



“Mapocho Pedaleable”: modelos estadísticos y de transporte de sedimentos

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

José Luis Domínguez¹, Alumno de quinto año

Cristián Escauriaza¹, Profesor Asistente

Maricarmen Guerra¹, Ingeniero de Proyectos

¹DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL

INTRODUCCIÓN

El río Mapocho es uno de los tres cauces más importantes en la cuenca del río Maipo [1] y tiene una gran relevancia histórica para el país, ya que la ciudad de Santiago fue fundada a sus orillas para el aprovechamiento de sus aguas. Lamentablemente, hasta hace pocos años, el río mantenía altos niveles de contaminación y, a pesar del tratamiento de la mayor parte de sus aguas, todavía conserva este estigma por parte de la población [2].

Con el proyecto “Mapocho Pedaleable” [3] se pretende superar este problema, proponiendo la construcción de una ciclovía en el cauce del río, que acerque a los ciudadanos a un río limpio y más integrado a la ciudad.

Actualmente, la zona en la que se ubicaría la ciclovía es una zona de alta congestión, por lo que resultaría una solución apropiada para este problema, además de promover la vida sana y el deporte.

La importancia de este proyecto radica en que se estaría aprovechando un espacio que la mayor parte del año no se utiliza, el mismo lecho del río, como se ve en la Figura 1. Si ésta se hace de un material suficientemente resistente, sólo se requerirá mover los sedimentos arrastrados por el río después de las crecidas importantes, las que este estudio pretende calcular. Además, la ciclovía no altera mayormente la capacidad de transporte de caudal del río, puesto que es una intervención menor y el talud seccionador ya está construido en gran parte del río, remanente de la construcción de la Costanera Norte.

Concretamente, la ciclovía recorrerá 7 km desde el parque Bicentenario a la estación Mapocho, como se muestra en la Figura 2. Su diseño considera que la ciclovía podría inundarse en condiciones de tormenta, cuando el caudal del río se incrementa de forma considerable. En estas condiciones, el análisis del flujo y de las zonas de inundación durante las crecidas adquiere gran relevancia para el diseño de la ciclovía y su posterior operación.



Figura 1: Esquema de la ciclovía y altura máxima del río sin inundarla [3].



Figura 2: Tramo del río en que se construirá la ciclovía en el cauce del río Mapocho con indicadas zonas de probable deposición de sedimentos de acuerdo al modelo. Sobre imagen de © Google 2012 [4].

METODOLOGÍA

La investigación se divide en tres partes fundamentales: (1) el análisis hidrológico de los caudales; (2) la modelación hidráulica del flujo; y (3) el análisis del transporte de sedimentos. La metodología utilizada para cada uno de ellos se describe en los párrafos siguientes.

El análisis hidrológico de caudales se realizó a partir de datos recopilados de estaciones fluviométricas, donde las series de tiempo se ajustaron a distribuciones de probabilidad de excedencia de caudales, con el objetivo de determinar la magnitud de las crecidas relacionadas a la probabilidad de ocurrencia.

En esta investigación, la modelación hidráulica se realizó utilizando el programa HEC-RAS creado por el USACE (United States Army Corps of Engineers). El modelo considera solamente flujo unidireccional, lo cual es suficiente en este tipo de análisis a gran escala y que entrega, como resultado, la profundidad de escurrimiento y la velocidad promedio en cada sección del río.

Los aspectos importantes considerados en el modelo fueron: a) las secciones perpendiculares al cauce en dirección aproximada oriente-poniente (en total 157 secciones ubicadas cada 50 mts), obtenidas de los planos arquitectónicos con lo que se obtuvo la geometría del cauce; b) la pendiente que permitió evaluar la energía que el río va ganando a medida que avanza, de 1,1% en promedio; c) el puente a la altura de la rotonda Pérez-Zujovic, el cual es el único que obstruye el flujo natural del cauce con pilares; d) la rugosidad, utilizando el método de Cowan [7], ya que la pérdida de energía del flujo es mayor si la rugosidad es alta y viceversa; y e) el aumento de caudal producido por el Canal San Carlos, dado que con un mayor caudal, el flujo posee más capacidad de transporte de sedimentos.

Con respecto al análisis de transporte de sedimentos, la metodología consistió en que, a partir de la curva granulométrica [9] se obtiene la descripción del suelo aguas abajo del tramo propuesto para la ciclovia. Con esto, y los resultados de la modelación, se puede proceder a calcular, sección a sección, la capacidad de transporte del río. Esto se hace utilizando distintos parámetros que entrega el modelo, ya sea la energía, la altura de agua, la rugosidad, la velocidad y el caudal. Combinados estos factores se utiliza el método de Wilcock y Crowe para lechos de granulometría extendida [8], para determinar el transporte.

RESULTADO Y DISCUSIÓN

Análisis hidrológico de caudales

Debido a la información incompleta de las estaciones fluviométricas, se estimaron los caudales máximos instantáneos anuales utilizando la metodología estadística propuesta por la Dirección General de Aguas (DGA) [5].

Luego de obtener los caudales máximos instantáneos para cada estación, se procedió a ajustar las distribuciones de probabilidad (Figura 3). En este caso, como son valores extremos, se utilizó las distribuciones generalmente propuestas para este tipo de datos: Valores Extremos Tipo I, o Gumbel, y Tipo II [6].

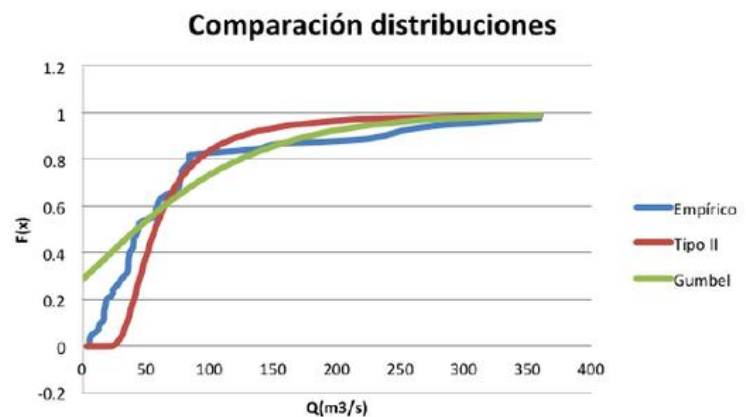


Figura 3: Comparación de distribuciones de probabilidad acumuladas, ajustadas a la serie de caudales máximos instantáneos.

A partir de este ajuste se calculó el valor del caudal en una crecida para un Periodo de Retorno (T) mayor a los años del registro de datos. Por otra parte, también se han considerado, para completar el estudio hidrológico, los valores de caudal máximo instantáneo propuesto en el Plan Maestro de Aguas Lluvias de la ciudad de Santiago [1]. Finalmente, dado que el Plan Maestro indica valores de caudales más altos, se decidió usar estos valores para mantener un modelo conservador. Se decidió utilizar, en el modelo, los valores de las crecidas de período de retorno 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, puesto que son valores comúnmente usados y representativos.

Modelación hidráulica

De la modelación hidráulica se obtuvo por resultado las características del río en cada sección analizada. Es decir, contando con parámetros relevantes del río a gran escala, como la velocidad, altura de agua, rugosidad y pérdida de energía, se pudo graficar la información para así tener una mejor idea del comportamiento de éste.

El análisis se realizó para cada valor de crecida mencionado anteriormente. En la mayor parte de los resultados se muestran las crecidas de período de retorno de 2 y 100 años debido a que son los casos más extremos, pudiendo observar así diferencias con mejor claridad.

¹ Porcentajes referidos a los alumnos cursando en dicho semestre, según encuesta realizada en la primera clase del curso. El resto de los alumnos (19%) corresponde a inactivos.

Para ilustrar esto se muestra una comparación de los resultados para dos crecidas de distinto período de retorno en torno al puente de la rotonda Pérez-Zucovic (Figura 4). Como es de esperar, la altura de agua (en azul) en la crecida de 2 años de período de retorno es menor que en la de 100. Es importante notar también que, para la crecida de 100 años, el agua no sobrepasa los márgenes, indicando que el diseño de éste es para una crecida de una magnitud aún mayor.

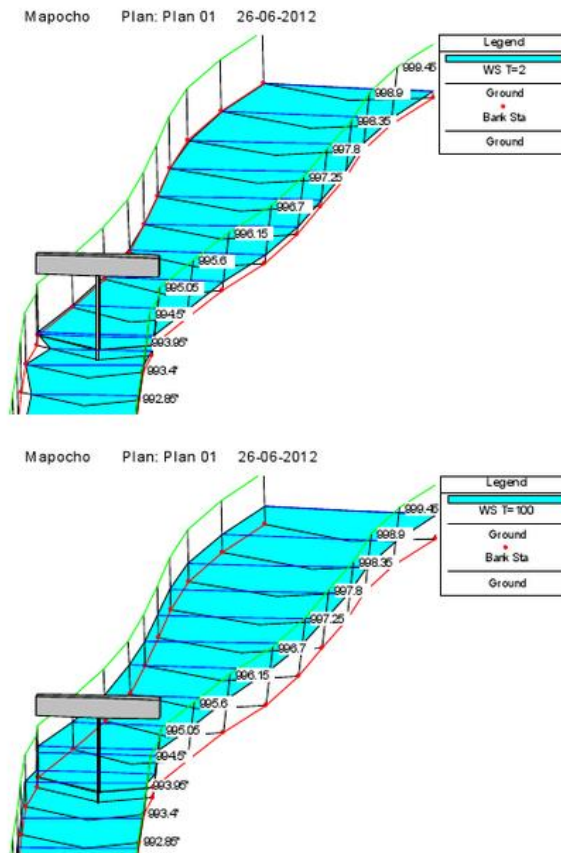


Figura 4: Modelación HEC-RAS para T = 2 y T = 100 años en puente rotonda Pérez-Zujovic. En azul está la superficie del agua (WS), en negro, la sección del canal (Ground).

Si se usara el muro que quedó de la construcción de la Costanera Norte como división de la ciclovía, éste evitaría inundar la ciclovía con la crecida de dos años.

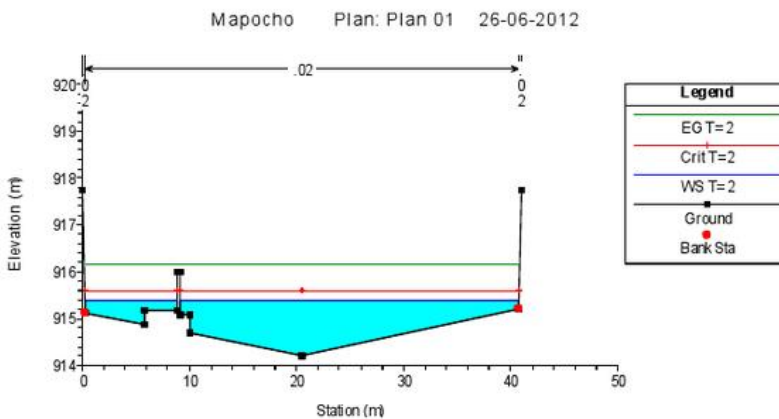


Figura 5: Modelación HEC-RAS para T = 2 años, sección cercana al puente Manuel Rodríguez. Se puede ver, claramente, el muro que actualmente divide las aguas, remanente de la construcción de la Costanera Norte. La altura en azul es el nivel de agua (WS), la roja es la altura crítica (Crit) y la verde es **altura de energía (EG)**.

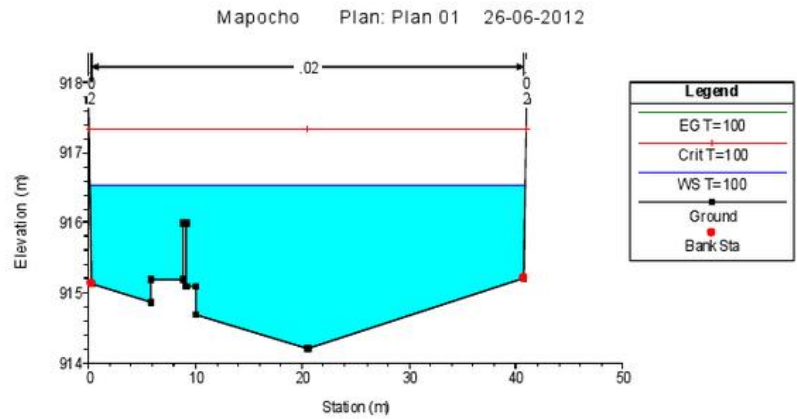


Figura 6: Modelación HEC-RAS para $T = 100$ años, en sección puente Manuel Rodríguez. La altura en azul es el nivel de agua (WS), la roja es la altura crítica (Crit) y la verde es la altura de energía (EG).

Cabe señalar que en todos los casos modelados, es decir, 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años de período de retorno, el número de Froude antes del puente de la rotonda Pérez-Zujovic es menor a 1, lo que significa que se está en presencia de régimen subcrítico o régimen de río. Aguas abajo, sin embargo, por causa del cambio en el coeficiente de rugosidad de Manning, el número de Froude pasa a ser mayor a 1, es decir, se tiene régimen supercrítico o de torrente. La Figura 6 lo ilustra, mostrando que el eje hidráulico va sobre la altura crítica aguas arriba del puente y, aguas abajo, pasa a ser torrente. Análisis adicionales de este cambio de régimen y las consecuencias sobre el puente se abordarán en una investigación futura.

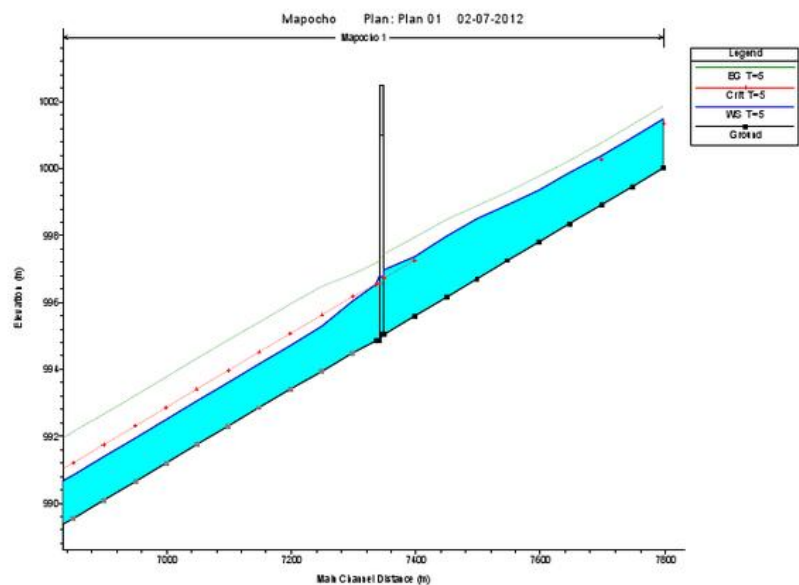


Figura 7: Modelación HEC-RAS para $T = 5$ años. Paso de río a torrente en el puente Pérez Zujovic. La altura en azul es el nivel de agua (WS), la roja es la altura crítica (Crit) y la verde es la altura de energía (EG).

Análisis del transporte de sedimentos

A partir de los resultados obtenidos en la modelación hidráulica anterior, es posible calcular la capacidad de arrastre de fondo de sedimentos, es decir, la cantidad y tamaño de piedras que puede arrastrar el río para las distintas crecidas.

Además se debe señalar que, en los sectores interiores de las curvas del río, también puede ocurrir sedimentación, la cual no es considerada por este análisis unidimensional, porque dicha sedimentación se produce debido a flujos secundarios controlados por la aceleración centrífuga local.

Transporte de Sedimentos

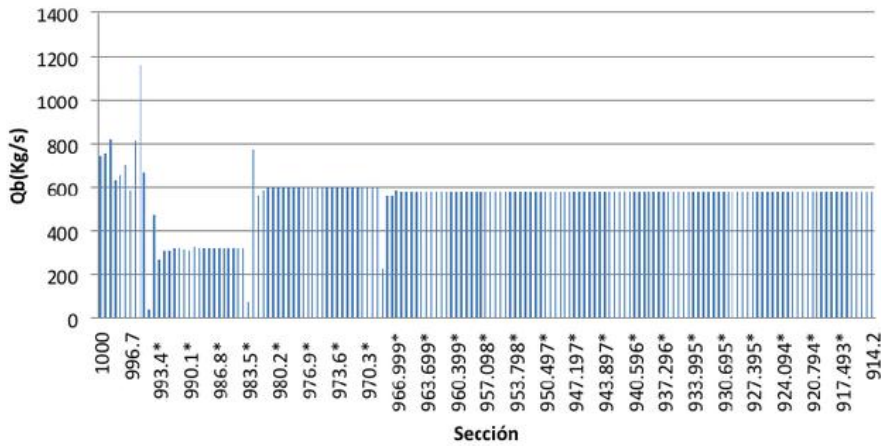


Figura 8: Transporte de sedimentos en kg/s para cada sección para T = 2.

Transporte de Sedimentos

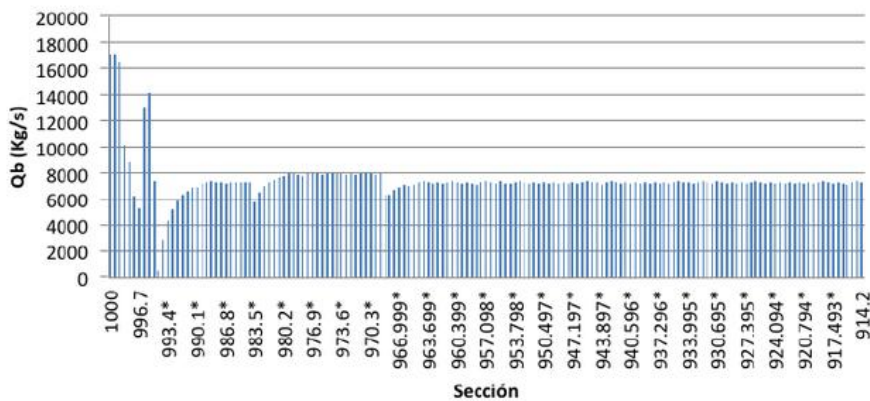


Figura 9: Transporte de Sedimentos en kg/s para cada sección para T = 100.

Se puede observar que hay dos zonas en las que cambia abruptamente el transporte de sedimentos (Figuras 8 y 9). Primero, en la sección 995, donde se ubica el puente de la rotonda Pérez Zujovic y se produce el cambio de rugosidad del lecho. Además, el lecho se va volviendo más angosto paulatinamente en ese tramo. El segundo punto de interés es en la sección 983.5, que es justamente la sección donde el canal San Carlos aporta caudal, produciendo un transporte mayor (Figura 2).

Se podría decir que la zona tentativa de mayor sedimentación sería entre el puente de la rotonda Pérez-Zujovic y la unión con el canal San Carlos, ya que es una zona donde es probable que los sedimentos se acumulen. Otra zona con probable acumulación de sedimentos es la sección 969.2, donde hay un cambio de forma importante en el río, pues se incorpora un muro en su interior. Finalmente se muestra en la Figura 2 un mapa global con las zonas probables de depositación de sedimentos.

Para conocer el tamaño de los sedimentos transportados, se realiza un promedio a lo largo de las secciones del río, para los períodos de retorno T = 2 y T = 100, y se obtiene por resultado el gráfico de la Figura 10.

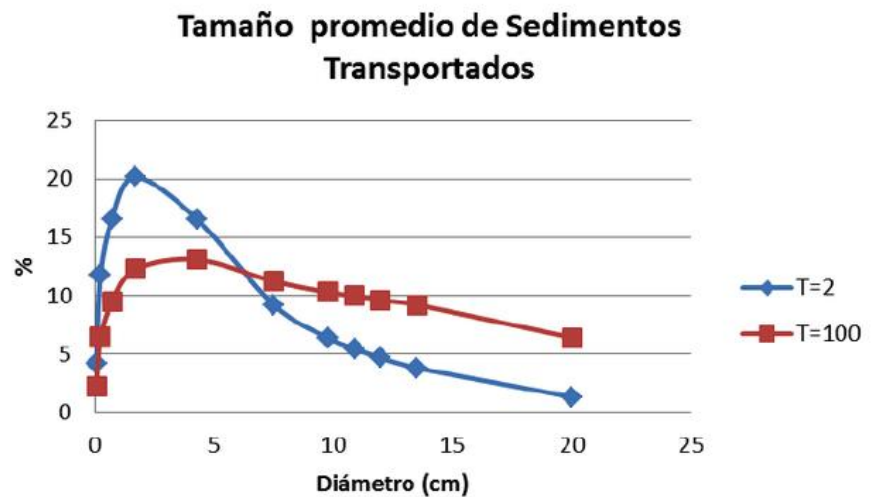


Figura 10: Tamaño promedio de sedimentos transportados para las crecidas de período de retorno 2 y 100.

Se puede observar que hay un mayor transporte de sedimentos para crecidas más grandes de, aproximadamente, 10 veces más. Además, los sedimentos transportados son de mayor tamaño en las crecidas mayores. El tamaño promedio (ponderado) para la crecida de 2 años es de 4,4 cm y, para la de 100 años, es de 7,5 cm, lo cual es aproximadamente un 70% más grande. Esto se debe a que un caudal mayor tiene más capacidad de arrastre para transportar grava de mayor tamaño que una crecida más pequeña.

CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó un estudio de crecidas en el río Mapocho para determinar los caudales que este río lleva en eventos de crecidas, con el fin de poder hacer un análisis acabado del impacto de una ciclovía en la zona canalizada del torrente. Después de esto, se modeló el río hidráulicamente en el programa HEC-RAS y se obtuvieron resultados asociados al comportamiento de éste para eventos de crecidas. Finalmente, se recurrió a un análisis del transporte de sedimentos utilizando el modelo de Wilcock y Crowe [8] para lechos con granulometría extendida, con lo cual se obtuvo una estimación de la capacidad de transporte de sedimentos, pudiéndose definir las zonas más propensas de la ciclovía a recibir depositación de estos.

Para el análisis de crecidas, se estudiaron los caudales máximos instantáneos anuales en las estaciones fluviométricas Mapocho, en Los Almendros, y Arrayán, en La Montosa. Se realizó un ajuste probabilístico a los datos utilizando las funciones de probabilidad Gumbel y Valores Extremos Tipo II. Estos resultados fueron comparados con los valores propuestos en el Plan Maestro de Aguas Lluvias de Santiago [1]. Finalmente, se decidió utilizar los caudales propuestos por el Plan Maestro de Aguas Lluvias, dado que son valores más conservadores.

Se construyó un modelo hidráulico del río Mapocho para el tramo en que se construirá la ciclovía, el cual sirve para obtener una aproximación general de las características del río como velocidad, pendiente de la línea de energía, altura de agua y radio hidráulico, entre otras. Este modelo puede ser usado para futuras investigaciones que evalúen cambios en el diseño de la ciclovía.

A partir del modelo, se determinó un cambio importante en el régimen del río al pasar el puente bajo la rotonda Pérez-Zujovic y cambiar la rugosidad. Pasa de ser subcrítico a supercrítico, lo cual es bastante relevante para caracterizar el comportamiento del río. Se definieron dos zonas con alta probabilidad de sedimentación para eventos de crecidas, las cuales se ubican entre el puente de la rotonda Pérez-Zujovic y la unión con el canal San Carlos y en el tramo en que la sección del río cambia. Se identificó, también, el tamaño y la cantidad de sedimentos que el río transporta, los cuales aumentan un 70% de tamaño y 10 veces en cantidad entre las crecidas de 2 y 100 años de período de retorno.

Estos resultados también pueden ser utilizados para una mejor comprensión del río que cruza la ciudad, para posteriores obras e intervenciones, esperando que intenten, siempre, mantener la dinámica natural del río.

PRINCIPIO CIENTÍFICO UTILIZADO

Distribución Gumbel o tipo I

La función densidad $f_x(x)$ y distribución acumulada $F_x(x)$ son:

$$f_x(x) = \exp(-a(x-u) - \exp(-a(x-u)))$$

$$F_x(x) = \exp(-\exp(-a(x-u)))$$

Donde:

$$a = \bar{x} - \sigma_x \frac{y_n}{S_n}$$

$$a = \frac{S_n}{\sigma_x}$$

Distribución de valores extremos tipo II:

La función densidad $f(y)$ y distribución acumulada $F(y)$ son respectivamente

$$f(y) = \frac{k}{u} \left(\frac{u}{y}\right)^{k+1} \exp\left(-\left(\frac{u}{y}\right)^k\right)$$

$$F(y) = \exp\left(-\left(\frac{u}{y}\right)^k\right)$$

Donde los momentos de la distribución son:

$$y = u \Gamma\left(1 - \frac{1}{k}\right)$$

$$\sigma_y^2 = u^2 \left(\Gamma\left(1 - \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 - \frac{1}{k}\right) \right)$$

Luego:

$$c_v^2 = \left(\frac{\Gamma\left(1 - \frac{2}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1 - \frac{1}{k}\right)} \right) - 1$$

Método de Cowan para determinar la rugosidad del lecho:

Los valores utilizados para el cálculo de n son:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m$$

$n_0 =$ material del lecho: Grava gruesa = 0,025

$n_1 =$ irregularidades: Moderadas = 0,01

$n_2 =$ variaciones de la sección: Graduales = 0,000

$n_3 =$ obstrucciones: Despreciables = 0,000

$n_4 =$ vegetación: Poca = 0,005

$m =$ curvas: pocas = 1,00

$$n = (0,025 + 0,01 + 0 + 0 + 0,005) * 1 = 0,04$$

Ecuación de Wilcock y Crowe (2003) para lechos de granulometría extendida

Definiendo F_i como el porcentaje retenido para el diámetro d_i . El gasto sólido de fondo se expresa de forma adimensional como:

$$W_i = \frac{(SG - 1)g}{F_i u_{*i}^3} q_{bi}$$

Donde q_{bi} es el gasto sólido de fondo para la fracción de diámetro d_i y la velocidad de fricción definida como $u_* = \sqrt{gRS}$.

(1) Se calcula el esfuerzo de corte de referencia τ_{rm} para el diámetro d , que considera el efecto de escondimiento:

$$\tau_{rm} = \rho g (SG - 1) d_g (0,021 + 0,15 e^{-20F_s})$$

Donde F_s es la fracción de arenas < 2 mm, y $d_g = (d_{34} d_{16})^{(1/2)}$

(2) Se calcula el esfuerzo de corte de referencia para la fracción i .

$$\tau_{ri} = \tau_{rm} \left(\frac{d_i}{d_g} \right)^b$$

$$b = \frac{0,67}{1 + \exp\left(1,5 - \frac{d_i}{d_g}\right)}$$

(3) El esfuerzo de corte adimensional.

$$\phi = \frac{\tau}{\tau_{ri}}$$

Donde $\tau = \rho g R S$ es el esfuerzo de corte.

(4) El gasto sólido adimensional se calcula entonces como:

$$W_i = \begin{cases} 0,002\phi^{7,5} & \phi < 1,35 \\ 14 \left(1 - \frac{0,894}{\sqrt{\phi}}\right)^{4,5} & \phi \geq 1,35 \end{cases}$$

(5) El gasto sólido de fondo para la fracción i se obtiene a partir de la primera ecuación. Finalmente:

$$q_b = \sum_{i=1}^N q_{bi}$$

Este proceso se realiza para todas las 157 secciones del canal a partir considerando los resultados del modelo hidráulico.

GLOSARIO

Altura Crítica: Es la altura que corresponde al número de Froude igual a 1, es decir, la transición entre régimen de río a torrente y mínima energía específica del flujo.

Altura de Energía: La altura de energía es la cuantificación gráfica de la energía del río. Corresponde a la suma de la altura de agua y de velocidad promedio del agua del río. En otras palabras, si el río se encuentra con una pendiente adversa, la altura que alcanzaría antes de detenerse sería ésta (sin contar pérdidas de fricción).

Eje Hidráulico: Es el trazado de la línea de la superficie libre del agua a medida que fluye. En otras palabras, es la línea que muestra la altura de agua del río. El eje hidráulico es distinto para las crecidas de distinto período de retorno.

Número de Froude (F): Parámetro adimensional que relaciona la inercia del flujo con la gravedad, que permite identificar, entre otras cosas, si el tipo del flujo es de río (subcrítico) o torrente (supercrítico). Un régimen de río implica alturas de agua mayores y velocidades más bajas, al contrario, un régimen de torrente implica velocidades altas y alturas de agua bajas.

Periodo de Retorno (T): Tiempo (en años) que, en promedio, pasa entre dos eventos de crecida con una cierta magnitud. Una crecida de $T = 100$ implica que, en promedio, ese caudal se repite cada 100 años.

Río Vs Torrente: En la naturaleza, los cauces se pueden encontrar de estas dos formas. Con el mismo caudal, un río se puede presentar de las dos maneras dependiendo, principalmente, de la rugosidad y pendiente. El régimen de río equivale a un flujo más lento con una mayor altura de agua. Por otra parte, el torrente corresponde a un flujo de baja altura y alta velocidad. Es equivalente a régimen subcrítico vs régimen supercrítico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este artículo agradecen a Tomás Echiburú y Osvaldo Larrain, autores originales de la idea y proyecto Mapocho Pedaleable.

REFERENCIAS

1. DIRECCIÓN DE OBRAS HIDRÁULICAS, MOP. "Plan Maestro de evacuación y drenaje de Aguas Lluvias del Gran Santiago", 1999.
2. SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS SANITARIOS. "Informe de Gestión del Sector Sanitario", 2010.
3. CAMACHO, I., INOSTROZA, D., MUÑOZ, J., VEGA, P. "Informe Final: Mapocho Pedaleable". Curso Evaluación Social de Proyectos. Departamento de Ingeniería de Transporte, Facultad de Ingeniería Universidad Católica, 2011.
4. Imágenes obtenidas desde © 2012 Google Earth, © 2012 Geo Eye, © 2012 Digital Maps.
5. DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS, MOP. "Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica", 1995.
6. VARAS, E., BOIS, P. "Hidrología Probabilística". Ediciones Universidad Católica de Chile, 1998.
7. GONZÁLEZ, R. "Curso Taller de Obras Hidráulicas, Capítulo 1.4: Elementos de Hidráulica Fluvial". Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental. Facultad de Ingeniería, Universidad Católica, 2011.
8. WILCOCK, P., CROWE, C. "Surface-based Transport Model for Mixed-Size Sediment". Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 129, No. 2, pp. 120-128, 2003.
9. DIRECCIÓN DE OBRAS HIDRÁULICAS. Municipalidad de Padre Hurtado y Comisión Nacional del Medio Ambiente, "Proyecto Técnico: Extracción Industrial de áridos en Río Mapocho, Sector El Trebal, Comuna de Padre Hurtado, Región Metropolitana, Chile", 2009.

EQUIPO DE INVESTIGADORES

- 1 José Luis Domínguez
- 2 Profesor Cristián Escauriaza
- 3 Maricarmen Guerra



1 2 3