

EFFECTOS DE LA CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS EN EL FENÓMENO DE
SOBRE-ELEVACIÓN EN CANALES CURVOS

IVÁN ANDRÉS GUERRERO DÍAZ
DAVID ESTEBAN VILLOTA PATIÑO

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2017

EFFECTOS DE LA CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS EN EL FENÓMENO DE
SOBRE-ELEVACIÓN EN CANALES CURVOS

IVÁN ANDRÉS GUERRERO DÍAZ
DAVID ESTEBAN VILLOTA PATIÑO

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil

Director
GUSTAVO CÓRDOBA GUERRERO, PhD

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2017

NOTA DE RESPONSABILIDAD

“Las ideas y conclusiones aportadas en el Trabajo de Grado, son responsabilidad exclusiva de su autor”

Artículo 1 del Acuerdo No. 324 del 11 de Octubre de 1966, emanado del Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

“La Universidad de Nariño no se hace responsable de las opiniones o resultados obtenidos en el presente trabajo y para su publicación priman las normas sobre el derecho de autor”

Artículo 13 del Acuerdo No. 005 de 26 de Enero de 2010, emanado del Honorable Consejo Académico de la Universidad de Nariño.

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

San Juan de Pasto, 07 de marzo de 2017

RESUMEN

En el presente estudio se analizan los efectos de la concentración de sólidos en el fenómeno de sobre-elevación en canales curvos, comparando resultados de experimentación física y numérica. En el desarrollo de la investigación se abordaron dos fases, donde en la primera, correspondiente a la experimentación física, se construye el canal experimental, en el que se realizaron 420 ensayos con diferentes concentraciones de sólidos y pendientes para determinar el comportamiento del flujo bifásico. Los datos obtenidos en el proceso experimental fueron comparados con resultados teóricos reportados en la literatura, formulando una ecuación de sobre-elevación que puede ser usada para las condiciones de flujos bifásicos. En la segunda etapa se realizaron modelaciones numéricas usando el software TITAN2F, donde se replicaron las condiciones de laboratorio. Estos datos son comparados con los resultados experimentales, con el fin de validar el modelo numérico que utiliza TITAN2F. De esto, se pudo deducir que efectivamente, TITAN2F replica el fenómeno hidráulico, sin embargo, se aprecia que el programa tiene baja susceptibilidad a cambios de concentración de sólidos debido a la escala utilizada.

ABSTRACT

In this study, the effects of the concentration of solids in the over-elevation phenomenon are analyzed, comparing experimental and numerical results with a mathematical model. Two phases are approached in the development of the research, where the experimental model is obtained in the first one (Chanel), in which 420 tries were made with different concentration of solids and slopes in order to determine the behaviour of the biphasic fluid. The data that was obtained during the experimental process was compared with the theoretical results which were acquired through mathematical equations, formulating an equation of over-elevation that can be used for the conditions of biphasic flows. During the second phase, numerical modeling's were made using the TITAN2F software, where laboratory conditions were replicated. This data was compared with the experimental results, with the purpose of validating the numerical model that TITAN2F uses. From this we could deduct that in fact TITAN2F replicates the hydraulic phenomenon, however, it has a low susceptibility in regards to changes in the concentration of solids due to the scale which was used.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	8
1. MANUSCRITO	9
EFECTOS DE LA CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS EN EL FENÓMENO DE SOBRE-ELEVACIÓN EN CANALES CURVOS	
CONCLUSIONES	25
RECOMENDACIONES	28
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29

INTRODUCCIÓN

Para el presente proyecto de investigación, es necesario informar que mediante el acuerdo No. 038 del 12 de febrero del año 2016 del Comité Curricular y de Investigación del Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Nariño, se acepta como opción válida en el componente escrito la presentación de un artículo científico.

Para este caso, la investigación será publicada en Revista Ingeniería y Competitividad con ISSN 012330333, con una categoría de A2 e indexada en Publindex de Colciencias.

Efectos de la concentración de sólidos en el fenómeno de sobre-elevación en canales curvos

Effects of the concentration of solids on the phenomenon of super-elevation in curved open channels

Iván A. Guerrero§*, David E. Villota*, Gustavo A. Córdoba*, Hernán J. Gómez*

* Grupo de investigación GRAMA, Universidad de Nariño, Colombia.

§ ivan.guerrero-diaz@hotmail.com, devillota@hotmail.com, gcordobaguerrero@gmail.com, hgomezza@unal.edu.co

Resumen

En el presente estudio se analizan los efectos de la concentración de sólidos en el fenómeno de sobre-elevación en canales curvos, comparando resultados de experimentación física y numérica. En el desarrollo de la investigación se abordaron dos fases, donde en la primera, correspondiente a la experimentación física, se construye el canal experimental, en el que se realizaron 420 ensayos con diferentes concentraciones de sólidos y pendientes para determinar el comportamiento del flujo bifásico. Los datos obtenidos en el proceso experimental fueron comparados con resultados teóricos reportados en la literatura, formulando una ecuación de sobre-elevación que puede ser usada para las condiciones de flujos bifásicos. En la segunda etapa se realizaron modelaciones numéricas usando el software TITAN2F, donde se replicaron las condiciones de laboratorio. Estos datos son comparados con los resultados experimentales, con el fin de validar el modelo numérico que utiliza TITAN2F. Se pudo deducir que efectivamente, TITAN2F replica el fenómeno hidráulico, sin embargo, se aprecia que el programa tiene baja susceptibilidad a cambios de concentración de sólidos debido a la escala utilizada.

Palabras clave: *Canales curvos, Concentración de sólidos, Sobre elevación, Titan2F*

Abstract

In this study, the effects of the concentration of solids in the over-elevation phenomenon are analyzed, comparing experimental and numerical results with a mathematical model. Two phases are approached in the development of the research, where the experimental model is obtained in the first one (channel), in which

420 tries were made with different concentration of solids and slopes in order to determine the behaviour of the biphasic fluid. The data that was obtained during the experimental process was compared with the theoretical results which were acquired through mathematical equations, formulating an equation of over-elevation that can be used for the conditions of biphasic flows. During the second phase, numerical modeling's were made using the TITAN2F software, where laboratory conditions were replicated. This data was compared with the experimental results, with the purpose of validating the numerical model that TITAN2F uses. From this we could deduct that in fact TITAN2F replicates the hydraulic phenomenon, however, it has a low susceptibility in regards to changes in the concentration of solids due to the scale which was used.

Keywords: Curved open channels, Concentration of solids, Supra elevation, Titan2F

Introducción

El comportamiento hidráulico natural es muy complejo, por lo cual en la hidráulica se realizan simplificaciones teóricas que facilitan el análisis de los cauces naturales (Chow, 1959). Sin embargo, estas simplificaciones eliminan características que se presentan en flujos reales, como viscosidad, rotacionalidad y compresibilidad, lo que genera una incertidumbre en los resultados, estas incertidumbres se incrementan al trabajar con flujos bifásicos, teniendo en cuenta la cantidad de sólidos en el fluido, la reología de este puede cambiar drásticamente, pasando de ser un fluido newtoniano a no Newtoniano (Streeter, et al., 1988; Chanson, 2002).

El problema abordado en la presente investigación está relacionado con los efectos que pueden ocurrir sobre los niveles de la superficie del agua en la curvatura de un canal al agregar partículas sólidas en diferentes concentraciones.

Los fenómenos hidráulicos se pueden analizar por medio de modelos matemáticos, numéricos y experimentales. Los modelos matemáticos, por medio de simplificaciones empíricas y ecuaciones aplicables para fluidos sin sólidos hacen aproximaciones al comportamiento del flujo (Kofman, 2000). Los modelos de simulación numérica (Sánchez & Elsitdié, 2010; Narváez & Ruiz, 2015), resuelven sistemas de ecuaciones complejas mediante aproximaciones aritméticas, estos modelos suelen requerir de software especializados

para el procesamiento de datos (Betancur & Palacio, 2009; Córdoba, et al., 2015), permitiendo aproximaciones más cercanas a la realidad. Los modelos experimentales (Kofman, 2000; Ghahfarokhi & Vrijling, 2008; Roche, et al., 2008), son generalmente reproducciones a menor escala que se usan para delimitar las variables que intervienen en un fenómeno y se pueden usar para obtener aproximaciones estadísticas o ecuaciones empíricas que lo expliquen (Ghahfarokhi & Vrijling, 2008; Campos-Aranda, 2010). Los métodos presentados anteriormente serán usados en el presente estudio para analizar los efectos producidos por la concentración de sólidos en el comportamiento del fenómeno de sobre-elevación (Roche, et al., 2008; Sánchez & Elsitdié, 2014; Scheidl, et al., 2014). Este fenómeno hidráulico se presenta en canales abiertos con alineamientos curvos y se caracteriza por un aumento en la altura del flujo en la pared externa de la curva y un descenso en la pared interna (Chow, 1959). Generalmente en la ingeniería, este fenómeno se aproxima mediante ecuaciones que no tienen en cuenta la fase sólida del flujo (Chow, 1959; Mendez, et al., 2009). Este estudio pretende aportar al entendimiento de este fenómeno, que se puede presentar en flujos de lodos, inundaciones o crecientes, eventos que pueden representar grandes riesgos a la infraestructura y la vida.

Los flujos de lodos o lahares (Streeter, et al., 1988; Iverson, 1997; Rickenmann, 1999), que son flujos con alta concentración de sólidos, la cual puede ir desde el 20% hasta más del 60% del volumen total del flujo (Coussot & Meunier, 1996; Pierson, 1997; Chanson, 2002; Pierson, 2005). Estos flujos no se comportan como fluidos newtonianos ya que el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad no tienen una relación lineal (Chanson, 2002; Turnbull, et al., 2015).

El objeto del presente trabajo es realizar una investigación física y numérica usando un modelo físico experimental para realizar ensayos de laboratorio en un canal artificial, controlando el porcentaje de sólidos y la pendiente de entrada a la curva. Adicionalmente realizar simulaciones numéricas (Betancur & Palacio, 2009), con el software especializado TITAN2F (Córdoba, et al., 2010; Córdoba, et al., 2015), en el cual se replican las condiciones iniciales usadas en laboratorio, obteniendo así resultados de velocidad y sobre-elevación. Para finalizar, los resultados obtenidos de ambos métodos se comparan con un modelo

matemático analítico que aplica la segunda ley de Newton, y una simplificación del perfil de velocidad de la sección transversal del canal (Chow, 1959).

1. MODELO EXPERIMENTAL.

De acuerdo con Baird (1991) y Gutiérrez & Salazar (2008), entre otros, se entiende como diseño experimental, una aplicación del método científico consolidado como un conjunto de técnicas estadísticas y de ingeniería, que han sido usadas ampliamente en investigaciones con el fin de entender el funcionamiento de un sistema o fenómeno.

En este sentido se realizaron una serie de experimentos, en los cuales se hacen cambios controlados en variables específicas, la pendiente y el porcentaje de sólidos, para observar y entender la relación de causa y efecto de estas variables, en el fenómeno de sobre-elevación.

Para la explicación y predicción de este fenómeno, se han realizado muchos estudios, entre otros (Chow, 1959; Tarrab, et al., 2006; Ghahfarokhi & Vrijling, 2008; Scheidl, et al., 2014), que han generado buenas aproximaciones del evento para fluidos puros. Estas aproximaciones generalmente solo requieren parámetros geométricos y de velocidad para su solución, con la desventaja de que solo predicen la sobre elevación máxima y no es posible conocer en que ángulo de curvatura del canal sucede, como por ejemplo las ecuaciones 1, 2 y 3 (Chow, 1959; McClung, 2001).

$$\Delta h = \frac{V_z^2 b}{g r_c} \quad 1$$

Donde b es el ancho del canal, V_z es la velocidad a la entrada de la curva g es la gravedad y r_c es el radio de curvatura.

$$\Delta h = 2.30 \frac{V_z^2}{g} \log \frac{r_0}{r_i} \quad 2$$

Donde r_0 es el radio externo y r_i es el radio interno.

$$\Delta h = \frac{V_{max}^2}{g} \left[\frac{20}{3} \frac{r_c}{b} - 16 \frac{r_c^3}{b^3} + \left(\frac{4r_c^2}{b^2} - 1 \right)^2 \ln \frac{2r_c + b}{2r_c - b} \right] \quad 3$$

Donde V_{max} es la velocidad máxima de la sección trasversal antes de llegar a la curva.

En estas ecuaciones Δh es la sobre-elevación como la diferencia entre el nivel mínimo y el máximo en una sección de la curva, de estas es la más usada es la ecuación 1 que se puede derivar de un análisis dimensional simple.

1.1. Construcción del canal artificial

El canal se diseñó con una sección transversal trapezoidal de base 0.3 m y altura de 0.28 m (figura 1a) y está dividido por tres zonas. La primera zona es recta (figura 1b), al inicio de ésta se ubica un compartimiento con capacidad de 50 litros y con pendiente variable en este tramo entre 0% y 12.5%. La segunda zona, es una curva de 180°, como se muestra en la (figura 1b), con una pendiente de fondo que varía a lo largo del recorrido, la cual será usada en futuros estudios. Finalmente, la última zona es una recta con inclinación constante de 2% y finaliza en una curva que llega hasta un tanque de abastecimiento.

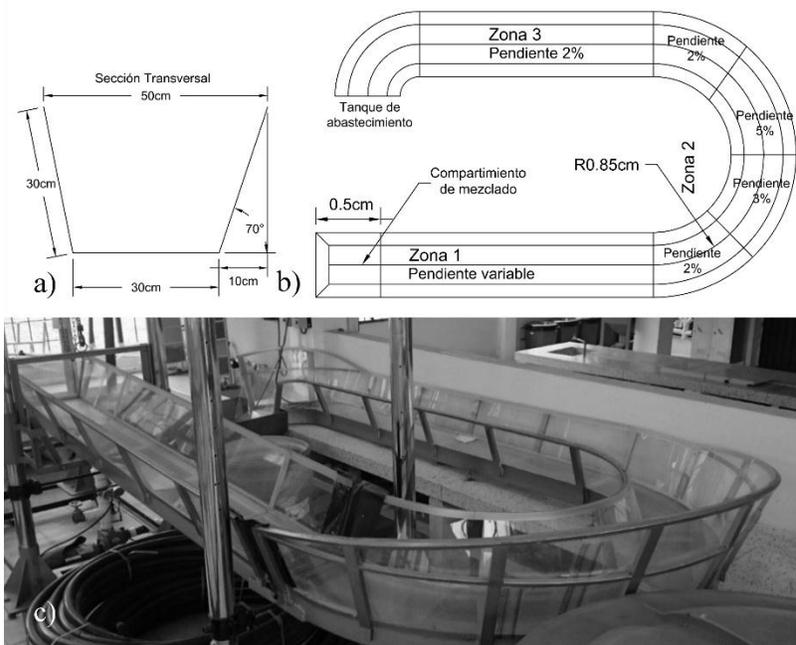


Figura 1. a) sección transversal del canal. b) planta del canal artificial. c) Montaje de laboratorio.

1.2. Elección de variables.

Los parámetros que influyen directamente en el fenómeno a estudiar son: la pendiente longitudinal, la concentración de sólidos, el volumen, la gravedad y la forma del canal. Puesto que el montaje de laboratorio

tiene unas dimensiones específicas (Figura 1), las variables a controlar se reducen a la pendiente del canal y la concentración de sólidos.

Se tomaron 2 pendientes de 5 y 10 %. Así mismo, teniendo en cuenta que el sistema de mezclado tiene como límite máximo 30 % de sólidos, el rango a evaluar será de 0 a 30 % de sólidos en porcentaje volumétrico. Usando incrementos del 5% este rango se dividió en 7 valores: 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 por ciento de sólidos, sin embargo, para el análisis de la información obtenida se tiene en cuenta la cantidad de sólidos depositados en la primera sección recta.

Los ensayos se realizaron a temperatura ambiente aproximadamente de 16°C, la fase sólida compuesta por arena de diámetro medio de 1 mm y una densidad de 2.5 g/cm³.

Con el fin de analizar los resultados de las ecuaciones 1, 2 y 3, se realizaron experimentos con agua pura, a partir de los cuales se dedujo la velocidad teórica con cada una de las ecuaciones, tablas 1 y 2.

Resultados velocidades teóricas y velocidad experimental con un 5% pendiente para agua pura 5% (sobre-elevación de 0.176 m)

n	
Experimental	-----
:	
:	
:	

Resultados velocidades teóricas y velocidad experimental con un 10% de pendiente para agua pura (sobre-elevación de 0.218 m)

n	
Experimental	--
:	
:	
:	

Teniendo en cuenta los resultados de las Tablas 1 y 2, se decidió usar las ecuaciones 1 y 2 dado que dan resultados cercanos a los observados en laboratorio.

1.3. Tamaño de muestra

Con el fin de confirmar que el tamaño de la muestra tenga validez estadística, se requiere obtener una muestra que la represente. Para dicho fin se utilizará la ecuación 4, (Ruiz-Bueno, 2008; Stephens & Spiegel, 2009), en la cual n es tamaño de la muestra, k es el valor correspondiente a la distribución de Gauss (Stephens & Spiegel, 2009), p es la prevalencia esperada del parámetro a evaluar, y e el porcentaje de error

que se admitirá. Finalmente, se calcula n para diferentes condiciones de nivel de confianza y porcentaje de error admitido, de donde se obtiene la Tabla 3.

$$n = \frac{k^2 p(1-p)}{e^2}$$

4

*Numero de ensayos dependiendo del nivel de confianza y el porcentaje de error admitido.
(3 niveles de confianza para cada % de error)*

Nivel De Confianza	Numero Total de Ensayos
95	5376
90	3808
85	2898
95	1344
90	952
85	728
95	602
90	420
85	322

Con los datos consignados en la Tabla 3, y considerando un nivel de confianza del 90% y un porcentaje de error del 15%, se tiene una muestra de 30 ensayos por cada escenario, para un total de 420 ensayos.

1.4. Procedimiento experimental

Para llevar a cabo los experimentos, se ubicaron dos cámaras de video sobre el canal. La primera, al final de la zona uno, grabando hacia el fondo de este, dónde se ubicó marcas de posición cada 10 cm, con el fin de determinar la velocidad con la que el flujo pasa por ese sector. La segunda fue colocada en la zona dos, enfocando las escalas ubicadas en la pared externa del canal, para poder precisar la altura máxima generada por el fenómeno de sobre-elevación.

Se procedió a cargar el material granular dentro del compartimiento inicial y se completó el volumen de control con agua, se activó el dispositivo de mezclado y se liberó el flujo, aunque el mezclado se realizó con dos rotores de 800 W de potencia el control de homogeneidad tiene gran dificultad.

1.5. Obtención de datos

Para la obtención de datos se procesan los videos obtenidos, extrayendo de la primera cámara las diferencias de tiempo y de distancia recorrida, a partir de la cuales se deduce la velocidad de entrada a la curva y de la segunda cámara se observa directamente la altura de sobre-elevación, además de esto se pesó la cantidad de material que se deposita en la zona uno para determinar el porcentaje de sólidos que llegan a la curva, y con

esto calcular densidad de la mezcla según ecuación (5). , cuyos promedios y análisis estadísticos se registraron en la Tabla 4.

$$\rho_m = \rho_f * (1 - \vartheta_s) + \rho_s * (\vartheta_s) \quad (5)$$

En esta ecuación ρ_m es la densidad de la mezcla, ρ_f es la densidad del fluido, ρ_s es la densidad del sólido y ϑ_s es el porcentaje volumétrico de sólidos en la mezcla.

Tabla 4 Promedios de resultados experimentales, porcentaje de sólidos, velocidad y altura de sobre-elevación.

Canal (%)	Porcentaje de Sólidos (volumétrico) (%)	Porcentaje de Sólidos a la entrada de la Curva (%)	Densidad de la mezcla ρ_m (Kg/m ³)	Velocidad de la curva (m/s)	Altura de sobre-elevación ΔH (m)
5	0	0	1000.00	2.204	76
	5	3.4	1051.25	1.971	71
	10	6.9	1103.75	1.91	47
	15	10.4	1156.25	1.816	46
	20	13.9	1208.75	1.787	38
	25	17.4	1261.25	1.716	13
	30	20.9	1313.50	1.696	11
10	0	0	1000.00	2.543	18
	5	3.8	1057.32	2.378	05
	10	7.6	1114.02	2.289	93
	15	11.3	1170.72	2.203	73
	20	15.1	1227.42	2.152	83
	25	18.9	1284.12	2.069	67
	30	22.7	1340.50	1.71	71

1.6. Análisis de resultados

Como se mencionó anteriormente se tomaron en total 420 ensayos, 30 por cada combinación de las variables, pendiente y porcentaje de sólidos, usando para este análisis los promedios.

Al graficar los resultados experimentales de velocidad y sobre-elevación para 5% y 10% de pendiente se observa que existe una tendencia lineal (Figura 2), a excepción de los datos con 30% de sólidos, por lo cual se excluyen de los posteriores análisis.

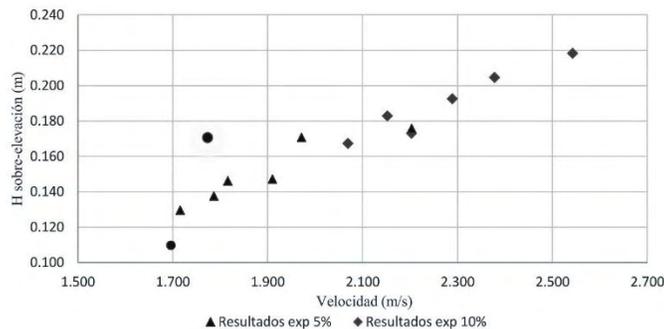


Figura 2. Resultados experimentales de velocidad versus sobre-elevación 5% y 10% de pendiente, los círculos representan los datos excluidos del análisis posterior.

1.6.1. Velocidad

Para este análisis se inicia calculando la velocidad del flujo a la entrada de la curva con una aproximación de Bernoulli expresada por la ecuación 6 (Streeter, et al., 1988).

$$V_b = \sqrt{2g(h_1 + sL - h_2 - h_f + \frac{V_i^2}{2g})} \quad 6$$

Siendo V_b la velocidad calculada en la entrada del canal, h_1 la altura de la pila, sL la pendiente por la longitud de recorrido, h_2 la altura de la lámina al final del recorrido y h_f las pérdidas por fricción, V_i velocidad inicial del flujo. De acuerdo a las condiciones iniciales en laboratorio h_1 es 0.2 m, h_2 igual a 2.5 cm, h_f calculadas por Darcy-Weisbach (ecuación 7) y (V_i^2) es cero.

$$h_f = f * \frac{L}{4Rh} * \frac{V^2}{2g} \quad 7$$

Donde f es el coeficiente de fricción calculado por la ecuación de Colebrook-White (ecuación 8), L es la longitud característica del canal, Rh es el radio hidráulico, velocidad media del flujo.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \log_{10} \left(\frac{ks}{14.8 Rh} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad 8$$

Donde ks coeficiente de rugosidad, Re es el número de Reynolds.

El cálculo de f se realiza por medio de un proceso iterativo, ks para el material del canal artificial es asumido como 0.0003 mm, Re determinado por la velocidad media del flujo en el canal.

Partiendo de la hipótesis de que existe una correlación directa entre la velocidad calculada a partir de Bernoulli y la velocidad observada en laboratorio, postulamos la ecuación 9.

$$V_c = K * V_b \quad 9$$

Donde V_c es la velocidad de Bernoulli corregida para tener en cuenta la densidad de la mezcla, y K es el factor que relaciona V_b y V_c . Teniendo en cuenta que este factor para 0% de sólidos debe ser igual a 1 y

disminuir a medida que se incremente el porcentaje de sólidos, asumiendo que K es función de la relación de densidades $K = f\left(\frac{\rho_f}{\rho_m}\right)$.

Al graficar la velocidad y la relación de densidades, a diferencia de lo observado en la Figura 3, la Figura 4 muestra que existe un comportamiento diferente para cada pendiente. Usando regresión lineal los datos experimentales se ajustaron a las ecuaciones 10 y 11.

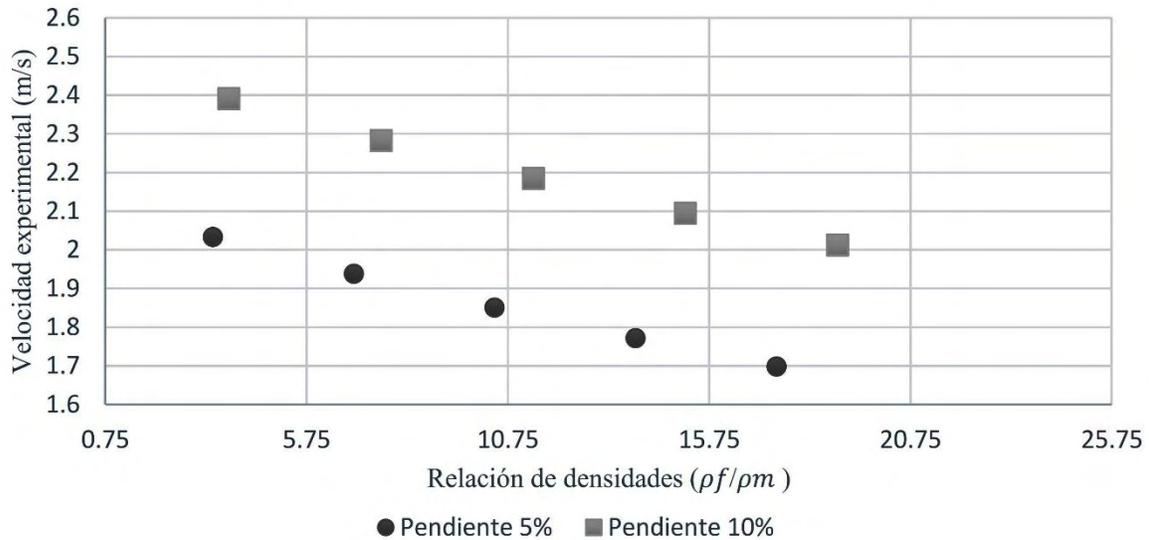


Figura 3. Relación entre la velocidad y la relación de densidades para 5 y 10 porciento de pendiente, donde (y) corresponde a velocidad experimental y (x) la relación de densidades.

$$V_c = 2.136 \left(\frac{\rho_f}{\rho_m}\right)^{0.987} \quad 10$$

$$V_c = 2.511 \left(\frac{\rho_f}{\rho_m}\right)^{0.786} \quad 11$$

A partir de estas ecuaciones se obtiene una sola ecuación, en la cual se propone usar el valor promedio de los exponentes de las ecuaciones 9 y 10 y dejar las constantes como el valor de la velocidad obtenida con la aproximación de Bernoulli (ecuación 6), obteniendo así la ecuación 12.

$$V_c = V_b \left(\frac{\rho_f}{\rho_m}\right)^{0.887} \quad 12$$

Para corroborar el nivel de confianza de esta ecuación se realiza un análisis de correlación lineal de Pearson, obteniendo los coeficientes $r_{5\%} = 0,934$ para 5 % de pendiente y $r_{10\%} = 0.985$ para 10 porciento de pendiente

(Dagnino, 2014), para los cuales se calculó el número de Desviaciones Tipo $t_5 = 5,2639$ y $t_{10} = 11.4953$. Estos resultados se comparan con los valores de la Tabla t de Student con un nivel de confianza mínimo del 95% y cuatro grados de libertad (Chao & Castaño, 1993), resultando en un $t(0,05,4) = 2.78$. Este valor nos permite concluir que los resultados que predice la ecuación y los datos experimentales están correlacionados con un nivel de confianza de más del 95%.

1.6.2. Sobre-elevación

Con el fin de simplificar el análisis de sobre-elevación se igualaron las ecuaciones 1 y 2 obteniendo así una ecuación donde el ancho de la base está en función de los radios de curvatura (ecuación 13). Esta ecuación representa la condición que se debe cumplir para que a partir de las ecuaciones 1 y 2 se pueda obtener una sola ecuación de sobre-elevación en función de la velocidad. En el caso específico de nuestro canal artificial la ecuación se cumple con un 0.9% de error.

$$b \cong 2.3 \log\left(\frac{r_0}{r_l}\right) r_c \quad 13$$

Reemplazando las dimensiones del canal en las ecuaciones 1 y 2, se obtiene una ecuación de sobre-elevación en función de la velocidad, aplicable a fluidos sin solidos (ecuación 14). El caso específico del canal, la comprobación de esta ecuación presenta un error menor del 1%.

$$\Delta h = 0.036V^2 \quad 14$$

Teniendo en cuenta que la ecuación 14 es útil para flujos de agua pura, es necesario realizar un ajuste para que tenga en cuenta los flujos bifásicos. Para esto se calculan las diferencias entre los datos experimentales y los resultados de la ecuación 14 (Figura 4).

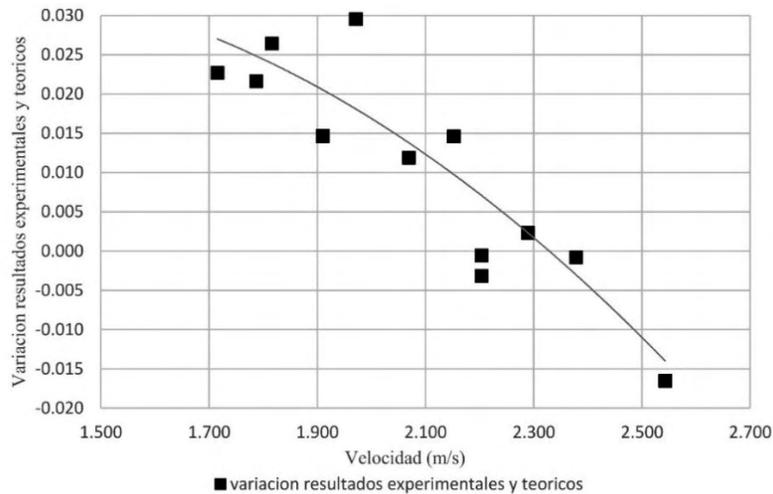


Figura 4. Diferencia de resultados experimentales y teóricos. La línea continua representa la tendencia de estos resultados.

La diferencia de resultados teóricos y experimentales de sobre-elevación, graficados anteriormente muestra una tendencia cuadrática y la ecuación en función de la velocidad (Δhc) se determinó por medio de mínimos cuadrados.

$$\Delta hc = -0.0257V^2 + 0.0598V \quad 15$$

Donde Δhc es la diferencia de resultados teóricos (ecuación 14) y los datos experimentales.

El ajuste lo realizamos sumando la ecuación 14 y 15, teniendo en cuenta el análisis de velocidad (ecuación 12) realizado anteriormente, resulta en una ecuación de sobre-elevación, en función de la velocidad corregida, que tiene en cuenta flujos bifásicos (ecuación 16).

$$\Delta H = 0.011(V_c)^2 + 0.0598 V_c \quad 16$$

ΔH es la sobre-elevación que tiene en cuenta el porcentaje de sólidos.

Los factores de Pearson para los resultados de sobre-elevación son $r_5=0.97$ y $r_{10}=0.95$, por lo cual se tiene que las Desviaciones Tipo resultan, $t_5=8.1$ y $t_{10}=6.1$, lo que indica que los resultados experimentales y teóricos (ecuación 16) están correlacionados con un nivel de confianza superior al 95%.

En la Figura 5 se muestra una relación entre la sobre-elevación y el porcentaje de sólidos, en la cual se aprecia que los resultados experimentales y los teóricos se alejan más allá de una desviación estándar propuesta. Lo que demuestra que las ecuaciones para la sobre-elevación válidas para fluidos puros, no permiten relacionar

el porcentaje de sólidos del flujo. Es importante resaltar que al aumentar la pendiente a 10 %, *Figura 5b*, se observa que los resultados teóricos se acercan más a los resultados experimentales con base a la desviación estándar propuesta, sin embargo, el rango de validez de las ecuaciones teóricas sigue siendo bajo ya que con densidades mayores al 20 % de sólidos los resultados no concuerdan.

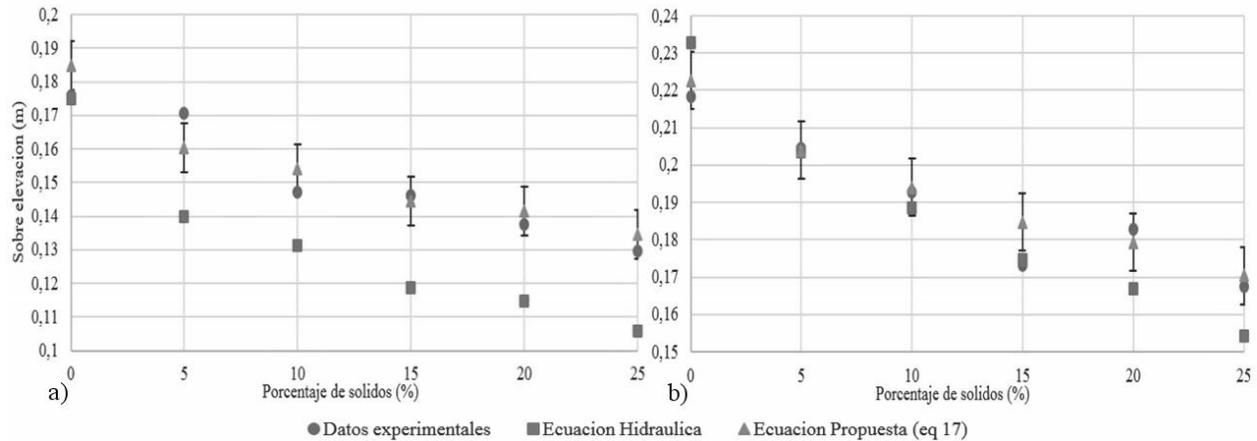


Figura 5. Sobre-elevación vs relación de densidades. a) resultados para pendiente de 5% y b) resultados para pendiente de 10% las marcas triangulares representan la ecuación que propondremos posteriormente.

2. MODELAMIENTO DIGITAL CON TITAN2F

TITAN2F es un software desarrollado por el PhD. Gustavo Córdoba en la Universidad de Buffalo, Estados Unidos para la simulación numérica del comportamiento de flujos bifásicos sobre un modelo de terreno digital (Córdoba, et al., 2010; Córdoba, et al., 2015). TITAN2F toma en cuenta la dinámica del material sólido a través del modelo Mohr-Coulomb y la combina con modelos hidráulicos por medio de las ecuaciones de aguas poco profundas. La interacción entre las dos fases se determina por medio de una ecuación semi-empírica que depende del porcentaje de sólidos, (Córdoba, et al., 2010).

El software requiere el ingreso de las condiciones iniciales del flujo de lodo que se va a modelar, tales como: el volumen, la localización, el modelo de terreno digital sobre el que se va a modelar, la concentración de sólidos, el tiempo de simulación, entre otros. (Córdoba, et al., 2015).

2.1. Construcción Modelo Digital.

El modelo digital de elevación o DEM por sus siglas en inglés, es una representación digital o computacional generalmente de la geomorfología de un terreno. Igualmente es útil para representar la morfología de cualquier elemento como calles, casas, ciudades y o canales.

Los DEM han ido evolucionando, tanto en exactitud (Broquetas, 1997; Recondo, et al., 2000; Rabus, et al., 2003) como en el método de generación de los mismos (Polidori, 1992; Felicísimo, 1994; Gutiérrez, et al., 2016), de tal manera que permiten un gran número de análisis con resultados recreables, accesibles y confiables (Kofman, 2000; Frau, et al., 2011).

Los DEM son utilizados en modelamientos numéricos que se desarrollan a través de herramientas de software como es el caso de TITAN2F (Córdoba, et al., 2015), LAHARZ (Iverson, et al., 1998; Muñoz, et al., 2009), COMSOL Multiphysics, FLOW 3D (Li, et al., 2009; Narváez & Ruiz, 2015), entre otros. Se debe tener en cuenta que a mayor resolución mayor es el costo computacional de los cálculos que se realicen sobre este.

El DEM se construyó a partir de las dimensiones del canal artificial (Figura 1), por medio de un esquema tridimensional realizado en el programa AutoCAD Civil 3D™ (versión académica), a partir del cual se obtuvo una representación vectorial del canal con una precisión de 0.01 m (Figura 6)

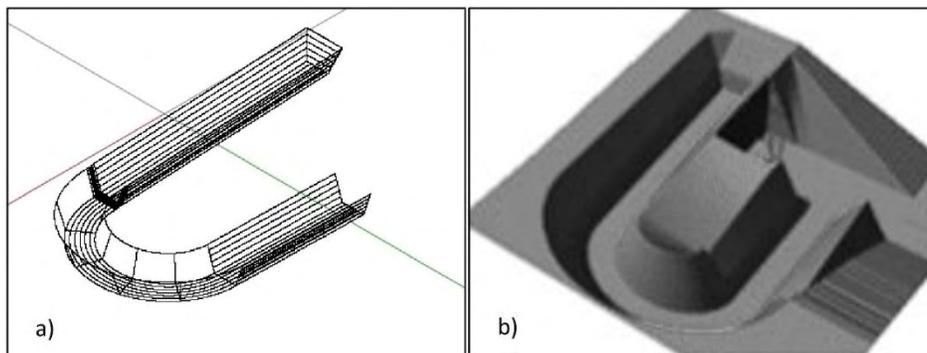


Figura 6 a) Esquema del canal en AutoCAD Civil 3D™ (versión académica). b) Representación del DEM en GRASS GIS.

Una vez obtenida la representación vectorial, se importa al Sistema de Información Geográfico GRASS GIS, software de uso libre y compatible con TITAN2F (Córdoba, et al., 2010). Una vez importado se usa el

comando *r.fillnulls* (Neteler & Mitasova, 2013) que hace parte de GRASS GIS, el cual, por medio de interpolaciones completa la información faltante para generar una sola superficie (Figura 6)

2.2. Datos de entrada.

Los datos de entrada para ejecutar el modelo son, la concentración de sólidos en un rango entre 5% y 30%, la ubicación de la pila en el archivo DEM, el volumen de la pila 40 litros y un tiempo de simulación de 5 segundos.

Al ejecutar el programa TITAN2F, se obtiene un conjunto de matrices almacenadas en archivos de texto plano (*.txt), conformadas por 7 columnas las cuales contienen posición en x, y, z, el espesor o altura del flujo, la velocidad, la concentración de sólidos y la presión dinámica, respectivamente. Cada matriz representa el flujo en un tiempo determinado.

2.3. Obtención de resultados.

Las matrices de resultados son importadas al sistema de información geográfica GRASS-GIS con el cual se extraen los datos de altura y velocidad del flujo, obteniendo así el tiempo y las coordenadas de la máxima sobre-elevación.

2.4. Predicción de resultados.

Al representar los resultados de velocidad a la entrada de la curva, obtenidos de las simulaciones en TITAN2F (Figura 7), se observa que los resultados para 5 % de pendiente con 5% y 25% de sólidos, se encuentran en un rango entre 1.89 y 1.88 m/s y que para 10 % de pendiente, con iguales porcentajes de sólidos, el rango de velocidades esta entre 2.36 y 2.34 m/s.

Al comparar con los valores obtenidos en laboratorio se observa que son cercanos a las velocidades medias observadas en laboratorio. Sin embargo, las velocidades medidas en laboratorio tienen un rango mayor, en el caso de 5% de pendiente este rango esta entre 2.2 m/s y 1.71 m/s para 0% y 25 % de sólidos respectivamente y para 10% de pendiente el rango va desde 2.54 m/s y 2.06 m/s con 0% y 25% de sólidos respectivamente.

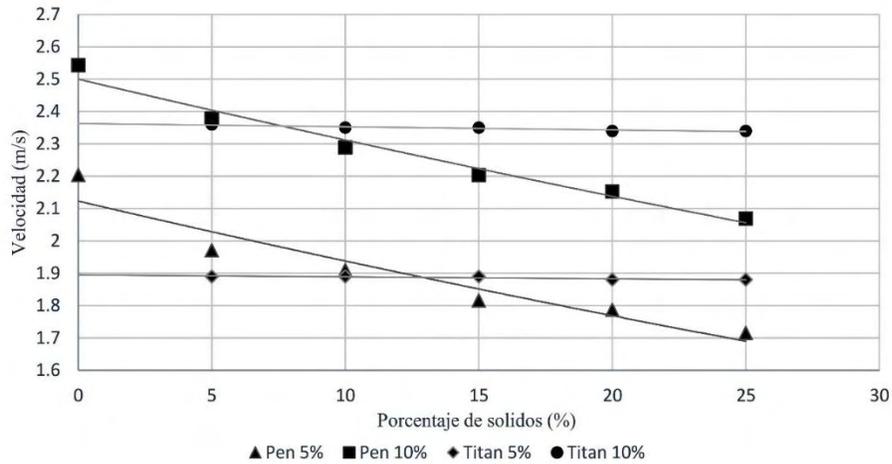


Figura 7. Comparación resultados experimentales de TITAN2F y experimentales de velocidad vs porcentaje de sólidos.

Con respecto a la sobre-elevación, al representar los resultados de TITAN2F en el software GRASS GIS (Figura 8), se observa como la simulación predice una sobre-elevación en los primeros 45 grados de la curva tal como se observó en el montaje físico de laboratorio, la altura de sobre-elevación predicha para 10% de pendiente y 20% de sólidos es de 0.091 m por encima del modelo digital.

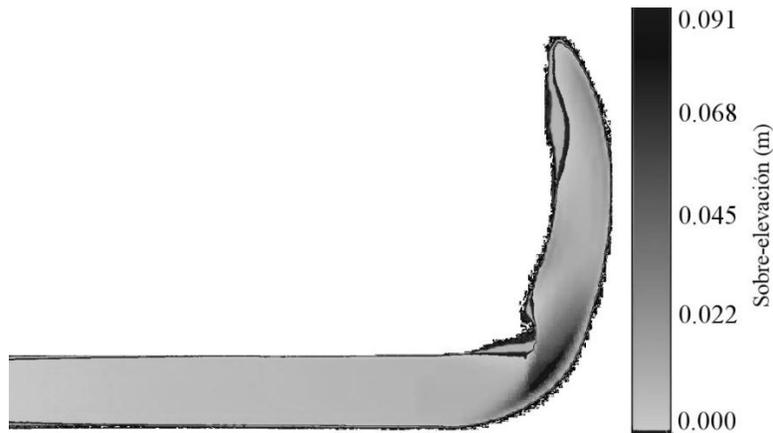


Figura 8. Representación en planta de los resultados del programa GRASS GIS en 1.3 segundos y 10 % de pendiente con 20 % de sólidos.

Al graficar las secciones transversales obtenidas por medio del software OCTAVE (Figura 9) es importante tener en cuenta que la resolución del DEM (1 cm) y la inclinación de las paredes del canal, de 60° con respecto a la horizontal, generan una incertidumbre de ± 3 cm en vertical.

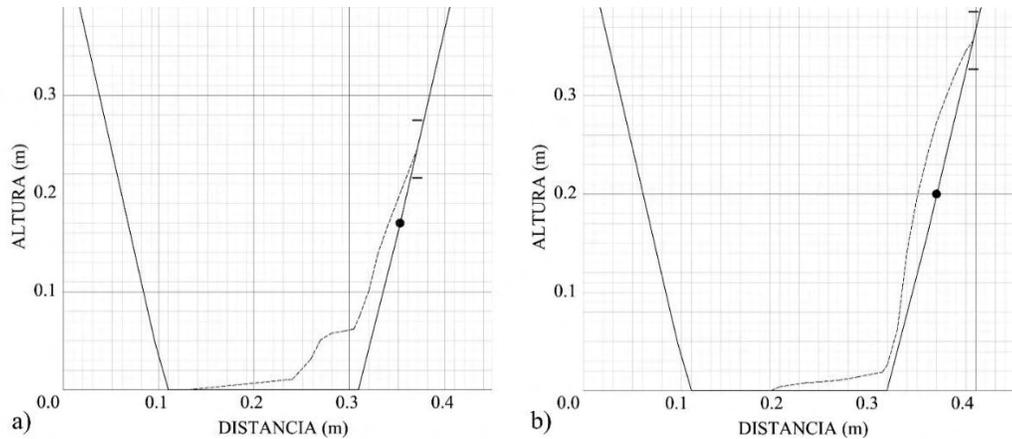


Figura 9. a) Comparación sobre-elevación datos experimentales y TITAN2F para 5% de pendiente b) comparación sobre-elevación datos experimentales y TITAN2F para 10% de pendiente. En a y b la línea continua es el perfil del canal, la línea punteada es el perfil del flujo para 20% de sólidos, el punto (●) es la sobre-elevación medida en laboratorio para 20% de sólidos y el rango marcado al final de la línea punteada es la incertidumbre en vertical.

De igual manera al graficar las secciones transversales donde la simulación con TITAN2F predice el fenómeno de sobre-elevación, se observa que para 5% de pendiente el perfil de este fenómeno es igualmente replicado por el programa, como se observa en la Figura 9a. Sin embargo, para 10% de pendiente el perfil asciende más de lo registrado en laboratorio, lo que nos permite concluir que al momento de la modelación en el software TITAN2F la pendiente influye en mayor medida que el porcentaje de sólidos al definir el comportamiento del flujo. Al analizar los resultados de sobre-elevación en estas secciones transversales, se encuentra un error del 28.87% y 48.85% para 5% y 10% de pendiente, respectivamente.

3. CONCLUSIONES

En este estudio se realizó una investigación física y numérica del fenómeno de sobre-elevación para el caso de flujos con sedimentos, donde se encontró que este fenómeno, cuando es representado por las ecuaciones que predice la hidráulica (ecuaciones 1 y 2), presenta un error menor del 5% para valores de velocidad de entrada a la curva entre 2.0 y 2.5 m/s. Por fuera de este rango de velocidades el porcentaje de error aumenta exponencialmente, por lo cual se realizó una corrección para tener en cuenta el efecto de la presencia de sedimentos en el flujo.

Se realizaron 420 ensayos para 14 escenarios diferentes. Estos ensayos se hicieron con concentraciones de sólidos del 0% al 30%, con incrementos constantes de 5%, sin embargo, se observó que los ensayos con

concentraciones de sólidos superiores al 25% en volumen, presentan un alto grado de dificultad de mezclado por lo cual se excluyeron del análisis los resultados con 30% de concentración de sólidos.

Se realizó un análisis de velocidad y se formuló una nueva ecuación para la velocidad del flujo teniendo en cuenta la concentración de sólidos, esta ecuación correlaciona la velocidad estimada a partir de la ecuación de energía de Bernoulli y una relación entre la densidad del fluido (líquido) y la densidad del flujo bifásico. La ecuación propuesta (Ecuación 12 en el texto) estima una velocidad corregida correlacionado inversamente la concentración de sólidos con la aproximación de Bernoulli.

Durante el estudio se determinó que el incremento en la concentración de sólidos en flujos bifásicos disminuye la sobre-elevación del fluido al transitar por una curva, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en laboratorio, se observa que los valores de sobre elevación calculados por ecuaciones de hidráulica y que no tienen en cuenta la presencia de sólidos en el fluido se alejan más allá de una desviación estándar en los resultados de 5% de pendiente incrementándose el error cuanto más sólidos suspendidos se encuentran en la mezcla, por otra parte al realizar los ensayos con 10% de pendiente se observa que los resultados de 5% hasta 15% de sólidos en la mezcla se encuentran dentro del margen de error de una desviación estándar, los resultados de 0%, 20% y 25% de sólidos salen del margen de error con más de una desviación estándar, los resultados de sobre elevación nos muestran que las ecuaciones de hidráulica requieren un ajuste para tener en cuenta la concentración de sólidos en el fluido, ya que su margen de validez está limitado para 5%, 10% y 15% de sólidos con una pendiente del fondo del canal de 10%.

En cuanto al análisis del fenómeno de sobre-elevación, se realizó un ajuste estadístico obteniendo una ecuación semi-empírica (ecuación 16), que ajusta el modelo matemático actual, expuesto por en las ecuaciones 1 y 2 del texto, a lo observado en laboratorio. Además, se encontró que este fenómeno también está correlacionado de manera inversa al porcentaje de sólidos y de manera directa con la velocidad del flujo. Es importante mencionar que la ecuación 16 es válida si la curva cumple con la relación geométrica expuesta en este artículo (ecuación 13).

Para corroborar el modelo matemático propuesto en este estudio, representado por las ecuaciones de velocidad y sobre-elevación corregida para flujos bifásicos (ecuaciones 12 y 16), se lo validó con el método de correlación lineal de Pearson del cual se obtuvieron niveles de confianza superiores al 95%.

Al realizar el modelamiento numérico del fenómeno de sobre-elevación con los escenarios analizados experimentalmente se observó que el software TITAN2F genera la sobre-elevación del flujo en la pared externa de la curva del canal de la misma forma percibida experimentalmente. Sin embargo, al realizar un análisis más detallado de los resultados se observó que el programa presenta una baja susceptibilidad al incremento del porcentaje de sólidos, tanto en velocidades como en sobre-elevación. Además, se encontró que la sobre-elevación presenta una variación del 67% respecto al 26% que se presenta en los ensayos de laboratorio, la que pudiera considerarse excesiva con respecto al cambio de pendiente.

Con la versión actual del Software TITAN2F y el DEM con resolución de 1 cm, se observó una baja susceptibilidad al incremento de porcentaje de sólidos, esto se debe a que el programa internamente redondea los valores de cálculo a la décima de milímetro debido a requerimientos numéricos, lo que puede implicar que canales muy pequeños o con resoluciones muy bajas, bordean el límite del programa, de igual manera con este DEM se genera una incertidumbre de 3 cm en los pixeles contiguos de las paredes del canal, lo que puede generar un error por redondeo que se propaga a lo largo del canal.

RECOMENDACIONES

Realizar un diseño experimental que contemple las variables externas e internas que pueden afectar cada fenómeno a estudiar, en este proceso se debe identificar los materiales y equipos adecuados para cada proceso, con el fin de agilizar el proceso investigativo.

Es recomendable realizar grabaciones de alta velocidad en el montaje experimental, para disminuir la incertidumbre en los resultados obtenidos al procesar la información.

Las ecuaciones resultado de este estudio se pueden aplicar para canales abiertos, y para concentraciones de sólidos entre 0 y 25 %, además se debe tener en cuenta la relación entre la base y los radios de curvatura expuesta por la ecuación 12 del artículo.

Es importante tener en cuenta que el software TITAN2F presenta, a bajas escalas, menor susceptibilidad al incrementar la concentración de sólidos y un aumento en el tiempo computacional requerido para su procesamiento. Por lo que es recomendable usar esta herramienta informática con precaución en estas condiciones.

Bibliografía

- Baird, D. C. (1991). *Experimentación: una introducción a la teoría de mediciones y al diseño de experimentos*. Mexico.D.F.: Prentice-Hall Hispanoamericana.
- Betancur, T., & Palacio, C. (2009). La modelación numérica como herramienta para la exploración hidrogeológica y construcción de modelos conceptuales (caso de aplicación: bajo cauca antioqueño). *Dyna*, 76(160), pp. 39-49.
- Broquetas, A. (1997). *Obtención de modelos digitales del terreno y detección de pequeños movimientos de la superficie terrestre mediante interferometría radar desde satélite*. In AET 1997. Santiago de Compostela, s.n., pp. 252-255.
- Campos-Aranda, D. (2010). Aproximación empírica a la solución bivariada de avenidas de diseño en embalses sin hidrometría. *Agrociencia*, 44(7), pp. 735-752.
- Chanson, H. (2002). *Hidraulica del Flujo en Canales Abiertos*. s.l.:MC. GRAW HILL..
- Chao, L., & Castaño, J. (1993). *Estadística para las ciencias administrativas*. s.l.:McGraw-Hill.
- Chow, V. T. (1959). *Open channel hydraulics*. s.l.:Mac Graw Hill.
- Córdoba, G., Sheridan, M. F., & Pitman, E. B. (2010). *A two phase, depth averaged model for geophysical mass flows in the TITAN code framework*. Pissa, Italy, s.n.
- Córdoba, G. y otros. (2015). Secondary lahar hazard assessment for Villa la Angostura, Argentina, using Two-Phase-Titan modelling code during 2011 Cordón Caulle eruption. *Natural Hazards and Earth System Science*, 15(4), pp. 757-766.
- Coussot, P., & Meunier, M. (1996). Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth-Science Reviews*. 40(3).
- Dagnino, J. (2014). Coeficiente De Correlacion Lineal De Pearson. *Chil Anest*, Volumen 43, pp. 150-153.
- Felícísimo, A. (1994). *Modelos Digitales de Terreno. Introducción y aplicación en las ciencias ambientales*. Oviedo: Extraído de <http://etsimo.uniovi.es/feli>.
- Frau, C. M., Pino, L. M., Rojas, Y. O., & Hernández, Y. M. (2011). Generalización de Modelo Digital de Elevación Condicionada por Puntos Críticos de Terreno. *Bol. Ciênc. Geod.*, 17(3), pp. 439-457.
- Ghahfarokhi, G. S., & Vrijling, P. V. G. J. (2008). *Evaluation of Superelevation in Open Channel Bends with Probabilistic Analysis Methods*. s.l., ASCE, pp. 1-14.
- Gutiérrez, Á. y otros. (2016). Elaboración de modelos 3D de diferentes morfologías y escalas utilizando técnicas Structure-from-Motion y fotografías terrestres. *Cuaternario y Geomorfología*, 30(1-2), pp. 23-35.

- Gutiérrez, H., & Salazar, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. Mexico D.F.: Mc Graw Hill.
- Iverson, R. M. (1997). The physics of debris flows. *Reviews of geophysics*,. august, 35(3), pp. 245-296.
- Iverson, R. M., Schilling, S. P., & Vallance, J. W. (1998). Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. *Geological Society of America Bulletin*, 110(8), pp. 972-984.
- Kofman, H. (2000). Modelos y simulaciones computacionales en la enseñanza de la Física. *Revista educación en física*, Volumen 6, pp. 13-22.
- Li, Q. y otros. (2009). COMSOL Multiphysics: A Novel Approach. *GROUND WATER*, 47(4).
- McClung, D. M. (2001). Superelevation of flowing avalanches around curved channel bends. *Journal of Geophysical Research*, 106(B8), pp. 16489-16498.
- Mendez, D. y otros. (2009). *Instalación y montaje del laboratorio de hidráulica de canales*, GIRARDOT: s.n.
- Muñoz, E. y otros. (2009). Lahar flow simulations using LAHARZ program: Application for the Popocatepetl. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volumen 182, pp. 13-22.
- Narváez, M. B., & Ruiz, M. X. (2015). *Implementación del programa FLOW 3D para la simulación tridimensional del flujo en una estructura de separación de caudales*, Quito:: s.n.
- Neteler, M., & Mitasova, H. (2013). *Open source GIS: a GRASS GIS approach*. s.l.:Springer Science & Business Media.
- Pierson, T. (1997). Hydrologic consequences of hot-rock/snowpack interactions at Mount St. Helens Volcano. Washington, 1982-84. *U.S. Geological Survey ; Information Services [distributor]*, pp. 39-49.
- Pierson, T. (2005). *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*. s.l.:Springer Berlin Heidelberg.
- Polidori, L. (1992). Aptitudes et limitations du radar à ouverture synthétique pour la cartographie. *Bulletin-Société française de photogrammétrie et de télédétection*, Issue 125.
- Rabus, B., Eineder, M., Roth, A., & Bamler, R. (2003). The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 57(4), pp. 241-262.
- Recondo, C. y otros. (2000). Estudio de las zonas propensas a sufrir deslizamientos en los Concejos de Oviedo y Mieres (Asturias) a partir de una imagen Landsat-TM y de un Modelo Digital de Elevaciones. *Revista de teledetección*, Volumen 14.
- Rickenmann, D. (1999). Empirical relationships for debris flows. *Natural hazards*, 19(1), pp. 47-77.
- Roche, O., Monserrat, S., Niño, Y., & Tamburrino, A. (2008). Experimental observations of water-like behavior of initially fluidized, dam break granular flows and their relevance for the propagation of ash-rich pyroclastic flows.. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B12).

- Ruiz-Bueno, A. (2008). La mostra: alguns elements per a la seva confecció. REIRE.. *Revista d'Innovació i Recerca en Educació*, 1(1), pp. 75-88.
- Sánchez, J. M. C., & Elsitdié, L. G. C. (2010). *Análisis del flujo turbulento y bifásico en un aliviadero de presa mediante simulación numérica tridimensional*. s.l., s.n., pp. 99-101.
- Sánchez, J. M. C., & Elsitdié, L. G. C. (2014). Validación de simulaciones de flujo bifásico en programas de CFD. *Anuario de Jóvenes Investigadores*, Volumen 7, pp. 102-104.
- Scheidl, C., McArdell, B. W., & Rickenmann, D. (2014). Debris-flow velocities and superelevation in a curved laboratory channel. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(3), pp. 305-317.
- Stephens, M. R., & Spiegel, L. (2009). *Estadística*. 4ta edición ed. D.F.: Mc Graw-Hill.
- Streeter, V. L., Wylie, E. B., & Bedford, K. W. (1988). *Mecánica de los fluidos*. s.l.:McGrawHill.
- Tarrab, L., Vionnet, C. A., & Rodríguez, A. (2006). ANÁLISIS DE LA RELACIÓN DE ASPECTO ANCHO/TIRANTE (B/H) EN LOS FLUJOS EN CURVA. *Centro de Estudios Hidro-Ambientales-CENEHA*. Argentina.
- Turnbull, B., Bowman, E. T., & McElwaine, J. N. (2015). Debris flows: Experiments and modelling. *Comptes Rendus Physique*, 16(1), pp. 86-96.