

ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO Y MODELACIÓN NUMÉRICA (2D) DE EVENTOS EXTREMOS EN LA CUENCA DEL RÍO SAUJIL, CATAMARCA, ARGENTINA.

Eder Matías^{1,2}, Barbeito Osvaldo^{2,3}, Ambrosino Silvio³, Gerardo Hillman¹, Ana Laura Rydzewski³, Moya Gonzalo¹ y Andrés Rodríguez^{1,2}

1 Laboratorio de Hidráulica - CETA (FCEfyN – UNC), Córdoba, Argentina.

2 CONICET, Córdoba, Argentina.

3 CIRSA-INA, Córdoba, Argentina.

E-mail: matiaseder2@gmail.com

RESUMEN

En la región montañosa de la Provincia de Catamarca las crecientes repentinas constituyen la amenaza natural más significativa, condicionada por la baja permeabilidad de las cuencas, la fuerte energía del relieve y la escasa vegetación sumado a la interacción entre las características orográficas y climatológicas regionales, que resultan en fenómenos hidrológicos localizados e intensos.

La localidad de Saujil, ocupa el piedemonte occidental de la Sa. De Ambato. El mismo constituye un ambiente deposicional en forma de una bajada aluvial derivada del aporte detrítico histórico ligado al desgaste del abrupto por efecto de la erosión y los procesos de remoción de masa en forma de caídas, deslizamientos y flujos.

Los procesos de erosión hídrica, de márgenes y remoción de masa ante la ocurrencia de lluvias intensas, puede ocasionar la generación de flujos densos (hiperconcentrados).

En enero de 2014 se produjo un evento de estas características en la zona de estudio que motivó el presente trabajo. En el cual se realiza un análisis geomorfológico de la cuenca del río Saujil y se realiza una modelaciones numéricas bidimensionales con el programa FLO-2D, el cual permite realizar modelaciones de flujos hiperconcentrados.

ABSTRACT

In the mountainous region of the Province of Catamarca the sudden flood constitute the most significant natural threat. Conditioned by the low permeability of the basin, the great slope of the relief and sparse vegetation. In addition to the interaction between regional orographic and climatological characteristics, resulting in localized and intense hydrological phenomena.

The town of Saujil, occupies the western piedmont of the Sa. De Ambato. It constitutes a depositional environment in the form of an alluvial descent derived from the historical detrital building connected to the abrupt erosion and the process of mass removal in the form of falls landslides and flows.

The processes of water erosion and margins erosion and removal of mass before heavy rainfall can cause the generation of hyperconcentrated flows.

In January 2014 an event of this type occurred in the area of study that motivated the present study. In which it was carried out a geomorphological analysis of the Saujil basin and the two-dimensional model was made with the FLO-2D program, which allows modeling of hyperconcentrated flows.

INTRODUCCIÓN

Los procesos de producción y transporte de sedimentos son función de las características geológicas propias del terreno, de sus condicionantes morfológicos y de la ocurrencia de eventos hidrológicos intensos.

Para el caso en estudio, río Saujil ubicado en el piedemonte occidental de la Sierra Ambato, se detectó la acción conjunta de procesos de erosión hídrica, erosión de márgenes y remoción de masa. La acción conjunta de estos procesos ante la ocurrencia de lluvias intensas, sumado a la fuerte energía del relieve puede ocasionar la generación de flujos densos (hiperconcentrados) que se incorporan a la red de drenaje.

Estos flujos contienen una fracción de materiales finos derivados de la erosión hídrica (limos-arcillas) y otra de material grueso (gravas, cantos, bloques), incorporando a la vez restos de

vegetación. La alta densidad de la masa viscosa permite transportar grandes bloques a distancias considerables.

Los flujos de sedimentos hiperconcentrados se definen como eventos de crecidas con concentraciones de sedimentos que superan el 20% en volumen.

En la Tabla 1 se presentan cuatro categorías de flujos y sus principales características en función de su concentración de sedimentos, tres de las cuales corresponden a flujos hiperconcentrados. Esta tabla fue desarrollada a partir de los datos de laboratorio utilizando flujos de barro reales de Glenwood Springs, Colorado.

Tabla 1.- Comportamiento del flujo en función de la concentración de sedimentos (FLO-2D, 2003).

Comportamiento del Flujo en Función de la Concentración de Sedimentos			
	Concentración de Sedimentos		Características del Flujo
	Por Volumen	Por Peso	
Deslizamientos	0.65 – 0.80	0.83 – 0.91	No fluye, falla por deslizamiento en bloque
	0.55 – 0.65	0.76 – 0.83	Deslizamiento en bloque con deformación interna y; reptación previa a la falla.
Flujo de barro	0.48 – 0.55	0.72 – 0.76	Flujo evidente; reptación sostenida de barro; deformación plástica bajo su propio peso; cohesivo; no ocurre esparcimiento sobre una superficie plana
	0.45 – 0.48	0.69 – 0.72	Flujo con esparcimiento sobre superficies planas. Flujo cohesivo; mezcla.
Inundaciones o crecidas de barro	0.40 – 0.45	0.65 – 0.69	Flujo se mezcla fácilmente; deposición de grandes bloques; ocurren ondas pero se disipan rápidamente.
	0.35 – 0.40	0.59 – 0.65	Deposición marcada de gravas y cantos rodados; esparcimiento casi completo en superficies planas; dos fases en superficie con ondas.
	0.30 – 0.35	0.54 – 0.59	Separación del agua en superficie; las ondas viajan fácilmente; arena y grava viaje como carga de fondo
	0.20 – 0.30	0.41 – 0.54	Ondas dominan el movimiento superficial
Inundaciones o crecidas de agua	<0.20	<0.41	Inundación de agua con posibilidad de sedimentos en suspensión o carga de fondo.

Un “flujo de barro” consiste en una matriz fluida de sedimentos finos que puede transportar rocas de diferentes tamaños. Su comportamiento es una función de las propiedades de la matriz de fluidos, la geometría del canal, la pendiente y la rugosidad. La concentración de sedimento fino (limo, arcilla y arena fina en la matriz de líquido) controla las propiedades del fluido incluyendo la viscosidad, la densidad y la tensión de fluencia. La propiedad dominante de un flujo de barro es la alta viscosidad que se traducirá en velocidades lentas. La alta densidad de la matriz de líquido puede aumentar la flotabilidad de partículas grandes de sedimentos de gravas hasta rocas. La tensión de fluencia afectará tanto el inicio como el fin del flujo. Para un evento de flujo de barro, la concentración promedio de sedimentos generalmente varía en el rango de 20% a 35% en volumen con picos de concentración de aproximadamente 50%.

ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO

La localidad de Siján, ocupa el piedemonte occidental de la Sa. De Ambato el cual constituye un ambiente deposicional en forma de una bajada aluvial derivada del aporte detrítico histórico ligado al desgaste del abrupto por efecto de la erosión y los procesos de remoción de masa en forma de caídas, deslizamientos y flujos hiperconcentrados.

El río Saujil corría recostado al sur del cono aluvial más reciente en el cual se localiza la población. En un estado de evolución antecedente, el canal de incisión original que dio lugar a la formación del cono activo, se localiza con trazo recto al norte del cauce y que luego de 2.7Km, desde el ápice, se integraba a un segundo ápice mas antiguo a partir de donde el río se recostaba en la dirección sur (Figura 1).

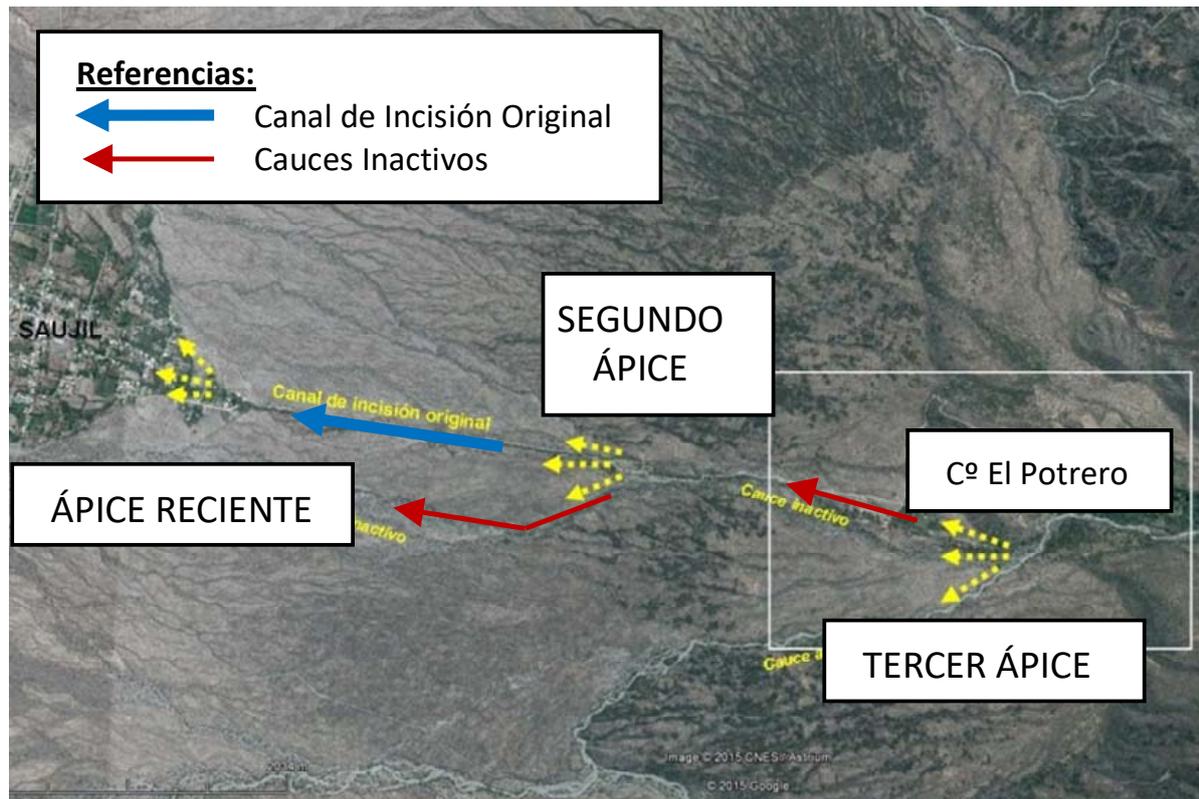


Figura1.- Imagen en planta de la zona en estudio.

Desde el segundo ápice el canal de incisión original recorre con trazo recto hasta el pie de sierra una distancia de 2 km., hasta un tercer y más antiguo ápice en el sector de Cº El Potrero. (Figura 1).

A partir de una crecida extrema que tuvo lugar en el año 1970 y ocasionó serios inconvenientes a la zona poblada, se realizaron obras de defensa y desvío en el Cº El Potrero (relicto del subnivel superior de la antigua bajada aluvial), donde se localiza el tercer y más antiguo ápice (Figura 2).

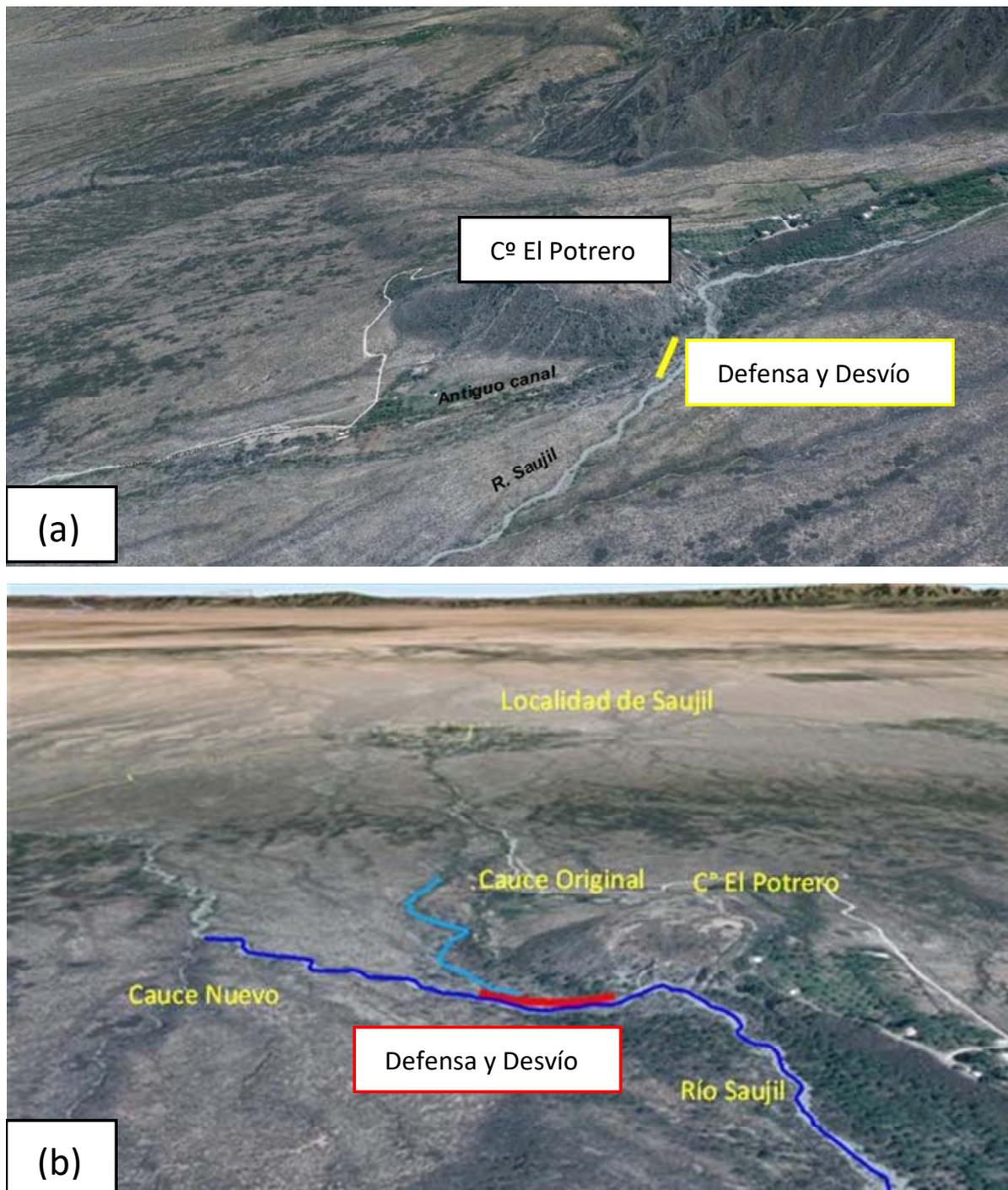


Figura2.- (a) Nuevo trazo del cauce del río Saujil, condicionado por la obra de defensa, (b) Vista hacia el oeste, se observa el actual cauce del río Saujil, la ubicación del C° El Potrero, el cauce original y la localidad de Saujil.

Ante el evento de enero de 2014, si bien hubo desbordes laterales localizados que tendieron a activar el canal de incisión original, las obras realizadas permitieron que el aluvión se rigiera por el nuevo trazo evitando un desastre en la zona poblada.

No obstante es de suma importancia tener en cuenta que en el sector dada la alta capacidad de carga y competencia del flujo derivado del frente de sierra y los fuertes procesos de avulsión, pueden por efecto de levantamiento el cauce dar lugar a la activación del canal de incisión original.

MODELACIÓN NUMÉRICA

Para realizar las modelaciones numéricas se utilizó el programa FLO-2D.

Se realizaron dos modelos diferentes, por un lado se modeló el cauce del Río Saujil en el C° El Potrero considerando el cauce actual, el original o la obra de defensa y por otro lado se modeló la zona urbana de Saujil.

Programa de Cálculo: FLO-2D

El programa FLO-2D permite predecir el movimiento de flujos hiperconcentrados como un fluido viscoso en función de la concentración de los sedimentos. Utiliza un modelo reológico cuadrático para predecir tensiones viscosas y de corte. El modelo considera a los flujos de barro como un continuo pronosticando el movimiento del fluido viscoso como una función de la concentración de sedimentos.

El modelo Flo 2D utiliza las siguientes ecuaciones de acuerdo a O'Brien and Julien (1985):

- Ecuación de Continuidad

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial [uh]}{\partial x} + \frac{\partial [vh]}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

- Ecuación de Movimiento

$$S_{fx} = S_{0x} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} \tag{2}$$

$$S_{fy} = S_{0y} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{u}{g} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} \tag{3}$$

Donde S_{0x} , S_{0y} son las componentes de la pendiente de fondo en las direcciones x e y y g es la aceleración de la gravedad.

- Modelo Reológico

El esfuerzo cortante en los flujos de sedimentos hiperconcentrados, incluyendo los que se describen como los flujos de escombros, flujos de barro y las inundaciones de barro, se puede calcular a partir de la suma de las cinco componentes de la tensión de corte: La tensión de corte de cedencia τ_c , 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 :

$$\tau = \tau_c + \tau_{mc} + \tau_v + \tau_t + \tau_d \tag{4}$$

Cuando se escribe en términos de tasas de corte (dv/dy) y con $\tau_y = \tau_c + \tau_{mc}$ se obtiene la siguiente ecuación cuadrática reológica (O'Brien y Julien, 1985):

$$\tau = \tau_y + \eta \left(\frac{dv}{dy} \right) + C \left(\frac{dv}{dy} \right)^2 \tag{5}$$

Donde η es la viscosidad dinámica y C denota el coeficiente de corte inercial que depende de la densidad de la mezcla ρ_m , de la longitud de mezcla de Prandtl l , del tamaño del sedimento d_s y de una función de la concentración volumétrica de sedimentos C_v :

$$C = \rho_m \times l^2 + f(\rho_m, C_v) \times d_s^2 \tag{6}$$

Bagnold (1954) dio la función $f(\rho_m, C_v)$ como:

$$f(\rho_m, C_v) = \alpha_t \times \rho_m \left[\left(\frac{C_s}{C_t} \right)^{1/3} - 1 \right] \tag{7}$$

Donde α_t (~ 0.01) es un coeficiente empírico y C_s es la concentración estática en volumen para las partículas de sedimentos.

Los dos primeros términos de esfuerzos en el modelo reológico cuadrática se conocen como las tensiones tangenciales Bingham (Figura 3). La suma de la tensión de fluencia y la tensión viscosa define el esfuerzo cortante total de un flujo de barro de cohesión en un régimen de flujo viscoso. El último término es la suma de las tensiones de corte dispersivo y turbulento, y define un régimen de flujo de inercia para una inundación de barro. Este término es una función del cuadrado del gradiente de velocidad. Una discusión de estas tensiones y su papel en los flujos de sedimentos hiperconcentrados se puede encontrar en Julien y O'Brien (1987, 1993).

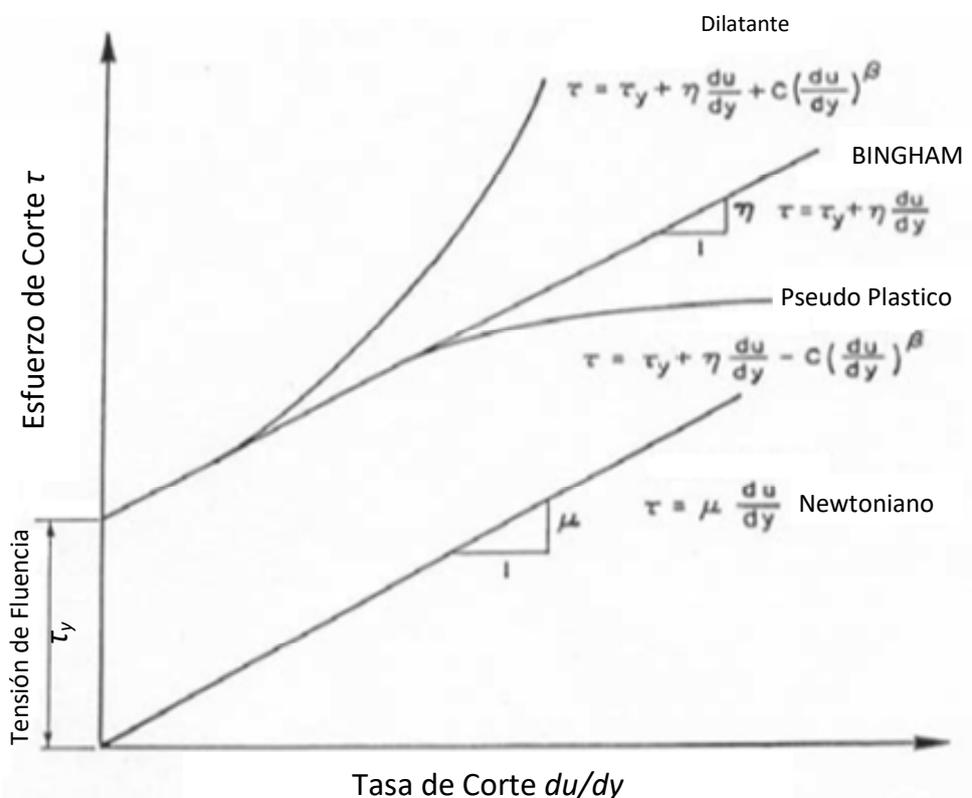


Figura 3.- Esfuerzo de corte en función de la tasa de corte o gradiente de velocidad (Flo-2D, 2003).

Para definir todos los términos de esfuerzo de corte para su uso en el modelo FLO -2D, se integran las ecuaciones en la profundidad y se reescriben en la de gradiente adimensional:

$$S_f = S_y + S_v + S_{td} \quad (8)$$

Donde la pendiente de fricción total S_f es la suma del gradiente de cedencia S_y , del gradiente viscoso S_v y del gradiente dispersivo turbulento S_{td} .

Los términos de gradiente viscoso y turbulento pueden escribirse en términos de profundidad y velocidad media.

La pendiente viscosa se puede escribir como:

$$S_v = \frac{K \eta V}{8 \gamma_m h^3} \quad (9)$$

Donde γ_m es el peso específico de la mezcla de sedimento, K es el parámetro de resistencia para el flujo laminar su valor es 24 para canales lisos anchos rectangulares pero puede aumentar significativamente (hasta ~ 50.000) con la rugosidad y la geometría sección transversal irregular.

En el modelo de FLO -2D el valor de K se calcula automáticamente a partir de n , valor de Manning.

La componente de la tensión de cizalladura turbulenta y dispersiva se combina con el valor del coeficiente de Manning equivalente (n_{td}) para el flujo:

$$S_{td} = \frac{n_{td}^2 V^2}{h^{4/3}} \quad (10)$$

Entonces, la ecuación para la pendiente de fricción puede ser reescrita como:

$$S_f = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} + \frac{K \eta V}{8 \gamma_m h^3} + \frac{n_{td}^2 V^2}{h^{4/3}} \quad (11)$$

La tensión de corte y la viscosidad varían principalmente con la concentración de sedimentos y pueden ser expresados en una ecuación semiempírica como (Flo-2D, 2003):

$$\tau_y = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v} \quad (12)$$

$$\eta = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v} \quad (13)$$

$$\eta = \eta_t + \eta_d = \eta_t + 0.0538 \eta_t e^{6.0886 C_v} \quad (14)$$

Donde η_t es la viscosidad turbulenta y η_d la viscosidad dispersiva.

Las expresiones de la tensión de corte y viscosa son funciones de la concentración de sedimento en volumen C_v y los parámetros α_1 , α_2 , β_1 y β_2 son coeficientes empíricos determinados en laboratorio.

La viscosidad de la matriz fluida es también una función del porcentaje y del tipo de limos y arcilla y de la temperatura del fluido. Los flujos de barro muy viscosos tienen altas

concentraciones del sedimento y en correspondencia, altas tensiones de cedencia y pueden dar lugar a flujo laminar aunque los flujos laminares en naturaleza son extremadamente raros. Los flujos menos viscosos (crecidas de barro) son siempre turbulentos. O'Brien and Julien (1985) resumieron los resultados de investigaciones previas que se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2.- Tensión de fluencia y viscosidad como una función de la concentración de sedimentos (FLO-2D, 2003).

Fuente	$\tau_y = \alpha_1 e^{\beta_1 c_s}$ (dynes/cm ²)		$\eta = \alpha_2 e^{\beta_2 c_s}$ (poises)	
	α	β	α	β
Datos de Campo				
Aspen Pit 1	0.181	25.7	0.036	22.1
Aspen Pit 2	2.72	10.4	0.0538	14.5
Aspen Suelo Natural	0.152	18.7	0.00136	28.4
Aspen Relleno de Mina	0.0473	21.1	0.128	12
Cuenca de Aspen	0.0383	19.6	0.000495	27.1
Del Área de la mina de Aspen	0.291	14.3	0.000201	33.1
Glenwood 1	0.0345	20.1	0.00283	23
Glenwood 2	0.0765	16.9	0.0648	6.2
Glenwood 3	0.000707	29.8	0.00632	19.9
Glenwood 4	0.00172	29.5	0.000602	33.1
Relaciones Disponibles en la Literatura				
lida (1938)	-	-	0.0000373	36.6
Dai et al. (1980)	2.6	17.48	0.0075	14.39
Kang and Zhang (1980)	1.75	7.82	0.0405	8.29
Qian et al. (1980)	0.00136	21.2	-	-
	0.05	15.48	-	-
Chien and Ma (1958)	0.0588	19.1-32.7	-	-
Fei (1981)	0.166	25.6	-	-
	0.0047	22.2	-	-
Ver O'Brien (1986)				

Conversión

Tensión de Corte: 1 Pascal (PA)=10 dynes/cm²
1 Pas=10 dynes-sec/cm²=10

Viscosidad: poises

Para cada elemento de la malla y cada paso de tiempo, el modelo calcula el cambio en los volúmenes del agua y de sedimento y el correspondiente cambio en la concentración de sedimentos. Como resultado de la simulación se informan la cantidad de agua y sedimento que abandonan el área del estudio (salida) y los volúmenes de agua y sedimento almacenados en la planicie o en el cauce. Asimismo, el modelo calcula la extensión del área inundada por el barro y las profundidades y velocidades de flujo máximas como una función del sedimento disponible (Jaime P. R. et. all, 2007).

Escenarios Hipotéticos

Para la definición de los escenarios correspondiente a las simulaciones de flujo de barro, se consideró que estos flujos se asocian a eventos de crecida relativamente frecuentes (O'Brien, 2003), cuyo caudal líquido se encuentra entre 10 y 25 años de recurrencia.

A partir de estas consideraciones se definieron los escenarios que se presentan en la Tabla 3, donde $Cv_{m\acute{a}ximo}$ es la concentración de sedimentos en volumen ($Cv = Vol. Sed./Vol. Agua y Sed.$).

Tabla 3.- Escenarios modelados numéricamente con FLO-2D.

Escenario	Caudal Líquido	$Cv_{m\acute{a}ximo}$
Nº 1	Tr: 10 años	0.25
Nº 2	Tr: 10 años	0.55
Nº 3	Tr: 25 años	0.25
Nº 4	Tr: 25 años	0.55

Se modelaron los hidrogramas correspondientes a cada escenario en el modelo "a" y se obtuvieron los hidrogramas que pasaron por encima de la defensa. Estos hidrogramas se ingresaron al modelo "b" y se realizaron las correspondientes modelaciones.

RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos del estudio geomorfológico y de las modelaciones numéricas.

Geomorfológico

La zonificación de la amenaza realizada se basa en las condiciones geomorfológicas de los ámbitos fluviales, no considerando la recurrencia de los eventos, ni la vulnerabilidad de los elementos expuestos.

Teniendo en cuenta el análisis de los datos fotogeológicos y fotogeomorfológicos obtenidos en gabinete y el correspondiente control de campo, se establece una escala de amenaza o peligrosidad frente a las inundaciones repentinas relacionada con las condiciones geomorfológicas.

En la Figura 4 se presenta la Carta de Amenaza en la localidad de Saujil.

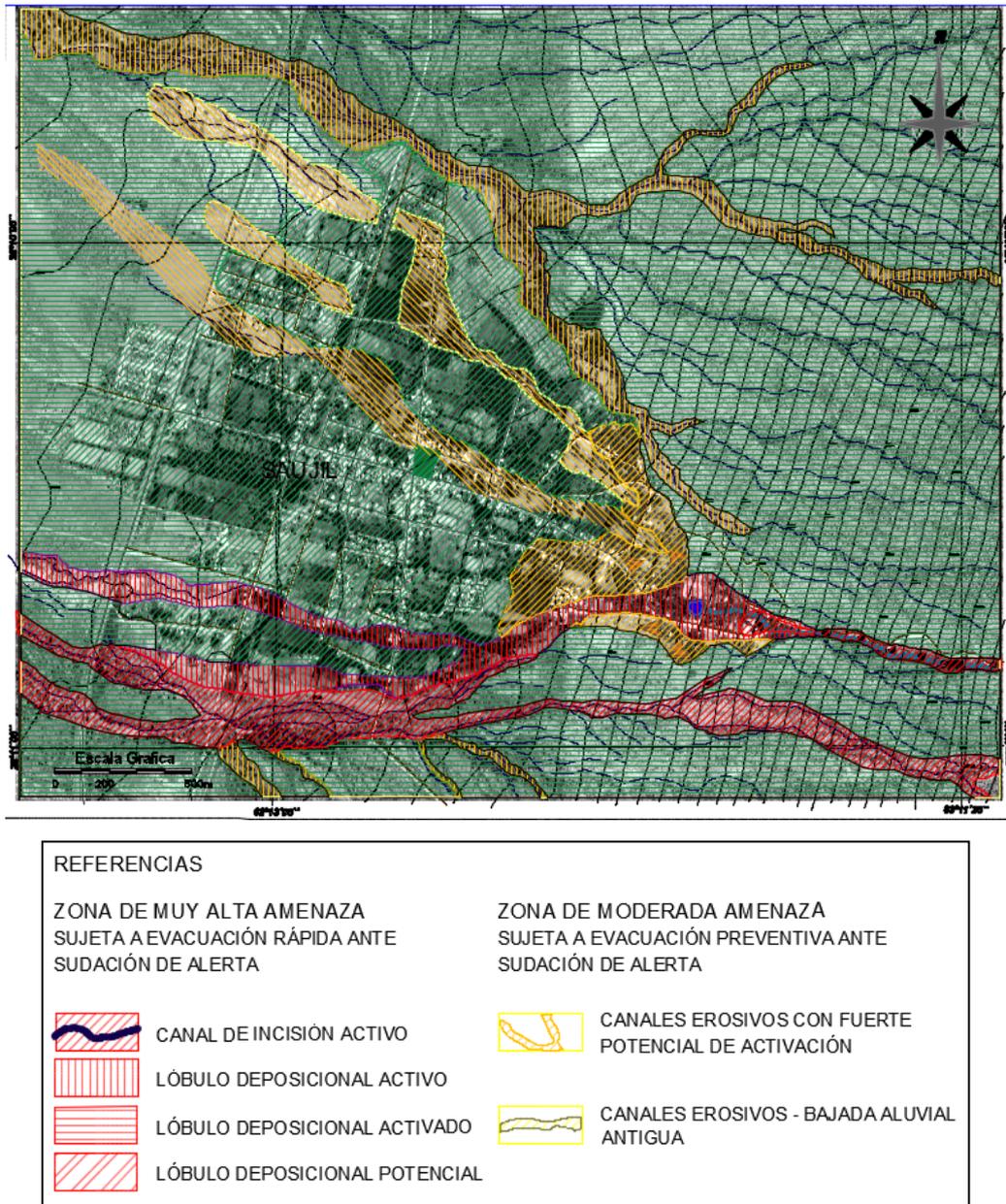


Figura 4.- Carta de amenaza.

Modelación Numérica

En las Figuras 5, 6, 7 y 8 se presentan las manchas de inundación en la zona urbana de Saujil para los escenarios 1, 2, 3 y 4 respectivamente.

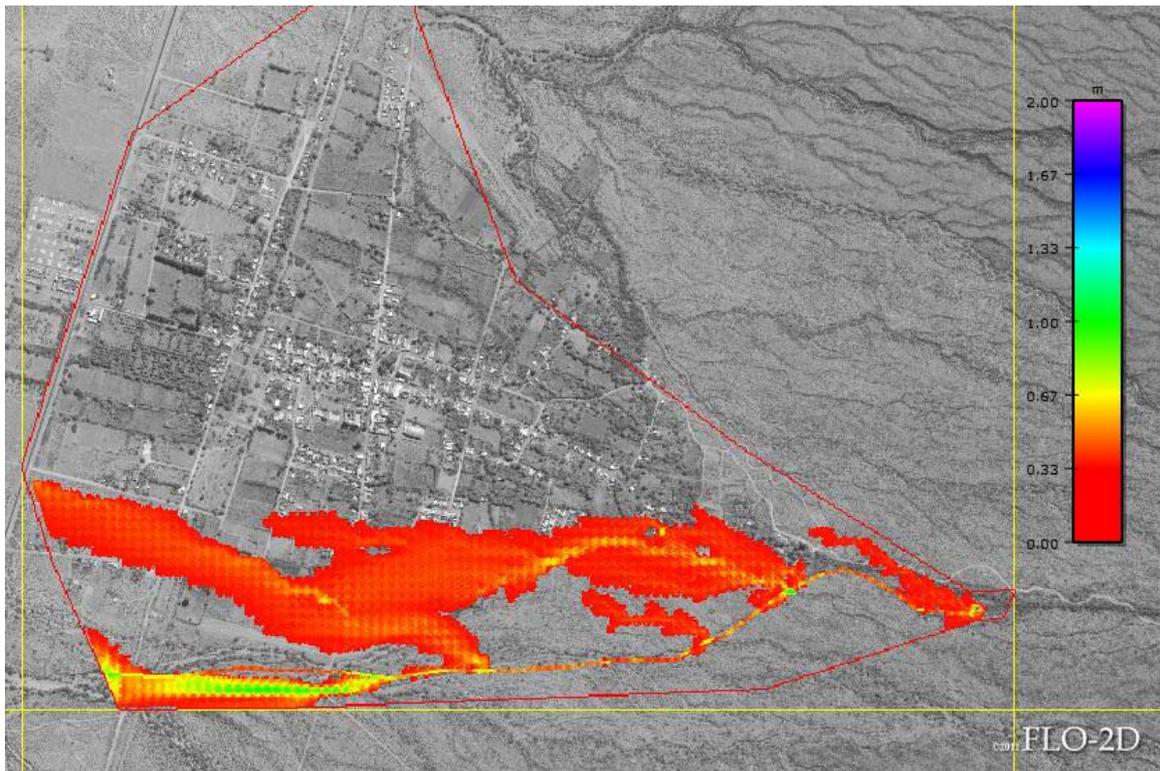


Figura 5.- Mancha de inundación – Escenario 1.

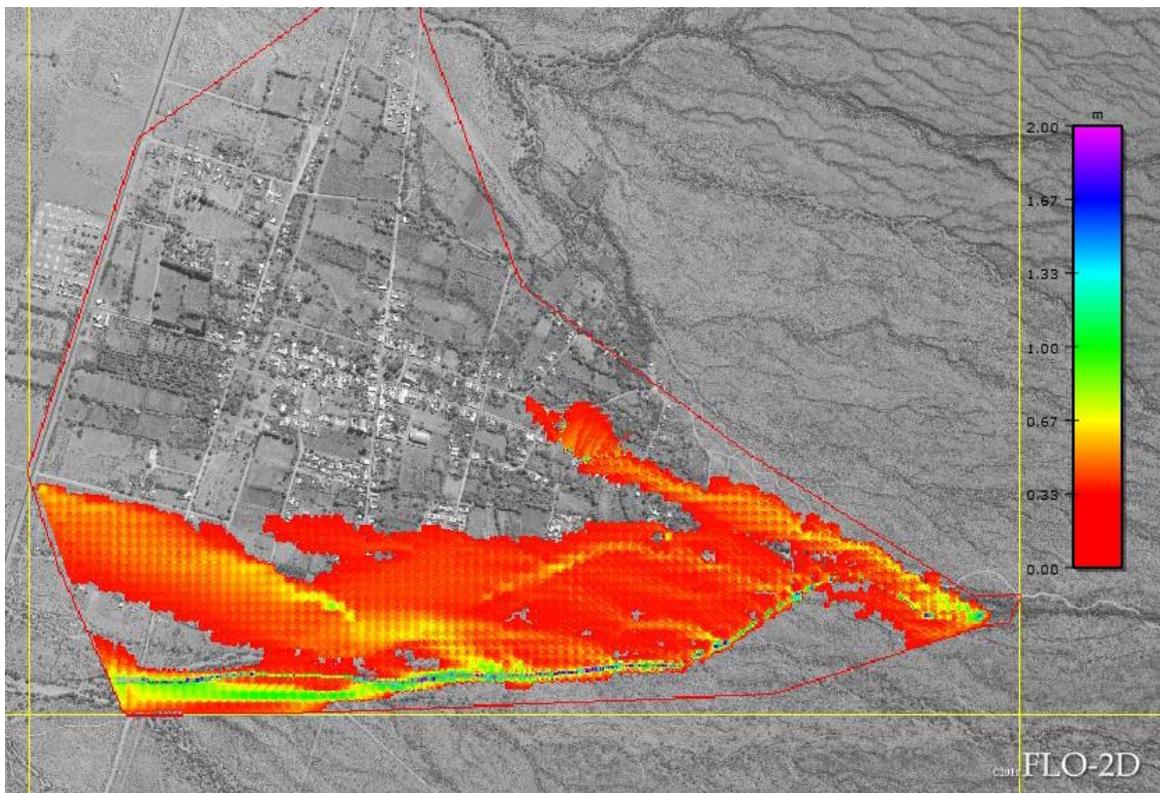


Figura 6.- Mancha de inundación – Escenario 2.

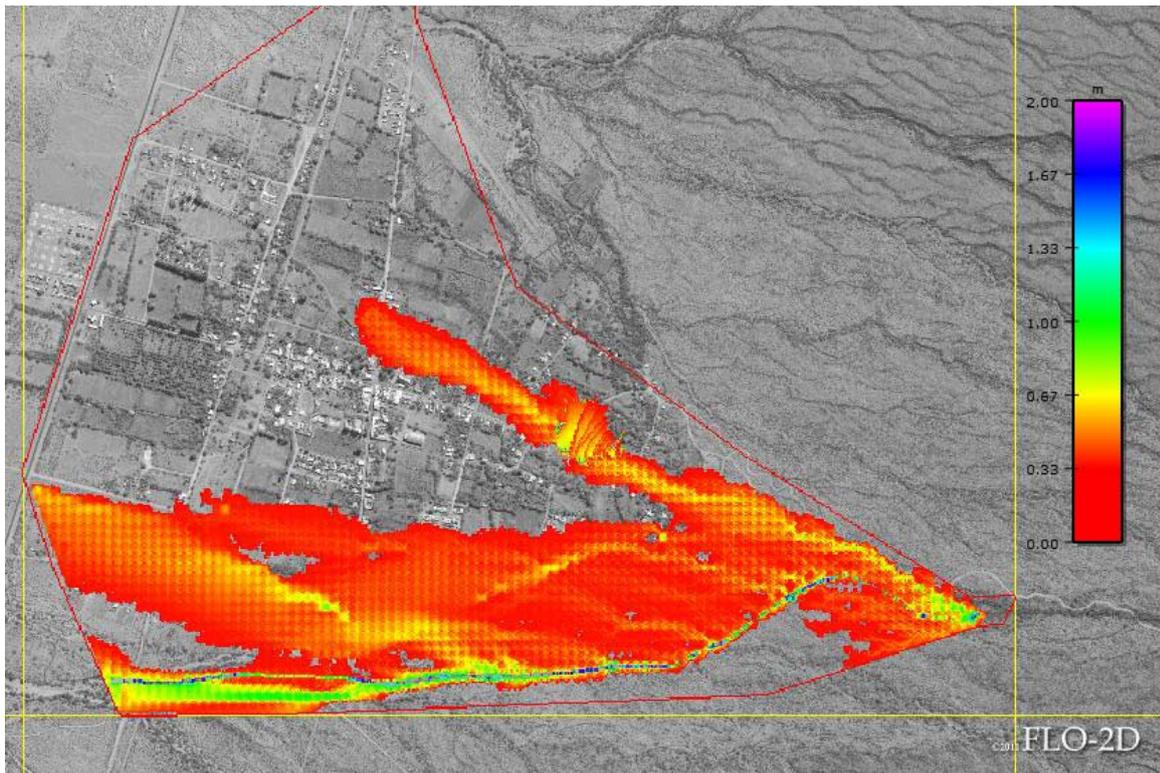


Figura 7.- Mancha de inundación – Escenario 3.

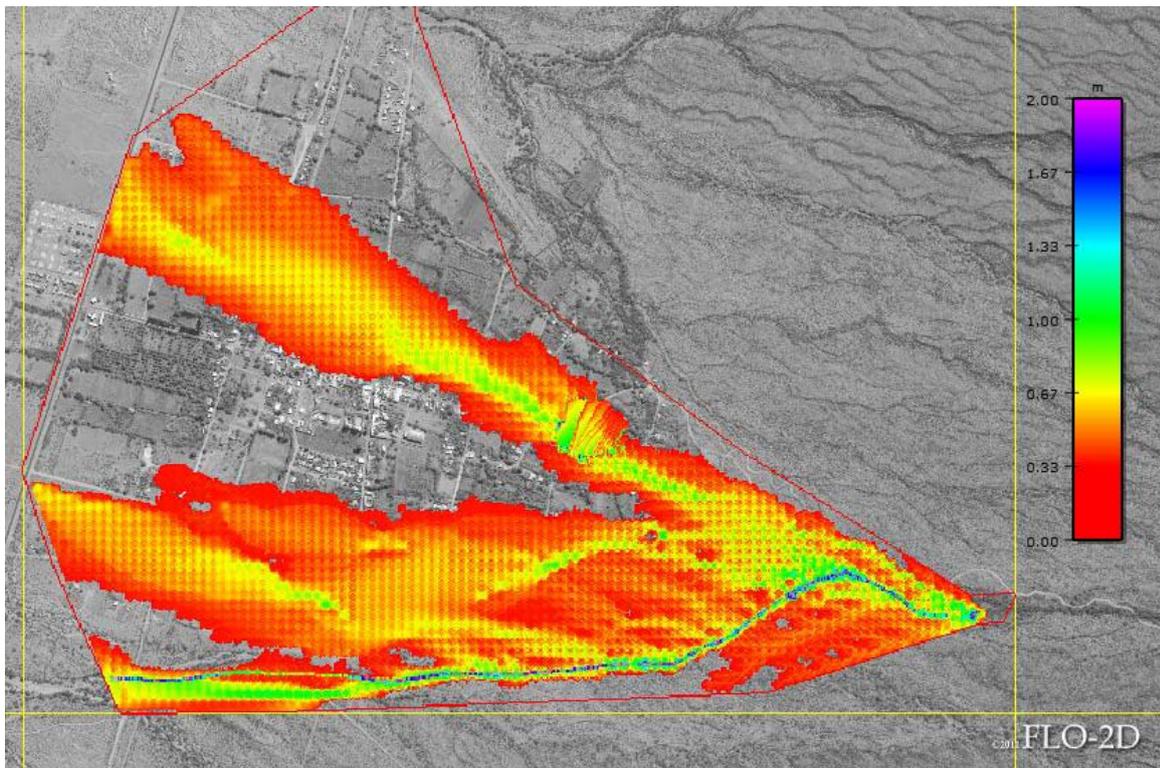


Figura 8.- Mancha de inundación – Escenario 4.

CONCLUSIONES

La zona apical del cono y la defensa construida próxima al C° El Potrero tienen posibilidad de activación por efecto de los procesos de avulsión.

Se observó que las zonas de inundación obtenidas para los “Escenarios Hipotéticos” planteados son similares a las zonas de riesgo delimitada en la Carta de Amenaza en el estudio geomorfológico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bagnold, R. A. (1954) *Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear*, Proc. of the Royal Society of London, Series A, V. 249, 235-297.

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

O'Brien, J. S., P.Y. Julien y W.T. Fullerton. (1993). *Two-dimensional water flood and mudflow simulation*, J. Hydr. Eng., ASCE, 119(2), 244-261.