

**XXIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
CARTAGENA DE INDIAS COLOMBIA, SEPTIEMBRE 2008**

**CONSIDERACIONES SOBRE EL DISEÑO DE OBRAS SOMETIDAS A LA
ACCIÓN DE FLUJOS DENSOS**

J.D. Brea, P.Spalletti, P. Jaime, J. Herrera.

*Laboratorio de Hidráulica - Instituto Nacional del Agua, Argentina
dbrea@ina.gov.ar, pspallet@ina.gov.ar, pjaime@ina.gov.ar, jherrera@ina.gov.ar*

RESUMEN:

La zona andina ubicada en la región noroeste de argentina, se caracteriza por la generación de importantes procesos de movimientos en masa activos que afectan importante infraestructura vial, agrícola, y fundamentalmente, petrolera y gasífera. El estudio de este tipo de fenomenología resulta pues de sumo interés en el campo de la ingeniería, tanto desde el punto de vista del conocimiento de los procesos, como del desarrollo de metodologías de diseño de obras sometidas a la acción de este tipo de flujos. En el presente trabajo se efectúan consideraciones y se presentan ejemplos sobre la experiencia adquirida en el diseño de umbrales de fondo para estabilizar lechos de ríos y protecciones de gasoductos sometidos a la acción de flujos densos. También, se presenta la aplicación del modelo numérico FLO-2D a uno de los problemas citados, como una contribución en la evaluación del grado de severidad de estos fenómenos, proporcionando información sobre las características que interesan en el diseño de medidas estructurales.

ABSTRACT:

The Andean zone located in the northwest region of Argentina, is characterized by the generation of debris flows that affect important road infrastructure, agricultural, and fundamentally, oil and gas pipelines. The study of such phenomena is therefore of great interest in the field of engineering, such from the point of view of understanding the processes as the development of methodologies for design works under the action of such flows. In the present paper, considerations and examples of experience in the design of structures to stabilize beds of rivers and protections of pipelines brought to debris flows, are presented. It also presents the application of the numerical model FLO-2D in one of the problems cited, as a contribution in assessing the degree of severity of these phenomena, providing information on the characteristics that interest in the design of structural measures.

PALABRAS CLAVES:

flujos densos obras

INTRODUCCIÓN

La zona andina ubicada en la región noroeste argentina, se caracteriza por la generación de importantes procesos de movimientos en masa activos, tales como deslizamientos, caídas de rocas, flujos de lodo, así como también erosión de laderas. Estos procesos afectan importante infraestructura vial (Andes Consultora, 2003), agrícola y, fundamentalmente, petrolera y gasífera (Transportadora Gas del Norte, 2007), desarrollada en la zona. Estos procesos además aportan gran cantidad de material detrítico al sistema condicionando la ocurrencia de flujos de barro en áreas muy escarpadas y con condiciones geológicas frágiles. Las lluvias intensas frecuentemente actúan como disparadoras de estos procesos induciendo la falla de las laderas y el flujo de detritos, y causando efectos severos. Así, los eventos de flujos densos son inducidos por la lluvia pero también gobernados por la disponibilidad de sedimentos y rocas en la zona de acumulación.

El estudio de este tipo de fenomenología resulta pues de sumo interés en el campo de la ingeniería, tanto desde el punto de vista del conocimiento de los procesos, como del desarrollo de metodologías de diseño de obras sometidas a la acción de este tipo de flujos, que generan, en general, sollicitaciones de magnitudes superiores a las correspondientes a flujos de agua cargados de sedimentos.

La importancia de la observación y análisis de estas crecidas, radica en conocer las características de los flujos densos generados con este tipo de fenómenos, el área afectada y el espesor de los depósitos producidos, ya que la predicción precisa de la distancia recorrida por estos flujos y de las velocidades y niveles alcanzados puede proporcionar una eficaz ayuda en la delimitación de áreas de riesgo y proporcionar los parámetros para el diseño de medidas de protección y obras de sistematización que deben considerar las sollicitaciones generadas por estos flujos, tanto desde el punto de vista del diseño estructural, como del de las erosiones producidas.

En efecto, más allá de las investigaciones básicas sobre el tema de este tipo de flujos, la hidráulica de ríos apunta a las aplicaciones prácticas en el campo de la ingeniería relacionadas con este tipo de fenómenos, las cuales necesitan imperiosamente de la cuantificación de los procesos.

Por lo tanto, gran parte de los desarrollos realizados desde la especialidad tratan de explicar el comportamiento de los flujos densos a partir de las fuerzas intervinientes en el proceso, llegando a ecuaciones que permiten a través de su resolución, poner un número a las variables en juego.

Debe resaltarse que los flujos de barro y de detritos han sido estudiados por un gran número de autores, y desde diferentes puntos de vista: observaciones de campo, características del flujo, comportamiento de los materiales, composición, etc. A pesar de ello, no hay todavía un acuerdo en la bibliografía específica del tema en lo que hace a una clasificación única y aceptada de este tipo de procesos.

Este universo de definiciones, interpretaciones y caracterizaciones de los flujos densos, hace dificultosa la tarea de adoptar definiciones, sin tomar partido por alguna de las escuelas o de algún autor. En este contexto, y siendo las aplicaciones prácticas en el campo de la ingeniería hidráulica relacionadas con estos fenómenos las de mayor interés ingenieril, los desarrollos que parten de conocer la física del problema, analizando las fuerzas en juego, y que plantean ecuaciones que resuelven la dinámica del problema, resultan los más adecuados.

Aún cuando la aplicación de los modelos surgidos de estas metodologías es todavía difícil, debiendo muchas veces recurrirse al empirismo para la resolución de casos prácticos, el conocimiento del comportamiento cualitativo de los flujos densos que se adquiere que a partir de su desarrollo, constituye una base fundamental frente a un problema de ingeniería concreto con

necesidad de ser resuelto (Brea, Spalletti, 2003). En el presente trabajo se efectúan consideraciones y se presentan ejemplos sobre la experiencia adquirida en el diseño de obras sometidas a la acción de flujos densos.

CLASIFICACIÓN DE FLUJOS DE BARRO

En situaciones normales, en los flujos cargados de sedimentos estos son transportados por la corriente, teniendo poca influencia en el comportamiento de la misma. En otras situaciones, la presencia de muy grandes cantidades de partículas de sedimentos es de tal magnitud que influye notablemente en la mezcla, cambiando las propiedades del fluido y el comportamiento del flujo. A los flujos de estas características se los denomina flujos hiperconcentrados (Wan, Wang, 1994).

En el marco de los flujos hiperconcentrados de sedimentos, los flujos densos pueden clasificarse en tres tipos: inundaciones o crecidas de barro (mud floods), flujos de barro (mudflows) y flujos de detritos (debris flows) (Julien, 2000). Se diferencian entre sí en los procesos físicos involucrados en cada uno de ellos, que son función de la reología de la mezcla agua-sedimento.

El volumen y las propiedades de la matriz del fluido (mezcla agua-sedimento) gobiernan la hidráulica del flujo, su desplazamiento y la deposición de los sedimentos. Las propiedades dependen de la concentración de sedimentos, de la distribución granulométrica y del contenido de arcillas.

Las inundaciones o crecidas de barro son típicamente hiperconcentraciones de partículas no cohesivas, que presentan un comportamiento muy fluido para un rango de concentraciones de sedimento en volumen (C_v) de hasta un 40 %. Tienen régimen turbulento, dependiendo la resistencia al flujo de la rugosidad de los bordes, como en los flujos turbulentos en agua clara.

Los flujos de barro se caracterizan por una concentración de limos y arcillas, lo suficientemente alta como para cambiar las propiedades de la matriz del fluido, favoreciendo el transporte de grandes tamaños de material. De este modo, los flujos de barro se comportan como una masa fluida muy viscosa, que a altas concentraciones es capaz de transportar en superficie piedras de gran tamaño. La C_v de la matriz del fluido en flujos de barro está en un rango entre el 45 y el 55 %. Los flujos de barro presentan altas viscosidades y esfuerzos de cedencia, pudiendo viajar grandes distancias en pendientes moderadas a bajas velocidades, para depositarse en forma lobular en los abanicos aluviales.

Los flujos de detritos se componen de una mezcla de materiales clásticos, incluyendo grandes piedras, troncos, etc, donde la colisión lubricada entre las partículas es el mecanismo dominante de disipación de energía. El conocimiento de este tipo de flujos se debe en gran medida a Takahashi (Takahashi, 1978).

La Tabla 1, desarrollada a partir de datos de laboratorio, detalla las cuatro diferentes categorías de flujos hiperconcentrados de sedimentos y las características dominantes del flujo (Flo-2D Users Manual, 2003).

Tabla 1. – Clasificación de flujos hiperconcentrados de sedimentos.

	Concentración de sedimentos		Características del flujo
	en volumen	en peso	
Deslizamiento	0,65 - 0,80	0,83 - 0,91	No fluye; falla por deslizamiento de bloques
	0,55 - 0,65	0,76 - 0,83	Falla por deslizamiento de bloques con deformación interna durante el deslizamiento; arrastre lento antes de la falla
Flujo de barro	0,48 - 0,55	0,72 - 0,76	Flujo evidente; flujo de barro sostenido de arrastre lento; deformación plástica bajo su propio peso; cohesivo; no se esparce en superficie llana
	0,45 - 0,48	0,69 - 0,72	Flujo que se esparce en superficie llana; flujo cohesivo; alguna mezcla
Crecida de barro	0,40 - 0,45	0,65 - 0,69	El flujo se mezcla fácilmente; muestra características fluidas en la deformación; se extiende en superficie horizontal pero mantiene una superficie fluida inclinada; asentamiento de partículas grandes (canto rodado); con aparición de ondas que disipan rápidamente
	0,35 - 0,40	0,59 - 0,65	Markado asentamiento de gravas; desparramamiento casi completo en superficie horizontal; aparece la superficie líquida con dos fases fluidas; las ondas viajan en superficie
	0,30 - 0,35	0,54 - 0,59	Separación del agua en superficie; las ondas viajan fácilmente; la mayoría de la arena y de la grava ha asentado y se mueve como carga de fondo
	0,20 - 0,30	0,41 - 0,54	Acción distinta de la onda; superficie fluida; todas las partículas descansan sobre el lecho en condiciones de fluido quieto
Crecida de agua	< 0,20	< 0,41	Crecida de agua con carga de fondo suspendida convencional

Otros autores han dividido las corrientes de detritos en dos tipos principales (Coussot y Meunier, 1996): la corriente de detritos granular (granular debris flow) que contiene principalmente material grueso y que se representa por un flujo turbulento, friccional o inercial; y la corriente de detritos de alta viscosidad (viscous debris flow o muddy debris flow), que contiene principalmente material fino y que se caracteriza más bien por tener un comportamiento tipo laminar.

Cómo se dijo, el comportamiento reológico de los flujos de barro permite su análisis a partir de las tensiones de corte puestas en juego en este tipo de fenómenos, e involucra la interacción de diversos y complejos procesos físicos. Los cuatro elementos clave en el intercambio de momento de un flujo hiperconcentrado de sedimentos son: la viscosidad de la matriz de fluido, la turbulencia, la fricción entre partículas y la colisión entre las mismas.

La cohesión entre las partículas finas de sedimento controla el comportamiento no newtoniano de la matriz de fluido. Esta cohesión contribuye al esfuerzo de cedencia (yield stress) τ_y , que debe ser excedido por una tensión aplicada para iniciar el movimiento del fluido.

Para grandes tasas de corte, pueden generarse tensiones turbulentas. Una componente adicional de la tensión de corte, la dispersiva, aparece en flujos turbulentos por la colisión de las partículas de sedimento bajo grandes tasas de deformación. Las tensiones dispersivas altas ocurren cuando las partículas más grandes de sedimento dominan el flujo y el porcentaje de partículas cohesivas es pequeño. A muy altas concentraciones de sedimentos finos, el impacto turbulento y dispersivo entre partículas es suprimido, y el flujo se aproximará a uno laminar. La concentración de sedimentos puede variar drásticamente en un mismo evento de crecida, alternándose el dominio de las tensiones viscosas y turbulentas, produciendo flujos pulsantes.

La tensión de corte total en flujos hiperconcentrados de sedimentos, incluyendo los tres tipos descriptos en el punto anterior, puede ser calculada por la suma de cinco componentes:

$$\tau = \tau_c + \tau_{mc} + \tau_v + \tau_t + \tau_d \quad [1]$$

donde la tensión de corte total τ depende del esfuerzo de cedencia cohesivo τ_c , la tensión de corte de Mohr-Coulomb τ_{mc} , la tensión de corte viscosa τ_v , la tensión de corte turbulenta τ_t , y la tensión de

corte dispersiva τ_d . Escribiendo la ecuación anterior en términos de la tasa de corte dv/dy o gradiente de velocidad, se obtiene la ecuación cuadrática reológica (O'Brien and Julien, 1985):

$$\tau = \tau_y + \eta \left(\frac{dv}{dy} \right) + C \left(\frac{dv}{dy} \right)^2 \quad [2]$$

siendo η la viscosidad dinámica; τ_y el esfuerzo de cedencia, y C representa el coeficiente de la tensión de corte inercial.

La resolución de la ecuación diferencial [2] presentada permite desarrollar modelos numéricos, como el que se presenta en puntos siguientes.

DISEÑO DE OBRAS SOBRE LA BASE DE EXPRESIONES EMPÍRICAS

Existen en la bibliografía una serie de relaciones simples para estimar los parámetros necesarios para un diseño de obra sometida a la acción de flujos densos (Rickermann, D., 1999, Costa, 1984). La verificación de la validez y los límites de esas relaciones es dificultosa debido a la variedad en la composición de los materiales movilizados, que puede restringir su aplicabilidad a un estrecho rango, a que la replicación de los eventos de flujos densos en laboratorio es difícil, a que las leyes de semejanza son más complejas que para flujos de aguas claras, y a que el número de datos de campo es muy limitado. Esta última restricción es aplicable al uso de modelos de simulación numérica cuya calibración exige observaciones de campo que permitan caracterizar la magnitud, densidad y viscosidad de los flujos de barro, como se verá en el punto siguiente.

En estas condiciones, resulta dificultosa la definición de parámetros de diseño, más aún si se parte de una casi total falta de datos de base a tal fin. El proyecto de una obra a la acción de flujos densos debe incluir consideraciones de diseño sobre los siguientes aspectos, entre otros (VanDine, 1996): frecuencia de ocurrencia, magnitud de diseño o volumen, caudal máximo y profundidad, características granulométricas del material, líneas probables de flujo, distancia de llegada, fuerza de impacto, trepada y sobreelevación, ángulo de incidencia.

La mayor parte de los puntos citados presenta una importante dificultad para su definición, lo que se ve agravado casi siempre por la ausencia total de datos de base. Se presentan no obstante algunas expresiones que permiten estimar acciones para que las obras proyectadas tengan en cuenta los flujos densos que pueden incidir sobre ellas.

La escasa presencia de poblaciones al pie de las montañas de la zona, implica que la tipología de este tipo de intervenciones en el noroeste andino argentino, está orientada a obras de defensa de ductos, de control de lecho en cauces, y protecciones de márgenes. En estas condiciones, las variables principales a considerar son el caudal de diseño, su recurrencia, las características granulométricas del sedimento, la fuerza de impacto, velocidades, tirantes, erosiones, y sobreelevación.

Un parámetro importante es la concentración de sedimento en volumen (C_v) de la mezcla. A partir de este parámetro puede estimarse la viscosidad dinámica (Julien, León, 2000).

La descarga máxima de un flujo denso depende de la geometría del canal y de la velocidad del flujo, la que queda determinada por la pendiente y geometría del canal, y la viscosidad dinámica y la densidad de la matriz del fluido. Existen expresiones para el cálculo de la velocidad, que dependen de cómo se considere el tipo de flujo. Por ejemplo, si se considera al flujo newtoniano y laminar, la velocidad puede calcularse mediante la ecuación de Poiseuille:

$$V = (1/L) \gamma \sin\theta h^2 / \nu \quad [3]$$

donde: V = velocidad

θ = gradiente del canal

h = tirante del flujo

γ = peso específico del flujo denso

ν = viscosidad dinámica del flujo denso

L = constante función de la forma de la sección transversal del canal (3 para canales anchos, 8 para canal semicircular).

Como ya se expresara, un parámetro de importancia cuando se proyecta una obra transversal al flujo, es la fuerza de impacto sobre la misma. El diseño de estos tipos de estructuras de control de flujos densos debe considerar tanto el empuje dinámico como la fuerza de impacto. Hungr et al. and Thurber Consultants han resumido los cálculos para estos parámetros (Van Dine, 1996). La ecuación de momentum que considera el pico estimado del la onda de flujo denso viajando a una velocidad uniforme, es usado para calcular el empuje dinámico. Dicho empuje puede calcularse mediante la expresión:

$$F = \rho A V^2 \sin\beta \quad [4]$$

donde: F = empuje dinámico

ρ = densidad del flujo denso

A = área transversal del flujo

V = velocidad del flujo

β = ángulo entre la dirección del flujo y la cara de la estructura

Este empuje debe ser distribuido en un área de igual ancho que la del flujo, y de altura igual a 1.5 del tirante, valor que tiene en cuenta la trepada del flujo. Las normas japonesas indican que si el frente de la onda del flujo pega contra la estructura, el empuje puede ser el doble del calculado. (Government of Japan, 1981).

Como también ya se señalara, otra variable de importancia es la erosión producida por el flujo. La experiencia japonesa (Rickenmann, 1990) recomienda asumir una profundidad de erosión de 5 metros si no hay información básica que permita estimarla con corrección, caso que se corresponde con el del presente estudio. Una simple expresión empírica propuesta por Kronfellner-Kraus permite calcular la profundidad máxima de erosión D en función de la pendiente del lecho S:

$$D = 1.5 + 12.5 S \quad [5]$$

Sobre esta base de relaciones simples para estimar los parámetros necesarios para un diseño de obra sometida a la acción de flujos densos, se desarrollaron dos casos prácticos. El primero fue en el río Colanzulí-Iruya, y consistió en el proyecto de una serie de umbrales de fondo para estabilizar la cota del lecho del río (Andes, 2003). La cuenca del río Iruya se destaca por su elevada producción de sedimentos, aportando al sistema del río Paraná, unos 40 millones de toneladas anuales de sedimento (Pérez Ayala, Rafaelli, Brea, Peviani, 1998).

Dentro de la información básica recopilada para la ejecución del estudio, se obtuvo una filmación de un evento de flujos densos en la zona. A comienzos de febrero de 1999 se produjo un evento de crecida del río Colanzulí, afluente del Iruya, que pudo ser filmado a su paso frente a la ciudad de Iruya. Este registro fue un dato fundamental para el estudio y caracterización de los flujos hiperconcentrados en la cuenca. El análisis del citado video permitió observar que las características

de la crecida del río Colanzulí frente a la ciudad de Iruya. No obstante, debe tenerse en cuenta en estos casos que en un mismo evento pueden darse diferentes tipos de flujo denso, dependiendo, entre otros factores, de las características de los materiales de las cuencas de aporte y de la concentración de sedimentos de la mezcla en el colector principal (Spalletti, L., Brea, J.D., Spalletti, P.; 2003). En las figuras siguientes se presentan dos fotos del pasaje de la crecida de barros citada.



Figura 1.- flujo de barro frente a la ciudad de Iruya

El proyecto de los umbrales se realizó sobre la base de las expresiones empíricas citadas, dando lugar a tres alternativas de materiales a utilizar: gaviones, hormigón simple y hormigón armado.

El segundo caso práctico consistió el diseño de una obra protección de un gasoducto de suma importancia regional, que cruza el río San Andrés en el noroeste argentino (Transportadora Gas del Norte, 2007). El Gasoducto Norandino presenta una trayectoria que acompaña aproximadamente el cauce de dicho río, atravesando su traza una gran cantidad de cursos tributarios al mismo y una serie de cruces principales. Entre estos últimos se encuentra el denominado cruce San Andrés I, donde se desarrollaron los estudios.

A partir del seguimiento de los relevamientos topográficos realizados en el lugar del cruce y de las constataciones, se estableció la existencia de un proceso erosivo que se magnificó durante los eventos de crecidas registrados a principios del año 2007. Este proceso erosivo tuvo como consecuencia directa un descenso generalizado del lecho del río en la zona del cruce del orden de los 2 m, dejando al gasoducto con una tapada cercana a los 4 m, tal como puede apreciarse en la Figura 2.

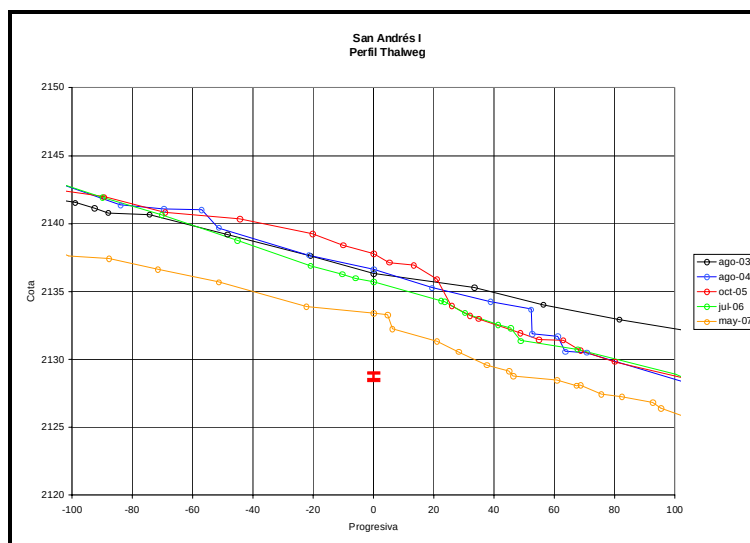


Figura 2.- Perfiles longitudinales del lecho del río San Andrés

Las circunstancias antes señaladas determinaron la necesidad de evaluar críticamente las condiciones del mencionado cruce, estableciendo la probabilidad de que se produzcan nuevos procesos erosivos y evaluando las alternativas posibles para controlar y minimizar los mismos.

Debe decirse que el cruce propiamente dicho fue reparado en el año 2001 a partir de los daños producidos por una importante crecida del curso natural. Hasta ese momento, el cruce se encontraba emplazado 250 m aguas arriba de su traza actual, en un sector del río que presenta un fuerte estrechamiento rocoso. Los procesos erosivos derivaron en la rotura producida en el mes de marzo de ese año, quedando el conducto expuesto y siendo erosionada su base de apoyo hasta alcanzar una situación tal como se ilustra en las fotografías de la Figura 3.



Figura 3.- Perfiles longitudinales del lecho del río San Andrés

En el sector del cruce, el curso presenta un ancho del orden de los 45 m, con márgenes del orden de los 6 m respecto del fondo y una pendiente media de 0.075. Al finalizar la construcción, hacia el año 2003, la cota del lecho del río en la sección del cruce era de 2136,34 m, encontrándose su lomo en 2128,89, es decir con una tapada de 7,45 m. La drástica reducción de esta tapada generó la necesidad de evaluar alternativas de obras de protección.

El esquema de solución fue similar al descrito para el caso anterior: un umbral de fondo aguas abajo de la traza del ducto, de modo de brindar protección al mismo a la acción de los flujos densos que se verificaron en la zona. Este tipo de obras tiende a garantizar el mantenimiento de la pendiente longitudinal del curso, no constituyéndose estrictamente en una obra de retención de sedimentos sino en una estructura que permite fijar una sección, manteniendo estable la pendiente hacia aguas arriba del mismo. Se destaca que presenta la ventaja cualitativa de no impedir el pasaje de sedimentos una vez alcanzado el equilibrio, razón por la cual no resultan esperables procesos erosivos de gran magnitud hacia aguas abajo.

Había una dificultad de diseño de este tipo de obras en la zona, relacionado con la existencia de márgenes de materiales muy erosionables, que hacían necesarias grandes longitudes de empotramiento para cumplir la premisas de estabilidad del proyecto estructural. Similares inconvenientes se encontraron al tratar de implementar una defensa con mallas de acero tipo

Geobrug. Se trata de barreras flexibles de redes de anillos contra torrentes y flujos de detritos, que son alternativa a las estructuras para control de aluviones, utilizadas en países alpinos y Japón.

APLICACIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS PARA LA DEFINICIÓN DE PARÁMETROS DE DISEÑO DE OBRAS

Con el fin de utilizar las posibilidades que entregan los modelos numéricos que resuelven las ecuaciones que gobiernan el desarrollo de los flujos densos, se aplicó un modelo de simulación de flujos densos a la cuenca del río Colanzulí-Iruya ya citada, como una contribución en la evaluación del grado de severidad de estos fenómenos, proporcionando información sobre las características que interesan en el diseño de medidas estructurales.

En este trabajo se usó el modelo FLO-2D (O'Brien et al., 1988) para analizar el flujo hiperconcentrado de sedimentos en la cuenca del río Iruya. Este modelo bidimensional de diferencias finitas permite simular flujo de fluidos no-newtonianos (como aludes torrenciales en conos de deyección) en topografías complejas y ha sido extensamente aplicado en una variedad de condiciones.

La red de drenaje en el tramo estudiado presenta una morfología muy accidentada con tramos de fuertes pendientes que superan el 10%. Esta característica provoca el transporte de grandes masas de sólidos a través de los torrentes de barro, siendo este tipo de transporte de sedimentos el típico fenómeno de remoción en masa que se observa en la cuenca.

En ausencia de los datos "in-situ" (análisis reológico del material deposicional), como es el caso de los episodios de flujos densos en el río Colanzulí-Iruya que nos ocupa, deben hacerse hipótesis razonables para estimar las características reológicas en función de la concentración de sedimentos.

La práctica recomienda que ante la imposibilidad de efectuar el análisis de muestras de barros del sitio que se analiza, la asignación de las características de la mezcla se realice en base al juicio cualitativo a partir de las observaciones de campo. Si las mismas indican que el flujo es muy viscoso con una tensión de cedencia moderada, se recomienda seleccionar los parámetros correspondientes a los suelo naturales de Aspen que corresponde a un tipo típico de material del flujo que se comporta como el cemento mojado. Si se asume que flujo se asemeja a una crecida de barro con limitada tensión de cedencia y viscosidad, se propone seleccionar los parámetros que corresponden a la región Glenwood 4.

Las simulaciones efectuadas con el modelo matemático Flo-2D se han dirigido a analizar dos aspectos del transporte de los flujos hiperconcentrados de sedimentos. En primer lugar se pretende comprender y evaluar la influencia de los parámetros del modelo reológico en los valores de profundidad hidráulica y velocidad de flujo, habida cuenta que los valores reales que caracterizan la viscosidad y la tensión de cedencia de los barros son datos de los que no se dispone y la necesidad de caracterizar este tipo de escurrimiento exige la asignación de los mismos. En segundo lugar se pretende ponderar los efectos en las variables hidrodinámicas de la incertidumbre en el verdadero valor de la concentración de sedimentos y a partir de esta cuantificación extrapolar conclusiones que interesen en el diseño de medidas de control y o mitigación.

En cuanto a la *sensibilidad a los parámetros del modelo reológico* (tensión de corte y viscosidad), se realizaron simulaciones considerando una concentración en volumen promedio durante el evento de 35%. Las Figuras 4 y 5 presentan la evolución de la máxima profundidad hidráulica y la máxima velocidad de flujo calculadas, para diferentes valores de los parámetros del modelo reológico. En promedio, evidencian que el rango de variación del tirante hidráulico es del orden de

78 cm, que representa una variación del 70% respecto del valor mínimo del tirante que pronosticado por el modelo cuando se utilizan los datos de campo de la región Glenwood 2. Asimismo, se advierte que la variación en los valores pronosticados de velocidad máxima en el tramo es en promedio de 189% (2,57 m/s) cuando se calcula respecto del mínimo valor estimado por el modelo para los parámetros reológicos correspondientes a Aspen Pit 1.

Si se consideran los resultados para los parámetros propuestos se advierte que en forma general, los valores crecientes de la profundidad hidráulica máxima se asocian a viscosidades crecientes, e inversamente, se obtiene una disminución de la velocidad máxima con el aumento de ese parámetro.

El efecto del aumento de la viscosidad y la tensión de cedencia se manifiesta también en que los mayores tirantes se producen con cierto retraso (del orden de 2 horas) mientras que la disminución de los parámetros induce un adelanto de las velocidades máximas.

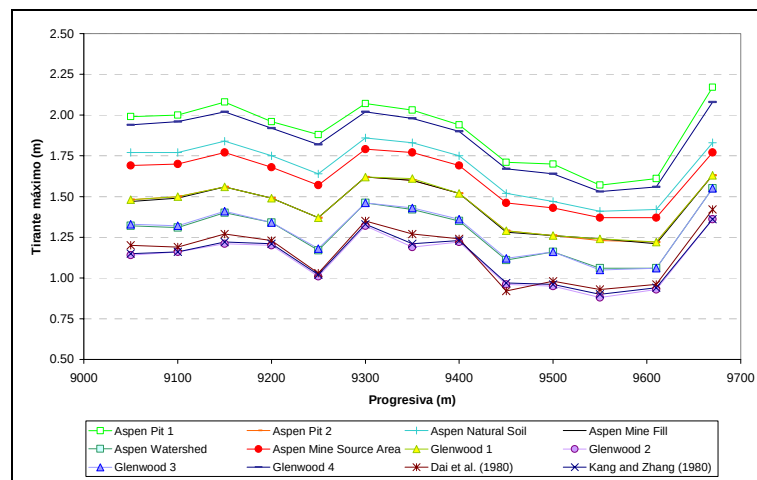


Figura 4.- Evolución de la profundidad hidráulica máxima frente a la localidad de Iruya ($C_v=0,35$)

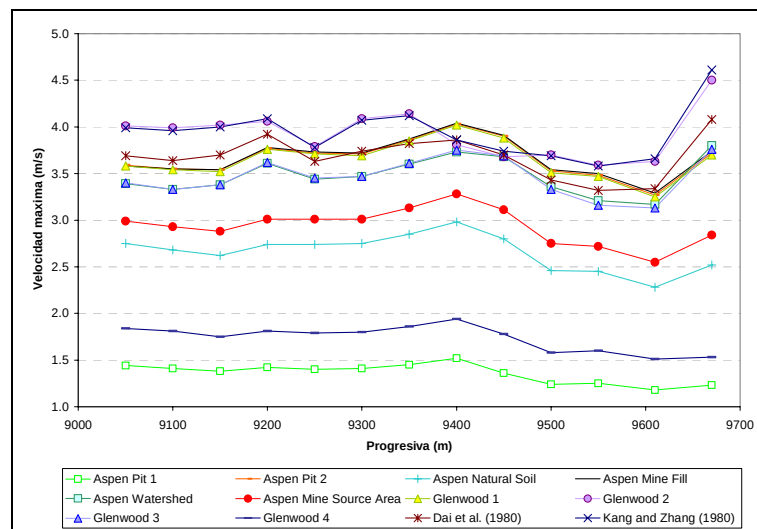


Figura 5.- Evolución de la velocidad máxima frente a la localidad de Iruya ($C_v=0,35$)

Simulaciones efectuadas considerando una concentración de sedimentos constante de 50% ilustraron la misma influencia del aumento de la viscosidad y la cohesión sobre las características del escurrimiento. Sin embargo, los porcentajes de variación respecto a los valores mínimos calculados exceden en mucho los obtenidos para una concentración de 35%.

Los resultados de los ensayos efectuados permiten mostrar la gran preponderancia que en la determinación de las variables hidrodinámicas posee una asignación razonable y ajustada a la realidad de los valores que caracterizan las propiedades de la mezcla agua-sedimento y definen su comportamiento. A la luz de la amplitud del rango de variación de las variables calculadas, y más allá que la asignación de los parámetros del modelo reológico sea efectuada dentro del rango propuesto por los autores del modelo, se deduce la ineludibilidad del ajuste que debería tener en cuenta las propiedades de los barros, su composición y las características de los depósitos resultantes de estos eventos.

En cuanto a la *sensibilidad a la variación de la concentración de sedimentos*, se efectuaron ensayos manteniendo los parámetros del modelo reológico y aumentando la concentración de sedimentos con incrementos de 5% a partir de una concentración de base de 25% y hasta una concentración máxima de 50%. Para efectuar estos ensayos, y en acuerdo con las recomendaciones del uso del modelo, se seleccionaron los parámetros del modelo reológico correspondientes a barros menos y más viscosos, adoptándose los valores de los coeficientes ajustados para las muestras de suelo natural de Aspen (tensión de cedencia moderada y alta viscosidad) y de la región de Glenwood 4 (limitada tensión de cedencia y viscosidad).

Para el tramo de 600 m localizado frente a la localidad de Iruya, en las Figuras 6 y 7 se presentan los resultados obtenidos para concentraciones variables. En las mismas se incluyen, con propósitos comparativos, los valores simulados cuando se considera un flujo de agua clara.

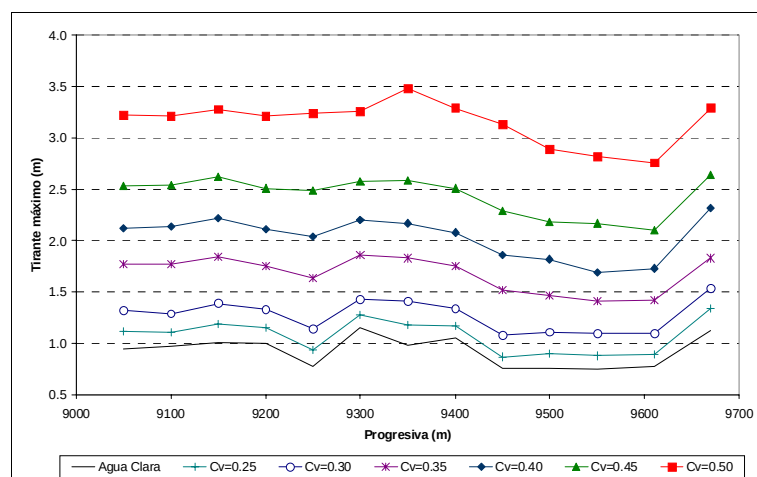


Figura 6.- Evolución de la profundidad hidráulica máxima frente a la localidad de Iruya (Parámetros del modelo reológico según O'Brien and Julien, 1985, para suelos naturales de Aspen)

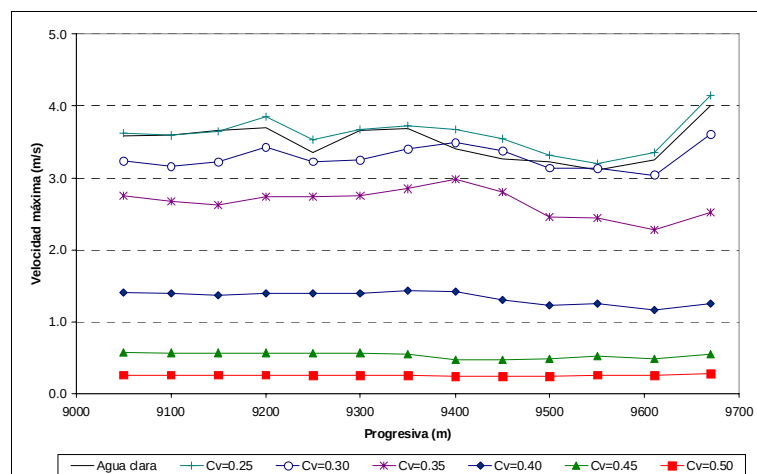


Figura 7.- Evolución de la velocidad máxima frente a la localidad de Iruya (Parámetros del modelo reológico según O'Brien and Julien, 1985, para suelos naturales de Aspen)

Las figuras señalan el amplio espectro de variación de los valores de tirante y velocidad de flujo máximos en el tramo para las condiciones simuladas. El modelo predice tirantes siempre crecientes que acompañan el aumento de la concentración de sedimentos, desde valores del orden de 1m para $C_v=0,25$ hasta valores superiores a 3 m para $C_v=0,50$. Por su parte, la disminución de las velocidades máximas de flujo se desarrolla a partir de valores de aproximadamente 3,5 m/s hasta 0,25 m/s cuando la concentración de sedimentos crece en un 25%. Obsérvese que las velocidades simuladas para la mínima concentración de sedimentos son del orden de la velocidad obtenida para flujo de agua clara.

Sobre los resultados obtenidos, resulta interesante analizar el cálculo de la fuerza de impacto antes mencionada (ecuación 4). Nótese que al calcularse los parámetros del flujo mediante expresiones que tienen en cuenta las altas concentraciones de sedimentos, los valores de las fuerzas de impacto sobre las estructuras varían drásticamente respecto de considerar un escurrimiento de agua sin sedimentos.

Los estudios realizados indican que, de acuerdo al modelo, el incremento de concentración induce el aumento de la fuerza de impacto a medida que aumenta la concentración de sedimentos y hasta que ésta alcanza un valor de aproximadamente 30%. A partir de este valor de concentración, la variación simultánea de los valores de tirante y de velocidad determina un descenso del valor del empuje que se hace mínimo para los máximos valores de concentración ensayados. La diferencia entre el empuje máximo obtenido y aquel derivado de suponer flujo de agua sin sedimentos alcanza un valor de entre 80 y 100% para las características reológicas asumidas.

CONCLUSIONES

Se han planteado consideraciones sobre el diseño de obras de ingeniería sometida a la acción de flujos de barro, tanto a través de expresiones surgidas de la experiencia, como a partir de la utilización de un modelo numérico desarrollado a tales fines.

La experiencia adquirida permite afirmar que, en ambos casos, las obras proyectadas no dejan de ser de tipo experimental, en escala 1:1, lo que implica la necesidad de tareas de monitoreo, tanto sistemático como especial ante eventos de magnitud, a los efectos de una identificación temprana de afectaciones de las obras, que permitan la programación del mantenimiento que resulte necesarios para garantizar la estabilidad de las obras de protección.

Aún dentro del empirismo, las expresiones de cálculo ofrecidas en la bibliografía no pasan de ser aplicaciones válidas para las condiciones en que fueron desarrolladas. En estas condiciones, un adecuado conocimiento e interpretación de la física del fenómeno, complementado con relevamientos y análisis de campo, permitirán encarar adecuadamente el proyecto de obras, las que de todos modos serán de tipo experimental, en escala natural.

El modelo numérico utilizado constituye una herramienta robusta y eficiente para simular numéricamente los procesos hidrodinámicos y sedimentológicos en ríos que son alimentados por grandes cantidades de sedimentos bajo forma de deslizamientos y flujos de detritos.

A pesar de no contarse con valores calibrados de los parámetros reológicos en la cuenca del río Iruya, el modelo implementado permite simular el orden de magnitud de los eventos y puede ser útil para predecir el impacto de eventos futuros en el área.

En base a la discusión de los resultados obtenidos se estableció que los parámetros de la tensión de cedencia y viscosidad tienen significativos efectos en los resultados de la simulación y que el ajuste

de los parámetros reológicos debería tomar en cuenta las propiedades de los barros y lodos, su composición y las características del área de depósito, por ejemplo mediante la realización de análisis geomórficos que permitan estudiar las condiciones de erosión y deposición causadas por los flujos densos.

Los resultados obtenidos para concentraciones de sedimentos crecientes indicaron la tendencia sostenida de aumento de la profundidad hidráulica y la velocidad máxima así como de la magnitud del volumen de material depositado.

REFERENCIAS

Andes Consultora. (2003). *Sistematización del Río Iruya- Estudios Hidráulicos-Morfológicos y Anteproyecto avanzado de Obras. Informe técnico.*

Brea J. D., Spalletti L., Hopwood H. y Spalletti P., (2005): *Conceptos y Aplicaciones sobre Flujos densos en la hidráulica de ríos*, Ingeniería del Agua, vol. 12, N° 3.

Costa, J. E. (1984) *Physical Geomorphology of Debris Flows*, in: *Development and Applications of Geomorphology*, Ed Costa, J. E. and Fleisher, P. J., Springer-Verlag, New York, 268-317.

Flo-2D (2003): *Users manual, Version 2003.06*, Nutrioso, Arizona, USA

Julien, P., León, C. (2000). *Mud floods, mudflows and debris flows. Classification, rheology and structural design*". *Jornadas de Investigación JIFI 2000: The debris flow disaster of december 1999 in Venezuela.*

O'Brien J.S. and Julien, P (1985): *Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows*. Proc. of the ASCE Specialty Conf. on the Delineation of Landslides, Floods, and Debris Flow Hazards in Utah, Utah Water Research Laboratory, Series UWRL/g-85/03, 260-279.

O'Brien, J. Julien, P. (1988): *Laboratory Analysis of Mudflow properties*. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE 114, 8, 877-887.

Rickermann, D. (1999) *Empirical relationships for Debris flows*, Natural hazards 19: 47-77.

Spalletti L., Brea J., Spalletti P. (2002): *Contribución al ordenamiento conceptual geológico-hidráulico de flujos densos*. Seminario sobre flujos densos en áreas de montaña, San Salvador de Jujuy.

Transportadora de Gas del Norte S.A. (2007). *Gasoducto Norandino. Adecuación del cruce del río San Andrés 1. Definición de Alternativas. Informe Técnico*, Red Ingeniería.

VanDine, D.F. (1996). *Debris flow control structures for forest engineering*. Res.Br. British Columbia, work pap 08