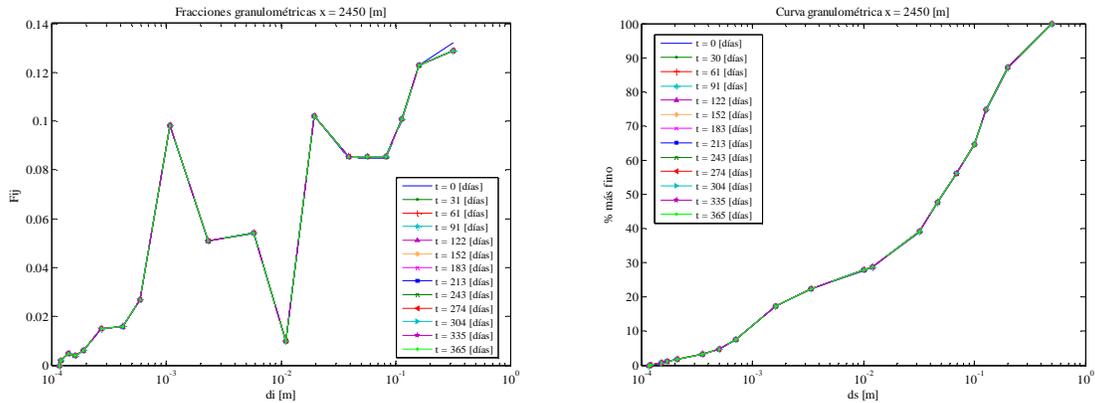


Figura 4.41: Evolución temporal de la granulometría en $x=2450$ [m] (Fracciones granulométricas y curvas granulométricas), considerando evolución granulométrica con restricción.

De las Figuras 4.35-4.37 se comprueba el rápido acorazamiento del lecho al considerar la evolución de la granulometría sin restricción, siendo más rápido en el extremo de aguas arriba, donde el gasto sólido afluente al primer nodo es interrumpido. Hacia aguas abajo el acorazamiento es más lento, pudiendo apreciarse la transición de la granulometría a una más gruesa y más uniforme a través del paso de los días. La tendencia es que hacia aguas abajo la granulometría evoluciona en forma más lenta, debido a que el sistema no sólo busca el equilibrio en el tiempo, si no que también en el espacio. Por lo tanto hacia aguas abajo, a una distancia considerable del extremo de aguas arriba donde se impone gasto sólido afluente nulo, el cauce tiende a equilibrar el gasto sólido, como muestra la Figura 4.32, disminuyendo, por lo tanto, también la degradación del lecho en esa zona.

Al considerar la evolución de la granulometría restringida (Figuras 4.38-4.40), se aprecia la formación de una coraza más fina que en el caso anterior, pero que permanece constante a partir de 30 días de simulación. Esto quiere decir que variaciones del lecho de mayor magnitud se experimentan en los 30 primeros días, ya que la restricción impuesta corresponde a un límite inferior en la magnitud de variación de éste. Por otro lado, de las figuras se ve que en la zona de aguas abajo prácticamente no hay variación de la granulometría, aunque la degradación en esa zona es importante (3 m). Esto hace pensar que la condición impuesta como restricción de la granulometría no es la más adecuada, ya que en el modelo no habría una representación idónea de la evolución de la granulometría. Pese a esto, si la evolución modelada genera perfiles del lecho que representen la realidad, podría obviarse la mala representación de la evolución granulométrica. Respecto a esto es bueno notar que los perfiles generados en la aplicación con ésta alternativa, si bien son de gran magnitud, no presentan la contrapendiente del perfil resultante al considerar una granulometría constante en el lecho. Es preciso señalar, que para determinar la aplicabilidad de la restricción y del modelo en general, es vital contar con datos de terreno apropiados para validar y calibrar los distintos parámetros establecidos para representar el fenómeno de evolución temporal de la granulometría.

En la Figura 4.41 se presenta la evolución del D_{90} y del diámetro geométrico, a lo largo del eje longitudinal del cauce, para distintos tiempos. Se ve claramente, en el caso de evolución sin restricción, como la granulometría acorazada se va afinando hacia aguas abajo,

presentado un aumento hacia aguas abajo. Este aumento no es esperado, debido a que hacia aguas abajo se debería tender a la granulometría original. De esta forma, se atribuye que la tendencia de aumento se debe a una condición de borde en el extremo de aguas abajo inadecuada, la cual en la aplicación corresponde a la altura normal de la superficie libre considerando las condiciones iniciales del lecho. Esto claramente no es apropiado y tal condición debería adecuarse a las condiciones que el lecho presente en cada instante.

La Figura 4.42 muestra la evolución del D_{90} y D_g de la simulación que considera la evolución granulométrica restringida. Se puede apreciar la misma tendencia del caso de evolución granulométrica restringida, es decir, granulometría más gruesa que la original, pero que se afina hacia aguas abajo. Esta tendencia es desarrollada solo hasta $x = 1200$ m, y a partir de ese punto el perfil del D_{90} y D_g presentan anomalías, que al igual que en el caso anterior, se atribuyen a una condición de borde aguas abajo inadecuada.

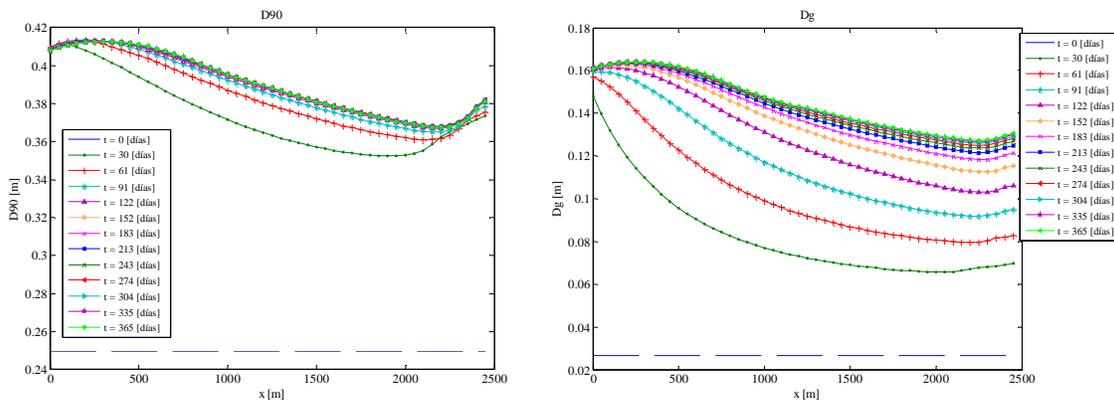


Figura 4.42: D_{90} y diámetro geométrico a lo largo del eje longitudinal en distintos tiempos considerando evolución granulométrica sin restricción

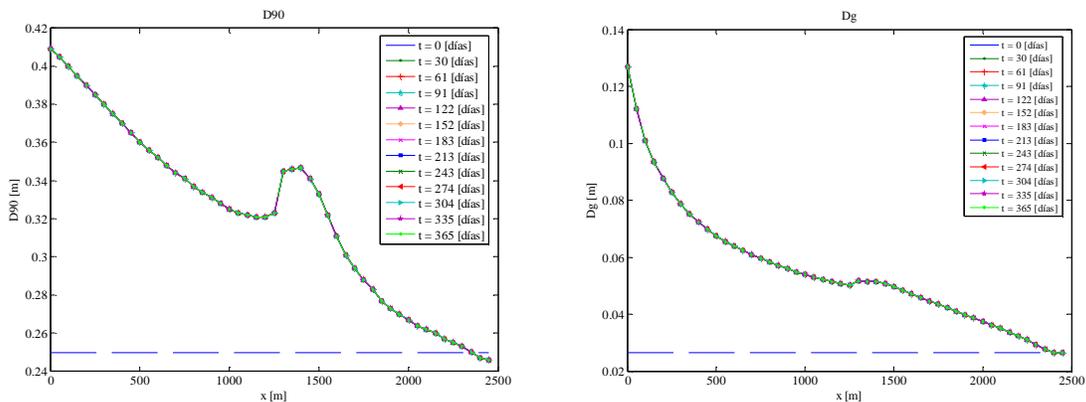


Figura 4.43: D_{90} y diámetro geométrico a lo largo del eje longitudinal en distintos tiempos considerando evolución granulométrica restringida

La base de datos de los resultados obtenidos en esta simulación se encuentra en el anexo digital A-2.

5. VALIDACION DEL MODELO

5.1 Introducción y antecedentes

Para realizar la validación del modelo se buscaron antecedentes de cauces, que debido a alguna alteración antropogénica, sufrieran algún tipo de desequilibrio sedimentológico. Es así como se escogió el cauce del Río Maule aguas abajo de la Presa Colbún, considerando la zona desde el lugar del emplazamiento del muro hasta 2.4 km aguas abajo; y el periodo entre los años 1985 y 2007.

5.1.1 Recopilación de antecedentes

La información necesaria para aplicar el modelo al cauce fue obtenida del trabajo “*Estudio de la degradación del Río Maule aguas debajo de la Presa Colbún*” (1981-1984), realizado por el Centro de Recursos Hidráulicos (CRH) de la Universidad de Chile. El estudio fue contratado por la Empresa Nacional de Energía (ENDESA), con el fin de determinar la magnitud de la potencial degradación que experimentaría el lecho a causa de la construcción de la Presa Colbún. Así, se contó con estudios de terreno, que proporcionaron información topográfica y propiedades de los sedimento del lecho al inicio del periodo de simulación (1981-1984). Respecto las condiciones del cauce al término del periodo, año 2007, se dispuso sólo de información topográfica, correspondiente a levantamientos topográficos de perfiles transversales del cauce en la zona de análisis. Esta última información fue proporcionada por Colbún S.A., que interesado en este trabajo proporcionó antecedentes del estudio de 1984 y realizó el levantamiento topográfico del sector en Diciembre del 2007.

5.1.1.1 Información topográfica 1984

En el estudio realizado por el CRH se levantaron 32 perfiles a lo largo del Río Maule en el año 1984 (desde la zona de emplazamiento de la Presa hasta el Puente de Ferrocarriles), de los cuales sólo 9 están disponibles en la actualidad. De esta forma, la zona a modelar queda definida por los perfiles E141-A, E140, E140-A, E139, E139-A, E138 y E138-A.

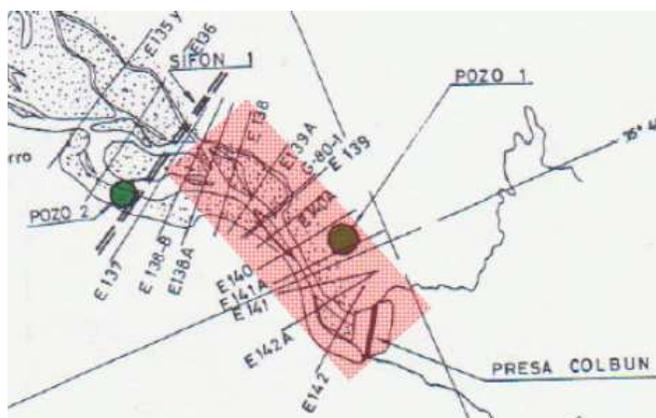


Figura 5.1: Zona del Río Maule considerada en la simulación

En la Tabla 5.1 se presenta la ubicación de los perfiles mencionados en el párrafo anterior, incluyendo aquellos que se encuentran inmediatamente aguas abajo del sector de la presa y de los cuales no se tienen antecedentes topográficos (E142, E142-A y 141). Además, se incluye la mínima cota de cada perfil, considerando para aquellos perfiles sin información que la cota es la misma que la del perfil inmediatamente agua abajo (Perfil E 141-A).

Tabla 5-1: Identificación y ubicación de perfiles

Identificación	Distancia [m]		Minima cota
	Parcial	Acum.	Perfil [m]
Presa Colbun	0	0	319.98
Endesa 142	145	145	319.98
Endesa 142 A	190	335	319.98
Endesa 141	440	775	319.98
Endesa 141 A	160	935	319.38
Endesa 140	200	1135	319.61
Endesa 140 A	210	1345	317.36
Endesa 139	185	1530	312.61
Geodesia 1980-1	86	1616	314.29
Endesa 139 A	335	1951	315.97
Endesa 138	215	2166	312.71
Endesa 138 A	250	2416	311.38

En la Figura 5.2 se presenta el perfil longitudinal del cauce, definido por la información señalada en la Tabla 5.1.

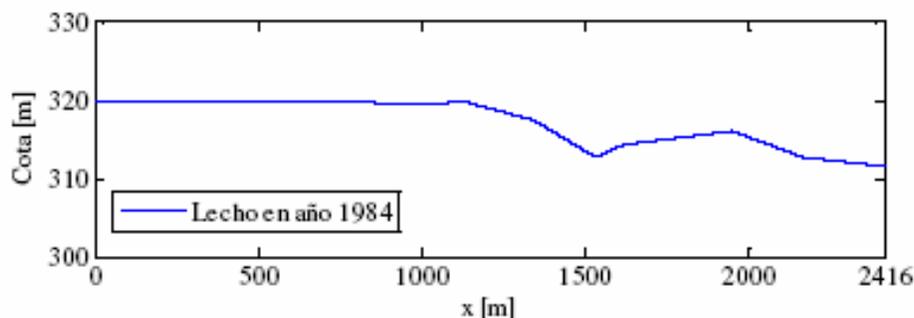


Figura 5.2: Perfil longitudinal del lecho en 1984

La base de datos correspondiente a los perfiles transversales medidos el año 1984, disponibles en la actualidad, se encuentra en el anexo digital A-3.

5.1.1.2 Información granulométrica 1981

El documento “Informe de los estudios de terreno realizados para determinar las propiedades de los sedimentos del Río Maule” (1981) contiene información granulométrica del lecho desde la zona de emplazamiento del muro hasta el Puente de Ferrocarriles, a través de 6 pozos de muestreo que entregan la siguiente información:

- Tamaño de los sedimentos y su distribución granulométrica tanto en el eje longitudinal del lecho como en su eje vertical.

- Peso específico representativo de las partículas.
- Porosidad del lecho.

Las dimensiones de los pozos fueron de 2 m x 1 m en planta y 2 m de profundidad, cuya excavación fue ejecutada manualmente, por capas de 0.5 m de espesor (Ver Figuras 5.3 y 5.4). La primera capa, más superficial, se adoptó como la superficie o capa activa del lecho, y las tres restantes como las capas de sustrato.

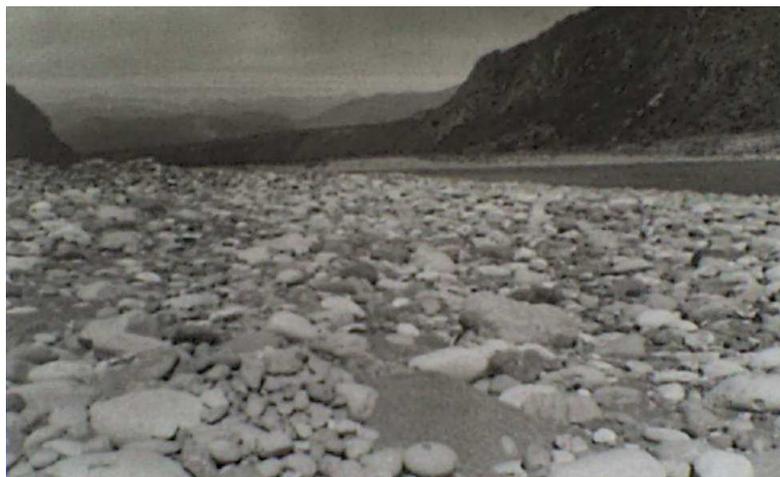


Figura 5.3: Ubicación pozo de muestreo N°1 (Ribera izquierda del Río Maule año 1981).



Figura 5.4: Foto de la excavación del Pozo N°1, año 1981

La información obtenida del Pozo N°1 (ubicado a 300 m del emplazamiento del muro) se considera representativa de la zona más cercana al muro, en una longitud de aproximadamente 1 km, que corresponde a la zona en estudio. La información obtenida de este pozo de muestreo se presenta en las Tablas 5.2, 5.3 y 5.4 y Figuras 5.5 y 5.6.

Tabla 5-2: Características de los sedimentos obtenidos en el Pozo N°1, año 1981

Propiedad	Valor	Unidad
Porosidad	0.22	-
Peso Específico	2.61	[Ton/m ³]

Tabla 5-3: Granulometría de la superficie del lecho y capas del sustrato en el Pozo N°1, año 1981

	Superficie: Capa 1		Sustrato: Capa 2		Sustrato: Capa 3		Sustrato: Capa 4	
	Espesor: 0.5 [m]		Espesor: 0.5 [m]		Espesor: 0.5 [m]		Espesor: 0.5 [m]	
	ds [m]	% mas fino	ds [m]	% mas fino	ds [m]	% mas fino	ds [m]	% mas fino
1	0.5	100.00	0.5	100.00	0.5	100.00	0.5	100.00
2	0.2	69.90	0.2	91.10	0.2	80.60	0.2	88.80
3	0.128	57.60	0.128	75.50	0.128	68.70	0.128	79.40
4	0.1	49.90	0.1	67.00	0.1	60.90	0.1	65.60
5	0.0684	42.53	0.0684	55.24	0.0684	48.96	0.0684	56.03
6	0.0468	35.21	0.0468	46.51	0.0468	40.69	0.0468	47.66
7	0.032	29.80	0.032	40.40	0.032	35.00	0.032	41.60
8	0.012	20.20	0.012	30.40	0.012	25.10	0.012	31.00
9	0.01	19.20	0.01	29.40	0.01	24.20	0.01	29.80
10	0.00336	13.60	0.00336	24.80	0.00336	17.70	0.00336	24.70
11	0.00162	11.20	0.00162	24.80	0.00162	12.90	0.00162	19.20
12	0.000707	6.60	0.000707	11.90	0.000707	4.30	0.000707	8.20
13	0.0005	5.10	0.0005	8.70	0.0005	2.20	0.0005	5.10
14	0.000354	3.60	0.000354	6.30	0.000354	1.20	0.000354	3.20
15	0.000210	1.90	0.00021	4.30	0.00021	0.40	0.00021	1.30
16	0.000162	1.05	0.000162	3.30	0.000162	0.00	0.000162	0.35
17	0.000147	0.74	0.000147	2.93	0.000147	0.00	0.000147	0.00
18	0.000117	0.00	0.000117	2.06	0.000117	0.00	0.000117	0.00
19	0.000068	0.00	0.000068	0.00	0.000068	0.00	0.000068	0.00

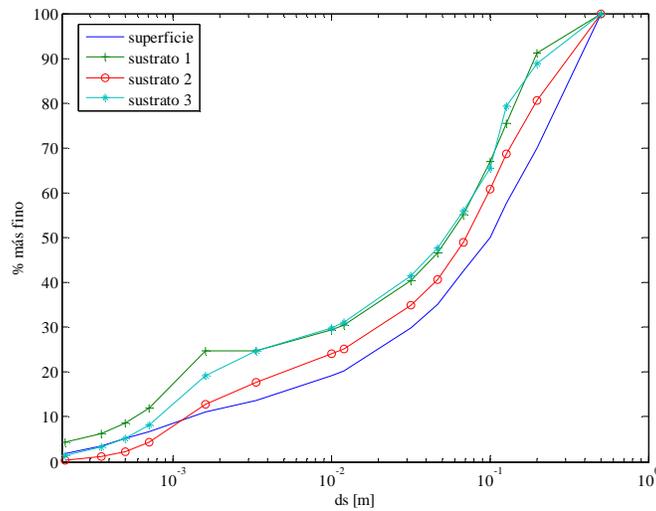


Figura 5.5: Curvas granulométricas de la superficie y capas de sustrato en el Pozo N°1, año 1981

Tabla 5-4: Fracciones granulométricas inicial de la superficie del lecho y capas del sustrato en el Pozo N°1, año 1981

	Superficie: Capa 1		Sustrato: Capa 2		Sustrato: Capa 3		Sustrato: Capa 4	
	Espesor: 0.5 [m]		Espesor: 0.5 [m]		Espesor: 0.5 [m]		Espesor: 0.5 [m]	
	di [m]	Fij	di [m]	Fij	di [m]	Fij	di [m]	Fij
1	0.32	0.301	0.32	0.089	0.32	0.194	0.32	0.112
2	0.16	0.123	0.16	0.156	0.16	0.119	0.16	0.094
3	0.113	0.077	0.113	0.085	0.113	0.078	0.11	0.138
4	0.083	0.074	0.083	0.118	0.083	0.119	0.083	0.096
5	0.057	0.073	0.057	0.087	0.057	0.083	0.057	0.084
6	0.039	0.054	0.039	0.061	0.039	0.057	0.039	0.061
7	0.020	0.096	0.020	0.100	0.020	0.099	0.020	0.106
8	0.0110	0.010	0.0110	0.010	0.0110	0.009	0.011	0.012
9	0.0058	0.056	0.0058	0.046	0.0058	0.065	0.0058	0.051
10	0.0023	0.024	0.0023	0.000	0.0023	0.048	0.0023	0.055
11	0.00107	0.046	0.00107	0.129	0.00107	0.086	0.0011	0.110
12	0.00059	0.015	0.00059	0.032	0.00059	0.021	0.00059	0.031
13	0.00042	0.015	0.00042	0.024	0.00042	0.010	0.00042	0.019
14	0.00027	0.017	0.00027	0.020	0.00027	0.008	0.00027	0.019
15	0.00018	0.009	0.00018	0.010	0.00018	0.004	0.00018	0.010
16	0.00015	0.003	0.00015	0.004	0.00015	0.000	0.00015	0.003
17	0.000131	0.007	0.000131	0.009	0.000131	0.000	0.00013	0.000
18	0.000089	0.000	0.000089	0.021	0.000089	0.000	0.000089	0.000

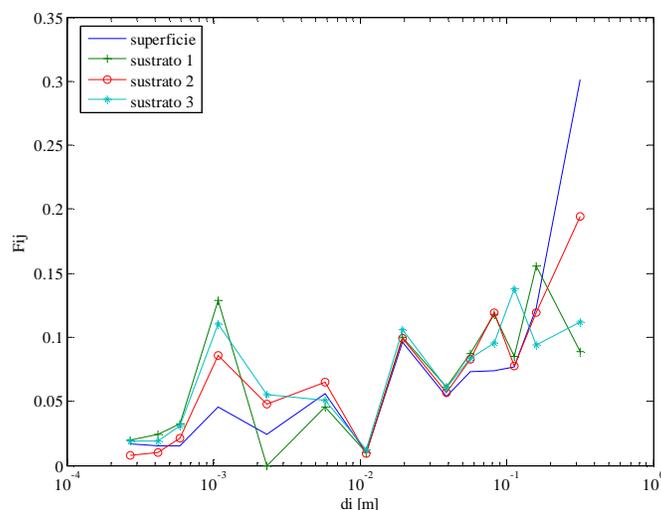


Figura 5.6: Fracciones granulométricas de la superficie y capas de sustrato en el Pozo N°1, año 1981.

5.1.1.3 Información hidrológica 1985-2007

La información hidrológica adecuada para la aplicación del modelo, corresponde a caudales medios diarios, debido a que pequeñas variaciones de caudales producen diferencias de magnitudes mayores en las capacidades de arrastre.

Los escurrimientos en el lecho, en la zona que se considera en la aplicación, se deben exclusivamente a los vertimientos del embalse en periodos de crecidas. Así se contó con los registros de los vertimientos del embalse desde el año 1985, cuando éste entró en operación,

hasta diciembre del 2007. En la Tabla 5.5 se presentan los vertimientos mínimos y máximos del Embalse Colbún para el periodo considerado.

Tabla 5-5: Vertimientos Embalse Colbún

Año	Descarga media anual [m³/s]	Mínima descarga [m³/s]	Máxima descarga [m³/s]
1985	4.940	0.000	197.000
1986	62.047	0.000	3320.000
1987	35.622	0.000	550.000
1988	3.195	0.000	210.000
1989	No hay registro		
1990	No hay registro		
1991	58.947	0.000	2733.000
1992	53.085	0.000	664.250
1993	10.823	0.000	1203.250
1994	10.477	0.000	1040.420
1995	16.230	0.000	229.230
1996	0.000	0.000	0.000
1997	74.474	0.000	987.500
1998	0.810	0.000	50.000
1999	5.511	0.000	221.700
2000	30.822	0.000	2168.800
2001	22.990	0.000	982.200
2002	83.498	0.000	2329.920
2003	5.120	0.000	270.750
2004	0.000	0.000	0.000
2005	40.444	0.000	1073.960
2006	33.390	0.000	1236.460
2007	0.000	0.000	0.000

La estadística completa de los vertimientos realizados por el Embalse Colbún en el periodo 1985-2007, se encuentra en el anexo digital A-4.

5.1.1.4 Información hidráulica 1984

El coeficiente de Manning representativo del lecho se obtiene del documento “*Estudio de la degradación del Río Maule aguas abajo de la Presa Colbún*” (1984), donde se determina el coeficiente a partir de *coeficientes base y aditivos*, determinados a través de la relación de Strickler y de valores recomendados por literatura (Chow 1959). De esta forma, se asignó un valor representativo a cada subsección *Si*, en que se dividió cada perfil transversal. En la Tabla 5.6 se muestran los valores de los coeficientes en las subsecciones de cada perfil, y a modo de ejemplo se muestra en la Figura 5.7, las subsecciones consideradas en el perfil 140-A.

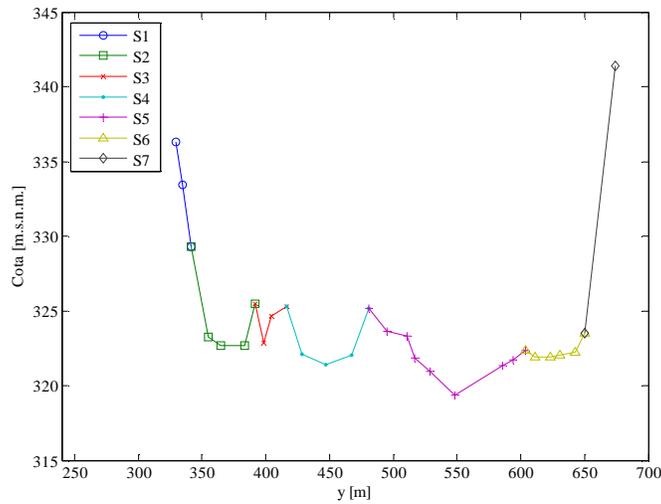


Figura 5.7: Subsecciones del perfil 140-A

Tabla 5-6: Coeficiente de Manning en cada subsección Si, de cada perfil de la sección considerada

Perfil	Subsección						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
141-A	0.080	0.040	0.045	0.045	0.040	0.045	0.080
140	0.060	0.040	0.060	0.080	-	-	-
140-A	0.060	0.040	0.060	0.080	-	-	-
139	0.060	0.040	0.060	0.045	0.080	-	-
139-A	0.045	0.040	0.060	0.045	0.045	0.080	-
138	0.040	0.040	0.045	0.045	0.040	0.080	-
138-A	0.060	0.040	0.045	0.040	0.080	-	-

Para determinar el número de Manning representativo de la sección, se determinó un promedio ponderado de los valores de la tabla anterior, considerando el perímetro mojado de la sección del lecho que representan. Los valores obtenidos se presentan en la Tabla 5.7.

Tabla 5-7: Coeficiente de Manning representativo de cada perfil

Perfil	n de Manning
141-A	0.047
140	0.052
140-A	0.042
139	0.049
139-A	0.045
138	0.048
138-A	0.054

5.1.1.5 Situación del lecho del Río Maule aguas abajo de Presa Colbún en el año 2007

La empresa Colbún S.A., actual controladora de la Central Hidroeléctrica Colbún, realizó en Diciembre del 2007 un levantamiento topográfico de la zona del Río Maule obteniendo así información sobre la situación actual del lecho del cauce. El levantamiento contempló la medición de 8 perfiles transversales correspondientes a los medidos en 1984 y que están disponibles en la actualidad, que además definen la situación inicial del lecho para esta simulación. En la Figura 5.8 se presenta la vista en planta del levantamiento realizado por Colbún S.A, cuyo detalle se puede encontrar en el anexo digital A-4.

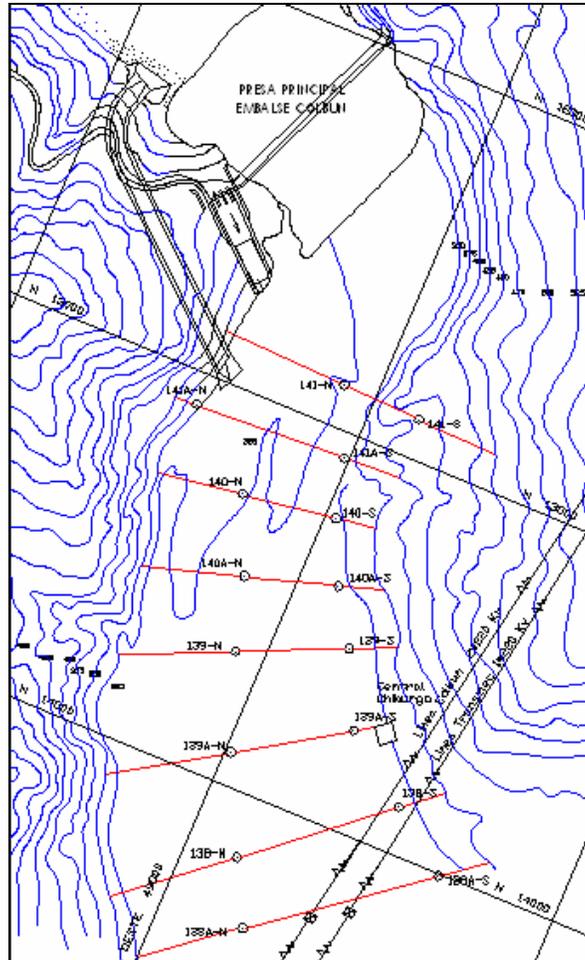
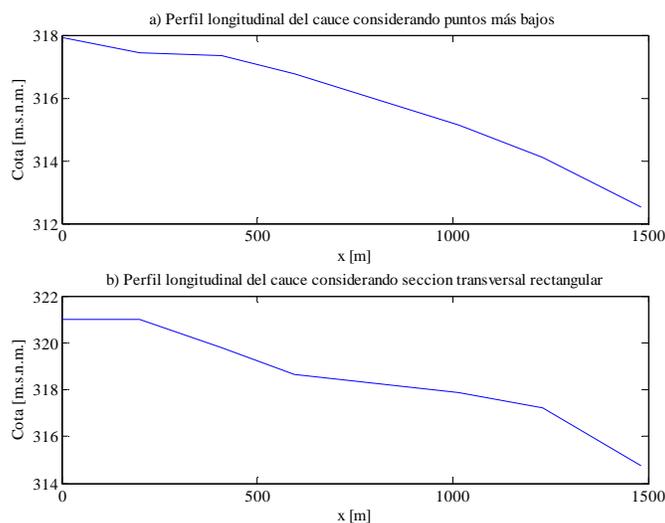


Figura 5.8: Vista en planta de levantamiento topográfico aguas abajo de Presa Colbún, Diciembre 2007.

En la Figura 5.9 se muestra el perfil longitudinal del cauce aguas abajo de la presa en Diciembre del 2007, considerando los puntos más bajos de cada sección y el generado por la aproximación de las secciones a formas rectangulares. Al comparar los perfiles se puede ver que la aproximación de las secciones transversales a secciones rectangulares tiende a elevar la cota del perfil, lo cual podría ser determinante a la hora de hacer comparaciones con los resultados obtenidos en la simulación.



**Figura 5.9: a) Perfil longitudinal que considera los puntos más bajos de las secciones medidas, año 2007.
b) Perfil longitudinal que considera sección transversal rectangular, año 2007.**

En la Figura 5.10 se puede ver la comparación del lecho del Río Maule en el inicio de la construcción de la presa (1984) y luego de 22 años de operación de ésta (periodo 1985-2007), considerando la definición por los puntos más bajos de cada sección y el generado por la aproximación de la secciones a una forma rectangular. Se aprecia, en ambos casos, degradación del cauce en el extremo de aguas arriba, zona más cercana a la presa y depositación de material en la zona central del cauce, deduciéndose que a partir de la construcción de la presa, el cauce busca el equilibrio disminuyendo la pendiente. Esto se puede ver como una forma que tiene el cauce de disminuir el gasto sólido, y así equilibrar el desbalance frente a una condición de borde en su extremo de aguas arriba, de gasto sólido afluente nulo.

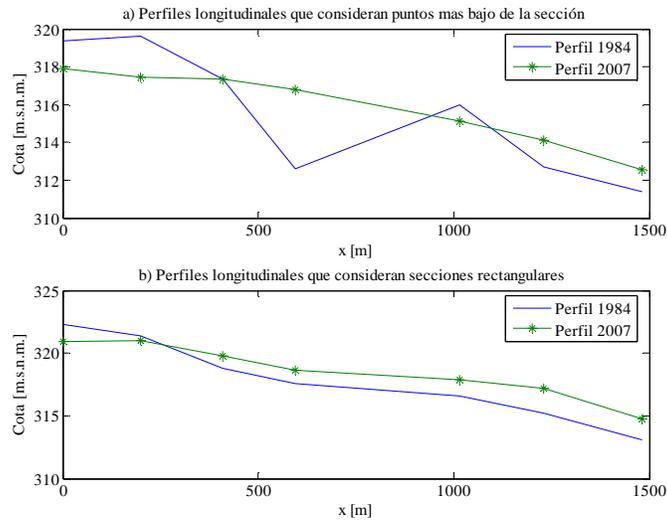


Figura 5.10: a) Comparación de que considera los puntos más bajos de las secciones medidas. b) Perfil longitudinal que considera sección transversal longitudinal.

Analizando las secciones transversales medidas en 1984 y comparándolas con las medidas en Diciembre del 2007, se puede observar en el perfil 141, la efectiva degradación del cauce. Sin embargo, para los perfiles de aguas abajo es difícil determinar la situación a simple vista, debido a que en todos los perfiles aguas abajo del 141, se observa degradación en uno de los costados de la sección, y depositación en el lado opuesto. Los perfiles 140-A y 139 presentan degradación en su zona izquierda y depositación en la derecha. A partir del perfil 139-A cambia la situación, presentando degradación en la zona derecha y depositación en la zona izquierda. Este fenómeno se explica básicamente por la presencia de corrientes secundarias generadas por las curvas que presenta el cauce en la zona de análisis. En general, las masas de agua cercanas a la superficie libre tienen mayores velocidades que las ubicadas a mayor profundidad, por lo que en presencia de curvas, las primeras tienden a desplazarse hacia el lado exterior de la curva debido a la fuerza centrífuga, empujando las segundas (más lentas y profundas) hacia el lado interior. Por lo tanto, se producen corrientes transversales de fondo que son capaces de arrastrar los sedimentos hacia el costado interior de la curva, explicándose así la situación depositación y degradación presentada en el cauce, que por lo demás genera variaciones importantes del ancho del cauce. Lo descrito puede observarse en el conjunto de imágenes de la Figura 5.11 donde aparecen los perfiles transversales medidos en los años 1984 y 2007, a excepción del perfil 141-A, el que no fue medido en forma completa en la reciente campaña de terreno realizada por Colbún S.A..

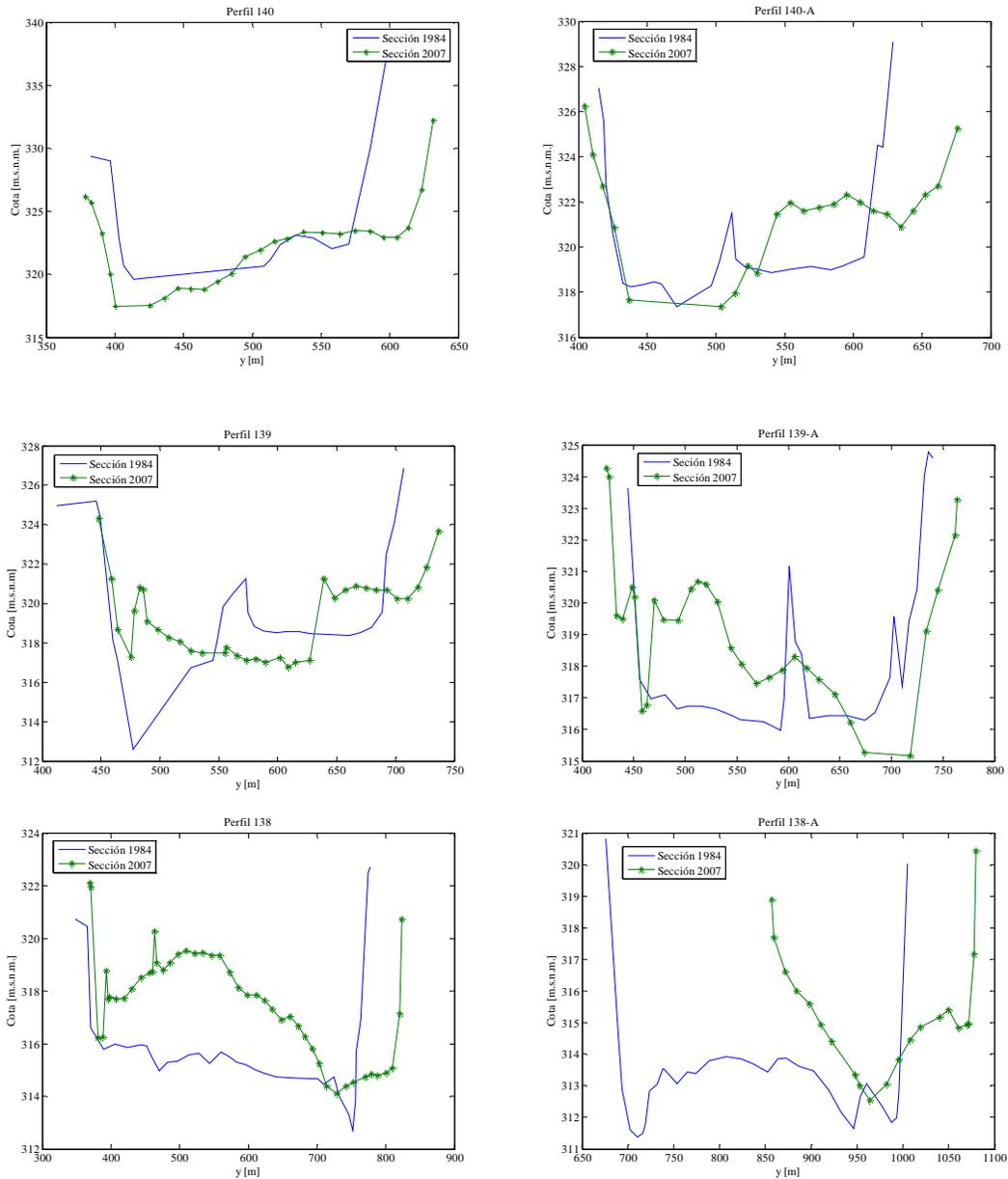


Figura 5.11: Comparación de secciones transversales del cauce en 1984 y 2007.

A partir de lo observado, se puede decir que el cauce durante 22 años de operación de la presa Colbún, no sólo presentó fenómenos de evolución de su lecho debido a un desbalance longitudinal de gasto sólido, sino que además presentó un fenómeno de erosión transversal de sus riberas causado por la curvatura de su morfología.

En la Tabla 5.7 se muestra un balance de volúmenes netos de degradación o depositación de material que se experimenta en cada uno de los perfiles mostrados en la Figura 5.11. Se consideró en este balance una longitud de influencia del perfil considerando, que corresponde a la mitad de la distancia que lo separa de los perfiles contiguos. De esta formase obtuvo que para los perfiles 140 y 140-A el cauce experimento una clara degradación, sin embargo en los perfiles 139 al 138-A se experimentó depositación de

material, que es mas notoria en los perfiles 138 y 138-A. Sumando los valores calculados, se obtiene que el cauce experimentó un volumen neto de depositación aproximado de 48000 m³. Esto no corresponde a una valor esperado, ya que dada la condición de gasto sólido afluente nulo, se debería haber experimentado una degradación neta en el cauce, donde los volúmenes depositados solo podrían provenir de degradación del cauce aguas arriba. Puede haber ocurrido que los perfiles considerados como representativos del cauce no sean adecuados, y se necesite una extensión transversal mayor que refleje en forma integral la diferencia entre la topografía medida en 1984 y 2007.

Tabla 5-8: Balance de de volumen en perfiles

Perfil	Fenómeno experimentado	Longitud de influencia	Diferencia de área entre perfiles	Volumen degradado o agradado en la zona de influencia del perfil
		[m]	[m ²]	[m ³]
140	Degradación	205.00	-767.00	-157235
140-A	Degradación	197.50	-123.00	-24293
139	Agradación o depositación de material	303.00	69.00	20907
139-A	Agradación o depositación de material	318.00	10.00	3180
138	Agradación o depositación de material	232.00	570.00	132240
138-A	Agradación o depositación de material	124.50	590.00	110183

Los planos de los perfiles medidos y el informe del levantamiento se encuentra en el anexo digital A-5.

5.2 Aplicación del modelo al cauce del Río Maule

5.2.1 Consideraciones especiales y simplificaciones adoptadas

La aplicación del modelo al cauce del Río Maule, considera el periodo de simulación comprendido entre 1985 al 2007, en el cual se cuenta con información suficiente al inicio del periodo e información al final de éste para verificar la evolución que experimentó el lecho. De esta forma se tratar de comparar ésta evolución medida con la simulada a través de *Mossem*. Para la simulación se considera una sección transversal rectangular del cauce, debido a que la expresión que determina la evolución del fondo del lecho y balance de los gastos sólidos en el modelo, es exacta para aquella situación. En la Figura 5.12 se muestra la adaptación del perfil 141-A a una sección transversal rectangular, donde se considera que la línea que define la base de la sección, corresponde a aquella que genera secciones de corte y relleno de igual área en el perfil real.

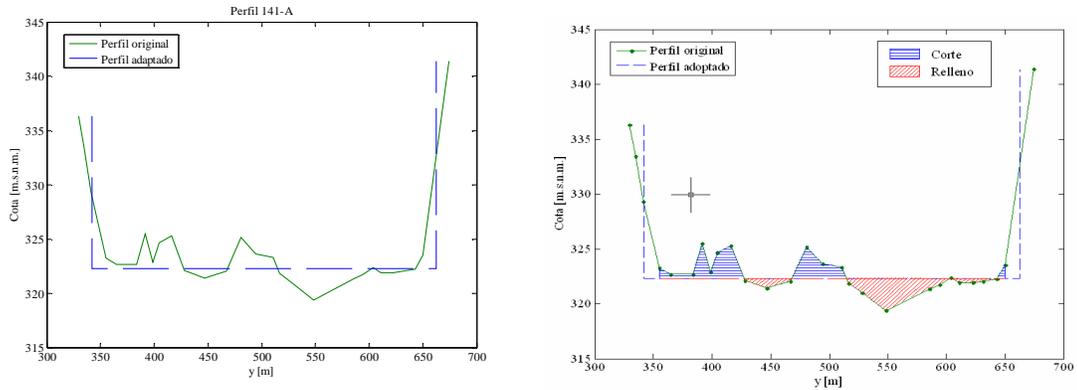


Figura 5.12: Ejemplo de criterio para la adaptación de secciones transversales del lecho (Perfil 141-A)

En la Figura 5.1, correspondiente a la vista en planta de los perfiles del cauce, aparecen 11 perfiles transversales en la zona de análisis considerada. De éstos, sólo 7 se consideran en la simulación, (141-A, 140, 140-A, 139, 139-A, 138 y 138-A), cubriendo 1.5 km de cauce. El resto de los perfiles de aguas arriba, no se encuentran disponibles en la actualidad, sin embargo, de fotografías aéreas realizadas al cauce, se puede observar que la zona cubierta por aquellos perfiles presenta una poza que corresponde a la fosa de socavación generada por la operación del vertedero, no representable por el modelo (ver Figura 5.13), y que además se presume no debe generar una cantidad importante de gasto sólido, pudiendo asignar la condición de borde de gasto sólido nulo al perfil 141-A, y considerarlo como posición del nodo inicial $x = 0$ m.



Figura 5.13: Vista general cauce Río Maule aguas debajo de la Presa Colbún.
 * Las fotografías aéreas disponibles del cauce se encuentran en el anexo digital A-6.

De la figura anterior, en el sector aguas abajo de la presa, se pueden distinguir claramente el cauce principal y las áreas de inundación de éste. Estas áreas son bastante amplias, las que pueden facilitar la movilidad transversal en el tiempo del cauce principal, experimentándose una evolución importante tanto en el ancho del cauce como en las mismas zonas de inundación.

En el conjunto de imágenes de la Figura 5.15, se muestran los perfiles considerados en la simulación, y su adaptación a secciones transversales rectangulares según el criterio antes explicado. Estos perfiles adaptados generan un nuevo perfil longitudinal del lecho, el que se

muestra en la Figura 5.14. De esta forma, en la Tabla 5.8 se presenta un resumen con las características de la topografía adaptada del lecho.

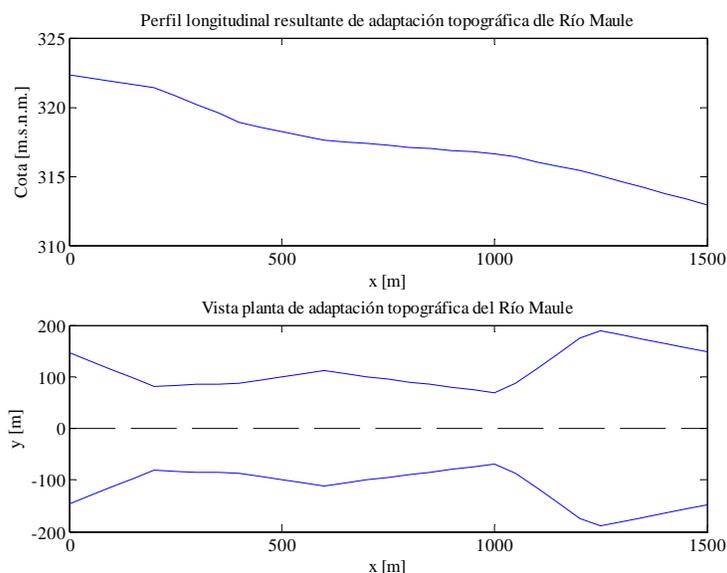
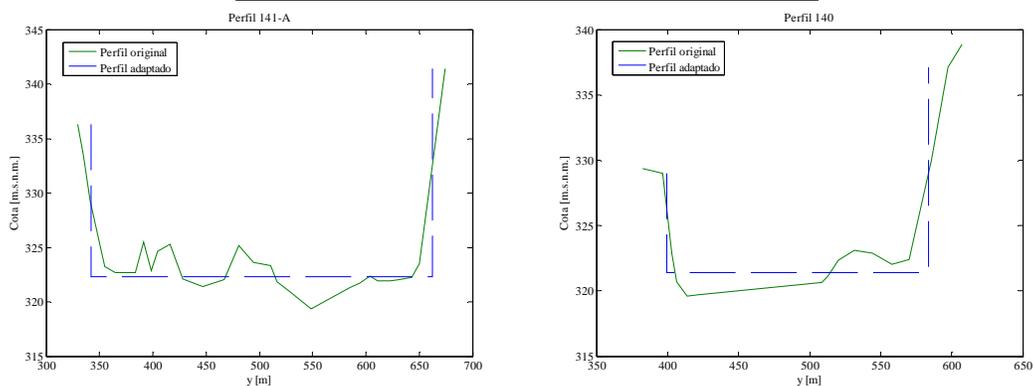


Figura 5.14: Perfil longitudinal y ancho de secciones adaptadas del lecho Río Maule, año 1984

Tabla 5-9: Topografía adaptada a sección rectangular del lecho Río Maule 1984

Perfil	Ancho basal rectangular [m]	Cota base [m.s.n.m.]	Dist. Acumulada [m]
141-A	320.170	322.300	0
140	183.980	321.420	200
140-A	194.960	318.800	410
139	244.670	317.600	595
139-A	146.575	316.610	1016
138	397.435	315.190	1231
138-A	317.570	313.080	1481



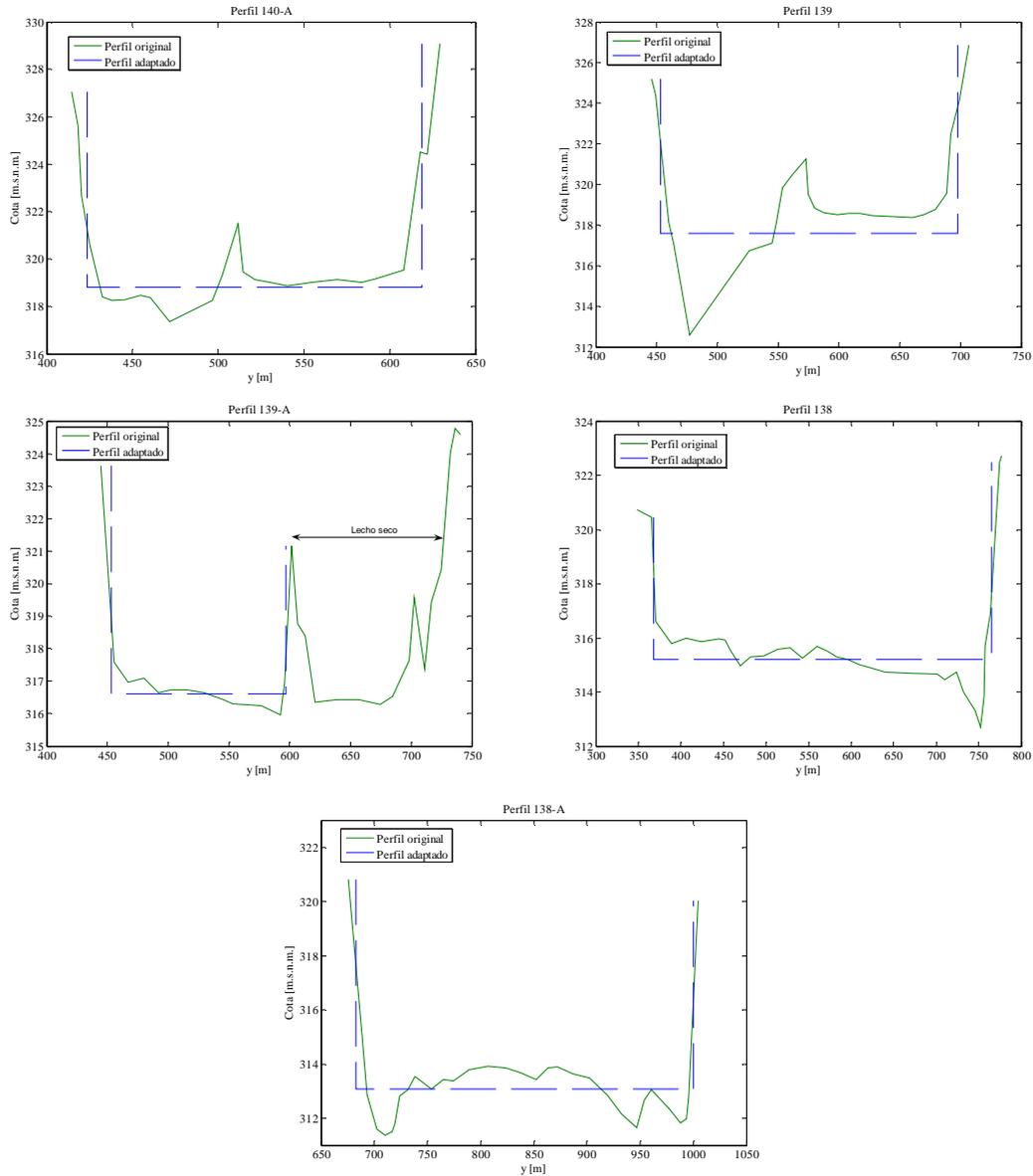


Figura 5.15: Adaptación de perfiles transversales del cauce, año 1984

La secuencia de vertimientos del embalse desde 1985 hasta 2007 tiene una serie de periodos en los cuales no hay vertimientos, lo cual no puede ser representado por el modelo. Por esto, de la serie completa, se eliminaron todos los vertimientos nulos y aquellos menores a 100 [m³/s], debido a que esta medida reduce en forma notable el tiempo de simulación y evita posibles problemas en el modulo de *Mossem* encargado de simular el flujo, debido a las despreciables áreas de escurrimiento que generan dichos caudales. Además, se estima que el aporte de gasto sólido generado por caudales menores al valor mencionado, no tiene un impacto apreciable en la evolución del lecho. De esta forma, considerando lo anterior, se introducen al modelo 627 días de simulación, que equivalen en tiempo real a 8030 días, es decir, 22 años.

Se consideró como condición de borde en el extremo de aguas abajo, que la altura de escurrimiento en el último nodo corresponde a la altura normal, determinada a través del caudal de descarga correspondiente y de la pendiente original del perfil en el extremo de aguas abajo (año 1984), que en este caso corresponde a 0.84 %.

Finalmente, la aplicación consideró un total de 31 nodos equidistantes que cubren una longitud de 1500 [m], obteniendo el ancho y cota correspondiente a cada uno, a través de interpolación lineal de los perfiles medidos. Además, para el cálculo de los gastos sólidos se consideró la relación de Wilcock y Crowe (2003).

5.2.2 Resultados de la simulación

En la simulación se consideraron tres formas de representar la evolución del lecho:

- Evolución del lecho con evolución granulométrica sin restricción.
- Evolución del lecho con evolución granulométrica restringida a variaciones del lecho, en el intervalo de tiempo de avance, superiores al 10% del tamaño de la partícula del lecho más pequeña.
- Evolución del lecho con granulometría fija en el tiempo (sin evolución).

De éstas, sólo las dos primeras se muestran en detalle a continuación, presentándose el resultado de la última sólo como comparación a los otros dos resultados obtenidos..

5.2.2.1 Resultados de evolución del lecho 1985-2007

En la Figura 5.16 se presenta la evolución del lecho en 22 años, considerando evolución granulométrica sin restricción. Se puede ver que a partir de 1.44 años de simulación el modelo comienza a generar contrapendientes (pendientes positivas) como las mostradas en Figura 4.30, Sección 4.2, donde se simuló una situación similar, pero sin considerar evolución granulométrica. Sin embargo, las zonas de contrapendiente no son generadas en el extremo de aguas arriba, como en el caso mostrado en la mencionada, sino que se generan en los puntos centrales del cauce, donde además se concentra la mayor degradación.

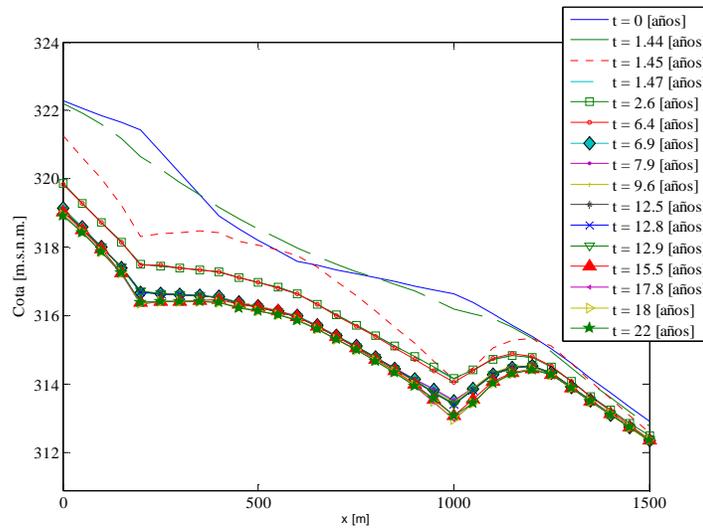


Figura 5.16: Resultado evolución sin restricción de evolución granulométrica

Analizando la evolución que determina el modelo, se puede ver que en los primeros 1.44 años, el cauce tiende a formar un perfil longitudinal uniforme, sin puntos altos ni bajos, a través de una única pendiente, que parece ser el promedio de las formadas en el lecho original ($t = 0$ años). A partir de ese momento, el cauce experimenta una degradación abrupta, donde se aprecia la formación de zonas con contrapendiente (pendiente positiva). Entre los años 1.44 y 1.47 se experimentan las mayores magnitudes de degradación, debido a que entre ese periodo, exactamente el 19 de Junio de 1986, ocurre el máximo vertimiento del Embalse Colbún correspondiente a un caudal medio diario de $3320 \text{ m}^3/\text{s}$ (Máximo instantáneo de $5300 \text{ m}^3/\text{s}$), que corresponde a un máximo histórico. En el periodo de simulación se experimentan otros vertimientos de gran magnitud (del orden de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$), que corresponden también a las mayores degradaciones experimentadas, posteriores al año 1986. En la Figura 5.17 se presenta la estadística de los vertimientos de Junio de 1986.

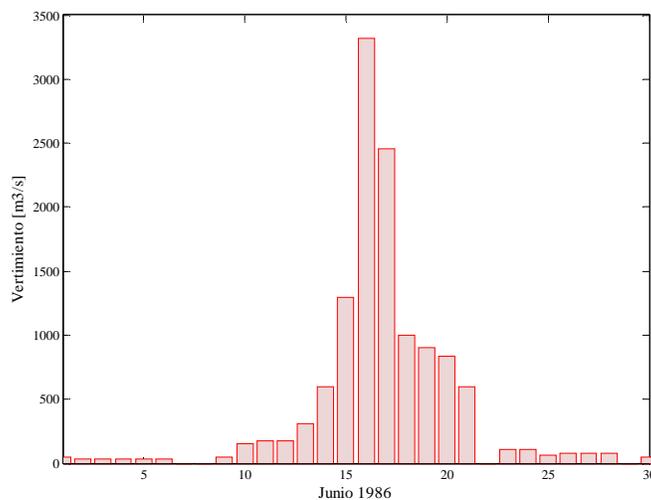


Figura 5.17: Vertimientos de Embalse Colbún correspondientes a Junio de 1986

Al comparar el perfil obtenido a través de la simulación, con el perfil real del 2007, generado por la aproximación de las secciones a formas rectangulares, se puede observar que difieren en gran magnitud, a tal nivel que en zonas donde en el perfil real adoptado manifiesta depositación el modelo entrega resultados de degradación, que llegan a 5 m (Ver Figura 5.18). Ahora, no hay que olvidar que en esta comparación, el perfil real medido en Diciembre del 2007, ha sido adaptado aproximando sus secciones transversales a formas rectangulares, según el mismo criterio utilizado en los perfiles medidos en 1984 (ver Figura 5.12). Esto es relevante ya que en los perfiles del 2007 se observa la presencia de un fenómeno de arrastre transversal, es decir, el lecho experimenta evolución bidimensional, que obviamente no es representable por este modelo unidimensional; por lo tanto, el perfil real adaptado no sería comparable con el obtenido a través de la simulación, pues provienen de fenómenos de transportes diferentes.

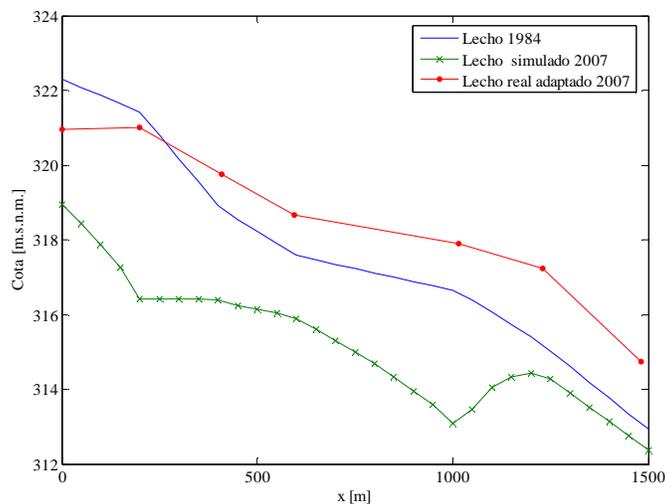


Figura 5.18: Comparación situación simulada (sin restricción en evolución granulométrica) y real, considerando perfil generado por adaptación de secciones transversales a rectangular.

Al comparar el perfil simulado con el medido en Diciembre del 2007, considerando los puntos de menor cota de cada perfil, se observa que ambos manifiestan degradación del lecho, pero en distinta magnitud. En los extremos de aguas arriba y aguas abajo, el perfil medido manifiesta una mayor degradación, aunque en los últimos nodos, la cota simulada y medida prácticamente coincide. En la zona central los resultados difieren en mayor medida, en especial en aquellos puntos donde se concentra la degradación simulada (zonas de contrapendiente), la cual es mayor a la real. Lo mencionado puede ser observado en la Figura 5.19.

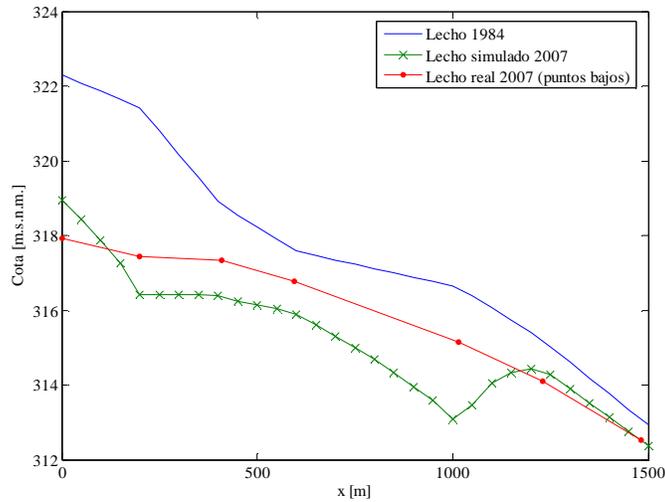


Figura 5.19: Comparación situación simulada (sin restricción en evolución granulométrica) y real, considerando perfil generado por puntos bajos de las secciones.

Los resultados de la evolución del lecho obtenidos a través del modelo, considerando la evolución restringida de la granulometría del lecho, se presentan en la Figura 5.20. Al igual que en el caso anterior, donde no se considera restricción en la evolución de la granulometría, la mayor degradación se experimenta en los años de simulación 1.44 y 1.47, pero en mayor magnitud, alcanzando valores de 5.5 m a los 22 años, respecto al perfil original de 1984.

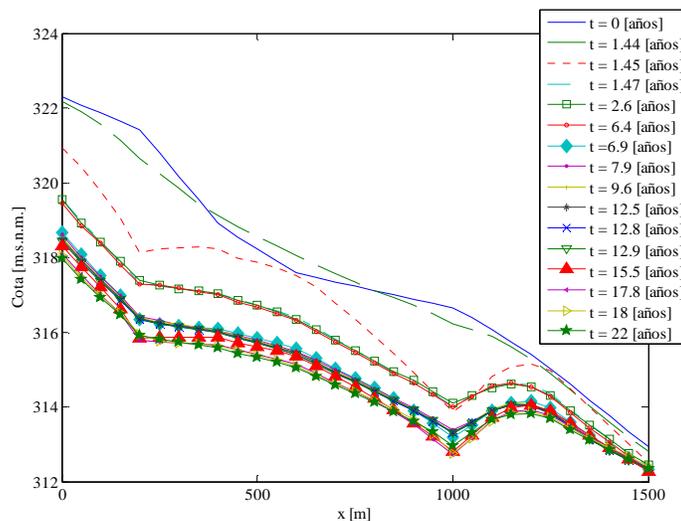


Figura 5.20: Resultado evolución con restricción de evolución granulométrica

Nuevamente se compara el perfil simulado con el real medido el 2007 pero adaptado a una sección rectangular, obteniendo el mismo resultado que en el caso anterior, pero siendo más notoria la diferencia entre lo simulado y lo medido.

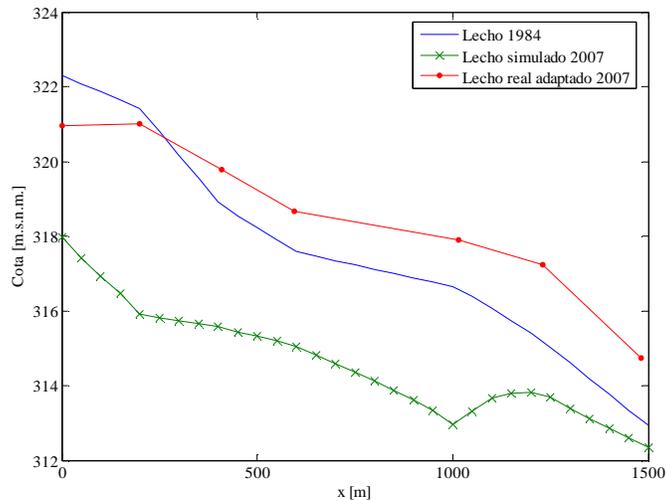


Figura 5.21: Comparación situación simulada (con restricción en evolución granulométrica) y real, generado por adaptación de secciones transversales a rectangular.

Si se compara el perfil simulado (con restricción en la evolución granulométrica del cauce) con el perfil real del año 2007 generado por los puntos más bajos de cada perfil, ambos coinciden en sus extremos de aguas arriba y aguas abajo, y difieren en menor medida en la zona central que al considerar la simulación sin restricción en la evolución de la granulometría (ver Figura 5.22).

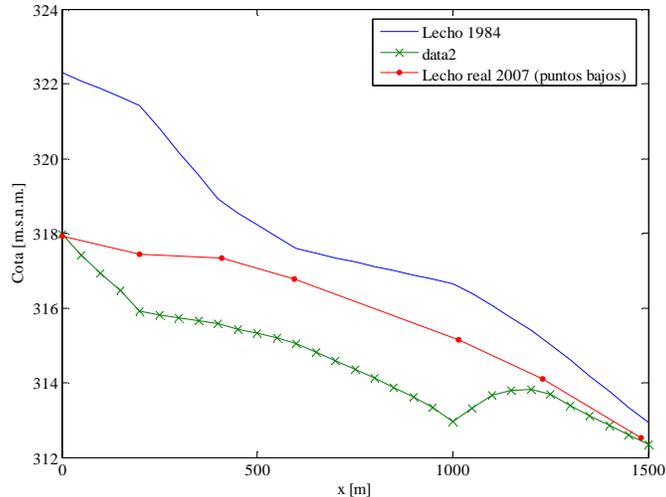


Figura 5.22: Comparación situación simulada (sin restricción en evolución granulométrica) y real, considerando perfil generado por puntos bajos de las secciones.

En la Figura 5.23 se presentan los tres perfiles simulados, considerando evolución de la granulometría sin restricción, restringida y sin evolución, donde se puede ver que al no considerar la evolución de la granulometría, la degradación del lecho es mucho mayor que las otras dos simulaciones. Los perfiles simulados que consideran la evolución de la granulometría son mucho más cercanos, aunque el caso en que la evolución granulométrica es restringida, la degradación es mayor, obteniendo diferencias de hasta 1 m. Si bien las

magnitudes de degradación son distintas en los tres casos, todos experimentan la formación de zonas con contrapendiente (pendiente positiva. Si se analiza la variación longitudinal del ancho del cauce y se comparara en paralelo con los perfiles resultantes de las tres simulaciones, comparación mostrada en la Figura 5.23, se observa que los puntos de concentración de degradación ocurren donde existe angostamiento del cauce, lo cual es razonable, ya que en esa zona se espera un mayor esfuerzo de corte, que se traduce en una mayor capacidad de arrastre. Ahora, en la zona de ensanche del cauce, se experimenta una degradación menor, lo cual explica la formación de la contrapendiente.

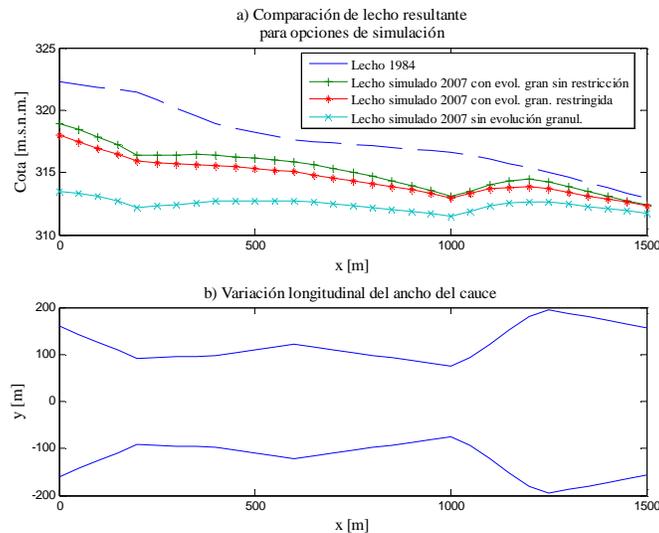


Figura 5.23: Lecho resultante con distintas consideraciones de simulación, y su relación con la variación longitudinal del ancho del cauce

5.2.2.2 Resultados evolución granulométrica del lecho 1985-2007

Al comparar los gastos sólidos obtenidos en las tres simulaciones, en los años de simulación 1.45, 15.55 y 22, se puede ver que éstos son mayores para el caso en que no se considera evolución de la granulometría, lo cual es esperable ya que no hay formación de coraza en la superficie, y siempre hay disponibilidad de partículas transportables en el lecho. Al inicio del periodo de simulación, año 1.44, cuando no hay presencia de máximos ni mínimos locales en los perfiles generados, se observa que el gasto sólido es creciente en la dirección del flujo en los tres casos simulados, situación esperable, debido a la condición de borde aguas arriba de gasto sólido nulo afluente al primer nodo. En el año de simulación 15.5 el gasto sólido presenta mínimos en las zonas de angostamiento del cauce, donde se presume que en ese tiempo no debería haber degradación, dado su condición de mínimo en el perfil de gasto sólido. Pese a los mínimos, igual se presenta una tendencia de aumento hacia aguas abajo, que se pierde en el último año de simulación. Es importante notar que los valores máximos y mínimos de gasto sólido no corresponden a zonas en las cuales se produce la máxima o mínima degradación, si no que más bien, corresponden a zonas donde existe equilibrio en los gastos sólidos que entran y salen del nodo, no generándose degradación en ese punto, en ese intervalo de tiempo.

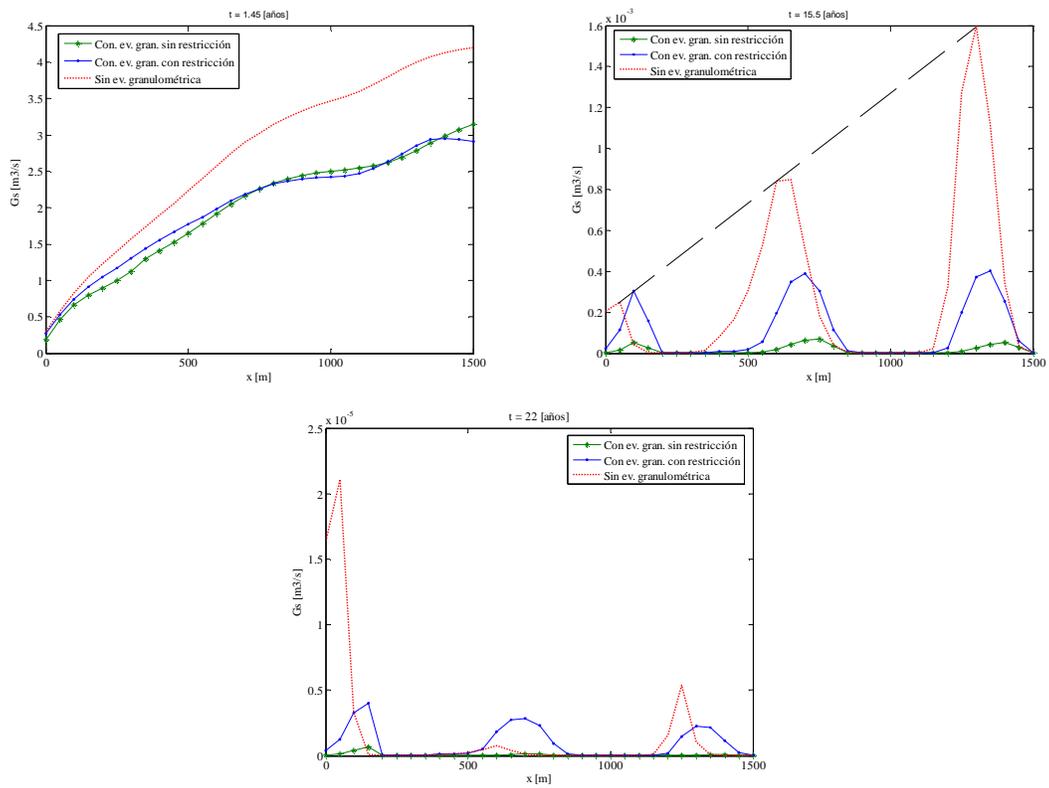


Figura 5.24: Comparación gastos sólidos para los años de simulación 1.44, 15.5 y 22

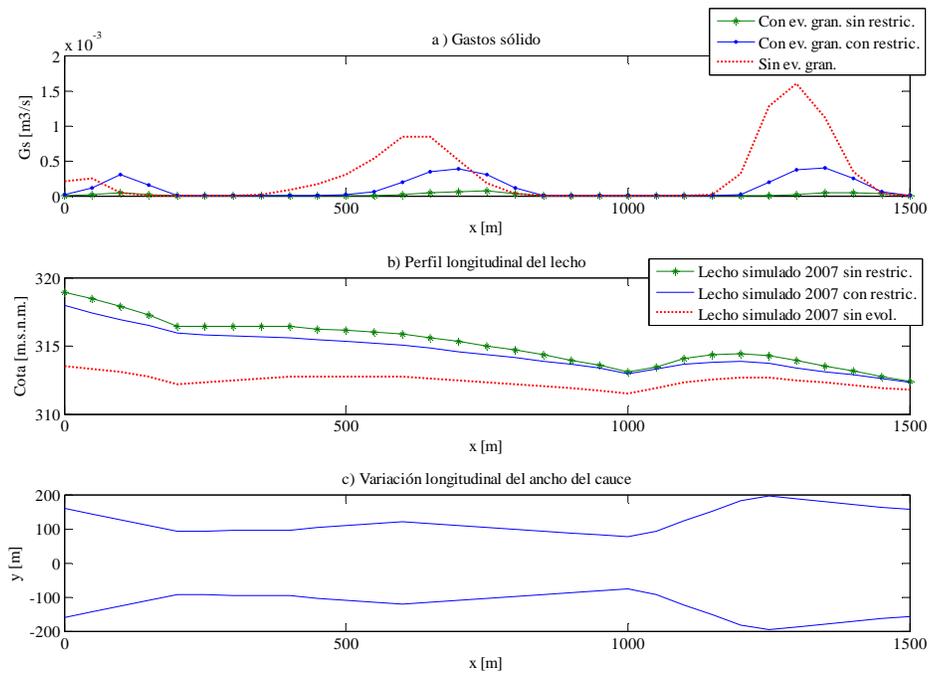


Figura 5.25: Gasto sólido y su relación con el perfil longitudinal y variación longitudinal con el ancho del cauce.

De la Figura 5.25 se puede ver claramente que la formación de zonas de contrapendiente se debe a la presencia de secciones de angostamiento en el cauce, lo cual hace pensar que la aproximación de las secciones a formas rectangulares no fue la adecuada y podría ser la causa de las diferencias obtenidas entre lo simulado y medido en el año 2007. En la Figura 5.26 se muestra una comparación entre el ancho de las secciones consideradas en la simulación y las estimadas de las mediciones realizadas en el año 2007.

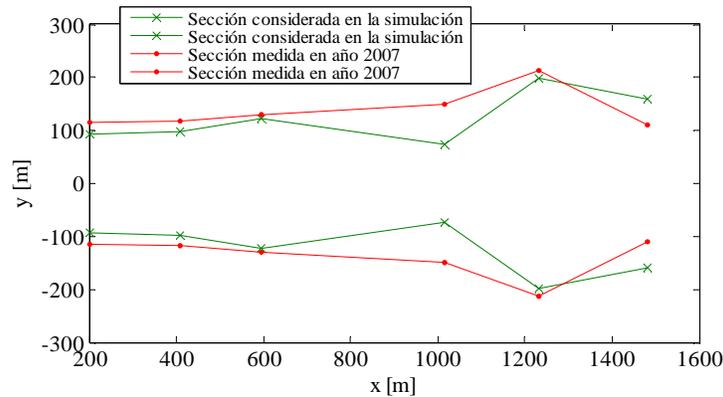


Figura 5.26: Comparación de ancho de secciones consideradas en la simulación y medidas en año 2007.

Se ve en la figura anterior la gran diferencia obtenida en el perfil 139-A ($x = 1000$ m), donde el ancho es mucho menor al valor real estimado, y por lo tanto sería la causa de las diferencias obtenidas. Ahora, si se analiza el perfil 139-A de la Figura 5.15, se puede ver que hay una sección del cauce que no se considera en la aproximación de la sección, debido a que en el documento original identificaban dicha zona como sector de acumulación de material, y por lo tanto no había escurrimiento. No hay que olvidar además, que el modelo es unidimensional y es incapaz de simular la degradación de las riberas del cauce, razón que podría justificar la diferencia entre los anchos considerados.

En las Figuras 5.27 y 5.28 se muestra la granulometría resultante de la simulación con y sin restricción. Se puede ver que en las dos simulaciones se obtiene acorazamiento a lo largo de todo el lecho considerado, disminuyendo su magnitud hacia aguas abajo. En los gráficos de las fracciones granulométricas se puede observar cómo disminuyen las fracciones de la mayoría de las partículas, a excepción de la partícula de mayor tamaño representativo, cuyo porcentaje en el lecho aumenta en más de un 30% en el caso de la simulación sin restricción de la evolución.

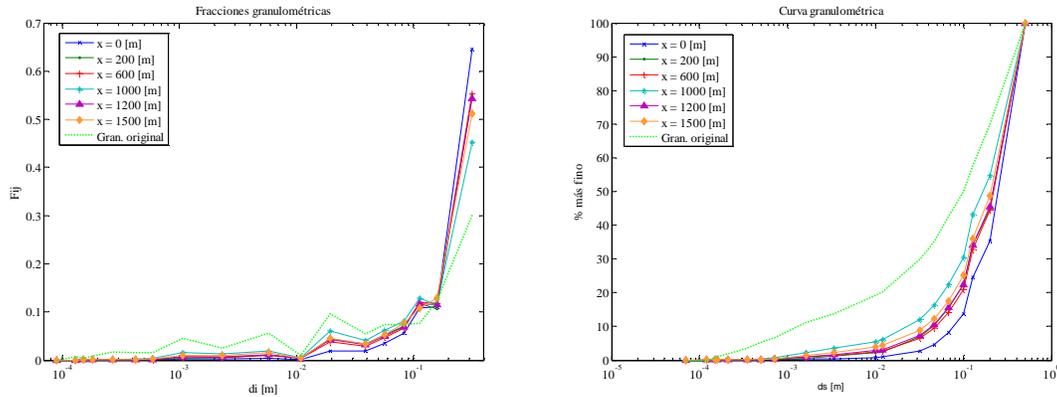


Figura 5.27: Granulometría de la superficie del lecho a lo largo de su eje longitudinal después de 22 años de simulación, considerando evolución granulométrica sin restricción.

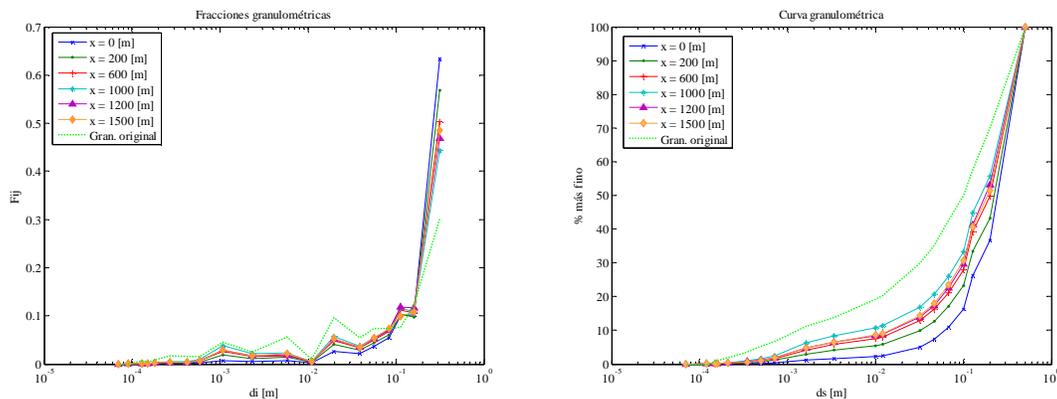


Figura 5.28: Granulometría de la superficie del lecho a lo largo de su eje longitudinal después de 22 años de simulación, considerando evolución granulométrica con restricción.

En las Figuras 5.39-5.34 se muestra la evolución temporal de la granulometría en tres puntos del cauce, $x = 0$ m, $x = 1000$ y $x = 1250$ m, correspondientes al inicio del tramo en simulación, máximo angostamiento y posterior ensanche. En $x = 0$ m y en $x = 1250$ m, para las dos simulaciones consideradas, se experimenta acorazamiento del lecho, siendo de gran intensidad en el año 1.45 de la simulación, cuando ocurre el máximo vertimiento del embalse. En $x = 1000$ [m], para el caso en el cual no hay restricción en la evolución de la granulometría, el acorazamiento también se experimenta, pero no se manifiesta el efecto de este vertimiento histórico, y al contrario de los otros dos puntos del cauce, en vez de aumentar el acorazamiento, aumenta la presencia de partículas de menor tamaño, lo cual puede corresponder a una mala representación de la evolución debido a que justamente en este punto, la resolución del flujo podría no ser del todo correcta. Para el mismo nodo, pero considerando el caso de la evolución restringida, el acorazamiento es sostenido, al igual que en los nodos de $x = 0$ [m] y $x = 22540$ [m], pero en menor magnitud. De esta forma, la restricción sobre la evolución de la granulometría permite controlar aquellas anomalías resultantes en la simulación, y además, según los resultados mostrados en las Figuras 5.22 y 5.19, es más conservadora a la hora de predecir la degradación. La mayor degradación resultante en la simulación que restringe la evolución de la granulometría, se debe a que al restringir la evolución, el acorazamiento es más lento y las partículas de menor tamaño están

disponibles en el lecho por más tiempo, siendo ésto no atribuible a un fenómeno físico del proceso de transporte. Ahora, si bien esto corresponde a una medida de control, su determinación no es arbitraria, ya que en el incremento de tiempo de la simulación la variación en el nivel del lecho debe ser de por lo menos el diámetro de la partícula de menor tamaño que salga o se incorpore a él. Sin embargo, esto no corresponde del todo a la restricción impuesta en el modelo, ya que para que la restricción sea consistente, también debería restringirse la evolución del nivel del lecho.

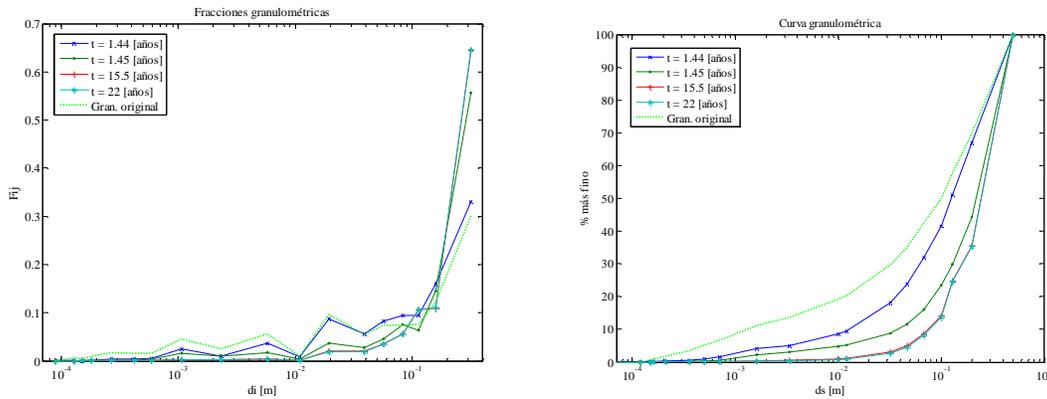


Figura 5.29: Evolución temporal de la granulometría en $x = 0$ [m] (Fracciones granulométricas y curvas granulométricas), considerando evolución granulométrica sin restricción.

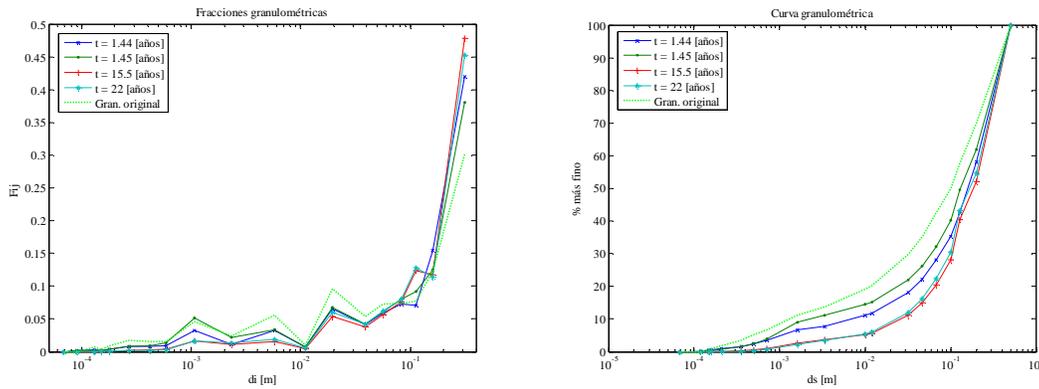


Figura 5.30: Evolución temporal de la granulometría en $x = 1000$ [m] (Fracciones granulométricas y curvas granulométricas), considerando evolución granulométrica sin restricción.

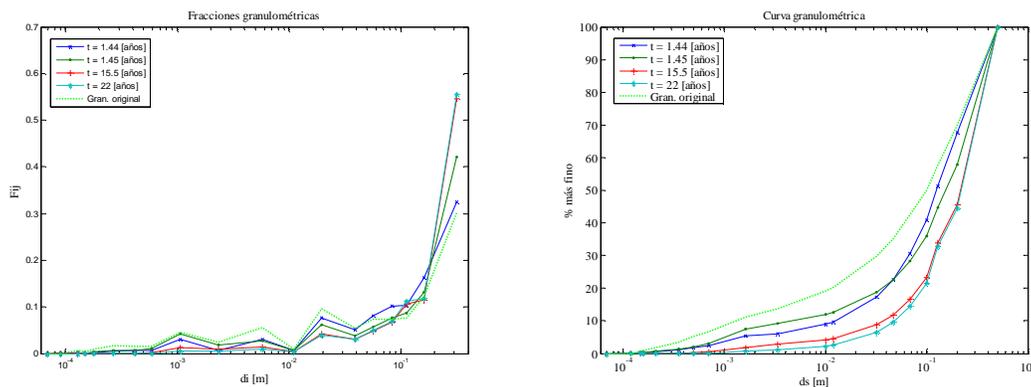


Figura 5.31: Evolución temporal de la granulometría en $x = 1250$ [m] (Fracciones granulométricas y curvas granulométricas), considerando evolución granulométrica sin restricción.

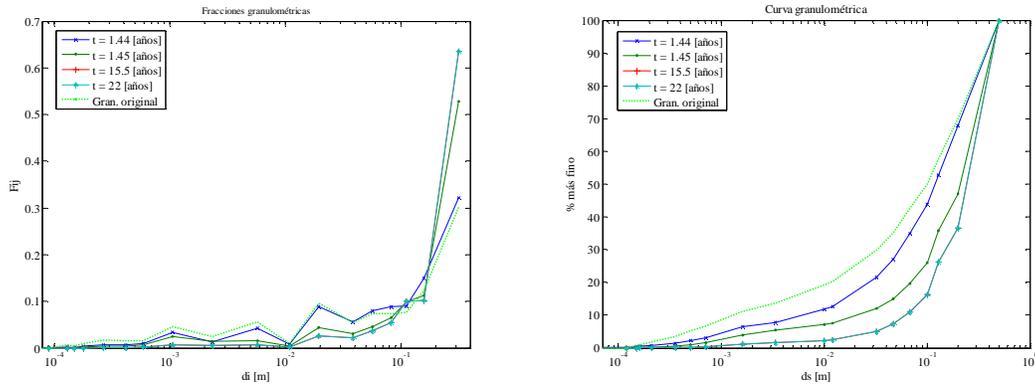


Figura 5.32: Evolución temporal de la granulometría en $x = 0$ [m] (Fracciones granulométricas y curvas granulométricas), considerando evolución granulométrica con restricción.

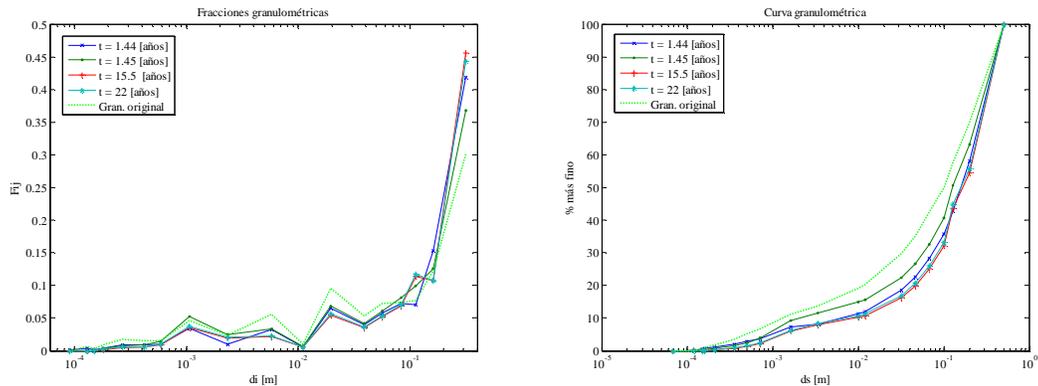


Figura 5.33: Evolución temporal de la granulometría en $x = 1000$ [m] (Fracciones granulométricas y curvas granulométricas), considerando evolución granulométrica con restricción.

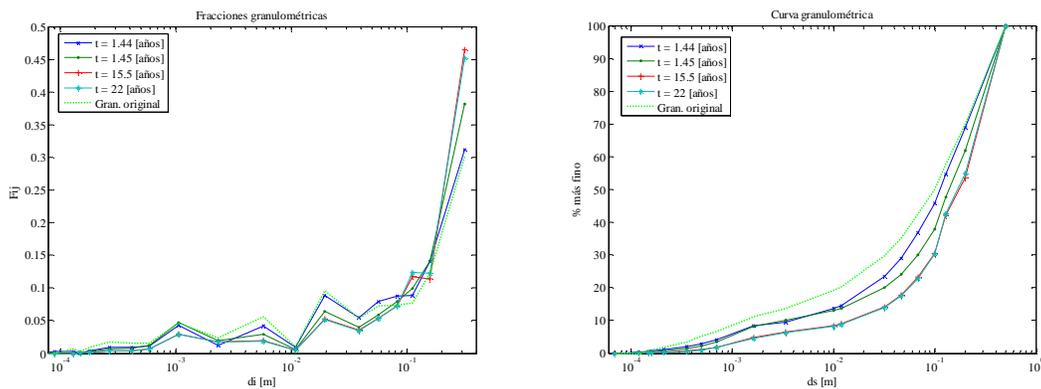


Figura 5.34: Evolución temporal de la granulometría en $x = 1250$ [m] (Fracciones granulométricas y curvas granulométricas), considerando evolución granulométrica con restricción.

En las Figuras 5.35 y 5.36 se muestra el D_{90} y el diámetro geométrico D_g , a lo largo del cauce para distintos tiempos en las dos simulaciones consideradas. De las figuras se puede

desprender que para ambas simulaciones, el $D90$ aumenta en los puntos de angostamiento para el año 1.44 de simulación, que según las Figuras 5.16 y 5.20 corresponde a degradación, reproduciéndose la formación de coraza más temprana. Por el contrario, en la zona de ensanche para el año 1.44, cuando se experimenta depositación de material en esa zona, el $D90$ disminuye respecto al valor original, explicándose por la depositación de partículas provenientes de la degradación de aguas arriba, que corresponden a las partículas de menor tamaño. Posterior a los 1.44 años de simulación, se manifiesta del todo el acorazamiento, aumentando en casi todo el cauce, menos en los puntos de angostamiento, donde disminuye su valor para el año 1.45, pero sigue siendo mayor al valor original. A partir de 1.45 años el aumento del $D90$ es sostenido en todo el cauce, con mínimos locales en las zonas de angostamiento para el caso de la evolución sin restricción, y disminución en la dirección del escurrimiento en el caso de la evolución restringida. Respecto al diámetro geométrico, éste presenta un comportamiento similar al del $D90$, con máximos locales en los puntos de angostamiento para el año 1.44 de simulación, y aumentando en forma general a partir de 1.45 años. En las curvas de evolución del diámetro geométrico se aprecia una mayor diferencia entre las simulaciones sin y con restricción, experimentándose mayores valores de Dg para el primer caso, ya que al no restringir la evolución, la formación es más efectiva.

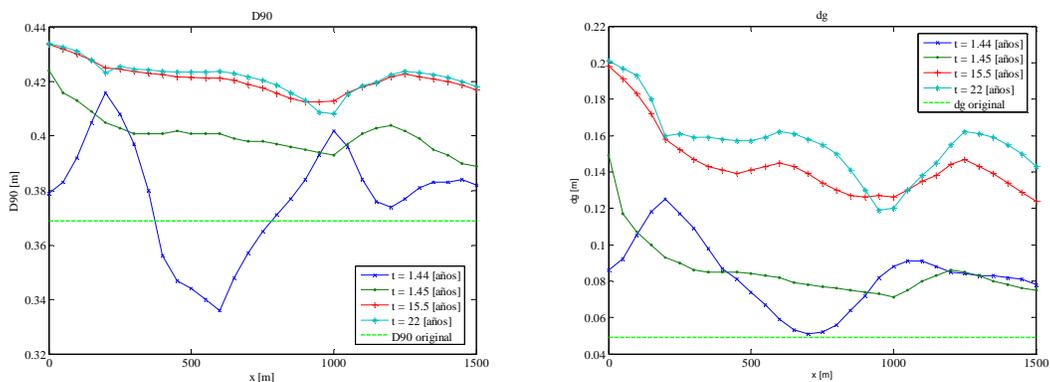


Figura 5.35: $D90$ y diámetro geométrico a lo largo del eje longitudinal en distintos tiempos, considerando evolución granulométrica sin restricción.

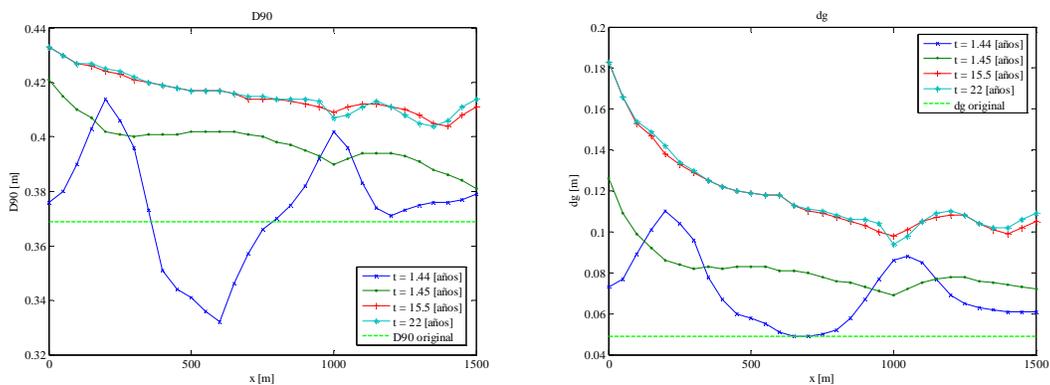


Figura 5.36: $D90$ y diámetro geométrico a lo largo del eje longitudinal en distintos tiempos, considerando evolución granulométrica con restricción.

La base de datos de los resultados obtenidos en las simulaciones de la validación se encuentra en el anexo digital A-7.

5.2.2.3 Resultados Modelo de Simulación 1981

En el periodo 1981-1984 el Centro de Recursos Hidraulico (CHR), de la Universidad de Chile, realizó un estudio para determinar la magnitud y escala de tiempo asociada a la degradación del Río Maule aguas abajo de la Presa Colbún, el cual fue encargado por la Empresa Nacional de Electricidad S.A. (ENDESA). Para esto, el CHR elaboró un modelo de simulación matemático que relaciona la topografía de las secciones transversales con las alturas de escurrimiento en ellas, y determina el gasto sólido a partir de la relación de Meyer-Peter y Müller (1948), realizando un balance del gasto sólido por franjas.

En esta simulación se consideró la siguiente información:

- Topografía de secciones medidas en 1984
- Información granulométrica correspondientes al trabajo “Informe de los estudios de terreno realizados para determinar las propiedades de los sedimentos del Río Maule” (1981).
- Coeficientes de Manning correspondientes a los mostrados en la Tabla 5.6. de este trabajo.
- Datos procesados correspondientes a gastos medio diarios en las estaciones fluviométricas de Maule en Colbún y Maule en Armerillo, además de los resultados a nivel mensual de la operación simulada del Embalse Colbún, e hidrogramas de crecida para T = 20, 50, 100, 500 y 1000 años, donde el máximo instantáneo para este último periodo de retorno es del orden de 8000 m³/s.

Los resultados obtenidos del modelo corresponden a los mostrados en la Tabla 5.9, el que consideró acorazamiento del lecho, una secuencia de caudales medios diarios y un periodo de simulación por 20 años. El detalle de los resultados obtenidos en este estudio se encuentra en el documento “Estudio de la degradación del Río Maule aguas abajo de la presa Colbún – Tercera Etapa” (1984).

Tabla 5-10: Valores característicos de la degradación del lecho con tendencia acorazante

Perfil	Degradación [m]
141	4.3
139	2.5
138	1.5

Si bien los resultados de este modelo no son comparables con los obtenidos a partir de *Mossem* modificado, ya que la secuencia hidrológica es distinta, en la Figura 5.37 se muestran un mismo gráfico los resultados de *Mossem* y los del modelo del CRH, extendido a todo el cauce en análisis a través de interpolación lineal. Se puede ver que en general ambos resultados son cercanos en orden, dando una idea de lo razonable de los resultados obtenidos.

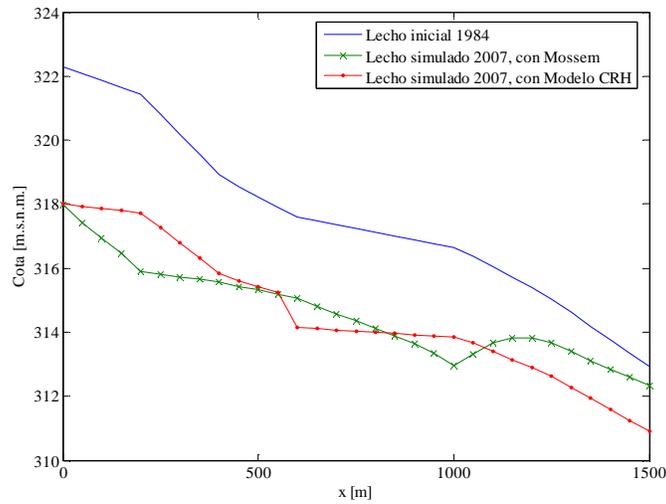


Figura 5.37: Comparación entre resultados obtenidos con Mossem sin restricción de evolución granulométrica, y con modelo del CRH

5.2.2.4 Comparación resultados considerando sección transversal trapecial

Como se explicó anteriormente, la expresión que determina el balance de gasto sólido y la evolución del lecho, no es exacta para secciones trapeciales, realizándose algunas aproximaciones. En la Figura 5.38 se muestra el resultado de la simulación considerando secciones rectangulares y trapeciales, a modo de comparación para verificar el efecto de las aproximaciones en las ecuaciones de balance. La aproximación de las secciones a formas trapeciales considera la misma cota de la base del lecho que la determinada en el caso de aproximar a secciones rectangulares.

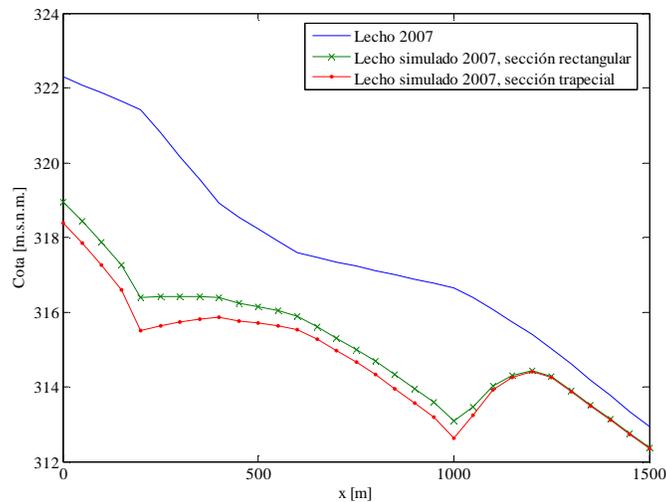


Figura 5.38: Comparación resultados simulación considerando sección rectangular y trapecial

De la figura anterior se ve que los perfiles obtenidos son muy similares, experimentándose una mayor degradación en el caso de considerar secciones trapeciales, ya que los anchos

basales son menores que los determinados por la aproximación a formas rectangulares. De la Figura 5.39 se ve que la disminución del ancho basal al final de la simulación, es casi despreciable, por lo que no es necesario, en este caso y otros de las mismas características, idear un mecanismo de degradación especial.

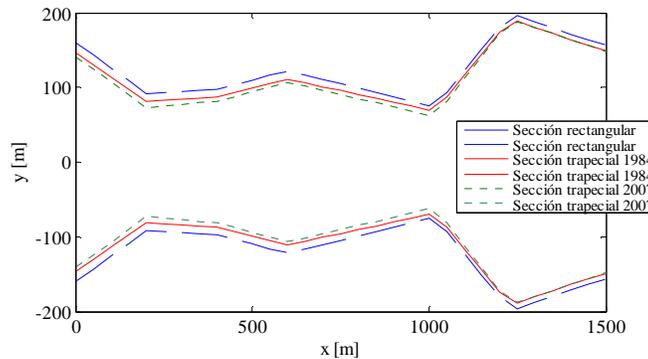


Figura 5.39: Anchos basales de las secciones a lo largo del cauce.

Respecto a los gastos sólidos resultantes, éstos presentan el mismo comportamiento que los obtenidos a partir de secciones rectangulares, en especial al inicio del periodo de simulación. Al final del periodo de simulación, los gastos sólidos difieren un poco en magnitud, atribuible a la diferencia del ancho de las secciones, pero en general, presentan el mismo comportamiento, verificándose que las aproximaciones realizadas en el balance de gasto sólido no generan grandes problemas en la simulación (Ver Figura 5.40).

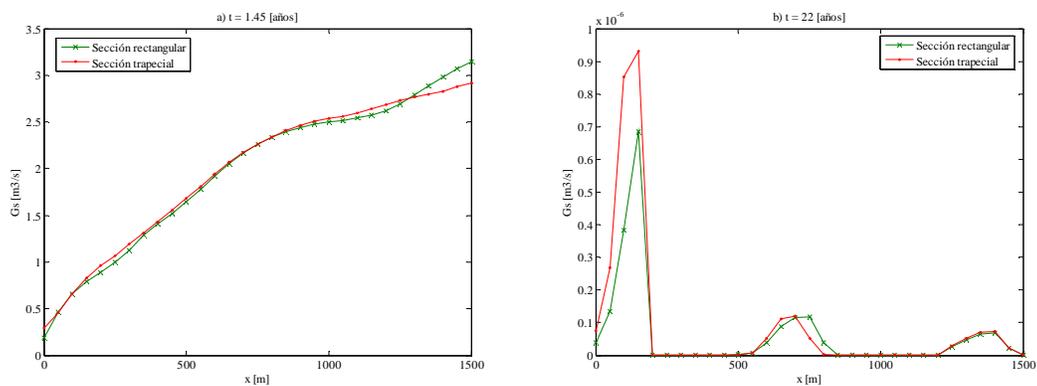


Figura 5.40: Comparación gastos sólidos considerando sección rectangular y trapecial

6. CONCLUSIONES

6.1 Conclusiones de adaptación realizada a *Mossem*

Mossem, diseñado por González (2006), es una herramienta de modelación de sedimentación en embalses que considera en forma conjunta el transporte y depositación de sedimentos finos y gruesos, incorporando el desarrollo de corrientes de turbidez y los efectos de granulometrías extendidas en el caso de sedimentos gruesos. En este trabajo se adaptó dicho modelo para que fuese capaz de simular variaciones morfológicas que involucren tanto depositación como degradación de lechos de cauces naturales, considerando la evolución temporal de la granulometría de la superficie. Para esto se introduce un nuevo módulo de resolución al programa, que calcula la evolución de las fracciones de granulométricas del lecho. Esta evolución es de gran importancia debido a que se traduce a cambios temporales en la disponibilidad de tamaños en la superficie del lecho, y por lo tanto afecta directamente a la granulometría y al valor del gasto sólido, lo cual a su vez condiciona la evolución del nivel del lecho.

La adaptación realizada a *Mossem*, se llevó a cabo respetando su estructura general, pudiendo trabajar considerando sólo los módulos originales de resolución de flujo, transporte de sedimento grueso y fino, donde la granulometría se considera constante en el lecho. Esto es posible a través de la introducción de un activador del módulo incorporado, siguiendo la misma idea de flexibilidad original. Es importante mencionar, que si se activa el módulo de evolución granulométrica, sólo tiene sentido utilizar las relaciones de gasto sólido que consideren granulometría extendida en el lecho, como lo son las relaciones de Parker (1990) y Wilcock & Crowe (2003).

En el fenómeno de degradación y evolución granulométrica, es fundamental la interacción con el sustrato, zona del lecho inmediatamente inferior a la superficie o capa activa, debido a que en degradación la superficie del lecho adquiere de alguna forma la granulometría del sustrato y del mismo modo, en caso de sedimentación, el sustrato irá adquiriendo en alguna proporción la granulometría de la superficie. Considerando este fenómeno de interacción, se incluye un nuevo archivo de entrada al modelo, que corresponde a la información granulométrica del sustrato, el cual está configurado para recibir tres niveles de sustrato, con el mismo nivel de información que el archivo de información granulométrica de la superficie.

6.2 Módulo de evolución granulométrica

El módulo de evolución granulométrica está basado en las formulaciones de Capa Activa, que relacionan la evolución de las fracciones granulométricas de la superficie del lecho con la granulometría del sustrato, el espesor de la capa superficial, la cual también varía en el tiempo, la porosidad y el balance de gastos sólidos por fracción. Respecto a la interacción con el sustrato, la formulación teórica del módulo introducido, correspondiente a la propuesta por Parker y Sutherland (1990), que considera una función granulométrica de interfaz o transferencia superficie–sustrato, que depende de la situación de evolución en la

cual se encuentre el lecho. La mayor dificultad en determinar esta función, corresponde al caso en que el lecho se encuentra en estado de depositación de sedimentos, donde el sustrato adquiere parte de la granulometría de la superficie del lecho y del gasto sólido de fondo. El problema es determinar la proporción entre ambos aportes. En el modelo se considera la relación propuesta por Hoey y Ferguson (1994), calibrada a partir de datos experimentales por Toro Escobar et al. (1996). Se consideraron las propuestas de estos autores debido al satisfactorio resultado que han tenido otros autores al considerarlas en modelos similares el presentado en este trabajo, como los realizados por Cui et al. (1996) y Cui and Parker (2005). Sin embargo, hay que notar que los trabajos realizados utilizan los mismos datos experimentales con los cuales se realizó la calibración de la relación, por lo que el éxito de la función es cuestionable. Lo ideal es contar con una función de transferencia para el lecho en análisis, obtenida a partir de estadística granulométrica de la estratigrafía de éste, y de su condición de depósito o degradación. En caso de no contar con la información mencionada, que en realidad se da en la mayoría de los casos, considerar la función de transferencia es una buena aproximación.

Al determinar la función de transferencia superficie-sustrato, fue necesario idear un algoritmo de almacenamiento de la información granulométrica que se va incorporando al sustrato, a medida que ocurre depositación de partículas en el lecho. Dado que los recursos computacionales con limitados, fue necesario acotar el detalle del almacenamiento, lo cual constituye una nueva aproximación en el modelo que permite representar la situación de depositación de partículas en el lecho seguido de un evento de degradación. Se consideró un número de capas de sustrato determinado (3 capas), de las cuales 2 son móviles de espesor fijo y otra es fija de espesor variable, dependiente del volumen que se incorpora el sustrato. De esta forma la granulometría representativa de cada capa corresponden a una promedio ponderado entre la granulometría del volumen que ese incorpora a la capa de sustrato, y la que posee originalmente. Así, la precisión de la granulometría del sustrato y su actualización en el tiempo, dependen en gran parte de los esfuerzos realizados en terreno a la hora de determinar las muestras granulométricas representativas del lecho.

Respecto al espesor de la Capa Activa o superficie, éste se definió con el valor D90 de la granulometría de la superficie del lecho, correspondiente a una forma de asignar al espesor, el tamaño de la partícula más grande en él. Para evitar una resolución iterativa de la expresión que determina la evolución granulométrica en el módulo incorporado, se realizaron algunas simplificaciones en el desarrollo numérico de ésta, las cuales se basan en consideraciones realizadas por otros autores, las que no presentan problemas en sus resultados al aplicarlas.

Una de las grandes dificultades al implementar el módulo de evolución granulométrica correspondió a encontrar una resolución numérica que mejor se ajustara con las resoluciones de *Mossem* original. De esta forma se contó con dos alternativas de resolución, escogiendo aquella que presentaba una resolución más sencilla, y que por lo tanto facilitaba la incorporación al programa y hacía menos engorrosa la resolución completa del conjunto de módulos del modelo.

6.3 Aplicaciones y validación

En este trabajo se realizaron dos aplicaciones con el modelo adaptado. Una de ellas corresponde a la evolución de un cauce aguas arriba de una presa, considerando un nivel constante en el embalse y luego su posterior descenso paulatino. Los resultados preliminares obtenidos mediante el modelo hicieron necesario imponer medidas de control en el proceso de evolución granulométrica. De esta forma se restringió la evolución granulométrica a variaciones del lecho superiores al 10% del menor tamaño de las partículas presentes en él, considerando el incremento de tiempo de la simulación. Esta medida permitió obtener resultados que se acercaban a lo esperados, lo cual corresponde al paulatino avance de un frente de depositación de sedimentos y a la variación del tamaño característico del sedimento en la dirección longitudinal. El resultado obtenido es muy similar al alcanzado sin considerar evolución granulométrica, solo que en menor magnitud. Pese a la restricción impuesta, se aprecia que la evolución temporal y espacial de la granulometría de la superficie, es la esperada, considerando resultados obtenidos en otros trabajos donde se analiza la misma situación. De esta forma se desprende de los resultados el afinamiento gradual de la granulometría hacia aguas abajo, que en el tiempo se va haciendo más gruesa que la inicial. Los resultados también muestran un engrosamiento de la granulometría en la cara frontal o empalme del frente, zona que el modelo no es capaz de representar debido a que se experimentan mecanismos de transporte más complejos. Cuando se inicia el periodo en el cual se genera un descenso en el nivel del embalse, se genera degradación del delta en una de sus zonas, siendo menos apreciable la evolución granulométrica en el lecho, en especial en los nodos de más aguas arriba.

La aplicación del modelo a la situación de un cauce aguas abajo de una presa, se realizó considerando evolución granulométrica restringida y sin restricción. De los resultados obtenidos se puede apreciar la formación de una coraza en el lecho, que dificulta o disminuye la degradación en el tiempo, lo cual se espera de acuerdo a la teoría. Los resultados de evolución del lecho obtenidos, considerando la evolución granulométrica restringida y sin restricción, difieren en magnitud, siendo los resultados de degradación del segundo menores al del primero. Esto se explica por la mayor velocidad y efectiva evolución granulométrica que presenta el caso sin restricción, y que por lo tanto presenta un acorazamiento del lecho en un menor tiempo, dificultando la degradación tempranamente en comparación con el caso con restricción. La opción de mecanismo de evolución granulométrica mas adecuada (con o sin restricción) sólo es posible determinarla a través de aplicaciones con información de validación de los resultados, pudiendo con esto determinar la aplicabilidad de la restricción granulométrica a alguna situación particular.

En la general, los resultados de evolución granulométrica del lecho, obtenidos en las distintas aplicaciones, son fáciles de interpretar como posibles resultados de una situación real. De esta forma, en la situación en que se modela un cauce aguas abajo de una presa se obtiene un engrosamiento de la granulometría a través del tiempo; y en la situación del de escurrimiento aguas arriba de la presa se obtiene el afinamiento de la granulometría hacia aguas abajo, que se hace mas gruesa que la original con el transcurso del tiempo. Pese a estos resultados, es imperioso contar con información granulométrica empirica que permitiesen comprobar los resultados obtenidos en las aplicaciones.

Respecto a la aplicación realizada al Río Maule en el sector de aguas abajo de la presa Colbún, el modelo en general entrega resultados que son del orden de los medidos en Diciembre del 2007, en especial los obtenidos al considerar la evolución granulométrica restringida. Sin embargo, estos resultados no son del todo comparables debido a que el cauce durante el tiempo de operación de la presa, presentó fenómenos de transportes transversales de erosión de riberas que el modelo no es capaz de representar, y por lo tanto no se consideran en la resolución. Además hay que notar que los anchos de las secciones considerados en la simulación, no coinciden con los determinados a partir de las mediciones realizadas, lo cual puede deberse a una adaptación inadecuada de los datos originales, o simplemente a que durante el periodo considerado, el cauce experimentó degradación de sus laderas, situación que tampoco es capaz de representar el modelo.

De la aplicación al Río Maule se detectaron algunas limitaciones que posee el modelo, como es la aplicabilidad a cauces con riberas fijas, donde los mecanismos de transportes pueden aproximarse a evoluciones exclusivas en la dirección longitudinal del cauce. De esta forma, la evolución morfológica presentada en el Río Maule no es apropiada para realizar la validación, siendo más adecuado otro tipo de cauces como es el Alto Bío-Bío. Otra limitación que presenta el modelo es la restricción impuesta a la evolución granulométrica, la que fue impuesta como mecanismo de control a la sensibilidad de modelo frente a pequeños cambios en la capacidad de arrastre. De esta forma, se proyecta la continuidad de este trabajo en la búsqueda de la causa de esta sensibilidad, a través de evaluaciones a los distintos parámetros introducidos al modelo que deberían ser determinados empíricamente, como por ejemplo el coeficiente α que determina la transferencia de granulometría desde la superficie del lecho al sustrato.

Respecto a la situación presentada por el Río Maule aguas abajo de la Presa Colbún, se determina a partir de los datos de terreno que éste no presentan una degradación generalizada, si no que más bien presenta una degradación local en la zona de aguas arriba, y depositación aguas abajo, siendo ésta mucho mayor en volumen que la cantidad degradada (Ver cuadro con balances volumétricos). Esta situación es incomprensible debido a que si la presencia de la presa interrumpe el gasto sólido afluente, un evento de depositación, sólo puede provenir de material degradado aguas arriba de la zona de depósito, y por lo tanto el balance total debería dar por lo menos la igualdad de volúmenes degradados y depositados, pero nunca una depositación mayor a la degradación. Puede ocurrir que los perfiles considerados en el balance no cubran una extensión suficiente de la sección transversal del cauce, despreciándose en el balance volúmenes de degradación importantes.

Finalmente, se puede decir que el modelo es capaz de determinar en forma aproximada el comportamiento unidimensional de cauces naturales sometidos a alguna alteración en el transporte de sedimentos, pudiendo utilizar los resultados obtenidos a través de él, como base para la evaluación de distintos proyectos de ingeniería.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ackers, P., and White, W., R. (1973). "Sediment Transport: New Approach and Análisis", *Journal of Hydraulic Division*, Vol. 99, No. HY11, pp. 2041-2060.
2. Bagnold, R. A. (1956). "The Flow of Cohesionless Grains in Fluids." *Philosophical Transactions Royal Society of London*, Serie A, 249, pp. 235-297.
3. Ayala L., Brown E., Cabrera G. y López A. (1984) "Estudio de la Degradación del Río Maule Aguas Abajo de la Presa Colbún". Tercera Etapa. *Centro de Recursos Hidráulicos, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Publicación CRH 84-15-E*.
4. Ayala L., Brown E., Cabrera G. y López A. (1981) "Estudio de la Degradación del Río Maule Aguas Abajo de la Presa Colbún". *Centro de Recursos Hidráulicos, Departamento de Ingeniería Civil, Publicación CRH 81-7-E*, Universidad de Chile.
5. Centro de Recursos Hidráulicos (1981) "Informe de los Estudios de Terreno Realizados para Determinar las Propiedades de los Sedimentos del Río Maule". Universidad de Chile.
6. Centro de Recursos Hidráulicos (1980) "Análisis del Efecto del Embalse Colbún en el Régimen Sedimentológico del Río Maule". *Fase I, Estudio Preliminar*. Universidad de Chile.
7. Chow V. T. (1959) "Open Channel Hydraulics". *Mc Graw-Hil Editions*.
8. Cui, Y., (2006) "The Unified Gravel-Sand (TUGS) Model: Simulating Sediment Transport and Gravel/Sand Grain Size Distributions in Gravel-Bedded Rivers" *Water Resources Reseach*, Vol 43.
9. Cui, Y. and Parker, G. (2005) "Numerical model of sediment pulses and sediment supply disturbances in mountain rivers." *Journal of Hydraulic Eng.*, Vol 13(8), pp. 646-656.
10. Cui, Y., Parker, G. and Paola, C. (1995) "Numerical formulation for models of aggradation and downstream fining." *St. Anthony Falls Laboratory, University of Minnesota*, External Memorandum No. M-244, 9p.
11. Einstein, H. A. (1950). "The Bed-load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows." *Technical Bulletin 1026*, U.S. Department of Army, Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C."
12. González, J. (2006). "Sedimentación en embalses considerando el efecto de turbidez. Desarrollo e implementación de un modelo matemático y numérico". *Tesis para optar al*

grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico, Universidad de Chile.

13. Hirano, M. (1971). "On Riverbed Variation with Armoring" *Proceedings, Japan Society of Civil Engineering*, Vol. 195, pp. 55-65.
14. Hoey, T. B. and Ferguson, R. (1994). "Numerical simulation of downstream fining by selective transport in gravel bed rivers: model development and illustration." *Water Resources Research*, Vol 30(7), pp 2251-2260.
15. Klingeman P. (1998). "Gravel-bed rivers in the environment". *Water Resources Publications*. 832 p.
16. Lisle, T. and Church, M. (2002). "Sediment transport-storage relations for degrading, gravel bed channels" *Water Resources Research*, Vol 38(11), pp 1919-1929.
17. Meyer-Peter, E., and Müller, R. (1948). "Formulas for Bedload Transport", *Proceedings, 2nd Congreso IA.H.R.*, Stockholm.
18. Niño, Y. (2005). "Hidráulica fluvial y arrastre de sedimentos". Apunte de clases, curso *Transporte Hidráulico de Sólidos CI61F*, Universidad de Chile.
19. Parker (2005) "Adjustment of the bed surface size distribution of gravel-bed rivers in response to cycled hydrographs." *Gravel-bed Rivers VI Conference, Lienz, Austria, September 5 - 9, 2005*.
20. Parker, G. and A. J. Sutherland, (1990), "Fluvial armor," *Journal of Hydraulic Research*, Vol 28(5), pp. 529-544.
21. Parker, G. (1990). "Surface-based Bedload Transport Relation for Gravel Rivers." *Journal of Hydraulic Research*, Vol 28, No 4, pp. 417-436.
22. Parker, G., and E. D. Andrews, (1985), "Sorting of bed load sediment by flow in meander bends," *Water Resources Research*, Vol.21(9):pp 1361-1373.
23. Parker, G. Klingeman, P. C., and Mclean, D. G. (1982). "Bedload and Size Distribution in Paved Gravel-bed Streams." *Journal of the Hydraulic Division, ASCE*, Vol. 108 No. H, pp. 544-571.
24. Toro-Escobar, C., Parker, G. and Paola, C. (1996) "Transfer function for deposition of poorly sorted sediment in response to streambed aggradation" *Journal Hydraulic Resource*, Vol 34, No 1, pp. 35-54.
25. Wilcock, P., and Crowe, C. (2003) "Surface-based Transport Model for Mixed-Size Sediment." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 129, No 2, pp. 120-128.