

FLUJOS DENSOS E HIDRÁULICA DE RÍOS

José Daniel Brea, Pablo Daniel Spalletti

Instituto Nacional del Agua (INA) Casilla de Correo 21 – Ezeiza - 1804

E-mail: dbrea@ina.gov.ar; pspallet@ina.gov.ar

www.ina.gov.ar

RESUMEN

Los flujos densos han sido estudiados desde diferentes disciplinas, como la geología y la hidráulica. En la hidráulica de ríos se apunta a las aplicaciones prácticas en el campo de la ingeniería por lo que es necesaria la cuantificación de los procesos. Para ello, los desarrollos que parten de conocer la física del problema, analizando las fuerzas en juego, y que plantean ecuaciones que resuelven la dinámica, resultan los más adecuados. En ese contexto, han sido desarrolladas expresiones complejas que intentan incluir las variables que afectan el fenómeno a partir del comportamiento reológico de los flujos densos, y que permiten definir las clases de flujos hiperconcentrados.

Se presenta una aplicación al río Colanzulí-Iruya, en la que se analiza la información disponible y las características del fenómeno. En este caso, la ausencia de los datos básicos necesarios, más la dificultad de determinarlos o definirlos, no permitió el uso de los desarrollos que tienen en cuenta los procesos intervinientes, debiéndose utilizar expresiones empíricas, siendo esta la situación más probable ante la que pueda encontrarse un ingeniero frente a un problema de flujos densos.

ABSTRACT

Hyperconcentrated flows have been studied from different disciplines, like geology and hydraulics. In rivers hydraulics the quantification of the processes is necessary because the objective are practical engineering applications. For that reason, the developments based on the physics of the problem, which analyze the participants forces, and that define equations to solve dynamics, are the most suitable. In that context, complex expressions which try to include the variables that affect the phenomenon based on the reologic behavior of the dense flows, and that allow to define the classes of hyperconcentrated flows, have been developed.

An application to the Colanzulí-Iruya river appears, in which the information available and the characteristics of the phenomenon are analyzed. In this case, the absence of the necessary initial data, plus the difficulty to determine or define them, did not allow the use of the expressions that consider the intervening processes, being necessary to use empirical expressions, being the most probable situation in which an engineer may be.

INTRODUCCIÓN

El tema de los flujos densos ha sido analizado desde diferentes disciplinas, entre las que se

destacan, desde nuestro punto de vista, la geología y la hidráulica. Aún dentro de cada una de ellas existe un amplio espectro de enfoques y definiciones, muchas veces contrapuestos.

En términos generales, se aprecia que los enfoques de las dos especialidades mencionadas para el tratamiento de los procesos de transporte por flujos densos y de sus productos han seguido caminos paralelos, encontrándose muy escasos puntos de convergencia (Spalletti, Brea, Spalletti, 2002). Los motivos de ello quizá puedan deberse a que los geólogos hacen hincapié en los productos (sedimentos, depósitos) a los que conducen estos procesos, mientras que los ingenieros hemos prestado mucha mayor atención a las cuestiones hidrológicas y reológicas, es decir al funcionamiento de estos mecanismos de transporte en masa.

En efecto, más allá de las investigaciones básicas sobre el tema de los flujos densos, 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.

También desde la hidráulica 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. Resulta destacable además que diferentes términos pueden ser usados para describir el mismo fenómeno, dependiendo de la formación científica de los autores (Coussot, 1996).

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 el espíritu de este trabajo apuntar a las aplicaciones prácticas en el campo de la ingeniería hidráulica relacionadas con los flujos densos, 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 en el cumplimiento de los objetivos buscados. Aún cuando la aplicación de los modelos surgidos de estas metodologías es todavía difícil, debiendo recurrirse al empirismo, 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.

DEFINICIONES DESDE LA HIDRÁULICA

Comencemos recordando que, en situaciones normales de flujos cargados de sedimentos, estos son transportados por el flujo, teniendo poca influencia en el comportamiento del mismo. 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, tema sobre el que volveremos en puntos siguientes.

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 (Figura 1) 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 %.



Figura 1.- Inundación de barro.

Los flujos de barro, por su parte, 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 (Figura 2) 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 (1978).



Figura 2.- Flujo de detritos.

Como ya se expresara, además de la definición de cada uno de los tres tipos de flujos densos presentada, que resulta función del mecanismo preponderante de disipación de la energía en el traslado de los mismos, existen descripciones basadas en otras características.

En opinión de los autores, las definiciones presentadas permiten comprender el fenómeno de los flujos densos, y su análisis a partir de su comportamiento reológico.

REOLOGÍA DE LOS FLUJOS HIPERCONCENTRADOS

Dentro de los flujos hiperconcentrados de sedimentos, el comportamiento reológico involucra la interacción de diversos y complejos procesos físicos. Las partículas sólidas pueden chocar, rozar, rotar y vibrar en el desarrollo del movimiento.

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 (du/dy , velocidad de deformación), como puede ocurrir en abanicos aluviales empinados, 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.

Los dos primeros términos de la ecuación corresponden a las tensiones de corte de Bingham y representan las tensiones de resistencia internas de un fluido de esas características. La suma de la tensión de cedencia y la viscosa define la tensión de corte de un fluido hiperconcentrado de sedimentos cohesivo en un régimen de flujo viscoso. El último término es la suma de las tensiones de corte dispersiva y turbulenta, que es función del cuadrado del gradiente de velocidad.

Julien y Lan (Julien y Lan, 1991) propusieron una formulación adimensional del modelo reológico, con tres parámetros que definen las tres clases de flujos hiperconcentrados en cuestión. Estos parámetros son:

- exceso de tensión de corte adimensionalizada t^*
- relación dispersiva-viscosa Dv^* (para grandes Dv^* , el flujo es dispersivo, para valores pequeños el flujo es viscoso)
- relación turbulenta-dispersiva Td^* (para grandes Td^* el flujo es turbulento, para valores pequeños el flujo es dispersivo).

A partir del contraste del modelo con datos de otros investigadores (Figuras 3 y 4), sugieren los siguientes valores guía para los flujos hiperconcentrados:

- Inundaciones de barro ocurren cuando son dominantes las tensiones turbulentas, con $Dv^* > 400$ y $Td^* > 1$
- Flujos de barro ocurren cuando son dominantes las tensiones viscosas y de cedencia, con $Dv^* < 30$
- Flujos de detritos son esperados cuando son dominantes las tensiones dispersivas, con $Dv^* > 400$ y $Td^* < 1$

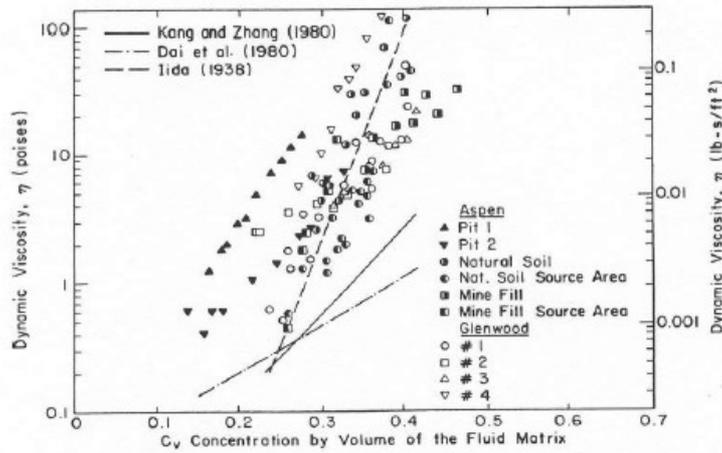


Figura 3.- Viscosidad dinámica en función de la concentración volumétrica.

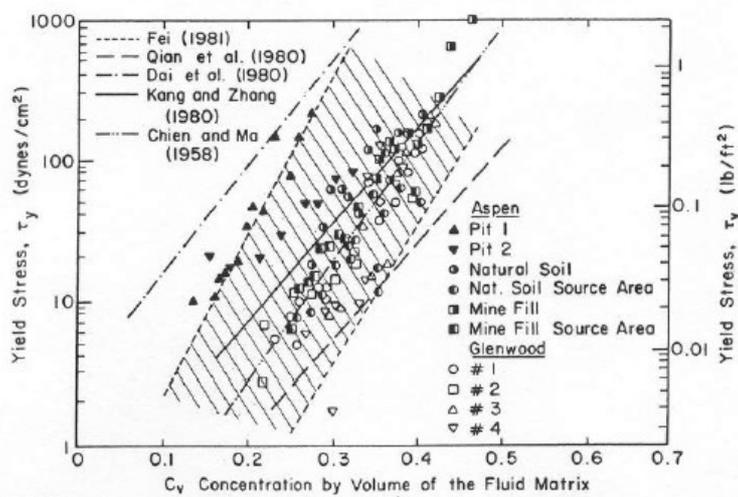


Figura 4.- Esfuerzo de cedencia en función de la concentración volumétrica.

En resumen, la resolución de la ecuación presentada permite obtener resultados de interés para una aplicación ingenieril del problema de flujos densos. La ausencia de los datos básicos necesarios, más la dificultad de determinarlos o definirlos, complica el uso de esta herramienta en la mayoría de los casos, por lo que debe recurrirse al empirismo.

ANTE UN PROBLEMA DE INGENIERÍA

En el año 2003 la empresa Andes Consultora S.A. contrató al INA para que la asesore en el estudio de sistematización de la cuenca del río Iruya. Dentro de la información básica recopilada para la concreción del estudio, se obtuvo una filmación de un evento de flujos densos en la zona. En efecto, a comienzos de febrero de 1999 se produjo un evento de crecida del río Colanzulí, que pudo ser filmado a su paso frente a la ciudad de Iruya, los días 5 y 7 de febrero.

Analizando los registros de precipitaciones en la localidad de Iruya para esa fecha (Figura 5), se observa que el día 28 de enero de 1999 hubo un evento de importancia: una lluvia de 42 mm en algo más de 6 horas. Considerado a nivel diario, dicho evento constituye el máximo

histórico registrado en la estación Iruya, sobre una serie disponible de treinta años (1982-2002). Luego de este evento extraordinario se sucedieron lluvias menores hasta los días previos al paso de la crecida frente a Iruya, en los que las precipitaciones registradas fueron de 18.5 mm el 3 de febrero, y de 15 mm el 5 de febrero de 1999.

El esquema de precipitaciones en la cuenca se inicio pues, con un evento extraordinario que seguramente afectó las zonas más susceptibles de sufrir procesos de remoción en masa y desmoronamientos, ya sea desencadenando dichos procesos o saturando los suelos, de modo que cuando se produjeron las precipitaciones de los días siguientes, de menor magnitud, siguieron generándose importantes aportes de sedimentos al sistema.

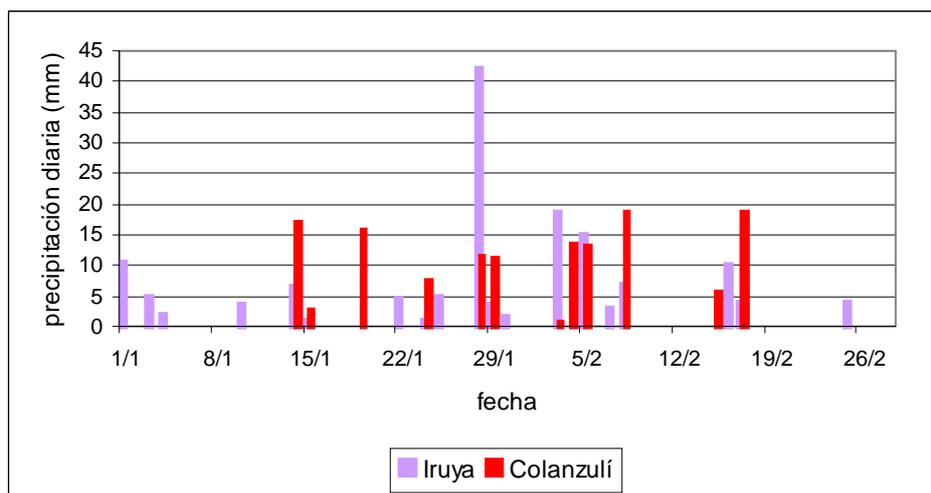


Figura 5.- Precipitaciones diarias en Iruya, enero-febrero 1999

Se observa que el evento del 28 de enero en la estación Iruya no se correspondió con uno de similar magnitud en Colanzulí (ubicada en las cabeceras de la cuenca), mientras que para la fecha del registro fílmico disponible, en ambas estaciones se registraron precipitaciones similares.

El análisis del citado video permite observar que las características de la crecida del río Colanzulí frente a la ciudad de Iruya de los días 5 y 7 de febrero fueron las de un flujo denso ubicado entre una crecida de barro y un flujo de barro. El flujo denso registrado el día 5 de febrero tiene claramente las características señaladas de los flujos de barro, mientras que el del 7 de febrero se asemeja más a una crecida de barro. 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).

Las fotos de las Figuras 5, 6, 7 y 8, extraídas del video, muestran la secuencia del paso de un pulso de crecida impactando sobre las defensas rígidas ubicadas aguas arriba del pueblo de Iruya.



La importancia de la observación de esta crecida fue conocer las características de los flujos densos en movimiento. El proyecto de las obras de sistematización que se está desarrollando en la zona, tuvo pues en cuenta las solicitudes generadas por estos flujos.

En general, el proyecto de una obra a la acción de flujos densos debe incluir consideraciones de diseño sobre los siguientes aspectos, entre otros: frecuencia de ocurrencia, volumen, caudal máximo y profundidad, granulometría de los materiales, líneas probables de flujo, distancia de llegada, fuerza de impacto, trepada y sobreelevación (VanDine, 1996). Algunas de estas características pueden determinarse por rigurosos métodos y mediciones, mientras que otras requieren estimaciones de campo y reglas del arte.

La mayor parte de los puntos mencionados presenta una importante dificultad para su definición, lo que se ve agravado en este caso por la ausencia total de datos de base. Se utilizaron no obstante algunas expresiones que, a partir del conocimiento de la tipología de los fenómenos, permitieron estimar acciones para que las obras proyectadas tuvieran en cuenta los flujos densos potencialmente incidente sobre ellas.

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.

Un parámetro de importancia cuando se proyecta una obra transversal al flujo es la fuerza de impacto sobre la misma, la que puede calcularse mediante la expresión:

$$F = \rho A V^2 \text{ sen } \beta \quad [3]$$

donde: F = empuje dinámico

ρ = densidad del flujo

A = área transversal del flujo

V = velocidad

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 el 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.

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:

$$D = 1.5 + 12.5 S \quad [4]$$

En el caso del río Colanzulí, para una pendiente del 8 %, la profundidad resultante de la fórmula es de 2.5 metros, que se encuentra en el del orden de lo recomendado por las normas japonesas.

Como ya se expresara, en el caso presentado los datos disponibles y las características del fenómeno sólo permitieron el uso de expresiones empíricas ofrecidas por la bibliografía específica sobre el tema. Esta es la situación más probable ante la que pueda encontrarse un ingeniero frente a un problema de flujos densos.

CONCLUSIONES

Más allá de las investigaciones básicas sobre el tema desde diferentes disciplinas, como la geología y la hidráulica de los flujos densos, 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.

En este contexto, y dentro del universo de definiciones y clasificaciones existentes, resultan de especial interés los desarrollos que 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.

Se recomiendan las definiciones y expresiones que tienen en cuenta el comportamiento reológico de los flujos densos, como las que surgen de los estudios de Julien, Lan, O'Brien, entre otros.

La ausencia de los datos básicos necesarios, y su dificultad para determinarlos o definirlos, complica el uso de este tipo de modelos, debiéndose recurrir necesariamente al empirismo para la resolución de problemas particulares, tal como se ha descrito en la aplicación presentada sobre la cuenca del Iruya. Esta es la situación más probable ante la que pueda encontrarse un ingeniero frente a un problema de flujos densos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Coussot, P.; Meunier, M., (1996). "Recognition, classification and mechanical description of debris flows" *Earth Science Reviews* 40, 209-227. Elsevier Science.B.V.

Julien, P., Lan, Y. (1991). "On the rheology of hyperconcentrations". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 117.

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. (2000): "FLO2-D. User Manual 2002".

O'Brien, J.S., Julien, P. (1985) "Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows." *Proc. ASCE H.D. Delineation of landslides, flash flood and debris flow Hazards*.

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

Rickenmann, D. (1990). "Debris flow 1987 in Switzerland: modeling and sediment transport. *Hydrology in Mountainous Regions*", IAHS Publ. N° 194.

Rickenmann, D. (1999). "Empirical relationships for debris flows", *Natural Hazards* 19. Kluwer Academic Publishers. Netherlands.

Takahashi, T., (1978). "Mechanical characteristic of debris flow". *J. of Hydr. Div., ASCE*, 104.

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

Wan, Z., Wang, Z., (1994). "Hyperconcentrated Flow". *IAHR Monograph Series*. A.A.Balkema.