



MODELACIÓN ESPACIO – TEMPORAL DEL COMPORTAMIENTO DE CAUCES DE LECHO MÓVIL

CLAUDIO SCHNETTLER C Y LUDWIG STOWHAS B
Ingeniero Civil, U.T.F.S.M, DOH X^a Región, Ministerio de Obras Públicas.
Ingeniero Civil, Departamento de Obras Civiles. Universidad
Técnica Federico Santa María

RESUMEN

En este trabajo se desarrolló un modelo conceptual y computacional de simulación de arrastre de sedimentos en lechos de ríos de granulometría gruesa y extendida y de sección, aproximadamente rectangular, que permitió calcular las variaciones de la cota de fondo y el eje hidráulico respectivo, bajo condiciones de caudal variable. Se consideró la socavación del cauce y también la posibilidad de embancamiento. Se utilizó el método de Einstein para estimar el arrastre de sedimento, utilizando como base las características geométricas, hidráulicas y sedimentológicas del Estero Marga-Marga de la V Región.

ABSTRACT

A conceptual and computational model for the simulation of sediment transport in approximately rectangular river channels, having coarse and extended grain sizes, was developed. The model allows the computation of water and bottom levels variations due to bed erosion or embankment, under unsteady flow conditions. The method of Einstein was used to estimate the sediment transport, using the geometric, hydraulic and sedimentological characteristics of the Marga-Marga River, Viña del Mar.



1 Introducción

El lecho del río está sujeto a cambios permanentes en su morfología, que pueden ser modelados, como en este caso lo será por métodos numéricos de gran aplicabilidad y confianza en este momento. En este caso se habla del método de diferencias finitas.

Para estudiar los cambios morfológicos del lecho del río se usarán en forma acoplada las ecuaciones de la hidráulica: Continuidad y Conservación de Momentum, con las de transporte de sedimentos, es decir, la ecuación de continuidad de sedimentos y una ecuación dinámica que determine el gasto sólido total.

Se considerará la simulación como un sistema acoplado, por lo que no separa la parte hidráulica de la del transporte de sedimentos. Son dos procesos que están relacionados; si se produce socavación o degradación del lecho, cambia el eje hidráulico y por lo tanto, cambia la altura de escurrimiento, la pendiente, etc., con lo que a su vez cambia el arrastre de fondo y así sucesivamente.

Para estimar el arrastre de sedimentos se utilizará el método de Einstein, correlacionado con el método de Meyer-Peter-Müller.

El presente trabajo se aplicó a un modelo de trazado de lecho de sección rectangular, pendiente media y longitud definida, tomando como base antecedentes disponibles del Estero Marga-Marga de Viña del Mar (ref. 4).

2 Hipótesis de la modelación

El transporte hidráulico de sedimento puede verificarse por distintos mecanismos que, en general, dependerán de las características del material del fondo y de las fuerzas que sobre éste ejerce el escurrimiento.

Pese a que los diferentes aspectos que involucran el transporte de sedimentos han sido estudiados por numerosos autores y que algunas de las teorías propuestas han podido ser calibradas con mediciones en terreno o laboratorio, debe tenerse presente que la física de estos fenómenos es de una complejidad tal que aún falta bastante para poder modelar matemáticamente toda la diversidad de condiciones que se pueden presentar.

De esta forma, las metodologías existentes suelen estar basadas en estudios o investigaciones de condiciones particulares y/o esquematizadas que, por su naturaleza, dificultan bastante su aplicación generalizada.

Algunas de las simplificaciones a que usualmente se recurre son las siguientes:

- Sedimento no cohesivo.



- Régimen subcrítico.
- Régimen permanente.
- Flujo unidireccional.
- Diámetro de los granos uniforme.

Para visualizar las limitaciones que pueden implicar estos aspectos puede considerarse el caso de los ríos chilenos en las zonas cordilleranas y valle central. En éstas, los mayores volúmenes de sedimento se movilizan durante las crecidas, las que, en las zonas indicadas, escurren generalmente en régimen supercrítico o muy cercano a la crisis, en forma impermanente y en cauces de sedimento con granulometría extendida.

Es decir, para las condiciones de mayor transporte, la mayor parte de las teorías y modelos existentes presentan limitaciones que obligan a considerar con precaución los resultados que se obtengan.

3 Metodología propuesta

Una de Las técnicas actuales de modelación numérica que permiten estimar el arrastre de sedimentos en los ríos es el método de diferencias finitas (ref. 1 y 3). Técnicas que complementadas junto a métodos de estimación de arrastre de sedimentos y condiciones de estabilidad propia de los métodos numéricos, permiten obtener la evolución espacio temporal del comportamiento de cauces de lecho móvil.

En el presente estudio no se ahondará en el desarrollo numérico del modelo ni se entregará una metodología de solución detallada, por considerarse suficientemente difundida en la ref. 1 y 3.

La metodología general de solución es la siguiente:

1. Recopilación de antecedentes.
2. Definición del modelo.
3. Definición de condiciones de borde.
4. Solución matricial de fase hidráulica y sedimentológica de la simulación
5. Resultados

4 Métodos de transporte de sedimento

El método base de este estudio corresponde al método de Einstein. Con él se obtiene el arrastre de fondo y una vez que éste es conocido se calcula el transporte de partículas en suspensión. La suma de ambos gastos sólidos permite conocer el transporte total de material del lecho.

A continuación se dan a conocer las razones por las que resulta conveniente usar el método de Einstein para calcular el gasto de fondo y el transporte en suspensión y sus principales desventajas. Estas últimas determinan la necesidad de correlacionar el



método de Einstein con el método de Meyer-Peters-Müller para obtener una expresión analítica conocida.

4.1 Método de Einstein

4.1.1 Ventajas del método de Einstein

1. El método de Einstein se puede trabajar con cualquier sistema coherente de unidades, lo que hace fácil su aplicación.
2. Es, posiblemente, el método mejor logrado, con un buen desarrollo conceptual y fundamento físico.
3. Las ecuaciones de Einstein permiten determinar el arrastre de fondo y el transporte en suspensión. Esta característica es fundamental para compararlo con otros métodos más simplificados.
4. El método de Einstein permite calcular el transporte en suspensión, sin la necesidad de conocer concentraciones de sedimento en algún punto.
5. Además el método de Einstein establece una relación entre las partículas en suspensión y las de fondo mediante coeficientes de escondimiento que tienen implícito la idea del acorazamiento; que las partículas más grandes protegen a las más pequeñas de ser arrastradas, fenómeno muy común en los ríos chilenos.

4.1.2 Desventajas del método de Einstein

La principal desventaja del método de Einstein es que no se cuenta con una expresión algebraica única conocida que sea diferenciable.

Por esta desventaja, implementar un método numérico que contenga derivadas (tanto en espacio como en tiempo) de la función que determina el gasto sólido con respecto al caudal líquido (Q), a la altura de escurrimiento (z) o a la pendiente hidráulica (S), y que sea aplicable de manera general, es muy difícil.

4.2 Ecuaciones para estimar arrastre de sedimentos

El método de Einstein permite estimar el arrastre de sedimentos de fondo y en suspensión (ref. 2).



4.2.1 Estimación de arrastre de fondo:

Se define el arrastre de fondo como aquel sedimento que se mantiene en contacto con el fondo y se transporta rodando, deslizando o a saltos y se determina con la siguiente expresión:

$$gB_i = \phi \cdot \gamma_s \cdot \left(\frac{1}{g \Delta D_i^3} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

4.2.2 Estimación del caudal sólido en suspensión:

El caudal sólido en suspensión corresponde a aquel en el cual las partículas del fondo, debido a la turbulencia del escurrimiento, son puestas en suspensión y transportadas con la misma velocidad del flujo. El método de Einstein estima el arrastre en suspensión a partir del arrastre de fondo con la expresión:

$$gBS_i = gB_i \cdot (PI_{1i} + I_{2i})$$

4.2.3 Estimación del arrastre total del material del lecho:

Finalmente el arrastre total de material del lecho se estima como la suma, para cada partícula de diámetro D_i , del arrastre de fondo más el arrastre en suspensión, es decir:

$$gBT = \sum_i gBT_i = \sum_i gB_i \cdot (1 + P \cdot I_{1i} + I_{2i})$$

4.3 Método de Meyer-Peter-Müller

Esta fórmula permite estimar el arrastre de sedimento en la capa de fondo (ref. 1). En su forma extendida es:

$$Q_s = 8 \cdot B \cdot (g \cdot \Delta \cdot d_m^3)^{\frac{1}{2}} \left[\left(\frac{n'}{n} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{h \cdot S}{\Delta \cdot d_m} - 0.047 \right]^{\frac{3}{2}}$$

5 Correlación entre método de Einstein y de Meyer-Peter-Müller

Debido a que el método de Einstein no entrega una ecuación analítica conocida para estimar el arrastre de sedimentos (ref. 6), como si lo permite Meyer-Peter-Müller, se correlacionaron ambos métodos obteniéndose la siguiente expresión:

$$Q_{sEinstein} = a \cdot (Q_{sMPM})^b \quad a = 1.248 \quad b = 3.151$$



La correlación se obtuvo para una granulometría en particular (ref. 4) y para una sección de escurrimiento rectangular de 40 m de ancho (ref. 5). El detalle se entrega en la referencia 6.

6 Modelo de simulación

Como modelo base de la simulación se consideró un tramo de lecho con las siguientes características:

1. sección rectangular de 40 m.
2. rugosidad de Manning $n=0.025$
3. longitud de análisis 3000 m (10 secciones).
4. longitud total modelación 5000 m. Esta longitud considera 1000 m hacia aguas arriba de la sección inicial de estudio (S1, figura 1) y 1000 hacia aguas abajo de la sección final de estudio (S10 figura 1) con el objeto de evitar que las singularidades que se impongan en el trazado de estudio sean afectadas por la imposición de las condiciones de borde.
5. granulometría (ref. 4)
6. hidrograma de crecida $T = 200$ años (ref. 4)
7. pendiente media 0.003
8. sección intermedia (S5 figura 1) donde se aplican singularidades para estudiar el comportamiento físico del modelo, tales como:
 - a. cambios de sección y de pendiente de fondo.
 - b. aumento y disminución de la capacidad de arrastre de sedimentos.
9. condiciones de borde aguas arriba : hidrograma y sedimentograma. El sedimentograma se obtiene imponiendo altura normal de escurrimiento en la sección de inicio.
10. condición de borde aguas abajo : altura normal de escurrimiento.

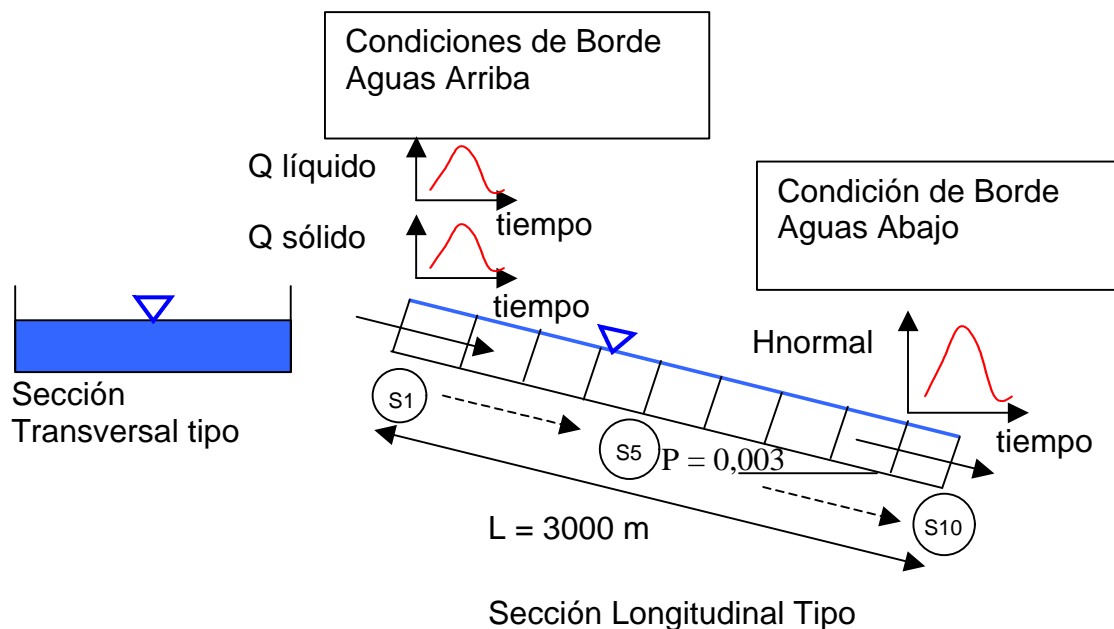


Figura 1 Sección transversal y longitudinal típica



7 Situaciones analizadas

A continuación se enumeran las situaciones que se modelaron.

1. situación base : escurrimiento permanente, $Q = \text{cte.}$
2. caudal variable, $Q = Q(t)$.
3. cambio de pendientes (suave – más suave).
4. cambio de pendiente (suave- menos suave).
5. reducción de capacidad de arrastre.
6. aumento de capacidad de arrastre.
7. ensanche de sección.
8. angostamiento de sección.
9. lecho con fondo irregular (forma diente de sierra).

8 Resultados

Para el presente documento se muestran algunos de los resultados obtenidos para cada una de las situaciones analizadas.

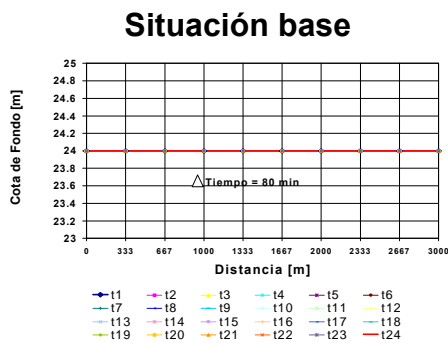


Figura 2 Cota de fondo v/s distancia

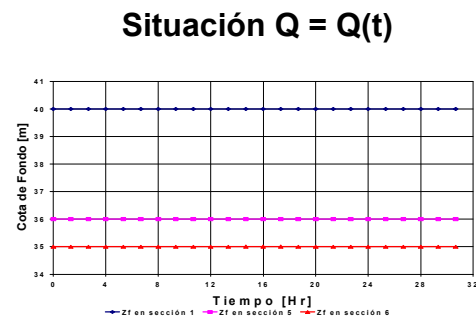


Figura 3. Cota de fondo en secciones 1 5 y 6

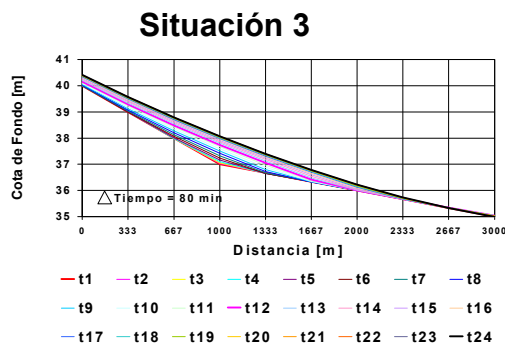


Figura 4 Cota de fondo v/s distancia

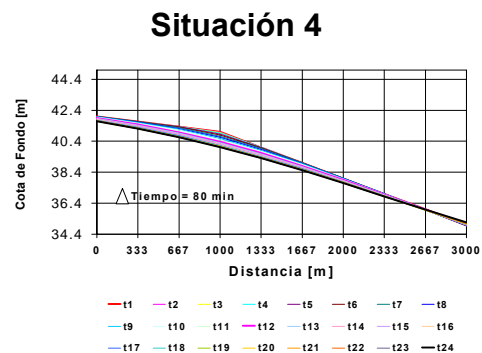
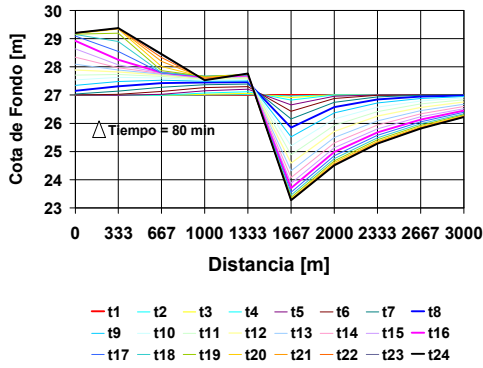


Figura 5 Cota de fondo v/s distancia



Situación 5



Situación 6

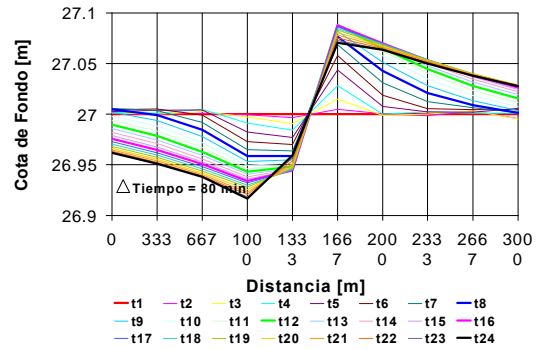
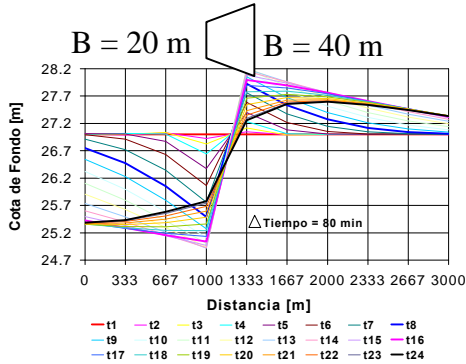


Figura 6 Cota de fondo v/s distancia

Figura 7 Cota de fondo v/s distancia

Situación 7



Situación 8

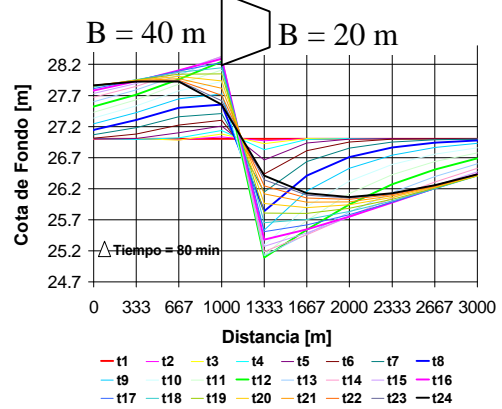
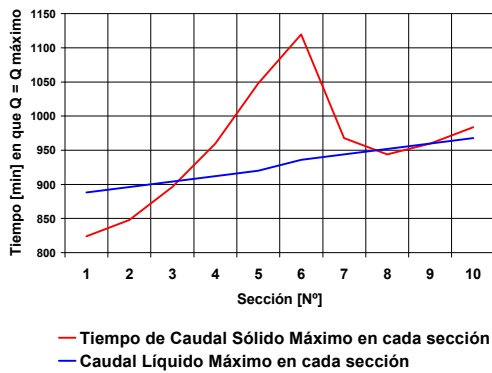


Figura 8 Cota de fondo v/s distancia

Figura 9 Cota de fondo v/s distancia

Situación 8



Situación 9

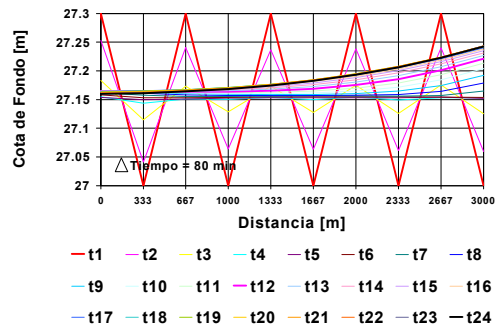


Figura 10 Tiempo Q = Qmáx

Figura 11 Cota de fondo v/s distancia



9 Conclusiones

Como resultado del análisis se concluye:

1. El modelo simplificado de un lecho de sección rectangular y granulometría única simula la respuesta morfológica del lecho de un cauce natural con transporte de sedimentos. El modelo implementado resuelve las fases líquida y sólida del escurrimiento, en un sistema cerrado, implícito en el espacio y explícito en el tiempo, utilizando para esto un sistema de diferencias finitas y un modelo unidimensional y transitorio.
2. De las situaciones estudiadas (situaciones 1 y 2) se determinó que no existe socavación general en lechos cuyo escurrimiento es en régimen de equilibrio o impermanente, si se mantiene el equilibrio sedimentológico (aguas turbias) y no existen singularidades particulares en los lechos.
3. Los efectos producidos en el lecho del estero, producto de las singularidades estudiadas, muestran la validez física del modelo desarrollado, permitiendo su aplicación a innumerables situaciones dentro de la hidráulica fluvial.
4. La amortiguación que experimenta el hidrograma de crecida en la mayoría de los casos no supera 1 m³/s, incluso para caudales sobre 1000 m³/s, situación que se explica por la corta longitud del trazado de lecho considerado (3000 m). Esta situación permitiría simplificar las ecuaciones del modelo asumiendo que la amortiguación del caudal líquido es nula.
5. En las situaciones estudiadas se determinó que el peak del caudal sólido no siempre es coincidente con el peak del caudal líquido (figura 10). Si el peak del caudal sólido se adelanta con respecto al peak del caudal líquido significa que existe socavación y si se atrasa significa que existe acumulación de sedimento. Los peak son coincidentes sólo en régimen permanente y uniforme.
6. El modelo permitirá validar las ecuaciones de arrastre de sedimento que existen actualmente para estimar el arrastre de sedimento, tanto de material del lecho como en suspensión.
7. El modelo desarrollado es aplicable con cualquier ecuación de arrastre de sedimento.
8. El trabajo desarrollado es sólo una primera etapa en que se han estudiado situaciones hipotéticas ideales con el propósito de verificar la consistencia de los resultados entregados por el modelo, ya que no existe información para verificarlo con datos reales.



9. En situaciones con fondo tipo diente de sierra, los peaks se suavisan, al mismo tiempo que entre dos peaks consecutivos se deposita material (figura 11).
10. En suma, se concluye que el modelo desarrollado puede ser considerado como una herramienta de gran utilidad para el análisis hidráulico-fluvial de los complejos problemas que se presentan en los cauces naturales.

10 Referencias

1. ESTELLÉ, Luis. DOMÍNGUEZ, Bernardo (1995). Modelo Numérico Fluvial Morfológico Implícito, Bases Teórico-Prácticas. XII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Volumen 2, Santiago, Chile.
2. MAZA Álvarez, José Antonio. GARCÍA Flores, Manuel (1995); Transporte de sedimentos. Manual de Ingeniería de Ríos, Volumen 7, 10 y 12. UNAM México, México.
3. ESTELLÉ, Luis (1999) "Caracterización Mecánico Fluvial del Río Mapocho Rural". XIV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. Pág 367-378. Santiago, Chile.
4. 4C Consultores en Ingeniería Civil Ltda.(1999-2000). Granulometría, topografía e hidrogramas del Estero Marga-Marga. Viña del Mar, Chile.
5. SCHNETTLER, Claudio. Modelación espacio-temporal del comportamiento de cauces de lecho móvil. Memoria ingeniero civil. Valparaíso, Chile, Universidad Técnica Federico Santa María. 2003.
6. SCHNETTLER, Claudio. STOWHAS, Ludwig. Correlación entre método de Einstein y de Meyer-Peter-Müller. En: Congreso Chileno de Hidráulica (XVI, 2003, Santiago, Chile).