

## Comparación de dos Modelos de Simulación de Rompimiento de Presas

I.C. Juan David Vásquez Villa  
[jdvasque@unalmed.edu.co](mailto:jdvasque@unalmed.edu.co)

I.C. Juan Manuel Alzate Vélez  
[jmalzate@unalmed.edu.co](mailto:jmalzate@unalmed.edu.co)

I.C., MSc, PhD Mauricio Toro Botero  
Profesor Asociado  
[fmtoro@unalmed.edu.co](mailto:fmtoro@unalmed.edu.co)

Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas  
Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

Preparado para presentación en el  
XVI Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología  
Sociedad Colombiana de Ingenieros  
Sociedad de Ingenieros del Quindío  
Universidad del Quindío  
Corporación Autónoma Regional del Quindío  
Armenia 29, 30 y 31 de octubre de 2004

**Resumen.** Se pretende con este trabajo hacer un estudio comparativo de dos modelos numéricos de simulación de rompimiento de presas de tierra, BREACH (NWS, USA) y BRECCIA (ENELCRIS, Italia). Se parte de un análisis de sensibilidad, independientemente para cada modelo, para el caudal y el tiempo al pico debido a variaciones de cada uno de los parámetros involucrados en la física de los modelos, para un escenario fijo de modelamiento. Posteriormente, se aplican ambos modelos al caso del embalse Piedras Blancas bajo una eventual falla por sobrevertimiento, y finalmente se justifican las diferencias de los resultados de la simulación de ambos modelos contemplando las hipótesis de cada uno de ellos. Al aplicar ambos modelos al caso Piedras Blancas se obtienen resultados muy diferentes en las hidrógrafas del rompimiento y en la dinámica de la brecha, debido a las restricciones consideradas en el modelo Breccia con respecto a la geometría de la presa, las cuales afectan en particular la cantidad de volumen aerodar y esto a su vez el tiempo de falla de la presa. De la justificación de las diferencias en los resultados de caudal pico entre ambos modelos, se obtiene que el coeficiente de fricción de Nikuradse y el coeficiente de descarga de la brecha, en el modelo Breccia, pueden ser considerados como parámetros subjetivos o semi-empíricos, y su variación no afecta la composición ni geometría de la presa.

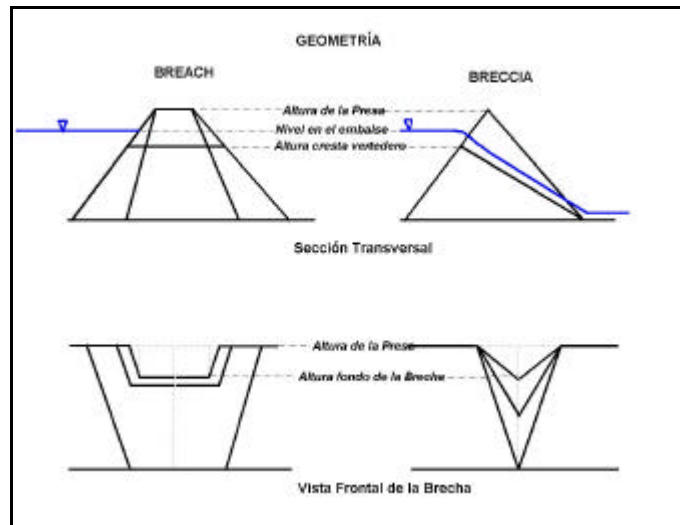
## **1. Introducción**

El rompimiento de una presa es quizás uno de los desastres con mayores consecuencias, principalmente en lo relacionado con las pérdidas de vidas humanas, las ambientales y las materiales. Actualmente la ley colombiana, siguiendo algunas tendencias internacionales, exige conocimiento al respecto con el fin de estimar el riesgo asociado a la construcción y operación de embalses. De igual forma existen unos términos de referencia expedidos por el Ministerio del Medio Ambiente de Colombia (Eter-210) para el estudio del impacto ambiental de proyectos de aprovechamiento hidroeléctrico, fundamentalmente en la elaboración de los planes de evacuación de zonas potencialmente en riesgo, lo que hace necesario un estudio detallado de rompimiento de presas, en particular, estimación de caudales máximos, tiempos de falla, desplazamiento de las hidrógrafas, y llanuras de inundación. Con el fin de atender no solo la necesidad legal que el tema implica, sino también la responsabilidad social implícita, se hace necesario hacer un estudio acerca de algunos de los modelos de rompimiento de presas actualmente en la literatura del tema, dentro de los cuales existen una gran variedad de modelos matemáticos y basados físicamente, entre los cuales se destacan los modelos Breach y Breccia, de diferente concepción en su formulación. En este trabajo se hace un estudio comparativo de los resultados que ambos modelos entregan para la simulación del rompimiento bajo las mismas condiciones. Se busca encontrar y explicar las diferencias que ambos modelos producen para ofrecer una guía al usuario de los modelos, guía que le permita adquirir confianza en la aplicación de cualquiera de los modelos a casos de la vida real.

## **2. Marco Teórico**

Durante la falla de una presa se desarrolla un proceso dinámico muy complejo. Aunque los principales modos de falla han sido identificados como el sobrevertimiento y la tubificación, poco se conoce sobre la localización y el tamaño de la brecha inicial o del conducto en el cual se inicia el proceso. En la formación de esta brecha y en el proceso de falla intervienen aspectos hidráulicos, hidrodinámicos, hidrológicos, geotécnicos y de transporte de sedimentos. La predicción de la forma, magnitud, y tiempo de desarrollo de la falla de la presa es importante para el diseño de un programa de evacuación y un manejo adecuado de la operación de un embalse. Una vez se forma la brecha, la descarga de agua continúa erosionándola hasta que el embalse se vacía.

Aunque ambos modelos están orientados a fallas de presas de material suelto y a utilizar ecuaciones de conservación de masa, energía, mecánica de suelos y transporte de sedimentos, estas últimas de Meyer-Peter y Müller y Einstein en los modelos Breach y Breccia respectivamente, considerando régimen de flujo uniforme y cuasi-permanente, existen diferencias significativas entre las hipótesis de ambos modelos y en la geometría de la sección transversal de la presa y de formación de la brecha (Ver Figura1)



**Figura 1.** Comparación de la geometría de presa y brecha en los modelos Breach y Breccia.

En cuanto a las diferencias en las hipótesis de los modelos, se destaca que, mientras el modelo Breach considera falla por tubificación, esfuerzo de cohesión y ecuación de vertedero rectangular de pared gruesa para descarga por la brecha, el modelo Breccia solo tiene en cuenta falla por sobrevvertimiento, no considera la cohesión y recurre a la ecuación de un vertedero triangular isósceles para estimar el caudal efluente en la brecha. Para más detalles de la física y ecuaciones de cada uno de los modelos se recomienda consultar Fread (1991), Pacheco (1986) y Barros (2003).

### 3. Análisis de Sensibilidad

#### 3.1 Metodología

Este análisis se lleva a cabo para cuantificar y describir las variaciones en las hidrógrafas resultantes de un rompimiento de presa utilizando los modelos Breach y Breccia. Se consideran principalmente los caudales y tiempos al pico de la hidrógrafa de rompimiento, los niveles de agua en el embalse y los anchos de brecha durante la simulación. En general, se puede decir que los parámetros que utilizan los modelos son geométricos de la presa, mecánicos del material que la conforman, y numéricos ( $\Delta t$ )

Para el estudio de sensibilidad de parámetros, se define un escenario fijo con datos reales de un embalse en particular, en el cual se realizan todas y cada una de las simulaciones considerando la variación de un parámetro a la vez, y dejando los restantes con sus respectivos valores patrones. Se tienen en cuenta valores físicamente posibles de los parámetros para aquellas simulaciones en las cuales hay sensibilidad a dichos valores, y no es necesario ampliar más su rango de variación, y valores matemáticamente posibles, cuando se recurre a diferentes valores que son necesarios para encontrar algún grado de sensibilidades en los resultados. Se tienen en cuenta valores de los parámetros por encima y por debajo del valor patrón.

### 3.2 Escenario patrón

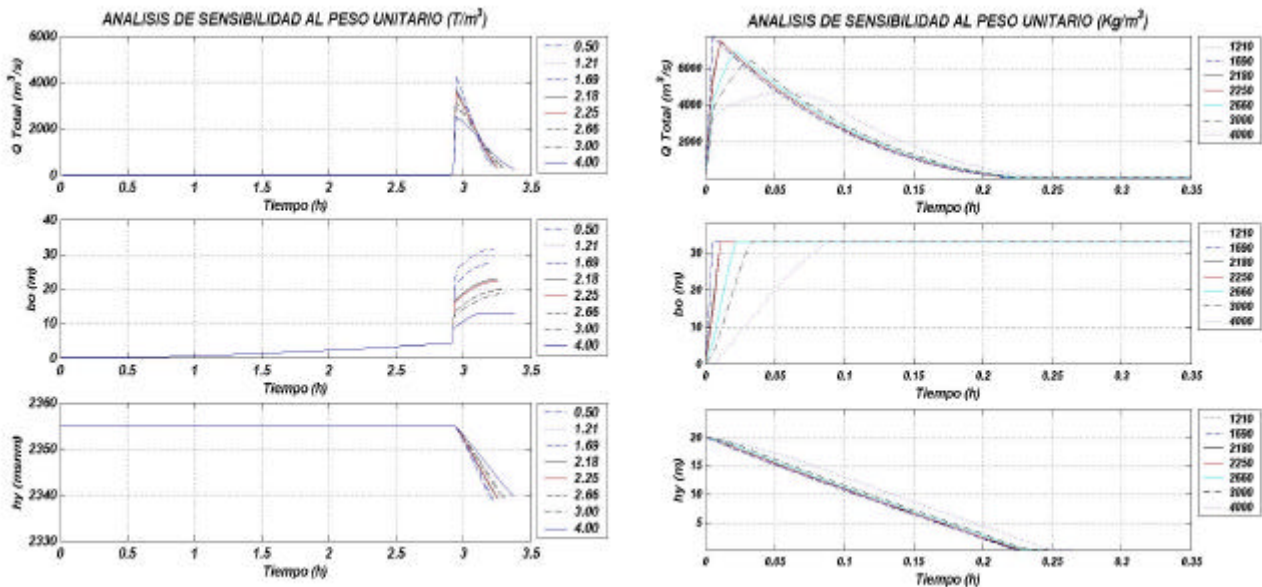
Se considera falla por sobrevertimiento, para lo que se no se tiene en cuenta descarga por el vertedero. Este caso no es probable, sin embargo es el más apropiado para llevar a cabo la comparación que se pretende hacer entre modelos. El caudal se reparte en la brecha y por encima de la presa. La geometría y descripción de la presa, las curvas de cota vs. capacidad y cota vs. área del espejo de agua corresponden a la presa y embalse Piedras Blancas. En la Tabla 1 se presentan los datos para el escenario patrón, los cuales son fijos durante el análisis de sensibilidad.

**Tabla 1.** Datos del escenario patrón, fijo para el A.S.

Nivel inicial de agua	2354.93 msnm
Altura de presa	19.93 m
Caudal afluente	5.0 m <sup>3</sup> /s
Tiempo simulación	5.0 h
Tamaño de paso ( $\Delta t$ )	3.6 s (Breach)
	0.5 s (Breccia)

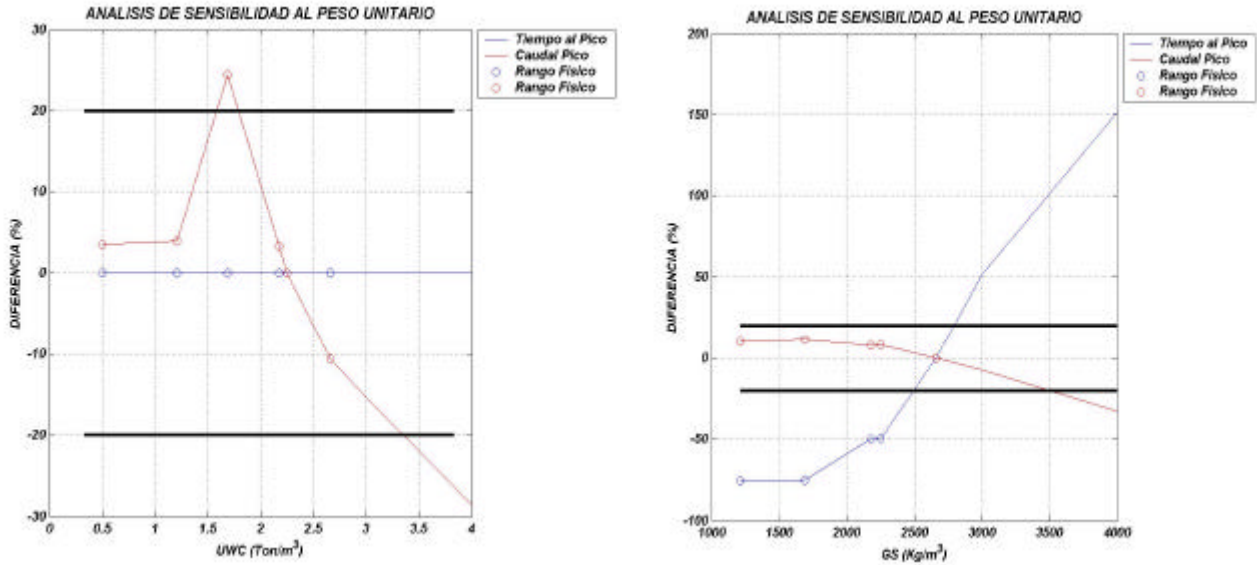
### 3.3 Algunos ejemplos

En la Figura 2 se presentan algunas gráficas correspondientes al ejemplo de análisis de sensibilidad a variaciones del peso unitario en las que se muestran los resultados de la simulación para las hidrógrafas resultantes del rompimiento, el ancho de fondo de la brecha y el nivel de agua en embalse, para ambos modelos.



**Figura 2.** Hidrógrafas resultantes del rompimiento, anchos de fondo de brecha y niveles de embalse para variaciones del peso unitario del material de la presa, para el modelo Breach (izquierda) y modelo Breccia (derecha). En rojo se presenta el la gráfica correspondiente al caso patrón.

Además en la Figura 3 se muestran las gráficas con la diferencia porcentual, con respecto al caso patrón, entre los resultados de caudal pico ( $Q_p$ ) y tiempo al pico ( $t_p$ ) debido a variaciones del peso unitario y considerando ambos modelos.



**Figura 3.** Diferencia porcentual, respecto al caso patrón, entre los resultados de caudal pico y tiempo al pico, debido a variaciones del peso unitario, con el modelo Breach (izquierda) y modelo Breccia (derecha).

Las Figuras 2 y 3 corresponden solo al caso del peso unitario, sin embargo éstas fueron obtenidas para cada uno de los parámetros, para lo cual se recomienda consultar Alzate y Vásquez (2004).

### 3.4 Resultados

Se considera un parámetro sensible aquel cuya diferencia porcentual del caudal pico o tiempo al pico excede al 20% o es inferior al - 20%, respecto al caso patrón. En la tabla 2 se presenta un resumen con los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad, en el cual se denomina con un "Si" y con un "No" a parámetros sensibles y no sensibles respectivamente, considerando tanto el caudal pico como el tiempo al pico.

**Tabla 2.** Resultados del A.S. para los modelos Breach y Breccia

	Parámetro	Caudal Pico	Tiempo al Pico
BREACH	Ángulo de fricción	No	No
	Porosidad	No	Si
	Relación $D_{90}/D_{30}$	No	Si
	Velocidad Máxima Permisible	No	No
	Pendiente talud aguas arriba	No	No
	Pendiente talud aguas abajo	Si	Si
	Peso Unitario	Si	No
	Esfuerzo de cohesión	Si	No
	Diámetro medio	No	No
BRECCIA	Pendiente de taludes	Si	Si
	Diámetro medio	Si	Si
	Coficiente de Nikuradse	Si	Si
	Peso unitario	Si	Si
	Porosidad	No	Si
	Coficiente descarga de brecha	Si	No
	Ángulo de reposo	Si	Si
	Altura inicial de brecha	No	No

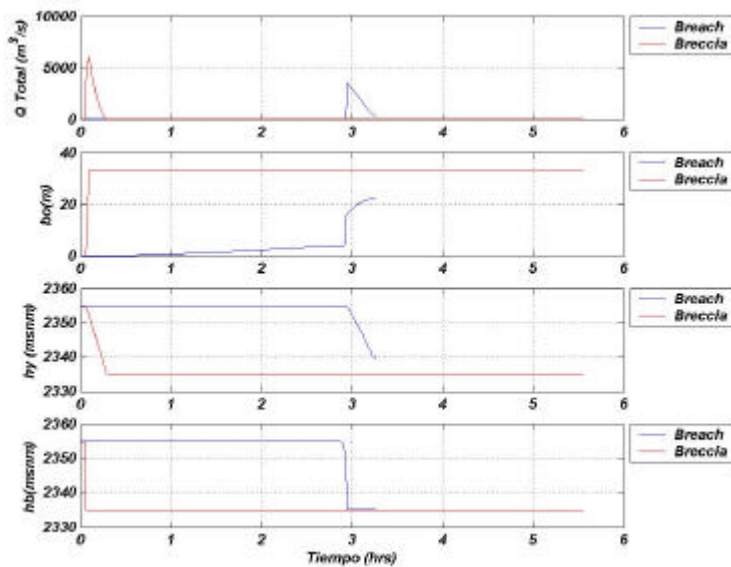
#### 4. Comparación de Resultados, caso de embalse Piedras Blancas

En esta parte del trabajo se presenta una comparación de resultados entre ambos modelos aplicados al caso del embalse Piedras Blancas, Antioquia. Se presentan los resultados de las hidrógrafas resultantes de la simulación del rompimiento de presa y además se ilustran algunas variables de la dinámica de la brecha durante la simulación. Es necesario aclarar que en ninguna etapa del trabajo aquí presentado se hace una precisión acerca de cual de los dos modelos es mas acertado o más potente en términos de sus resultados. La geometría, parámetros mecánicos de la presa y niveles de embalse de Piedras Blancas, Antioquia, pueden ser consultados en Toro *et al* (2003).

##### 4.1 Metodología y Resultados

Se define un escenario fijo de simulación que permita hacer las comparaciones entre las hidrógrafas resultantes del rompimiento de cada uno de los modelos, en particular el tiempo y caudal pico, además se comparan los niveles de embalse y dinámica de la brecha durante la simulación.

Inicialmente se define un caso “real” de simulación (Caso 1), para lo cual se utiliza la información del embalse Piedras Blancas, teniendo el **nivel máximo de agua en el embalse y considerando falla por sobrevertimiento**. Definido el escenario que se pretende simular, se aplican ambos modelos a este caso y se comparan sus resultados, los cuales se ilustran en la Figura 4.

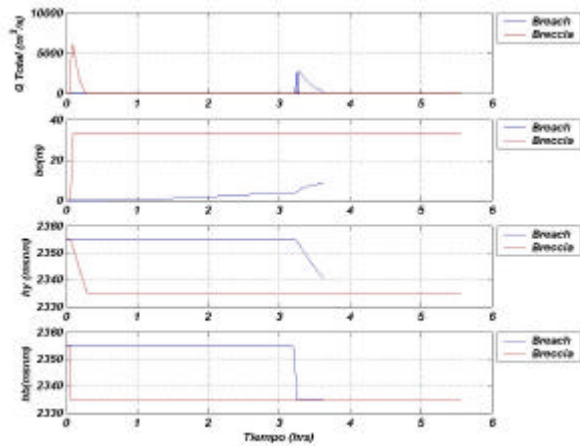


**Figura 4.** Comparación de resultados entre modelos, Caso 1.

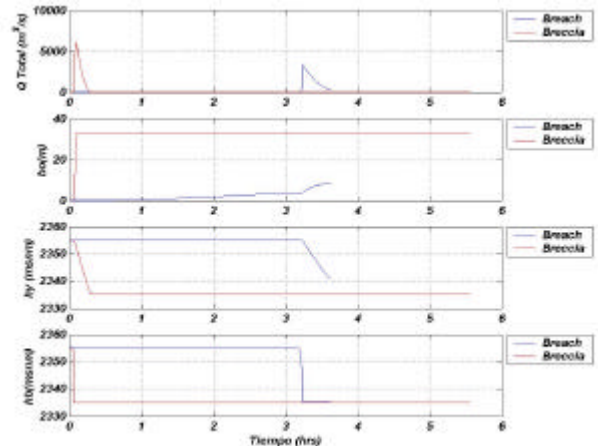
Ahora bien, teniendo en cuenta las apreciables diferencias entre los resultados obtenidos de ambos modelos para el Caso 1, se hace necesario encontrar alguna justificación. Al examinar la física de cada uno de los modelos se puede observar que el modelo Breccia involucra hipótesis más fuertes y restrictivas que las que considera el modelo Breach, entre las que se destacan:

- El modelo Breccia considera suelo sin cohesión, a diferencia del Breach que incluye este parámetro.
- El modelo Breccia no considera engramado en el talud aguas abajo de la presa, a diferencia del modelo Breach que si lo tiene en cuenta.
- En la geometría de la sección transversal de la presa, el modelo Breccia considera un triángulo isósceles (Ver Figura 1), esto le impide considerar un ancho de la cresta de la presa, opuesto a lo que ocurre con el modelo Breach que al considerar una presa de sección trapezoidal puede tener en cuenta este parámetro.

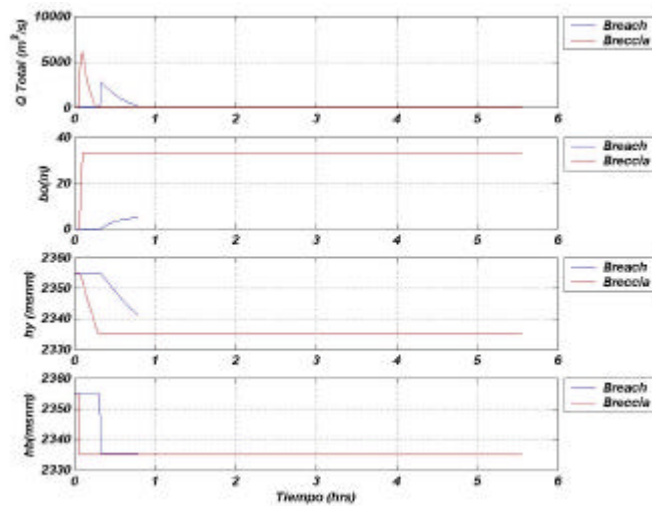
En las Figuras 5 a 7 se presentan las comparaciones de los resultados obtenidos al aplicar las simplificaciones consideradas en el modelo Breccia (descritas en el párrafo anterior) al modelo Breach, esto con la intención de alcanzar condiciones de simulación homogéneas que eventualmente permitan obtener caudales pico y tiempos al pico similares en ambos casos, escenarios mas comparables, y finalmente justificar las diferencias entre los modelos de simulación. La Figura 5 corresponde al caso de simulación del modelo Breach sin esfuerzo de cohesión (Caso 2), la Figura 6 presenta los resultados para el caso de simulación del modelo Breach sin esfuerzo de cohesión y sin engramado en el talud de aguas abajo de la presa (Caso 3), y por último la Figura 7 muestra los resultados para el caso de simulación del modelo Breach sin esfuerzo de cohesión, sin engramado y sin ancho de cresta de presa (Caso 4). Los resultados del modelo Breccia presentados en los Casos 2,3 y 4 corresponden a los del Caso 1.



**Figura 5.** Comparación de resultados entre modelos Caso 2.



**Figura 6.** Comparación de resultados entre modelos Caso 3.



**Figura 7.** Comparación de resultados entre modelos Caso 4.

En el Caso 4 es de particular importancia la disminución que presenta el tiempo al pico respecto al valor resultante de la simulación con el caso Piedras Blancas (diferencia de 88.8%) así como la disminución presentada por el caudal pico (diferencia de 22.3%). Lo anterior se da como consecuencia de la disminución del ancho de la cresta de la presa que en caso original era de 7 m (caso Piedras Blancas), y se hizo igual a 0 m según la hipótesis del modelo Breccia.

La diferencia mas representativa entre ambos modelos se encuentra en la cantidad de volumen erosionado pues hacer cero el ancho de la cresta de la presa en el modelo Breach implica una disminución de la cantidad de material que conforma la presa y esto a su vez, una falla mucho mas rápida al tener que erosionar menor volumen de material, y así obtener un resultado mas comparable que el obtenido con el modelo Breccia.



## 4.2 Justificación de la Diferencia entre los Resultados obtenidos para el Caudal Pico en las Simulaciones con los modelos Breach y Breccia

De acuerdo con los resultados obtenidos en el caso 4 (Ver Figura 7), que corresponde al caso más comparable entre modelos, pues éstos son llevados a las mismas condiciones en lo que respecta a sus hipótesis, el paso siguiente consiste en justificar las diferencias obtenidas para el caudal pico tratando de equiparar sus resultados en ambos modelos. Lo anterior realizando variaciones a los valores de los parámetros sensibles de cada uno de los modelos con el fin de obtener algún parámetro de carácter empírico que pueda ser variado sin afectar la geometría ni composición de la presa. Este proceso implica que con el modelo Breach se alcance un caudal pico similar al del modelo Breccia y viceversa.

La razón por la cual no se intenta equiparar los resultados en tiempo al pico es porque la diferencia entre 0.33 y 0.10 horas no es significativa desde el punto de vista práctico al momento de comparar los resultados de los modelos, en últimas es tan solo una diferencia aproximada de 14 minutos.

En la Tabla 3 se presenta un cuadro resumen con los resultados obtenidos para la justificación de la diferencia del caudal pico obtenidos con ambos modelos, en el cual se listan aquellos parámetros que a variaciones de sus magnitudes permiten alcanzar el resultado de caudal pico obtenido por el otro modelo. Se destacan (negrilla) aquellos parámetros semi-empíricos buscados, correspondientes al modelo Breccia. Para mas detalles sobre la justificación de la diferencia entre resultados obtenidos para el caudal pico se recomienda consultar Alzate y Vásquez (2004).

**Tabla 3.** "Igualación de caudal pico, justificación de diferencia"

<b>Breach a Breccia</b> (6102 m <sup>3</sup> /s)	Ningún parámetro
<b>Breccia a Breach</b> (2775 m <sup>3</sup> /s)	<b>Coficiente de descarga de la brecha</b> <b>Coficiente de Nikuradse</b> Tangente del ángulo de inclinación del talud. Peso unitario Diámetro medio

## 4.3 Ecuaciones Empíricas para la Estimación del Caudal Pico

El caudal pico de la hidrógrafa resultante de un rompimiento de presa se puede estimar a groso modo mediante ecuaciones de predicción (empíricas), las cuales son el resultado de trabajos realizados en múltiples presas de material suelto hasta la actualidad. Para el Caso 1 se utilizan las ecuaciones de *Froehlich, Barros, McDonald y Kirkpatrick*, las cuales proporcionan los mejores resultados (Barros, 2003).

El caudal pico se estima para el Caso 1, con nivel inicial en el embalse igual al nivel Máximo, y cuyos datos son:

- Altura de la presa ( $H_p$ ): 19.93 m
- Nivel Máximo ( $H_w$ ): 19.93 m (se presenta falla en el vertedero)
- Volumen en Nivel Máximo ( $V_w$ ): 1'190000 m<sup>3</sup> (subestimado)

Ecuación de Froehlich

$$Q_p = 0.607 (V_w^{0.295} H_w^{1.24}) = 1538 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (1)$$

Ecuación de Barros

$$Q_p = 8.388064 H_w^{1.959560} = 2952 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (2)$$

Ecuación de McDonald

$$Q_p = 3.85 (V_w H_w)^{0.411} = 4136 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (3)$$

Ecuación de Kirkpatrick

$$Q_p = 1.268 (H_w + 0.3)^{2.5} = 2334 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (4)$$

Respecto al tiempo al pico de la hidrógrafa resultante del rompimiento de presa en el caso Piedras Blancas, se tiene que de una base de datos de presas de material suelto, cuyos rompimientos se encuentran "bien" reportados (Barros, 2003) y al considerar fallas por sobrevertimiento, tal como se consideró en Piedras Blancas, se encuentra que para muchas de las presas consideradas, el tiempo al pico en la hidrógrafa se encuentra entre 0.1 y 0.5 h, dentro de las cuales la más similar a este caso es la presa de "Buffalo Creek" en Estados Unidos, la cual presentó un caudal pico aproximado de 1420 m<sup>3</sup>/s, fue construida de material homogéneo, con altura de presa de 14 m y un volumen de agua en el embalse de 0.48 Mm<sup>3</sup>, datos similares al de nuestro caso. Otros casos cuyos resultados en tiempo al pico son similares al caso Piedras Blancas corresponden a las presas de "Canyon Lake" en Estados Unidos, "Bradfield" en Inglaterra y "Frías" en Argentina (Barros, 2003).

De los resultados anteriores se aprecia cómo el modelo Breach presenta una mejor aproximación al caudal pico **si se tienen como referencia las ecuaciones de predicción** del mismo, quizá la única referencia que se tiene hasta el momento, mientras que el modelo Breccia presenta la mejor aproximación al tiempo al pico, si se compara con los casos reales de rompimientos por sobrevertimiento de presas similares a Piedras Blancas.

## 5. Conclusiones Generales

- De acuerdo a la física del modelo Breccia, se puede afirmar que éste contempla hipótesis restrictivas en comparación con las del modelo Breach, en su orden son: no considera un recubrimiento de grama en los taludes de la presa, no considera cohesión para el material que conforma la presa y finalmente, contempla una sección transversal de la presa en forma triangular, sin ancho de cresta, a diferencia del Breach que la considera trapezoidal.
- Se puede decir que el modelo Breach es más estable en sus resultados y que permite quizá una mayor "libertad" a la hora de estimar los parámetros en comparación con el modelo Breccia.
- Además de las conclusiones que se pueden extraer del análisis de sensibilidad como tal, se aprecia en la gran mayoría de resultados que el caudal pico y tiempo al pico como funciones de los parámetros de los modelos, no presentan un comportamiento de función monótona debido a la no linealidad del fenómeno, por lo que existen algunos máximos absolutos para algunos valores de los parámetros. Este tipo de

resultados pueden deberse a una deficiencia en la metodología empleada, en la cual para el análisis de sensibilidad solo se variaba un parámetro a la vez, y los demás se dejaban constantes, lo que tiene como inconveniente que existen algunos parámetros que están ligados entre sí, por ejemplo:  $D_{90}/D_{30}, D_{50}$ , peso unitario y porosidad.

- Al aplicar los dos modelos de simulación al caso real Piedras Blancas, Antioquia, para falla por sobrevvertimiento y considerando inicialmente un nivel máximo de agua en el embalse, se encontró que el caudal pico obtenido con el modelo Breach es  $3572 \text{ m}^3/\text{s}$  mientras que con el modelo Breccia es de  $6102 \text{ m}^3/\text{s}$ , diferencia de  $2530 \text{ m}^3/\text{s}$ . Para el tiempo al pico, con el modelo Breach se obtiene 2.95 horas y con el modelo Breccia se obtiene 0.10 horas.
- Dado que el modelo Breccia no considera ancho de cresta de presa, ni cohesión en el material de la presa, ni engramado del talud aguas debajo de la presa, estos valores no entraron como datos en la simulación y por esta razón se muestran las grandes diferencias presentadas en la conclusión anterior. Sin embargo, las hipótesis de suelo no cohesivo y taludes sin engramado consideradas en el modelo Breccia no repercutieron considerablemente en estos resultados.
- Dado que el modelo Breccia no considera ancho de cresta de presa, al aplicar el modelo Breach al caso de Piedras Blancas sin considerar ancho de cresta, se obtuvieron resultados en el tiempo al pico de 0.33 horas y en el caudal pico de  $2775 \text{ m}^3/\text{s}$ . El parámetro ancho de cresta de presa acerca los resultados de los dos modelos para el tiempo al pico, mas no para el caudal al pico.
- De los parámetros del modelo Breccia que permitieron alcanzar valores similares del caudal pico en el modelo Breach, el coeficiente de fricción de Nikuradse y el coeficiente de descarga de la brecha se consideran de carácter semi-empírico, y pueden ser modificados sin alterar ni la geometría ni la composición de la presa, es decir, están libres de ser modificados. El resto de ellos corresponden a parámetros mecánicos o geométricos que alcanzan valores prácticamente imposibles de obtener en la naturaleza o desde el punto de vista constructivo.

## Referencias

- 1] ALZATE, J.M y J.D. VÁSQUEZ. “*Estudio comparativo de dos modelos de simulación de rompimiento de presas*”. Trabajo de Grado. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 2004.
- 2] BARROS, J.F. “*Análisis de métodos de predicción para el caudal pico resultante en un rompimiento de presa*”. Tesis de Maestría en Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 2003.
- 3] FREAD, D.L. “*An erosion model for earthen dam failures*”. National Weather Service (NWS). Estados Unidos. Silver Spring, 1991.
- 5] PACHECO, R.G. “*Modello mattematico della breccia che si sviluppa in uno sbarramento in materiale sciolto per tracimazione*”. Ente Nazionale Energia Elettrica (ENEL) y Centro Ricerca Idraulica e Strutturale (CRIS). Italia. Calabria, 1986.
- 7] TORO F.M. et al. “*Estudio técnico de la llanura de inundación de la quebrada Piedras Blancas*”. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 2003. Informe presentado a EEPPM.
- 8] <http://www.usbr.gov/wrrl/twahl/> . Visitada en Junio de 2004.

