

Analisis Con HEC-RAS 2d de Eventos Torrenciales, Caso Quebrada la Liboriana del Municipio de Salgar



Revista EIA
ISSN 1794-1237
e-ISSN 2463-0950
Año XIX/ Volumen 22/ Edición N.43
Enero - junio 2025
Reia4324 pp. 1-17

Publicación científica semestral
Universidad EIA, Envigado, Colombia

PARA CITAR ESTE ARTÍCULO / TO REFERENCE THIS ARTICLE /

Chaverra, A. F.; Aristizábal, V. H. y Ríos, J. D.

Analisis Con HEC-RAS 2d de Eventos
Torrenciales, Caso Quebrada la
Liboriana del Municipio de Salgar

Revista EIA, 22(43), Reia4324 pp. 1-17
<https://doi.org/10.24050/reia.v22i43.1802>

✉ *Autor de correspondencia:*

Ríos, J. D.
Ingeniero civil y magister en
ingeniería recursos hidráulicos
Correo electrónico:
juan.riosar@campusucc.edu.co

Recibido: 26-09-2024

Aceptado: 10-12-2024

Disponible online: 01-01-2025

ANDRÉS FELIPE CHAVERRA¹

VÍCTOR HUGO ARISTIZÁBAL¹

✉ JUAN DANIEL RÍOS¹

1. Universidad Cooperativa de Colombia Sede Medellín, Colombia

Resumen

El objetivo central del presente trabajo es realizar un análisis hidráulico 2D con flujos Newtonianos y 2D con flujos no Newtonianos de una avenida torrencial en la quebrada la Liboriana del Municipio de Salgar, donde en el año 2015 ocurrió un evento de grandes proporciones afectando la vida y la propiedad, para este ejercicio de simulación hidráulica bidimensional empleamos el software HEC-RAS 6.2. Los resultados del modelo 2D Newtoniano con caudal mayorado en 40 % y los resultados del modelo 2D no Newtoniano son comparados contra la mancha de inundación del evento real del año 2015.

Encontramos que, el escenario modelado usando flujo No Newtoniano es una alternativa que posibilita tener una mejor aproximación respecto al comportamiento de una avenida torrencial, ya que, fue el escenario que mejor se aproximó al área afectada y anchos de inundación real. Permitiendo concluir que esta aproximación se debe a que el modelo tiene en cuenta las características reológicas del flujo (concentración y viscosidad); en cambio, los modelos que son mayorados en caudal son escenarios bastante conservadores que por lo general arrojan mayores áreas de inundación, mayores velocidades y profundidades de flujo, dado que no tienen en cuenta las características o propiedades del sedimento.

Palabras clave: Flujos de escombros, HEC-RAS 2D, Eventos torrenciales.

Analysis With HEC-RAS 2d Of Torrential Events, Case La Liboriana Creek Of The Municipality Of Salgar

Abstract

The central objective of this work is to carry out a 2D hydraulic analysis with Newtonian flows and 2D with non-Newtonian flows of a debris flow in the Liboriana creek of the Municipality of Salgar, where in 2015 a large event occurred affecting life and the property, for this two-dimensional hydraulic simulation exercise we use the HEC-RAS 6.2 software. The results of the 2D Newtonian model with flow increased by 40% and the results of the 2D non-Newtonian model are compared against the flood stain of the real event of the year 2015.

We found that the scenario modeled using non-Newtonian flow is an alternative that makes it possible to have a better approximation regarding the behavior of a debris flow, since it was the scenario that best approximated the affected area and real flood widths. Allowing us to conclude that this approximation is due to the model considers the rheological characteristics of the flow (concentration and viscosity); On the other hand, the models that are increased in flow are quite conservative scenarios that generally show larger flooding areas, greater flow velocities and depths, since they do not consider the characteristics or properties of the sediment.

Keywords: Debris flow, HEC-RAS 2D, Torrential events.

1. Introducción

Los eventos torrenciales (“debris flow” como se conocen en inglés) se caracterizan por sus grandes magnitudes y difícil pronóstico, además, son típicos de regiones montañosas donde las cuencas hidrográficas presentan grandes pendientes y la precipitación es abundante.

En Colombia, el análisis de los eventos torrenciales o “avalanchas” como suelen llamarlos la comunidad ha evolucionado desde los trabajos pioneros de Caballero (2011) donde a través de un enfoque geomorfológico se identificaron corrientes dentro del Valle de Aburrá susceptibles de presentar avenidas torrenciales a una guía metodológica para la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales como la desarrollada por el Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2021).

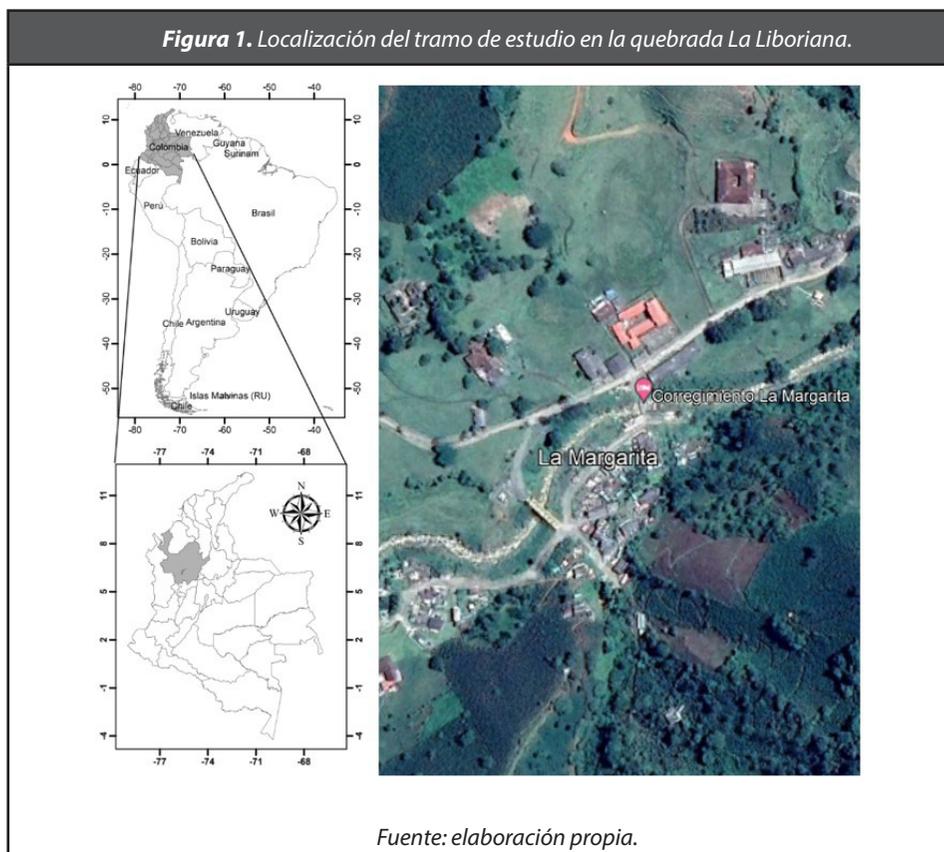
Por otro lado, desde el punto de vista hidráulico localmente se suelen modelar los eventos torrenciales empleando modelos unidimensionales como el HEC-RAS 4.1 (Brunner, 2010) y un caudal líquido mayorado en 40% como sugiere el plan de ordenación y manejo de la cuenca del río Aburrá-POMCA (CORNARE et al., 2007). Sin embargo, hoy en día gracias a la disponibilidad de modelos bidimensionales como el HEC-RAS 6.0 (Brunner, 2020), el IBER (Bladé et al., 2014), el OPEN TELEMAC (Hervouet, 2007) o el DELFT3D (Deltares, 2022), todos de uso libre actualmente, las posibilidades de representar mejor los eventos torrenciales han aumentado significativamente.

En el caso del HEC-RAS en su versión bidimensional, este ha sido usado ampliamente para el mapeo de zonas de inundación (Dasallas et al, 2019; Moya Quiroga et al., 2016; Namara et al., 2022; Rangari et al., 2019) y ahora con su versión 6.2 es posible simular flujos no Newtonianos, los cuales son característicos de eventos torrenciales como rompimientos de presas (Gibson et al., 2022).

En el presente estudio se comparan los resultados obtenidos con el modelo 2D Newtoniano con caudal mayorado en 40 % con solo una fase líquida (monofásico) y los resultados del modelo 2D no Newtoniano con dos fases, una líquida y una sólida (bifásico) contra la mancha de inundación del evento real (18/05/2015). El trabajo se divide en tres fases: 1) caracterización de la zona de estudio y obtención de información, 2) construcción y corridas del modelo hidráulico y 3) análisis comparativo de resultados.

2. Zona de Estudio

La quebrada La Liboriana se encuentra localizada en el municipio de Salgar al suroeste del departamento de Antioquia, sobre la cordillera occidental (Figura 1), cabe destacar que, la cabecera municipal se encuentra a una altura de 1250 metros sobre el nivel del mar y cerca de la desembocadura de la cuenca La Liboriana, una pequeña cuenca tropical con un área de 56 km² (Velásquez et al., 2020). En el año 2015 cuando se presentó el evento de grandes proporciones que afecto la vida y la propiedad, Salgar contaba con 17400 habitantes, 8800 de estos residentes en el área urbana. La cuenca de la quebrada La Liboriana se une a la cuenca del río El Barroso, y ambos drenan al río Cauca. El tramo específico de estudio se ubica en el corregimiento La Margarita (Figura 1).



3. Metodología y Datos

3.1. Modelo hidráulico

El modelo HEC-RAS 6.2 (River Analysis System), desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros Militares de los Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center - HEC) permite al usuario realizar cálculos de variables hidráulicas como profundidades (H), velocidades (V), esfuerzos cortantes (τ), cálculos de transporte de sedimentos y simulaciones de calidad de agua.

HEC-RAS aplica enfoques reológicos monofásicos para simulaciones no newtonianas, basado en una biblioteca de algoritmo no newtoniana llamada Debrislib (Gibson et al., 2022). Ambos modelos presentados en este documento utilizaron las ecuaciones de aguas poco profundas (“full shallow water equations”).

Conservación de masa:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0$$

Donde u y v son las componentes de la velocidad en las direcciones x , y , respectivamente; H es la altura desde un nivel de referencia hasta la lámina de agua; h es la profundidad de la lámina de agua, medida desde el fondo del canal y q es el termino fuente o sumidero (entrada o salida de agua del canal).

Conservación de momentum:

Cuando las escalas de longitud horizontal son mucho más grandes que la escala de longitud vertical, la conservación del volumen implica que la velocidad vertical es pequeña y la ecuación del momento vertical de Navier-Stokes se puede utilizar para justificar que la presión es casi hidrostática. Además, en ausencia de gradientes de presión baroclínica (densidad variable), fuertes fuerzas de viento y presión no hidrostática, es adecuada una versión promediada verticalmente de la ecuación

de momentum. Los términos de velocidad vertical y derivada vertical pueden despreciarse con seguridad (tanto en ecuaciones de masa como de momento). De esta forma se obtienen las ecuaciones de aguas poco profundas:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(V_{xx} h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(V_{yy} h \frac{\partial u}{\partial y} \right) - C_f u + f v + \frac{\tau_{s,x}}{\rho h}$$

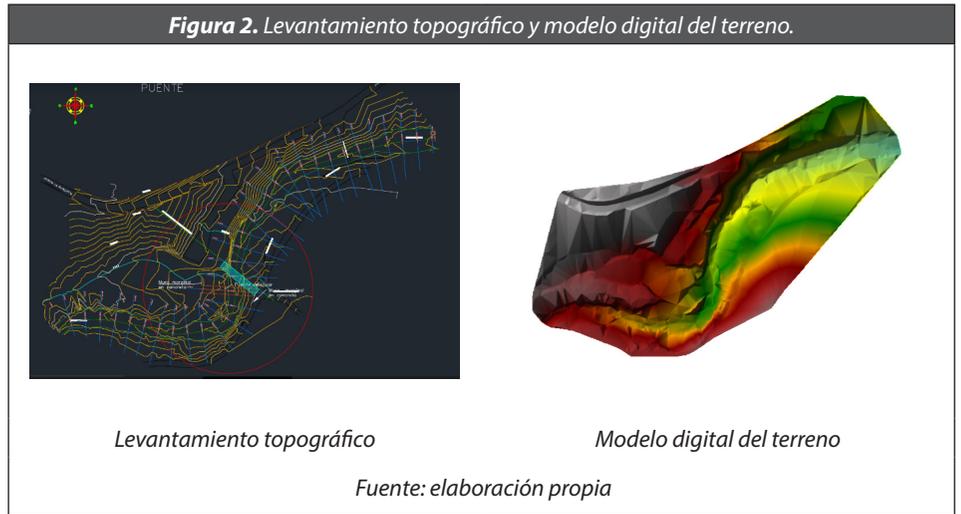
$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(V_{xx} h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(V_{yy} h \frac{\partial v}{\partial y} \right) - C_f v + f u + \frac{\tau_{s,y}}{\rho h}$$

Donde u y v son las velocidades en las direcciones cartesianas, g es la aceleración de la gravedad, y C_f son los coeficientes de viscosidad de remolino horizontal en las direcciones x e y , f es el coeficiente de fricción del fondo, $\tau_{s,x}$ es la tensión del viento en la superficie, h es la profundidad del agua, y f es el parámetro de Coriolis.

3.2. Información del terreno

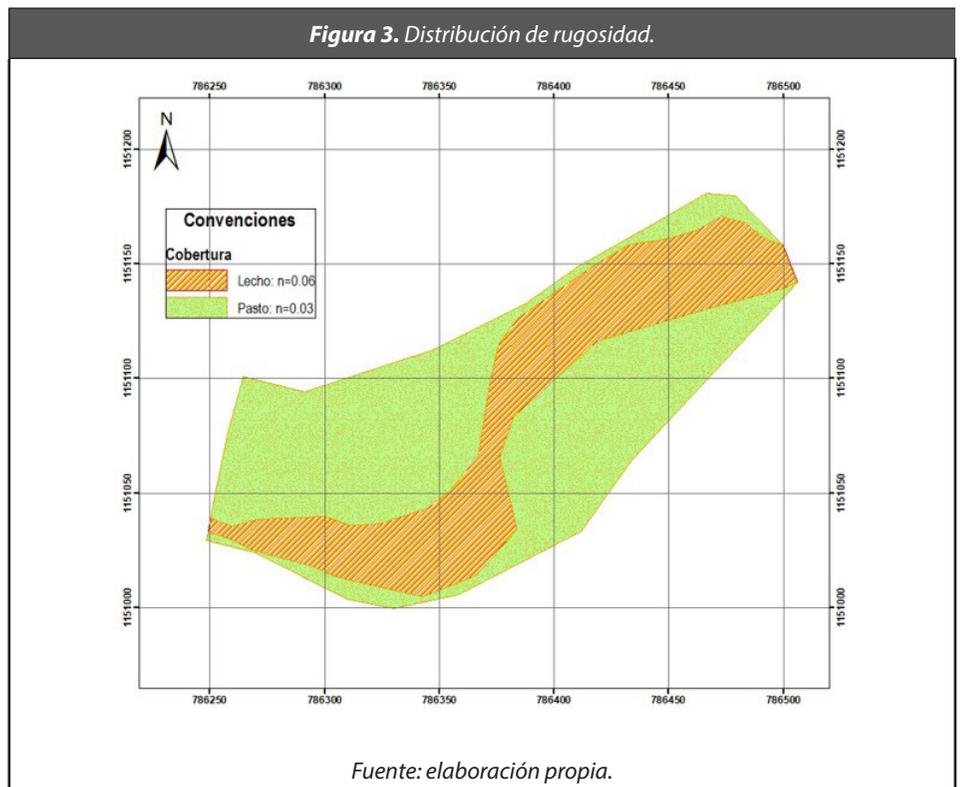
Para el desarrollo de los modelos hidráulicos se empleó el levantamiento topográfico (Figura 2 izquierda) a escala 1:1000 de 340 m de la quebrada La Liboriana realizado por Ingeniería Proyectos e Inversiones S.A.S. (2016). La pendiente media del tramo es de 0.038 m/m.

Posteriormente, con ayuda del software de información geográfica se rasterizó la topografía y se generó un modelo digital del terreno (MDT) con una resolución espacial de 0.5 m por 0.5 m (Figura 2 derecha), el cual cubre tanto el lecho de la quebrada La Liboriana como su planicie de inundación.



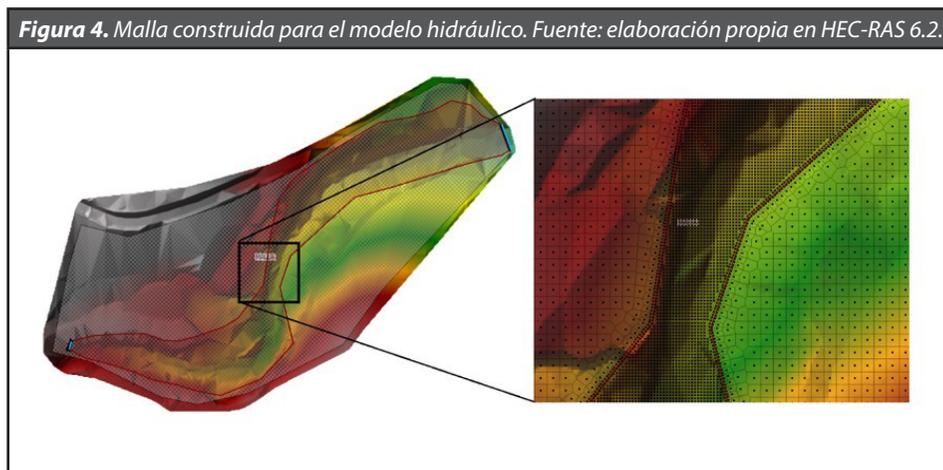
3.4. Rugosidad

El coeficiente de rugosidad de Manning (Figura 3) se asignó en dos capas, una para el lecho de la quebrada con un valor de 0,06 (lecho con gravas y arenas) y otra para las zonas de inundación con un valor de 0,03 (pastos y algunos arbustos) acorde a los valores sugeridos por Chow (1994).



3.5. Malla computacional

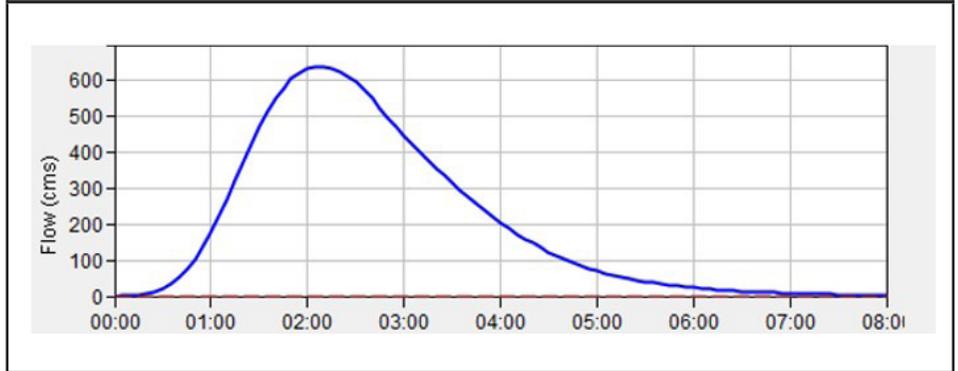
En el presente trabajo se usó una malla estructurada rectangular (Figura 4) con una discretización espacial en la llanura de inundación de 2,0 m y en el área del lecho de 0,5 m, el refinamiento permite tener más precisión en los resultados de la modelación en el cauce.



3.6. Caudales y condiciones de borde

Las condiciones de entrada a los modelos hidráulicos implementados corresponden al hidrograma de caudal de creciente (Figura 5) estimado por Ingeniería Proyectos e Inversiones S.A.S. (2016) para el tramo de análisis en la quebrada La Liboriana. Para este caso, se estimaron los caudales máximos para diferentes periodos de retorno (T_r) usando las hidrógrafas unitarias y el método Racional, seleccionando el hidrograma corresponde al método SCS por ser el método más conservador

Figura 5. Hidrograma caudal máximo Tr100 años. Fuente: Ingeniería Proyectos e Inversiones S.A.S. (2016).



Por su parte, las condiciones de borde de salida utilizadas corresponden a la profundidad normal asociada a la pendiente de terreno.

3.6. Características de los sedimentos y parámetros reológicos

Otra de las condiciones de entrada que se requiere para el escenario No Newtoniano son las características del sedimento (Tabla 1) que transporta la quebrada La Liboriana, para este caso, usamos la caracterización realizada por Ingeniería Proyectos e Inversiones S.A.S. (2016), donde se realizaron ensayos de granulometría, límites de Atterberg, peso específico, entre otros:

Tabla 1. Características de los sedimentos.

Humedad natural (%)	Granulometría				Límites de consistencia			Clasificación	
	Pasa tamiz N°4 (%)	Pasa tamiz N°10 (%)	Pasa tamiz N°40 (%)	Pasa tamiz N°200 (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	AASHTO	USCS
5,7	31,0	26,2	13,0	5,0	25,0	19,0	6,0	A-1-a	GW

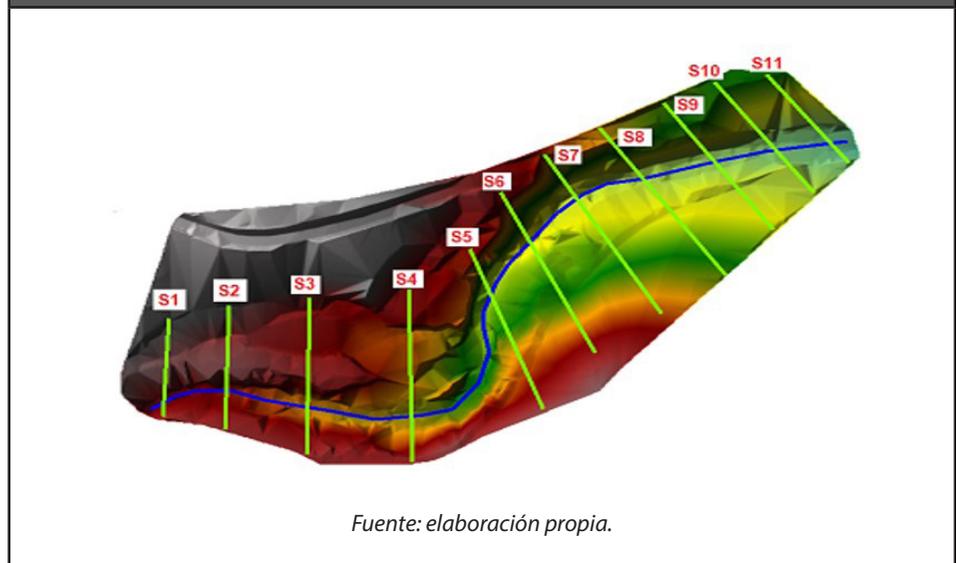
Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, en cuanto a la reología del flujo se escogió el modelo de Bingham con una concentración volumétrica de sedimentos del 45%, esta última se calibro haciendo un análisis de sensibilidad (“variando diferentes valores de concentración volumétrica”) desde el 22% al 45%, donde el valor que mejor se aproximó al evento real fue del 45%.

3.7. Análisis comparativo

Dado que la comparación directa de los campos de velocidad y profundidad resultantes de la modelación bidimensional es compleja, decidimos usar un eje por el centro del cauce y once (11) secciones transversales (Figura 6) para mostrar las diferencias en términos de profundidad.

Figura 6. Ubicación del eje del cauce y secciones transversales para análisis comparativo.



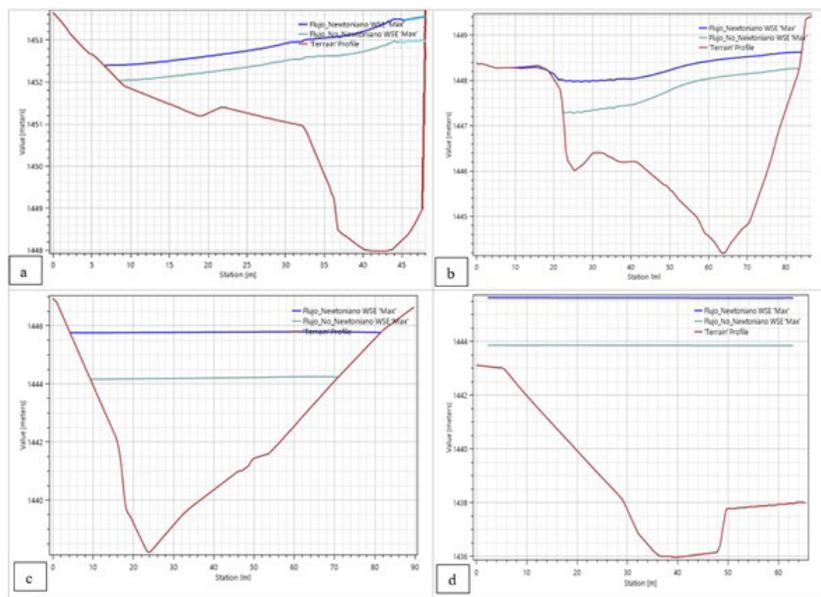
4. Resultados

4.1. Secciones transversales

La Figura 7 muestra la vista transversal de algunos de los sitios o secciones transversales escogidos, donde se visualiza la forma del terreno o cauce y la lámina de agua asociada a los dos escenarios de simulación, encontrándose que, en efecto la lámina de agua asociada al escenario Newtoniano presenta mayores profundidades respecto al escenario No Newtoniano, y donde adicionalmente se puede identificar que a partir de la sección 10 el cauce presenta un cambio en su geoforma (cambiando de un cauce encajonado a un valle amplio y de poca profundidad).

Por otro lado, se observa que en las secciones de aguas abajo, la sección del cauce es superada por la lamina de agua y se presentan desbordamientos (Figura 8d) situación que no sucede en el sector de aguas arriba donde el cauce contiene por completo el flujo para los dos escenarios (Figura 8abc).

Figura 7. Secciones transversales en el cauce de estudio, (a) sección 1, (b) sección 4, (c) sección 7 y (d) sección 10 – Q100 - Flujo Newtoniano (azul) y No Newtoniano (verde).



Fuente: elaboración propia.

4.2. Variables hidráulicas

En la Tabla 2 se presentan los valores estimados de profundidad máxima, velocidad promedio y ancho de flujo en las secciones transversales seleccionadas para el análisis comparativo, es evidente nuevamente que el escenario Newtoniano presenta mayores profundidades y velocidades que el escenario No Newtoniano.

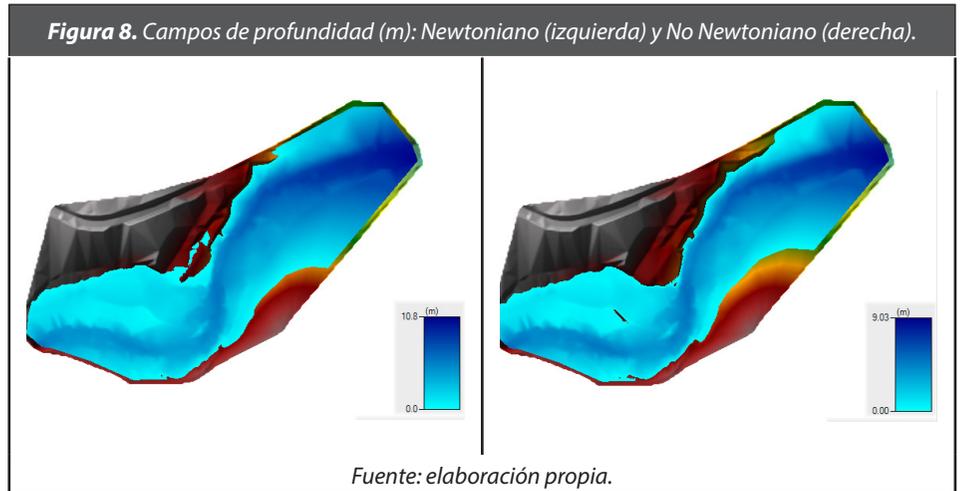
Tabla 2. Resultados de la modelación de los escenarios. (N: Newtoniano; NN: No Newtoniano).

Sección	H máx. N (m)	H máx. NN (m)	V promedio N (m/s)	V promedio NN (m/s)	Ancho N (m)	Ancho NN (m)
1	5,48	4,94	5,99	4,33	38,39	36,64
2	4,60	4,24	5,01	3,49	51,27	49,58
3	5,03	4,75	5,05	3,46	71,23	69,57
4	4,27	3,89	4,52	3,59	74,05	61,03
5	5,41	4,45	4,51	3,63	62,62	56,24
6	6,54	5,18	3,58	2,93	64,28	54,12
7	7,56	5,97	2,77	2,18	77,17	61,37
8	8,34	6,66	2,48	1,99	79,35	69,99
9	8,96	7,22	2,40	1,96	69,28	69,17
10	9,63	7,86	2,12	1,76	60,60	60,61
11	10,58	8,81	2,56	2,10	47,72	47,70

Fuente: elaboración propia

4.3. Campos de profundidad

La Figura 8 muestra los campos de profundidad estimados, se nota como el escenario Newtoniano presenta mayor área de inundación que el No Newtoniano.



Por otro lado, utilizando las imágenes disponibles en Google Earth se realizó la reconstrucción de la mancha de inundación real del evento del 18 de mayo de 2015 que afectó la vida y la propiedad. Empleando la reconstrucción, en la Figura 9 se muestra la superposición de la mancha real versus las manchas simuladas y en la Tabla 3 se presenta el ancho real en las secciones de análisis y el porcentaje de error de los anchos simulados en los dos escenarios, encontrando que el modelo con flujos No Newtonianos presenta mejores resultados.

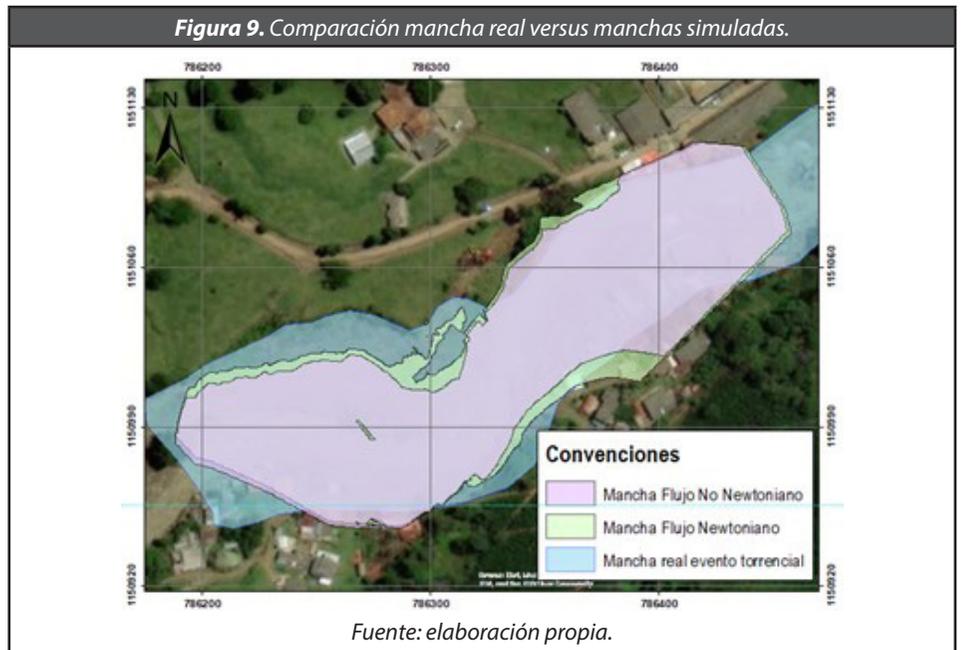


Tabla 3. Anchos de inundación y porcentaje de error.

Sección	Mancha real (m)	Error N (%)	Error NN (%)
1	58,32	34,17	37,17
2	82,35	12,09	14,99
3	88,36	22,14	19,29
4	80,00	26,97	4,65
5	85,07	7,37	3,57
6	51,55	10,22	7,20
7	59,54	32,32	5,23
8	63,55	36,06	20,01
9	59,85	18,79	18,60
10	53,66	3,91	3,93
11	54,94	18,18	18,21

Fuente: elaboración propia.

5. Discusión

Luego del análisis comparativo se encontró que el modelo con flujo no newtoniano se aproxima de mejor manera a la mancha de inundación real debido a que tiene en cuenta las características del sedimento y la reología del flujo, sin embargo, requiere mayor gasto y tiempo computacional, al igual que mayor cantidad de información de campo. Dada la dificultad y costo que implica tener datos de campo, se suelen simular avenidas torrenciales mayorando el caudal líquido y asumiendo agua clara; sin embargo, de acuerdo con lo encontrado en este trabajo se puede observar que este tipo de simulaciones tiende a sobre estimar el evento torrencial, obteniendo mayores magnitudes de velocidad, profundidad del flujo y área de la mancha de inundación.

Por otro lado, encontramos que una ventaja del modelo newtoniano es que requiere poca información de campo (solo topografía) y el tiempo de simulación es la mitad del tiempo con respecto al modelo no newtoniano y a pesar de que sus resultados tienden a sobreestimar el evento torrencial, permite hacer de manera

fácil y rápida mapas para la zonificación por amenaza de avenida torrencial, lo que puede ser útil en las fases iniciales de los proyectos de consultoría.

6. Conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo sugieren que el modelo HEC-RAS 6.2 y sus algoritmos para flujos No Newtonianos presentan buenos resultados para la modelación de eventos torrenciales en ambientes de montaña como es el caso de la región andina colombiana. Por otro lado, si bien aquí se presenta un análisis retrospectivo del evento ocurrido el 18 de mayo de 2015, pensamos que esta nueva versión del software desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros Militares de los Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center - HEC) puede ser de gran utilidad para el mapeo de zonas con amenaza alta y su posterior inclusión en los planes de ordenamiento territorial (POT) de nueva generación, lo que podría evitar pérdidas humanas como las ocurridas ese trágico 18 de mayo de 2015.

Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Cooperativa de Colombia sede Medellín por el tiempo y los recursos computacionales suministrados para el desarrollo de este trabajo.

Referencias

- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., & Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, 30(1), 1–10.
- Brunner, G. W. (2010). *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual. Version 4.1.*
- Brunner, G. W. (2020). *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual. Version 6.0 Beta.*
- Caballero, J. H. (2011). Las avenidas torrenciales una amenaza potencial en el valle de Aburrá. *Gestion y Ambiente*, 14(3), 45–50.
- Chow, V. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw-Hill.
- CORNARE, CORANTIOQUIA, & AMVA. (2007). *Plan de ordenación y manejo de la cuenca del río Aburrá.*
- Dasallas, L., Kim, Y., & An, H. (2019). Case Study of HEC-RAS 1D–2D Coupling Simulation: 2002 Baeksan Flood Event in Korea. In *Water* (Vol. 11, Issue 10). <https://doi.org/10.3390/w11102048>
- Deltares. (2022). *Delft3D-FLOW, User Manual.*
- Gibson, S., Moura, L. Z., Ackerman, C., Ortman, N., Amorim, R., Floyd, I., Eom, M., Creech, C., & Sánchez, A. (2022). Prototype Scale Evaluation of Non-Newtonian Algorithms in HEC-RAS: Mud and Debris Flow Case Studies of Santa Barbara and Brumadinho. *Geosciences*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/geosciences12030134>
- Hervouet, J. M. (2007). *Hydrodynamics of free surface flows, modelling with the finite element method*. John Wiley & Sons.
- Ingeniería Proyectos e Inversiones S.A.S. (2016). *Estudio hidrológico, hidráulico y diseño del puente peatonal sobre la quebrada la Liboriana en el sector hospital.*
- Moya Quiroga, V., Kure, S., Udo, K., & Mano, A. (2016). Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS version 5. *Ribagua*, 3(1), 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.riba.2015.12.001>
- Namara, W. G., Damisse, T. A., & Tufa, F. G. (2022). Application of HEC-RAS and HEC-GeoRAS model for Flood Inundation Mapping, the case of Awash Bello Flood Plain, Upper Awash River Basin, Oromiya Regional State, Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(2), 1449–1460. <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01166-9>

- Rangari, V. A., Umamahesh, N. V., & Bhatt, C. M. (2019). Assessment of inundation risk in urban floods using HEC RAS 2D. *Modeling Earth Systems and Environment*, 5(4), 1839–1851. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00641-8>
- SGC. (2021). *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales*.
- Velásquez, N., Hoyos, C. D., Vélez, J. I., & Zapata, E. (2020). Reconstructing the 2015~Salgar flash flood using radar retrievals and a conceptual modeling framework in an ungauged basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(3), 1367–1392. <https://doi.org/10.5194/hess-24-1367-2020>