



# Dinámica de flujos de lodos en la quebrada Mijitayo

Jaime Efrén Insuasty Enríquez<sup>1</sup>

Francisco Mafla Chamorro<sup>2</sup>

## Resumen

Los flujos de lodos causan daños en la infraestructura y pueden amenazar la vida. Este fenómeno se puede presentar en la quebrada Mijitayo en la ciudad de Pasto y, por lo tanto, se analizó la afectación que puede tener la ciudad, a través de un modelo de simulación llamado TITAN 2F, si se llegara a generar este tipo de eventos.

Para la modelación se estableció la base cartográfica de la zona, definiendo la dirección de acumulación del flujo. La zona alta de la quebrada presenta pendientes pronunciadas y es donde puede acumular material sólido para el flujo; la zona media propicia el depósito y transporte del material y, la zona baja es donde se acumula. Se obtuvo los volúmenes de agua que se puede generar con diferentes periodos de retorno de precipitaciones y, con base en información secundaria, se estableció las concentraciones de sólidos que puede tener este tipo de flujos. Con los volúmenes de agua establecidos y con las concentraciones determinadas se instauró diferentes flujos de lodos que pueden ocurrir en la quebrada.

Con el software TITAN 2F se pudo establecer que, las manchas de lodos superan notablemente los 30 m establecidos como norma nacional y que, en la parte baja del cauce analizado, puede tener un ancho superior a los 100 m. Igualmente, la presión dinámica que el flujo genera, puede afectar las estructuras de las edificaciones ubicadas a la entrada de la quebrada en la ciudad de Pasto. Los eventos máximos de inundación obedecen a la concentración máxima de sólidos. Se puede observar que, en escenarios donde aumenta el caudal de agua y la concentración de sólidos es baja, los anchos de inundación son similares.

**Palabras clave:** flujo; lodos; periodo de retorno; volumen de agua; concentración; inundación.

<sup>1</sup> Ingeniero Civil, Docente Programa de Ingeniería Ambiental, Universidad Mariana, Pasto, Colombia. Correo: [jinsuasty@umariana.edu.co](mailto:jinsuasty@umariana.edu.co)

<sup>2</sup> Ingeniero Sanitario, Magíster en Recursos Hídricos, Docente Programa de Ingeniería Ambiental, Universidad Mariana, Pasto, Colombia. Correo: [fmaffla@umariana.edu.co](mailto:fmaffla@umariana.edu.co)



## Introducción

Alrededor del mundo, las ocurrencias de flujos de lodos han generado graves consecuencias que, pueden generar desde daño y destrucción de infraestructura, hasta pérdidas de vidas humanas. El factor humano es el que está generalmente ligado a este fenómeno, como sostiene Insuasty (2012).

Los flujos de lodos se originan al combinarse el agua con sedimentos provenientes de deslizamientos de tierra o depósitos de materiales piroclásticos, donde generalmente predominan sedimentos de suelos con partículas finas como limo y arcilla en altas concentraciones, aunque también pueden transportarse grandes bloques o cantos de roca. Este tipo de fenómenos se conoce como flujos bifásicos, haciendo referencia a la parte fluida y la parte sólida o granular que los conforman, y se comporta como una suspensión (*slurry*) homogénea con una onda frontal y una serie de pulsaciones (Suárez, 2009).

En el análisis de la amenaza que se puede presentar ante flujos, estudiando diferentes factores de incidencia (Narváez y Rosero, 2005), se puede observar que, el fenómeno posee mucha ocurrencia en nuestra región, teniendo en cuenta que las condiciones geomorfológicas e hidrológicas de la zona son similares a aquellas donde han ocurrido catástrofes, debido al impacto generado por flujos de lodos con material volcánico (Ortiz, 2012).

Esta investigación busca identificar la tipología y morfología de la zona alta de la quebrada Mijitayo, según los registros geológicos existentes, para poder establecer las características generales de los suelos en cuanto a su posibilidad de deslizamientos, riesgos de erosión y demás fenómenos que precipiten la ocurrencia de flujos de lodos.

Una vez determinados los volúmenes que se puede generar, se establecerá las condiciones esperadas de flujos de lodo que pudiera formarse en el sector. Las diferentes concentraciones teóricas que formarán la pila inicial de material, serán la base para alimentar un modelo para la simulación de flujos bifásicos, con el que se podrá simular la propagación de crecidas o flujo de lodos en cuencas hidrográficas y su interacción con las diferentes estructuras y obstrucciones que caracterizan las zonas antropizadas, como puentes, alcantarillas y diques de flujo.

Los resultados obtenidos permitieron establecer el área de afectación que puede abarcar la generación de flujo de lodos en la quebrada Mijitayo y la posible afectación en la zona. La importancia del estudio y la modelación de la dinámica de los flujos de lodos es su presentación en las entidades gubernamentales, sirviendo de base para reformular los planes de gestión de riesgo, considerando que se puede afectar una de las más importantes vías de la ciudad de Pasto.

## Materiales y Métodos

El trabajo consistió en estudiar la dinámica de los posibles flujos de lodos generados por detonantes hidrometeorológicos en la quebrada Mijitayo, hasta la entrada a la ciudad de Pasto (capital del departamento de Nariño, al suroccidente de

Colombia), generando la base cartográfica de la zona de estudio de acuerdo con sensores remotos, estimación de los volúmenes sólido-agua probables en la cuenca de la quebrada y simulación matemática de los flujos de lodos, determinando su cobertura en la cuenca de la quebrada Mijitayo hasta la entrada a la ciudad.

Con base en los objetivos establecidos, se logró los siguientes resultados:

**Generación de la base cartográfica:** para esta parte se utilizó el software de procesamiento ArcGIS 9.3 (captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica), con un modelo digital de elevación DEM: GeoSar con resolución espacial de 5 metros por pixel.

Los formatos de salida de productos fueron hechos en formato vectorial (*shapefile*) y formato de celdillas RASTER (*geotiff*) utilizando como sistema de referencia espacial, Datum Magna Sirgas, Origen Oeste, determinado para Colombia. Se delimitó el polígono correspondiente al área de la microcuenca, para obtener los datos y depurarlos, en aras de alimentar el modelo digital.

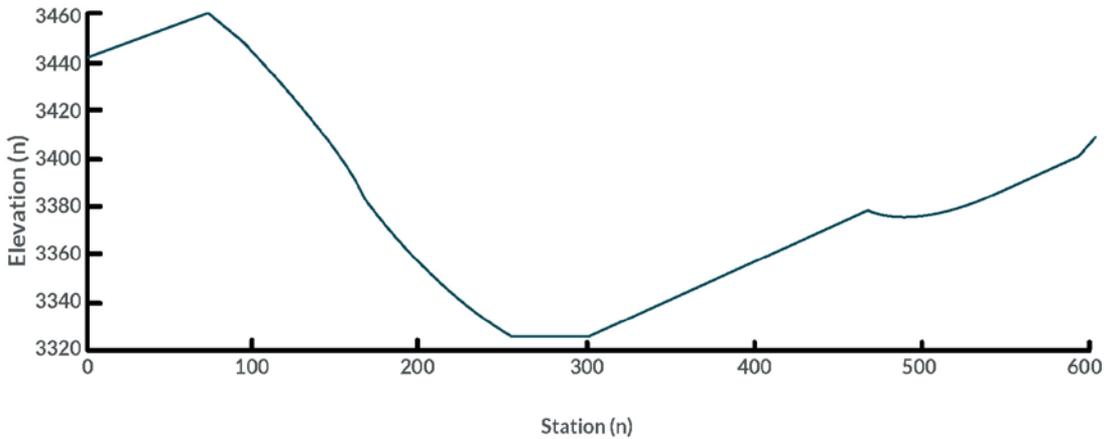
Se creó un ráster de flujo acumulado para cada celda, determinado por la acumulación de peso de las celdas que fluyen a otra celda de pendiente descendente. La entrada de esta herramienta es el archivo ráster generado con la herramienta Flow Direction. Se determinó el punto de desfogue de la cuenca, aguas arriba de la planta de tratamiento de agua potable Mijitayo de la empresa de obras sanitarias de la ciudad, Empopasto. Una vez delimitado el área, se transformó el formato ráster a formato vectorial tipo polígono. Luego, se determinó la red de drenaje, encontrando que está acorde con la forma de la cuenca y que desfoga en el punto determinado.

Para la generación de la topografía se utilizó el modelo de elevación GeoSAR con resolución espacial de 5m por pixel y se generó la topografía (altimetría) con curvas de nivel con dos intervalos: el primero cada dos metros y el segundo cada cinco metros. Para la generación de perfiles se utilizó el software HEC-RAS, construyendo perfiles transversales de los taludes cada 50m, encontrando pendientes pronunciadas en la parte alta de la microcuenca (Figura 1), medias en la zona central del curso de agua (Figura 2) y, relativamente planas, en la zona baja de la quebrada Mijitayo (Figura 3). El perfil longitudinal presenta un comportamiento similar al descrito (Figura 4).

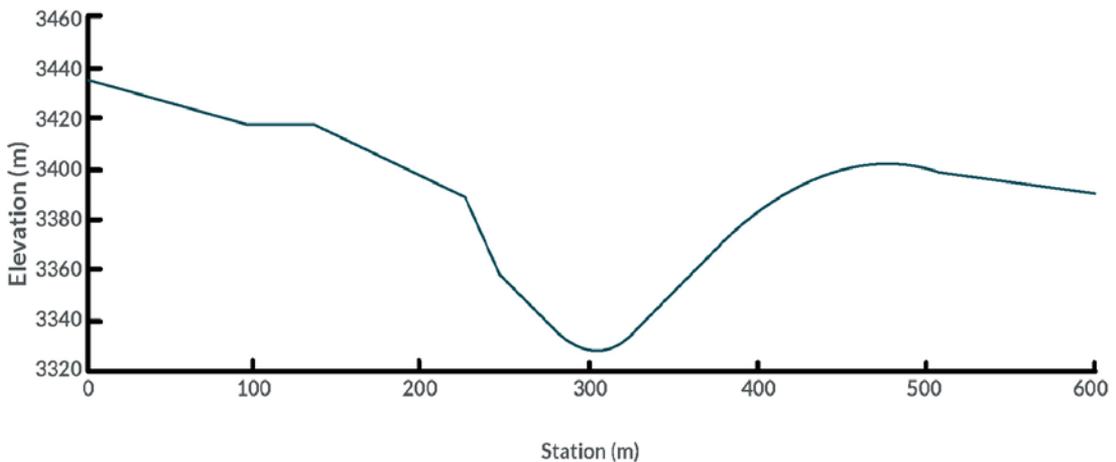
Con la topografía generada en planimetría y altimetría, se evidenció las condiciones iniciales para alimentar el programa de simulación TITAN 2 Fases. Se determinó los valores máximos de espesor y presión dinámica del flujo (Zona alta) que, son altas por el aumento de la presión dinámica por altas pendientes en el sector. Se calculó que un tiempo de once minutos es suficiente para que un flujo de lodo de esta magnitud sea capaz de alcanzar el territorio urbano de la ciudad de San Juan de Pasto.

**Figura 1**

*Perfil típico de la zona alta de la quebrada Mijitayo*

**Figura 2**

*Perfil típico de la zona media de la quebrada Mijitayo*



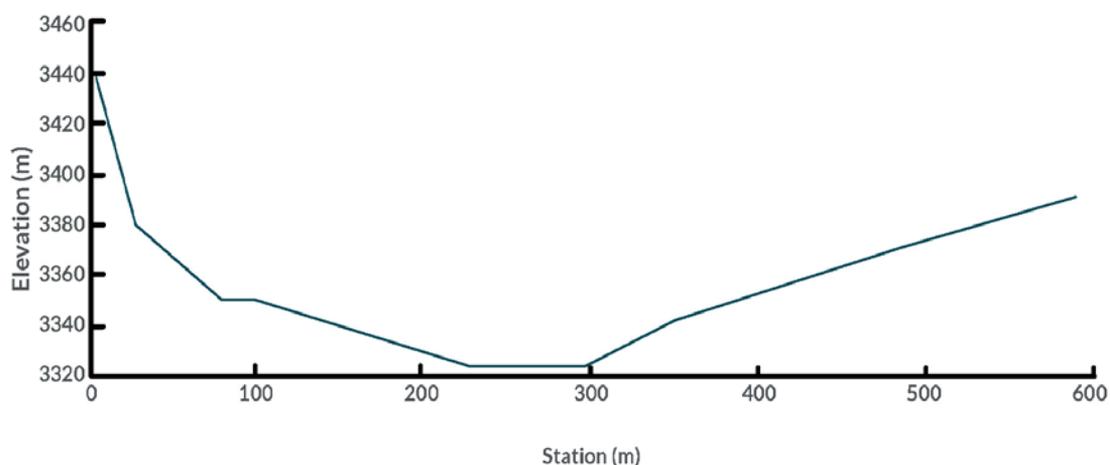
Las condiciones finales encontradas son: en la zona alta de la quebrada Mijitayo, con pendientes pronunciadas, se puede acumular material para formar flujo de lodos. La zona media es propicia para el depósito del material y, la zona baja permite transporte y el depósito del material transportado.

### **Estimación de los volúmenes sólido-agua probables en la cuenca de la quebrada Mijitayo**

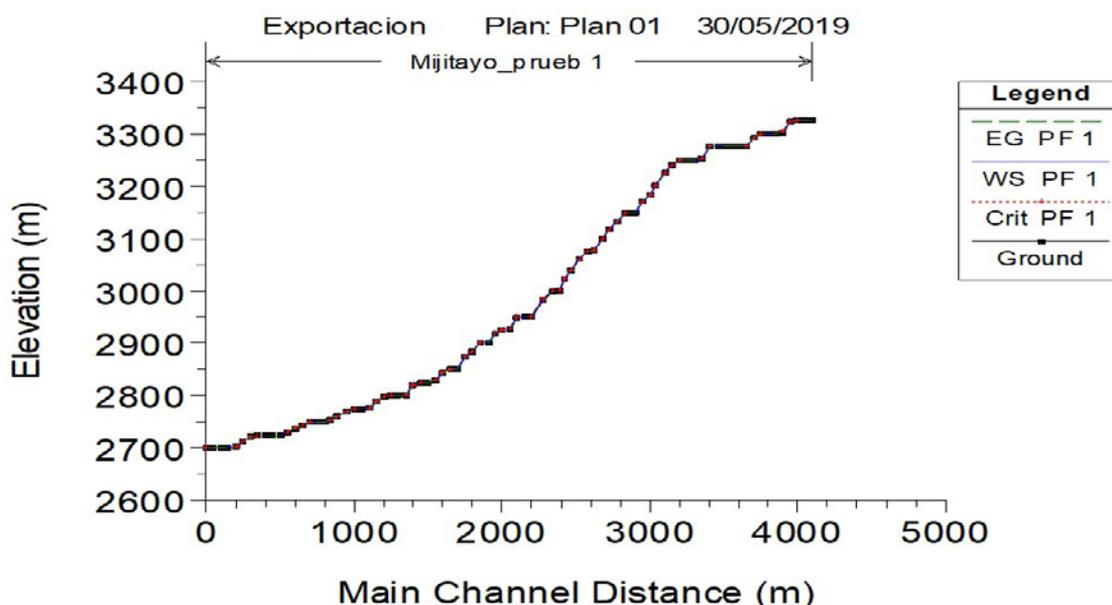
Una vez delimitada la cuenca, se hizo una estimación de las características físicas de la hoya hidrográfica y se aplicó las herramientas ArcHydro y ArcGIS 9.3. La simulación hidrológica mostró un número de curva, CN = 63, basado en un promedio ponderado de la cobertura de los usos del suelo: Suelo tipo B, es decir, modernamente bajo potencial de escorrentía.

**Figura 3**

Perfil típico de la zona baja de la quebrada Mijitayo

**Figura 4**

Perfil longitudinal de la quebrada Mijitayo



Para diferentes periodos de retorno, basados en la Resolución 0330 de 2017, Reglamento Técnico para el sector de agua potable y saneamiento *básico*, se encontró los siguientes volúmenes de agua:  $Tr = 50$  años; volumen =  $51.900 \text{ m}^3$ ;  $Tr = 75$  años; volumen =  $84.800 \text{ m}^3$ ; y  $Tr = 100$  años; volumen =  $98.200 \text{ m}^3$ . En la Tabla 1 se muestra los volúmenes de agua y la concentración de sólidos que se simuló con el software Titán 2F:

**Tabla 1**

Valores de volumen total y concentración de sólidos de cada uno de los escenarios a modelar

Número	Escenario	Volumen total del flujo (m <sup>3</sup> )	Concentración de sólidos
1	Volumen mínimo de líquidos, concentración mínima de sólidos	50.000	30 %
2	Volumen mínimo de líquidos, concentración máxima de sólidos	87.500	60 %
3	Volumen medio de líquidos, concentración mínima de sólidos	121.428	30 %
4	Volumen medio de líquidos, concentración máxima de sólidos	212.500	60 %
5	Volumen máximo de líquidos, concentración mínima de sólidos	142.857	30 %
6	Volumen máximo de líquidos, concentración máxima de sólidos	250.000	60 %

**Simulación matemática de flujo de lodos.** Debido al alto costo computacional y a la infinidad de posibles escenarios de flujos de lodo que pudieran crearse en la microcuenca, se hizo necesario determinar una cantidad concreta de eventos a modelar. Si bien existen diferentes características de un flujo que determinan su comportamiento, tales como su volumen, concentración, punto de inicio, etc., es relevante definir qué parámetros son determinantes al momento de evaluar la amenaza frente a este fenómeno. TITAN 2F es un modelo físico-matemático basado en las ecuaciones de Navier-Stocks y Morh-Coloumb, que permite el modelamiento de un determinado acontecimiento de flujos bifásicos sobre un modelo de elevación digital.

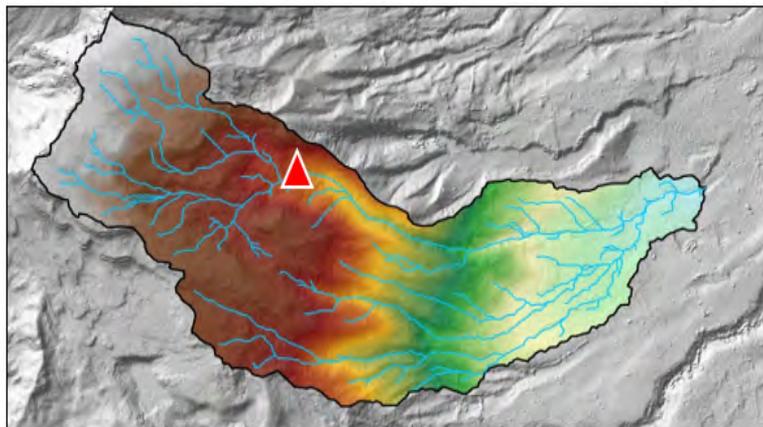
Uno de los factores más importantes para el proceso de simulación es el de determinar las condiciones del flujo que definen el evento a evaluar; es decir, un flujo como tal, posee características propias que definen su posible comportamiento.

El lugar de ubicación inicial de la pila de material a ser modelado fue elegido buscando un sitio de la zona alta y media de la cuenca, ya que una formación de flujo

de lodos en esa zona desencadenaría una mayor velocidad del flujo sobre la zona baja, debido a las altas pendientes del canal principal presentes en las dos zonas anteriores. Igualmente, se definió un lugar en el que pueda converger el mayor número de corrientes y que cumpla con las condiciones descritas. Finalmente, una vez cumplidas las dos condiciones, se priorizó el sitio donde la longitud de la corriente desde el lugar elegido hasta el punto de salida sea la mayor posible, por lo cual se definió la ubicación mostrada en la Figura 5.

### Figura 5

*Lugar de inicio de la simulación de los flujos de lodo*



La velocidad inicial se definió como 0 m/s, debido a que la ubicación de los flujos es lo suficientemente alta para inferir en la velocidad del flujo en la parte baja. Por último, la construcción de los eventos se determinó por medio del árbol bayesiano de eventos y con base en los valores máximos, medios y mínimos de líquido calculados y, en los valores de concentración de sólidos mínimo y máximo descritos en la literatura.

Con base en lo obtenido, se realizó la simulación de los seis escenarios de flujos de lodo con inicio fijo y, para una duración de 11.7 minutos, determinado como tiempo suficiente de simulación en los modelamientos realizados durante la validación y ajuste del sistema. Este proceso se realizó en uno de los servidores de la Universidad Mariana bajo el sistema operativo Debian Jessie 8.0 y, a través de una conexión cliente-servidor mediante el protocolo SSH. La información de avance de los flujos fue tomada cada 50 segundos de recorrido a partir del inicio del proceso en tiempo real; es decir, para reproducir cerca de once minutos de recorrido del flujo, cada una de las simulaciones tuvo una duración de entre cinco y ocho días.

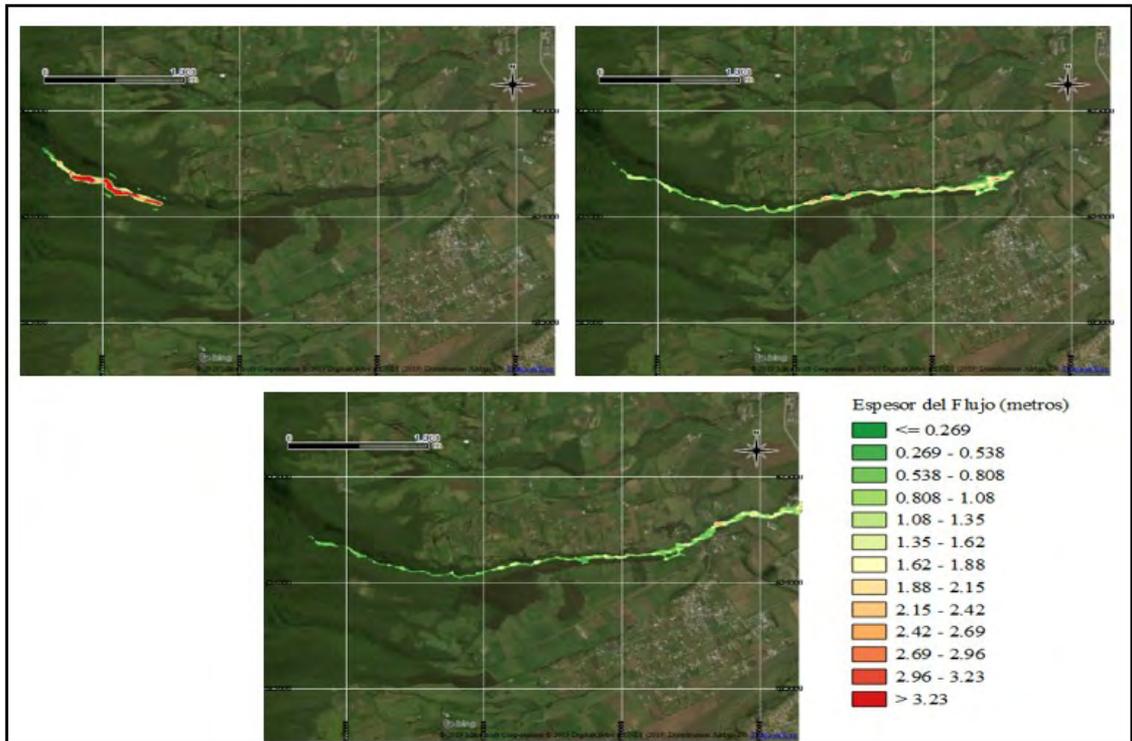
Dadas las condiciones de registro de información cada 50 segundos, el software TITAN 2F recoge los datos de recorrido del flujo en intervalos de tiempo equidistantes, obteniéndose así un registro en diferentes mallas no uniformes de datos que corresponden al espesor, presión dinámica del flujo, velocidad y concentración en un instante de tiempo determinado. De este modo, se pudo observar el avance del flujo sobre la topografía en sus distintas características. La



Figura 6 permite evidenciar el resultado de un escenario en los segundos 50, 250 y 500 de su recorrido y la variación de su espesor.

## Figura 6

*Distribución de espesor respecto al avance de flujo de lodo a los 50, 250 y 500 segundos de recorrido*



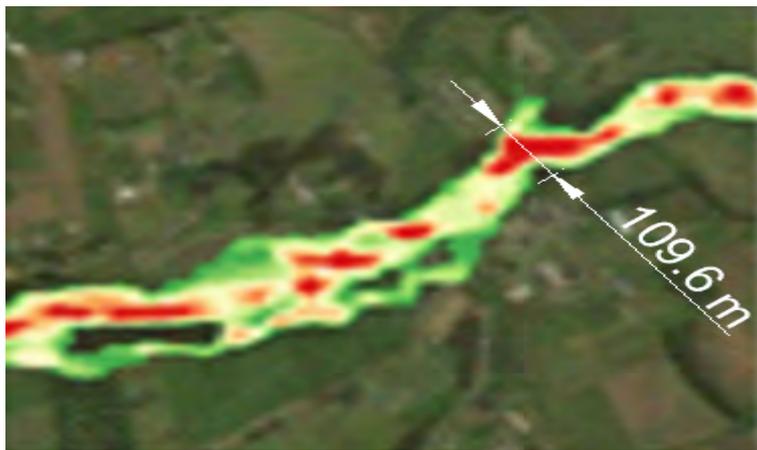
Haciendo un acercamiento a escala 1:2000 de las zonas alta, media y baja, se puede observar que los anchos de la mancha de inundación son aproximadamente de 60 m, 40m y 50m respectivamente, para volúmenes de agua bajos y concentraciones de lodos bajas.

El escenario de modelación más crítico indica un ancho de la mancha de inundación superior a los 30m, que es la hipótesis con la que se hizo este estudio. En este caso, se presenta el caudal máximo, referido a un tiempo de retorno de 100 años y, la concentración máxima de sólidos, alcanzando en la parta baja, anchos mayores a 100m. Las características del ancho de inundación son similares a las de otros escenarios simulados, donde la concentración también es alta, evidenciándose que, en general, las concentraciones altas producen anchos de mancha más grande, aunque el caudal presente en el caso dado sea el mismo (Figura 7).



## Figura 7

Ancho de la mancha en la parte baja del cauce, con acercamiento a escala 1:2000, para escenario de flujos de lodo 6



## Conclusiones

Los flujos de lodos generados en la quebrada Mijitayo, considerando periodos de retorno de lluvias de 50, 75 y 100 años, recomendados por el RAS para el análisis de canales abiertos, y con concentraciones de sólidos mínimas del 30 %, generan manchas de inundación que superan los 30 m de franja de protección mínima establecida por la norma nacional.

Se decidió trabajar con el modelo de elevación de mayor resolución dado que, los resultados obtenidos son más confiables, aunque ello conlleve un mayor costo computacional. De esta forma, el software utilizado tiene un campo de análisis más amplio ya que, por ser mejor la resolución, se toma características del sector, como, por ejemplo, en las zonas forestales a manera de barrera topográfica, el cauce se lo encuentra trazado con mayor claridad, lo que le permite al modelo abarcar zonas más amplias y analizar un volumen que está en el orden de las decenas de miles de metros cúbicos.

La topografía del terreno generada por las imágenes satelitales y el software específico, presenta pendientes pronunciadas en la zona alta y media de la quebrada, lo que hace que estas zonas sean susceptibles a deslizamiento cuando la saturación de agua en los suelos sea alta. Los posibles deslizamientos pueden depositar material sólido, constituyendo así un flujo de lodos.

Para los periodos de retorno de lluvia determinados (50, 75 y 100 años, según RAS) y, considerando las características hidrológicas y geomorfológicas de la microcuenca de la quebrada Mijitayo, se pudo calcular volúmenes máximos de agua correspondientes a 51900 m<sup>3</sup>, 84.800 m<sup>3</sup> y 98.200 m<sup>3</sup>, respectivamente.

Según la bibliografía existente, se encontró que los valores de concentración típica de sólidos en los flujos están entre el 30 % y el 60 %, siendo común su estimación



en volumen. Teniendo en cuenta los valores del volumen de agua depositados y los porcentajes de concentración mencionados, se modeló volúmenes de flujo-sólido desde  $50.000 \text{ m}^3$  como valor mínimo y, de  $250.000 \text{ m}^3$  como valor máximo de la mezcla, considerando la cantidad en la que el volumen de agua puede incrementarse con los sólidos para establecer el flujo total de lodos.

Para las modelaciones con TITAN 2F, se estableció, en un escenario evaluado inicialmente, que para un recorrido total de 13.3 minutos con periodos de almacenamiento de información cada 50 segundos de recorrido del flujo, se alcanzaba a cubrir la zona de estudio. Finalmente, se concluyó analizando las corridas del modelo preliminares, que un tiempo de recorrido de 11.7 minutos, era suficiente para abarcar la zona de estudio de la quebrada, tiempo con el cual se hizo las modelaciones definitivas.

Con los volúmenes de agua y lodos establecidos, se pudo establecer un espesor de flujo de lodos máximo de 4.5m de altura, que es bastante grande, si se considera la altura de una vivienda típica; este se presenta al inicio de la cuenca, donde afortunadamente no hay mucha intervención humana. De igual manera, presiones superiores a  $50000 \text{ Pa}$  ( $50 \text{ kPa}$ ), que son las que pueden afectar notablemente las estructuras de viviendas, solo aparecen en la parte alta de la cuenca.

Las manchas de inundación generadas en los diferentes escenarios superan los 30m, abarcando valores máximos mayores a 100m en la zona baja de la quebrada, correspondientes al sector de la planta de tratamiento de agua potable de EMPOPASTO en el barrio Mijitayo.

Los eventos máximos de inundación obedecen a la concentración máxima de sólidos. Se puede observar que, en escenarios donde aumenta el caudal de agua y la concentración de sólidos es baja, los anchos de inundación son similares. Sin embargo, cuando el caudal aumenta y la concentración de sólidos es máxima, el incremento del ancho de la mancha de inundación es notable.

Como es de prever, el escenario de mayor amenaza sería el de volumen más alto para un periodo de retorno de 100 años ( $250.000 \text{ m}^3$ ) y una concentración alta de sólidos (60%), ya que producirá presiones mayores a  $90 \text{ kPa}$ , manchas de inundación superiores a los 100m y, espesores de flujo de lodo mayores a 3.0m, en la parte baja de la quebrada Mijitayo, entrando a la ciudad de Pasto. Esto es bastante importante en el momento de planificar el ordenamiento territorial, teniendo en cuenta que, el ancho de inundación determinada, la altura de lodos y la presión dinámica, causarán daños en las estructuras que se ubiquen o que están ubicadas en estas zonas.





## Referencias

- Insuasty, J. E. (2012). Dinámica de flujo de lodos. *Revista UNIMAR*, (60), 43-54.
- Narváez, C. y Rosero, N. M. (2005). *Modelamiento del control topográfico ejercido por el Valle de Atriz sobre los flujos de lodo provenientes de la quebrada Mijitayo* [Tesis de Pregrado, Universidad de Nariño]. <https://fdocuments.co/amp/document/modelamiento-del-control-topogrfrico-ejercido-.html>
- Ortiz, A. (2012). *Distribución espacial y análisis de riesgo relacionado a flujos piroclásticos y lahares provenientes de la actividad eruptiva del volcán Colima* [Tesis de Pregrado, Universidad Autónoma San Luís de Potosí, México]. <http://ciep.ing.uaslp.mx/geologia/tesis/85201418226.pdf>. 2012
- Resolución 0330 de 2017. (2017, 8 de junio). Reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico. <https://minvivienda.gov.co/normativa/resolucion-0330-2017-0#:~:text=Por%20la%20cual%20se%20adopta,2005%20y%202320%20de%202009>
- Suárez, J. (2009). *Deslizamientos Volumen 1: Análisis geotécnico*. Universidad Industrial de Santander.