UNIVERSIDAD EAFIT

SIATA

Área Metropolitana Valle de Aburrá

SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA







Informe mensual de actividades

Anexo WP1.2.5 Modelación de avenidas torrenciales

Diciembre de 2025

Contrato

CCT 261 de 2025

Contenido

Introducción . . . 2
Área de estudio inicial . . . 2
WP1.2.5 Priorización de cuencas . . . 4
Metodología . . . 4
Variables consideradas . . . 6
Análisis Multicriterio con lógica difusa . . . 9
Resultados . . . 10
Discusión y conclusiones . . . 14
WP1.2.5 Modelación de Avenidas Torrenciales . . . 15
Metodología . . . 15
Resultados . . . 19
Discusión y conclusiones . . . 27
WP1.2.5 Diseño de Sensores . . . 29
Metodología . . . 29
Caracterización Raspberry Shake . . . 30
Implementación de algoritmos de procesamiento . . . 32
Conexión y envío de datos al servidor . . . 34
Resultados . . . 36
Implementación de algoritmos de detección de avenidas torrenciales . . . 54
Conexión VPN a la red interna . . . 56
Discusión y conclusiones . . . 59

Referencias 61



WP1

Observatorio de **amenazas y riesgos**

Este WP tiene como objetivo generar conocimiento que sirva como insumo para la alerta temprana y la toma de decisiones a partir del monitoreo, análisis, modelación y generación de alarmas y alertas sobre múltiples componentes físicos, a través de actividades de investigación y operaciones que permitan avanzar en la caracterización, entendimiento, seguimiento y pronóstico de múltiples amenazas ambientales y evaluación de riesgos asociados.

Se avanzará en la consolidación del observatorio de múltiples amenazas, el cual es fundamental dada la variedad de amenazas que pueden impactar la sociedad y el territorio. Para este fin, el WP1 está constituido por tres grandes grupos de actividades: WP1.1 - Caracterización y monitoreo de variables y procesos asociados con las amenazas. El grupo WP1.2 - Modelación y pronóstico de la calidad del aire, las lluvias y otros fenómenos asociados con las amenazas. Por último, el grupo WP1.3 – Información para la gestión y herramientas operacionales que permitan la consolidación del observatorio de amenazas y riesgos en su primera fase, para el apoyo a emergencias, se enfoca en la aplicación (transferencia) de esta investigación a las operaciones para generar alertas y apoyar la gestión, a través de la consolidación de un observatorio multi-amenaza.

Aclaración: *Esta actividad se orienta a la modelación de avenidas torrenciales, pero también busca generar los insumos necesarios para la implementación de un piloto que, además de modelar, permita monitorear las diferentes etapas asociadas a esta amenaza, incluyendo los procesos vinculados a movimientos en masa y a aspectos geológicos–geotécnicos. Con ello se pretende consolidar herramientas técnicas que fortalezcan la identificación de zonas de mayor riesgo y respalden la toma de decisiones informadas en el territorio.*

Introducción

Una avenida torrencial se entiende como un flujo rápido que transita por cauces permanentes o intermitentes con altas pendientes longitudinales, originado generalmente por lluvias intensas, y que transporta una mezcla de agua y sólidos en distintas proporciones(Servicio Geológico Colombiano and Pontificia Universidad Javeriana, 2021). El material sólido puede provenir tanto de las laderas como del lecho del cauce, y se deposita cuando el flujo alcanza zonas de menor pendiente, generando acumulaciones a lo largo de su trayectoria (Servicio Geológico Colombiano and Pontificia Universidad Javeriana, 2021). Estos eventos constituyen una de las amenazas hidrometeorológicas más destructivas, con un elevado potencial de pérdida de vidas humanas y daños económicos, especialmente en regiones tropicales y montañosas como Colombia (Aristizábal et al., 2020). Su ocurrencia repentina, gran energía y capacidad de transporte de material hacen que representen un riesgo considerable para las comunidades asentadas en zonas de influencia, lo que plantea la necesidad de fortalecer los sistemas de monitoreo, alerta y gestión del riesgo.

La línea de investigación aquí desarrollada se centra en la identificación y análisis de cuencas con susceptibilidad a la ocurrencia de avenidas torrenciales, orientándose a la selección de cinco cuencas que sirvan como base para elegir una cuenca piloto destinada al diseño de estrategias de monitoreo y alerta temprana. Para ello, se priorizaron aquellas cuencas que ya cuentan con algún Sistema de Alerta Temprana Comunitario (SATC) activo para inundaciones o multiamenaza, de manera que se facilite la apropiación social y la integración de la comunidad en el proceso de gestión del riesgo. El marco metodológico propuesto se articula en tres fases complementarias.

La primera fase corresponde a la priorización de cuencas, mediante la aplicación de un análisis multicriterio que integra variables geomorfológicas, hidrometeorológicas, sociales y de exposición, con el fin de establecer un ranking preliminar que permita identificar aquellas cuencas con mayor potencial torrencial.

En la segunda fase, correspondiente a la modelación física y empírico–numérica, se inicia con la determinación de las masas potencialmente inestables mediante modelos físicos de estabilidad como SHALSTAB y TRIGRS, empleados en la línea de investigación de movimientos en masa de tipo húmedo. Una vez identificadas estas zonas críticas, se procede a modelar la propagación de los materiales que podrían originar una avenida torrencial, utilizando herramientas empírico–numéricas como r.avaflow y Flow-R. Estos modelos, alimentados con insumos como modelos digitales de elevación, delimitación de áreas fuente y parámetros hidrometeorológicos, permiten generar escenarios de susceptibilidad espacial y mapas de amenaza, a partir de los cuales se evalúa la posible afectación sobre la población y la infraestructura. Como resultado conjunto de estas dos fases se obtiene la selección de la cuenca piloto, que será objeto de instrumentación detallada.

Finalmente, la tercera fase contempla el diseño e implementación de una red de sensores, instalada tanto en la zona fuente como en la zona de tránsito de la cuenca seleccionada, con énfasis en los sectores de mayor riesgo y en aquellas áreas más expuestas a la ocurrencia de avenidas torrenciales. Este escenario constituye la base para un análisis detallado y la propuesta de instrumentación. La red permitirá registrar en tiempo real variables hidrometeorológicas y geotécnicas clave, con el propósito de generar alertas tempranas oportunas y fortalecer la capacidad de respuesta y prevención de la comunidad frente a este tipo de eventos.

Área de estudio inicial

El análisis de avenidas torrenciales se fundamenta en la capacidad de respuesta de una cuenca hidrográfica ante eventos de lluvia y en el aporte de sedimentos, por lo que es importante definir la unidad territorial que influye en los comportamientos hidrológicos de los cauces. Este estudio aborda un análisis regional de las cuencas tributarias del río Aburrá, considerando aquellas con influencia directa en los nueve municipios del Valle de Aburrá y en el Distrito de Medellín, en la Figura 1 se puede ver el área de estudio.

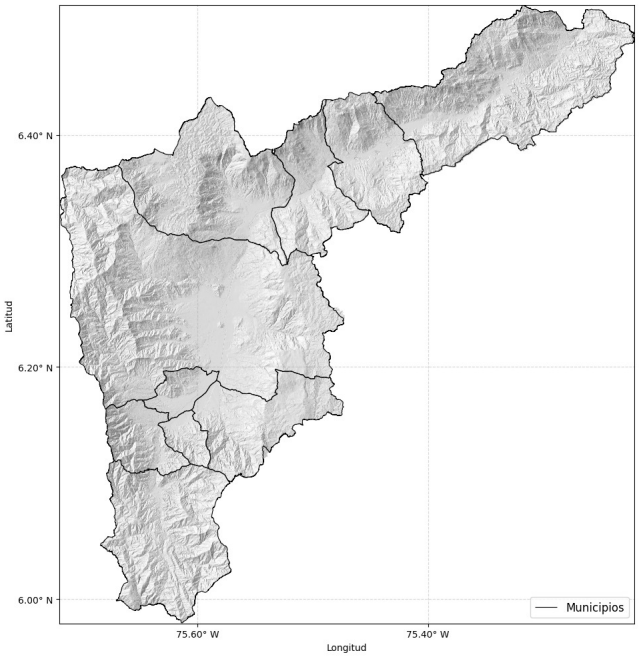


Figura 1. Área de estudio inicial.

WP1.2.5 | Priorización de cuencas

Metodología

La metodología diseñada integra un análisis multicriterio que considera variables morfométricas, hidrometeorológicas, de exposición y antecedentes de eventos, priorizando aquellas cuencas con mayor potencial de generar impactos y con mayor disponibilidad de datos históricos en sus sensores. Con ello, se busca facilitar la apropiación social, realizar la selección dentro del Valle de Aburrá y, a partir de las cuencas priorizadas, efectuar modelaciones en la zona de tránsito, así como un análisis del grado de exposición de las estructuras, para finalmente definir la cuenca piloto que será instrumentada.

El proceso inició de la mano con el equipo Social con la identificación de cuencas que ya contaban con algún Sistema de Alerta Temprana Comunitario (SATC) o sistema de instrumentación, ya fuera por inundación o por multiamenaza, con el fin de facilitar la apropiación social y el trabajo comunitario en fases posteriores. Se seleccionaron 52 cuencas distribuidas a lo largo del Valle de Aburrá, las cuales constituyen la base para la aplicación de la metodología de priorización. Adicionalmente, se realizaron visitas a las unidades de gestión del riesgo de cada municipio, con el propósito de recopilar información sobre aquellas cuencas que, aun sin contar con procesos comunitarios avanzados, presentan recurrencia de crecientes súbitas o han registrado históricamente eventos de avenidas torrenciales. De esta manera, se garantiza que el proceso de priorización no se limite únicamente a las cuencas con SATC existentes, sino que incorpore también el conocimiento territorial y las experiencias locales de gestión del riesgo.

En la Figura 2 se puede observar todo el proceso metodológico propuesto para la selección de la cuenca y piloto de instrumentación.

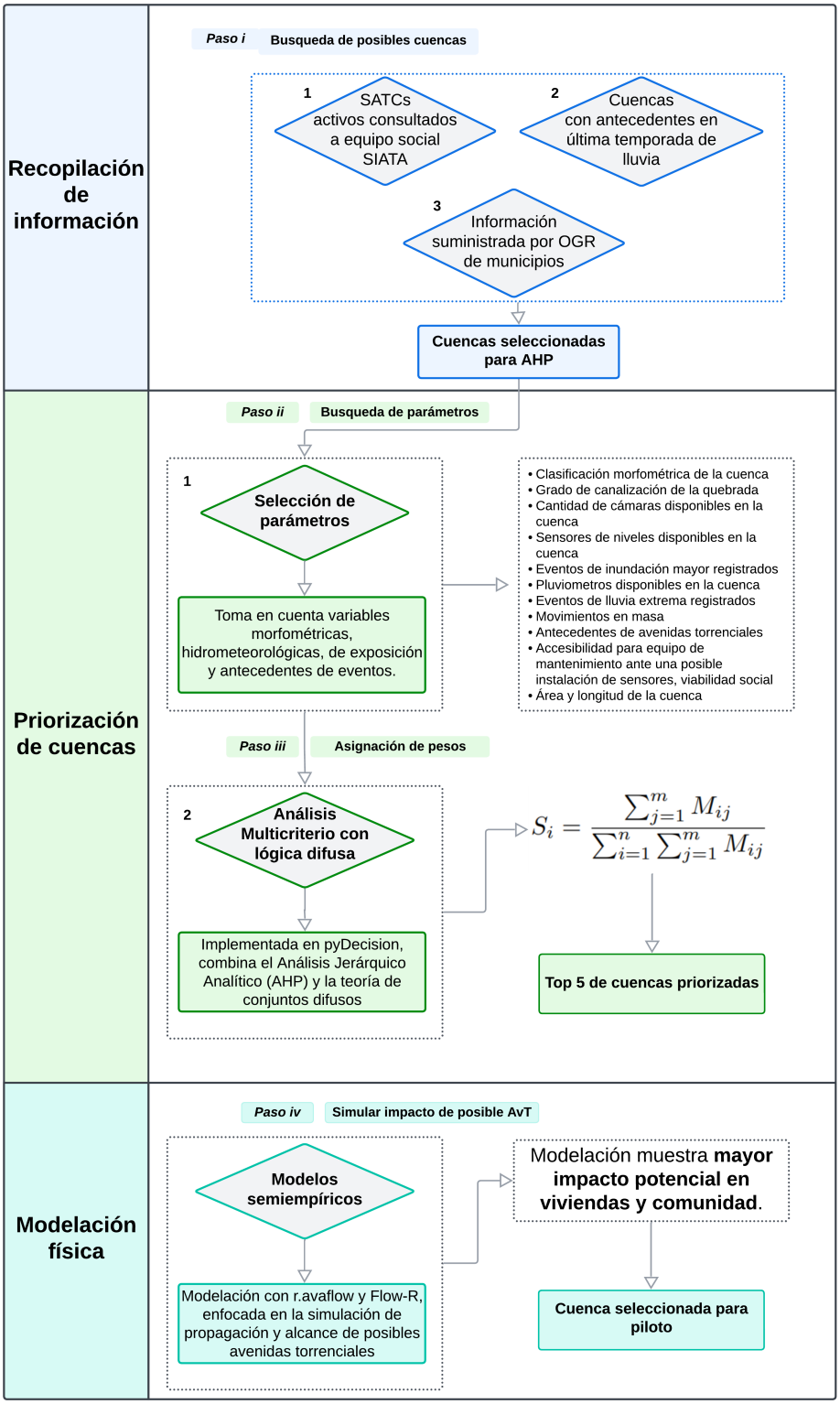


Figura 2. Metodología para priorización de cuencas torrenciales.

Variables consideradas

Para priorizar las cuencas, se aplicó un primer filtro a partir del análisis multicriterio que considera un total de 11 variables evaluadas para cada cuenca (Tabla 1).

Tabla 1. Variables consideradas en el análisis multivariado para la priorización de cuencas.

Variable	Descripción
TF	Clasificación torrencial según parámetros morfométricos presentados en la vigencia pasada.
CN	Grado de canalización.
CM	Número de cámaras
N	Número de niveles disponibles
CIM	Número de eventos de inundación mayor registrados.
P	Número de pluviómetros ubicados a menos de 1 km del nivel
CEEL	Número de eventos extremos de lluvia medidos en pluviómetros
MM	Existencia de movimientos en masa
AVT	Existencia de eventos torrenciales
LOG	Accesibilidad (vías, caminos, estaciones, torres eléctricas) y social
ÁREA	Tamaño de la cuenca y longitud de cuenca

Clasificación torrencial según análisis morfométrico (TF):

Esta clasificación fue desarrollada en el marco de la presente línea de investigación durante la vigencia anterior, a partir del análisis morfométrico de las cuencas. Para el presente análisis jerárquico, cada categoría se valoró de la siguiente forma:

1: Inundación.

2: Inundación de escombros.

3: Flujos de escombros no granulares.

4: Flujos de escombros granulares.

La asignación de estos valores se debe a que los flujos de escombros granulares corresponden a fenómenos monofásicos con comportamiento reológico no newtoniano, caracterizados por altas concentraciones de sólidos y elevada energía cinética, lo que incrementa significativamente su capacidad destructiva. Por otro lado, las inundaciones de escombros y los flujos no granulares presentan menores concentraciones sólidas o una dinámica más dispersa, lo que reduce su energía.

Grado de canalización (CN):

Esta variable evalúa el grado de intervención antrópica en los cauces principales de las cuencas, bajo el criterio de que un cuerpo de agua más cercano a su estado natural favorece la conservación de procesos hidrológicos y geomorfológicos propios, lo que permite un comportamiento más representativo en los análisis morfodinámicos. La asignación de valores se definió de la siguiente manera:

1: Cuerpos de agua totalmente canalizados.

2: Cuerpos de agua parcialmente canalizados.

3: Cuerpos de agua sin ningún tramo canalizado (condición totalmente natural).

La evaluación del estado de canalización se realizó por medio de imágenes satelitales de SAS Planet y Google Earth, identificando tramos de encauzamiento artificial, además de fotografías en noticias.

Cantidad de cámaras (CM):

Esta variable contabiliza únicamente las cámaras activas a la fecha ubicadas dentro de la cuenca, ya sean de medición de nivel o de monitoreo de algún proceso.

Niveles y Pluviometros

Para las variables descritas a continuación, en sus respectivos eventos extremos, se realizó un conteo (frecuencia) de eventos en escala mensual, para posteriormente obtener un promedio global de ocurrencia por punto, la normalización se realizó a partir de este promedio global.

Sensores de niveles disponibles (N) y eventos de inundación mayor (CIM):

Corresponde al producto entre la cantidad de sensores de nivel instalados en la cuenca y la antigüedad, en años, del sensor más antiguo. El objetivo no era únicamente contabilizar el número de niveles disponibles, sino también tener en cuenta el tiempo de operación de estos, ya que un mayor histórico de datos significa una ventaja para futuros procesos de modelación hidrológica e hidráulica. Para la cantidad de instrumentos de nivel (N) se realizó una normalización logarítmica min-max, para esto se utilizó la siguiente ecuación empírica:

$$x_{\text{norm}} = 1 + 3 \cdot \frac{\ln(x) - \ln(x_{\text{mín}})}{\ln(x_{\text{máx}}) - \ln(x_{\text{mín}})} \tag{1}$$

Para el procesamiento de los eventos de inundación mayor del nivel se aplicó la siguiente ecuación empírica:

$$x_{\text{norm}} = 1 + 3 \cdot \frac{\ln(x + \epsilon) - \ln(x_{\text{mín}} + \epsilon)}{\ln(x_{\text{máx}} + \epsilon) - \ln(x_{\text{mín}} + \epsilon)}$$

donde x representa el valor original de la variable, $x_{\text{mín}}$ corresponde al valor mínimo positivo observado en el conjunto de datos, y $x_{\text{máx}}$ es el valor máximo observado. El parámetro de ajuste ϵ se utiliza para manejar la presencia de ceros: si la variable contiene valores nulos, como en el caso de CIM, se adopta $\epsilon = 1$ para emplear $\ln(x + 1)$ y así evitar problemas de cálculo. Esta transformación permite reducir la asimetría de los datos, controlar el efecto de valores extremos y asegurar que los mínimos se escalen a 1,00 y los máximos a 4,00, manteniendo una distribución proporcional entre los valores intermedios.

Pluviómetros disponibles (P) y Eventos de Lluvia Extrema (CEEL):

Esta variable se obtiene multiplicando la cantidad de pluviómetros ubicados a menos de 1 km de distancia de un sensor de nivel por la antigüedad, en años, del pluviómetro más antiguo dentro de ese rango. El propósito es identificar no solo la densidad de pluviómetros en áreas críticas de monitoreo, sino también la calidad temporal de la información disponible. Si el sensor más cercano sobrepasaba el kilómetro de umbral, se penalizaban su peso proporcional a la distancia extra. Para la cantidad de pluviómetros (P) se realizó una normalización logarítmica min-max con la siguiente ecuación empírica:

$$x_{\text{norm}} = 1 + 3 \cdot \frac{\ln(x) - \ln(x_{\text{mín}})}{\ln(x_{\text{máx}}) - \ln(x_{\text{mín}})} \tag{2}$$

Para el procesamiento de los eventos de lluvia extrema se aplicó la siguiente ecuación empírica como en CIM:

$$x_{\text{norm}} = 1 + 3 \cdot \frac{\ln(x + \epsilon) - \ln(x_{\text{mín}} + \epsilon)}{\ln(x_{\text{máx}} + \epsilon) - \ln(x_{\text{mín}} + \epsilon)}$$

donde x representa el valor original de la variable, $x_{\text{mín}}$ corresponde al valor mínimo positivo observado en el conjunto de datos, y $x_{\text{máx}}$ es el valor máximo observado. El parámetro de ajuste ϵ se utiliza para manejar la presencia de ceros. En este caso para variables sin ceros, como CEEL, se utiliza $\epsilon = 0$, aplicando directamente $\ln(x)$. Esta transformación permite reducir la asimetría de los datos, controlar el efecto de valores extremos y asegurar que los mínimos se escalen a 1,00 y los máximos a 4,00, manteniendo una distribución proporcional entre los valores intermedios.

Movimientos en masa (MM):

Esta variable busca identificar si la cuenca presenta un escenario de multiamenaza, considerando que la ocurrencia previa de movimientos en masa constituye un indicador clave del potencial de aporte sólido a futuros eventos torrenciales. Se asigna un valor de 1 cuando se confirma la existencia de movimientos en masa y 0 cuando no se registran. En los casos donde la calidad o disponibilidad de imágenes satelitales no permite verificar la presencia se asigna un valor de 0.5.

Antecedentes de avenidas torrenciales (AVT):

Esta variable evalúa la existencia de registros históricos que evidencian la ocurrencia de eventos torrenciales en la cuenca, tales como noticias, reportes técnicos, entre otros. Se asigna un valor de 1 cuando la información confirma la ocurrencia previa de estos eventos y 0 cuando no existen antecedentes documentados. La inclusión de esta variable permite priorizar cuencas con historial de actividad torrencial comprobada, ya que este antecedente incrementa la probabilidad de recurrencia.

Lógistica (LOG):

Esta variable se relaciona con los aspectos logísticos necesarios para la instalación, operación y mantenimiento de la instrumentación en la cuenca. La accesibilidad se evaluó a partir de la facilidad de ingreso a

la zona fuente y a los tramos de interés, considerando la existencia de vías, caminos o senderos que permitan el transporte de equipos y personal técnico. Adicionalmente, cada cuenca fue valorada por el equipo social de SIATA, teniendo en cuenta factores asociados a las comunidades, aspectos sociales, condiciones de accesibilidad y observaciones complementarias. La valoración se realiza en una escala de 1 a 4, donde valores más altos corresponden a cuencas con mejor acceso, lo que facilita las actividades de instalación.

Área de la cuenca y Longitud (AREA):

Esta variable hace referencia a la extensión superficial total de la cuenca. Su valoración se fundamenta en que cuencas más pequeñas presentan una mayor propensión a generar procesos torrenciales destructivos (Ilinca, 2021), donde la combinación de áreas reducidas y altos valores del índice de Melton se asocia con la ocurrencia de flujos de detritos (DF) o flujos de detritos e inundaciones combinadas (DFD). Por el contrario, cuencas de gran tamaño tienden a disipar la energía del escurrimiento y suelen estar asociadas principalmente a inundaciones (F). En consecuencia, dentro del proceso de priorización se asignan valores más altos a cuencas de menor área y longitud, dado que representan escenarios de mayor amenaza torrencial y, por tanto, requieren una atención prioritaria en términos de monitoreo e instrumentación.

Para los valores de área y longitud, la normalización utilizada se definió de forma empírica a partir de los límites establecidos por Ilinca (2021), con el objetivo de ajustar los valores en una escala $[1, 4]$. Este procedimiento penaliza principalmente a las cuencas muy grandes, donde predomina el riesgo de inundación, asignándoles valores más bajos dentro de la escala. Los límites definidos fueron: $A_{\text{ideal}} = 1{,}1\,\text{km}^2$, $A_{\text{máx}} = 8{,}2\,\text{km}^2$, $P_{\text{obj,area}} = 0{,}51$, $L_{\text{ideal}} = 1{,}7\,\text{km}$, $L_{\text{máx}} = 5{,}2\,\text{km}$ y $P_{\text{obj,len}} = 0{,}857$. A partir de estos parámetros, los coeficientes de penalización calculados fueron: $\alpha \approx 0{,}1353$ y $\beta \approx 0{,}0475$.

$$V_A = 1 + \frac{3}{1 + \alpha \cdot \text{máx}(0, A - A_{\text{ideal}})} \tag{3}$$

$$V_L = 1 + \frac{3}{1 + \beta \cdot \text{máx}(0, L - L_{\text{ideal}})} \tag{4}$$

$$V_{\text{AHP}} = 1 + \frac{3}{1 + \alpha \cdot \text{máx}(0, A - A_{\text{ideal}}) + \beta \cdot \text{máx}(0, L - L_{\text{ideal}})} \tag{5}$$

Análisis Multicriterio con lógica difusa

Para la asignación de pesos a las variables anteriores, se optó por seguir una metodología de análisis jerárquico con lógica difusa, implementada en pyDecision, desarrollada por Pereira et al. (2024). Este enfoque estructura el proceso de toma de decisiones mediante la combinación del Análisis Jerárquico Analítico (AHP) y la teoría de conjuntos difusos, permitiendo manejar la incertidumbre en los juicios expertos a través de números triangulares difusos. Tras definir una jerarquía de criterios y alternativas, se construye una matriz de comparación por pares donde cada elemento a_{ij} se representa como un número triangular difuso (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}). Para cada alternativa, se calcula el valor sintético difuso siguiendo la ecuación:

$$S_i = \frac{\sum_{j=1}^{m} M_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} M_{ij}} \tag{6}$$

donde M_{ij} denota la evaluación triangular difusa de la alternativa i respecto al criterio j. Finalmente, los pesos obtenidos se normalizan y permiten priorizar alternativas de manera robusta, integrando tanto información cuantitativa como cualitativa con fundamento matemático sólido y adecuado para su implementación directa en ambientes de incertidumbre. Para evaluar si los pesos obtenidos son consistentes, la librería permite el uso de el índice de Consistencia (Consistency Ratio, CR). En el método AHP es una medida que evalúa la coherencia de las comparaciones pareadas realizadas por el tomador de decisiones. Este índice se calcula como la razón entre el Índice de Consistencia (CI) de la matriz de comparación y un Índice Aleatorio (RI), que representa la consistencia esperada de matrices generadas al azar. Un CR menor o igual al 0.10 indica que las comparaciones son suficientemente consistentes y coherentes, por lo que los resultados del análisis son confiables.

Resultados

A partir de las 11 variables analizadas, se construyo una matriz normalizada de parámetros para el análisis jerárquico, esta se puede visualizar en la Figura 3. Eventualmente, estos valores se usan con los pesos encontrados mediante el análisis AHP con lógica difusa.

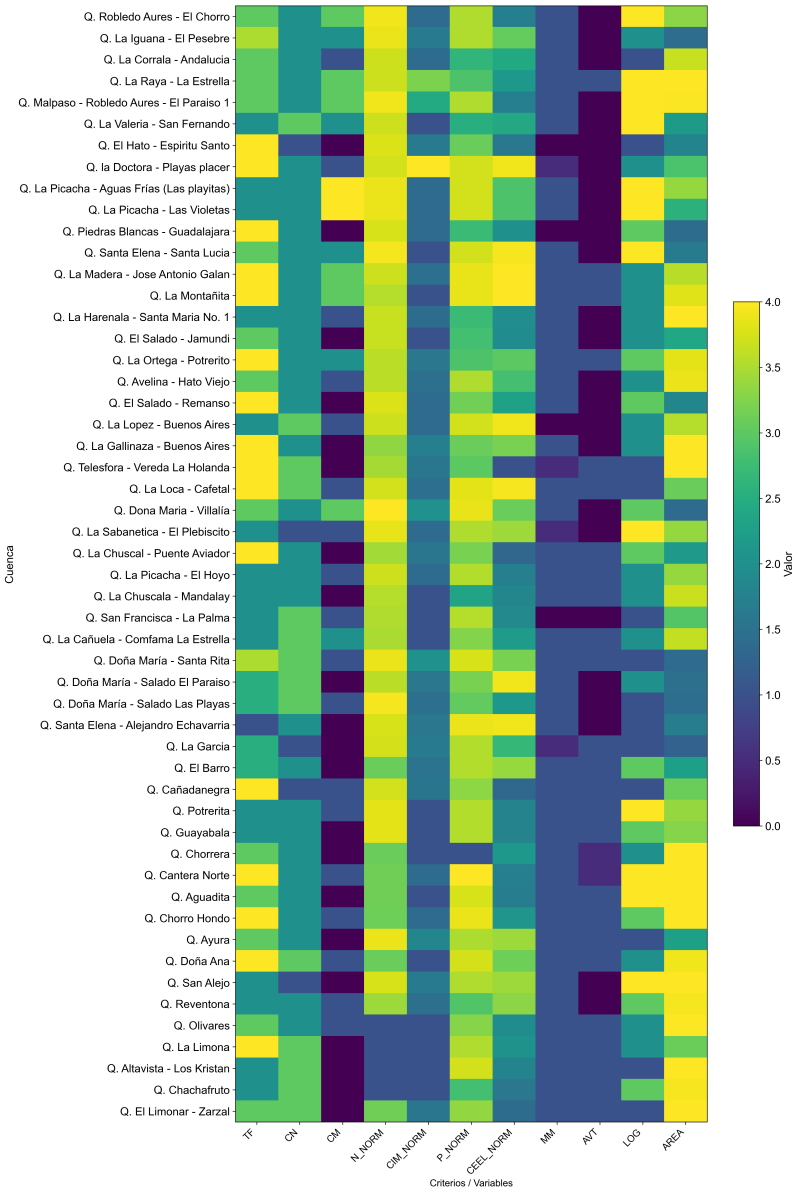


Figura 3. Matriz de variables.

A partir de la matriz de comparación por pares mostrada en la Figura 4, se establecieron las relaciones de importancia relativa entre los criterios evaluados. A partir de esta matriz, mediante el uso de `PyDecision`, se calcularon los pesos normalizados para cada variable.

Los resultados indican que la mayor influencia corresponde a los eventos de inundación mayor (`CIM_NORM`), seguidos por los eventos extremos en intensidad y duración de lluvia registrados en pluviómetros cercanos (`CEEL_NORM`). En contraste, la disponibilidad de cámaras (`CM`) presentó la menor ponderación.

La Tabla 2 presenta el detalle de los pesos expresados en porcentaje para cada variable. Adicionalmente, se obtuvo un valor de $\mathbf{CR = 0.05}$, lo que confirma que la matriz de comparación por pares es consistente

y que los valores establecidos minimizan el sesgo en el proceso de priorización.

	TF	CN	CM	N_NORM	CIM_NORM	P_NORM	CEEL_NORM	MM	AVT	LOG	AREA
TF	(1, 1, 1)	(1, 1.5, 2)	(2, 2.5, 3)	(1, 1.5, 2)	(0.5, 0.67, 1)	(1, 1.5, 2)	(0.5, 0.67, 1)	(1, 1.5, 2)	(1, 1.5, 2)	(0.5, 0.67, 1)	(0.5, 0.67, 1)
CN	(0.5, 0.67, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1.5, 2)	(1, 1.5, 2)	(0.5, 0.67, 1)	(1, 1.5, 2)	(0.5, 0.67, 1)	(1, 1.5, 2)	(1, 1.5, 2)	(0.5, 0.67, 1)	(0.5, 0.67, 1)
CM	(0.33, 0.5, 1)	(0.5, 0.67, 1)	(1, 1, 1)	(0.5, 0.67, 1)	(0.33, 0.5, 0.67)	(0.5, 0.67, 1)	(0.33, 0.5, 0.67)	(0.5, 0.67, 1)	(0.5, 0.67, 1)	(0.33, 0.5, 0.67)	(0.33, 0.5, 0.67)
N_NORM	(0.5, 0.67, 1)	(0.5, 0.67, 1)	(1, 1.5, 2)	(1, 1, 1)	(0.33, 0.5, 0.67)	(0.5, 0.67, 1)	(0.33, 0.5, 0.67)	(0.5, 0.67, 1)	(0.5, 0.67, 1)	(0.33, 0.5, 0.67)	(0.33, 0.5, 0.67)
CIM_NORM	(1, 1.5, 2)	(1, 1.5, 2)	(1.5, 2, 2.5)	(1.5, 2, 2.5)	(1, 1, 1)	(1.5, 2, 2.5)	(1, 1.5, 2)	(1.5, 2, 2.5)	(1.5, 2, 2.5)	(1, 1.5, 2)	(1, 1.5, 2)
P_NORM	(0.5, 0.67, 1)	(0.5, 0.67, 1)	(1, 1.5, 2)	(1, 1.5, 2)	(0.5, 0.67, 1)	(1, 1, 1)	(0.5, 0.67, 1)	(1, 1.5, 2)	(1, 1.5, 2)	(0.5, 0.67, 1)	(0.5, 0.67, 1)
CEEL_NORM	(1, 1.5, 2)	(1, 1.5, 2)	(1.5, 2, 2.5)	(1.5, 2, 2.5)	(0.5, 0.67, 1)	(1.5, 2, 2.5)	(1, 1, 1)	(1.5, 2, 2.5)	(1.5, 2, 2.5)	(1, 1.5, 2)	(1, 1.5, 2)
MM	(0.5, 0.67, 1)	(0.5, 0.67, 1)	(1, 1.5, 2)	(1, 1.5, 2)	(0.5, 0.67, 1)	(0.5, 0.67, 1)	(0.5, 0.67, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1.5, 2)	(0.5, 0.67, 1)	(0.5, 0.67, 1)
AVT	(0.5, 0.67, 1)	(0.5, 0.67, 1)	(1, 1.5, 2)	(1, 1.5, 2)	(0.5, 0.67, 1)	(0.5, 0.67, 1)	(0.5, 0.67, 1)	(0.5, 0.67, 1)	(1, 1, 1)	(0.5, 0.67, 1)	(0.5, 0.67, 1)
LOG	(1, 1.5, 2)	(1, 1.5, 2)	(1.5, 2, 2.5)	(1.5, 2, 2.5)	(0.5, 0.67, 1)	(1.5, 2, 2.5)	(0.5, 0.67, 1)	(1.5, 2, 2.5)	(1.5, 2, 2.5)	(1, 1, 1)	(1, 1.5, 2)
AREA	(1, 1.5, 2)	(1, 1.5, 2)	(1.5, 2, 2.5)	(1.5, 2, 2.5)	(0.5, 0.67, 1)	(1.5, 2, 2.5)	(0.5, 0.67, 1)	(1.5, 2, 2.5)	(1.5, 2, 2.5)	(0.5, 0.67, 1)	(1, 1, 1)

Figura 4. Matriz de números triangulares.

Tabla 2. Pesos normalizados de las variables obtenidos con `PyDecision`.

Variable	Peso (%)
CIM_NORM	13.4
CEEL_NORM	12.5
LOG	11.7
AREA	11.0
TF	9.5
CN	8.5
P_NORM	8.0
MM	7.5
AVT	7.0
N_NORM	5.7
CM	5.3

Con la asignación de pesos obtenida a partir de la matriz de comparación por pares y teniendo la matriz mencionada en la Figura 3, se realiza el calculo para la priorización. En la Tabla 3 se presentan las 10

primeras cuencas priorizadas resultantes del proceso de selección. Estas cuencas corresponden a aquellas con los puntajes más altos en el análisis multivariado.

Tabla 3. Top 10 de cuencas priorizadas según los puntajes obtenidos en el análisis AHP.

Rank	Cuenca	AHP_Score
1	Q. La Raya - La Estrella	0.7642
2	Q. La Madera - Jose Antonio Galan	0.7268
3	Q. La Montañita	0.7132
4	Q. La Ortega - Potrerito	0.6978
5	Q. Doña Ana	0.6838
6	Q. La Loca - Cafetal	0.6821
7	Q. La Doctora - Playas placer	0.6718
8	Q. Chorro Hondo	0.6635
9	Q. Malpaso - Robledo Aures	0.6630
10	Q. Cantera Norte	0.6552

Además, con el propósito de visualizar de manera integral y dinámica los resultados de la priorización de cuencas, se desarrolló un tablero interactivo en Power BI (Figura 5). En la parte superior izquierda se incluyen los criterios considerados en el análisis multicriterio, mientras que en la sección central se disponen dos mapas dinámicos asociados a las variables con mayor peso en el AHP: eventos extremos de lluvia y eventos de inundación mayor. Estos mapas permiten identificar de forma detallada las cuencas con mayor frecuencia en dichos eventos. Como apoyo visual estático, se incorporó la variable de logística, también relevante en el análisis, junto con el mapa de ranking final, el cual espacializa las cuencas priorizadas según su clasificación en las categorías Top 5, Top 10, Top 20 y Top 52. Finalmente, en la parte derecha del tablero se incluyó un gráfico de barras dinámico, que presenta para cada cuenca los valores obtenidos en cada criterio; al seleccionar una cuenca específica, el tablero realiza un zoom out en los mapas de eventos extremos de lluvia y de inundación mayor, facilitando así una exploración detallada y comparativa de la información.

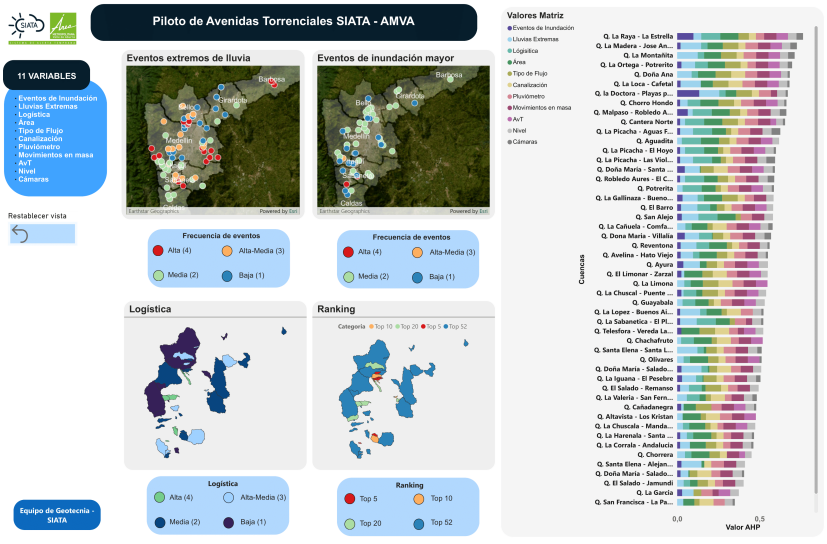


Figura 5. Tablero dinámico en Power BI para la visualización de resultados de priorización de cuencas.

Discusión y conclusiones

Este informe presenta una metodología para la priorización de cuencas en el Valle de Aburrá en el marco del piloto de avenidas torrenciales. Los resultados obtenidos muestran la priorización de 47 cuencas previamente seleccionadas, con base en la existencia de Sistemas de Alerta Temprana Comunitarios (SATC), esquemas de instrumentación para la medición de lluvia y nivel, cámaras de monitoreo de quebradas, además de parámetros morfométricos y criterios logísticos. La metodología planteada constituye la base para la clasificación y selección de cuencas que serán sometidas a modelación hidrológica e hidráulica con el fin de evaluar aspectos relacionados con la exposición y la posible población afectada por flujos torrenciales.

En los resultados preliminares, obtenidos mediante la aplicación de la metodología AHP con lógica difusa y en una reunión con el equipo Social se descar, se estableció un orden de importancia para las cuencas priorizadas. Entre las que mostraron características más críticas se encuentran: La Madera - Jose Antonio Galan, La Montañita, La Raya, La Loca - Cafetal, Chorro Hondo, La Ortega - Potrerito, la Doctora - Playas placer, Malpaso - Robledo Aures, Cantera Norte y Doña Ana, las cuales se perfilan como posibles candidatas prioritarias para análisis más detallados.

Durante la revisión se identificaron inconsistencias en los shapefiles de las cuencas, los cuales fueron corregidos hidrológicamente, asegurando así resultados más confiables.

Adicionalmente, se elaboró un tablero interactivo en Power BI que permite visualizar de forma dinámica las variables priorizadas, en especial los eventos extremos de lluvia y de inundación mayor, así como la logística y el ranking final de cuencas. Esta herramienta facilita la interpretación de resultados y su comunicación a los tomadores de decisión.

WP1.2.5 Modelación de Avenidas Torrenciales

Metodología

Las avenidas torrenciales representan uno de los procesos gravitacionales más destructivos, resultado de la combinación entre la morfología del terreno, la disponibilidad y tipo de materiales movilizables (tanto en las laderas como en los cauces) y las condiciones hidrometeorológicas que favorecen su desencadenamiento (Iverson, 1997; Hungr et al., 2005). La mayoría de las veces, los deslizamientos de tierra actúan como el mecanismo desencadenante principal, ya que movilizan volúmenes significativos de material que pueden transformarse en flujos de lodo o escombros bajo condiciones de alta saturación (Takahashi, 2014; Páez Pedraza, 2025). Estos eventos suelen originarse por lluvias cortas y muy intensas o por precipitaciones moderadas y prolongadas que reducen progresivamente la cohesión de los materiales superficiales (Páez Pedraza, 2025; Chen et al., 2014). Por ello, la evaluación detallada de la amenaza por deslizamientos constituye un paso fundamental en la modelación de avenidas torrenciales, ya que permite estimar la magnitud del volumen potencialmente movilizable y comprender los procesos que conducen desde la inestabilidad inicial hasta la propagación del flujo y su posterior depositación. En esta fase, se busca identificar las zonas fuente, es decir, los sectores del terreno donde pueden generarse o acumularse volúmenes significativos de material susceptible de ser removido.

Posteriormente, la modelación del tránsito permite simular el desplazamiento del flujo a lo largo de la red de drenaje, considerando la morfología del terreno, la pendiente y la energía potencial disponible (Iverson, 1997; Major and Iverson, 1999). Finalmente, la fase de depositación representa la pérdida progresiva de energía y el emplazamiento del material transportado, lo cual posibilita estimar las áreas de acumulación y las posibles zonas de impacto.

Finalmente, la fase de deposición representa la pérdida progresiva de energía y el emplazamiento del material transportado, lo cual permite estimar las áreas de acumulación y las posibles zonas de impacto. Para cuantificar dicho impacto, se realizará la intersección entre la mancha de flujo resultante de la modelación y la cartografía derivada de imágenes satelitales de alta resolución, con el fin de identificar las estructuras, vías o elementos expuestos que podrían verse afectados ante una eventual avenida torrencial. En caso de no disponerse de imágenes satelitales recientes o de resolución suficiente, se recurrirá al uso de imágenes Sentinel-2 mejoradas a 1 m de resolución mediante la herramienta S2DR3 basada en redes neuronales, o a información complementaria proveniente de sobrevuelos o fuentes cartográficas existentes.

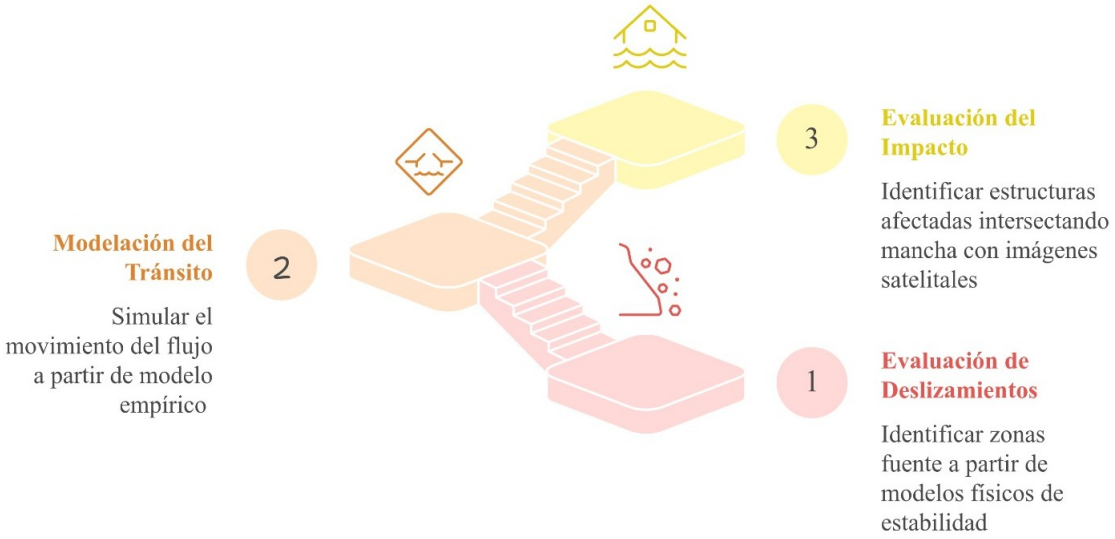


Figura 6. Metodología planteada para modelación de avenidas torrenciales en las 5 cuencas priorizadas.

Disponibilidad de sedimentos

Un aspecto relevante, aunque no siempre determinante, en el desarrollo de avenidas torrenciales es el aporte de sedimentos al flujo, ya que este factor puede condicionar si un flujo de escombros logra consolidarse en una cuenca. Según Cañón et al. (2021), dichos sedimentos pueden provenir de deslizamientos en las laderas o vertientes, de la erosión superficial de las mismas, o bien de la remoción del lecho y las márgenes del drenaje. Para cuantificar los aportes derivados de procesos de inestabilidad asociados a movimientos en masa, resulta fundamental la investigación en Estabilidad de Laderas, en la cual se han aplicado modelos como SHALSTAB y TRIGRS (para mayor información consultar el Anexo técnico: Modelación de movimientos en masa asociados al WP1.2.4 Modelación de movimientos en masa húmedos), que permiten aproximarse a la delimitación de zonas fuente dentro de cada cuenca.

Modelación del tránsito de las avenidas torrenciales

La modelación del tránsito de avenidas torrenciales puede abordarse desde diferentes enfoques, entre los que se destacan los empíricos, hidrodinámicos y de flujo de masa, cada uno con distintos niveles de complejidad y requerimientos de información. Para una priorización inicial de las áreas susceptibles, se recurrirá al modelo empírico Flow-Py, aplicado en las cinco primeras cuencas del ranking. Este modelo, por su simplicidad en los datos de entrada y su eficiencia para identificar zonas potencialmente afectadas, constituye un criterio adicional de gran peso para la selección de la cuenca piloto a instrumentar. Adicionalmente, al estar codificado en Python, Flow-Py ofrece la ventaja estratégica de poder automatizarse para futuras modelaciones, facilitando la actualización de escenarios y la incorporación de nuevas cuencas de manera sistemática y eficiente.

Análisis histórico con imágenes satelitales

Se utilizaron herramientas de teledetección para identificar eventos significativos de avenidas torrenciales y, mediante Street View, realizar un conteo preliminar de las viviendas e infraestructuras potencialmente expuestas dentro de la mancha detectada. Para el evento más relevante, la delimitación se efectuó con apoyo de imágenes históricas de AirBus integradas en Google Earth Pro y de imágenes Sentinel mejoradas a 1 m de resolución mediante el algoritmo S2DR3, lo que permitió reconocer con mayor claridad la huella del evento. Además, se mapearon puntos dentro de la cuenca en las zonas de generación y de transporte del flujo con el fin de identificar posibles ubicaciones para la futura instalación de sensores.

Modelación empírica

Flow-Py es una herramienta de simulación de código abierto diseñada para estimar la extensión espacial (*runout*) y la intensidad de flujos gravitacionales de masa (FGMs), como avalanchas de nieve, deslizamientos, caída de rocas y flujos de detritos. A diferencia de los modelos basados en procesos físicos, Flow-Py utiliza un enfoque empírico y geométrico, con base en conceptos clásicos de ángulo de alcance (*runout angle*) y algoritmos de enrutamiento en terreno tridimensional (D'Amboise et al., 2022).

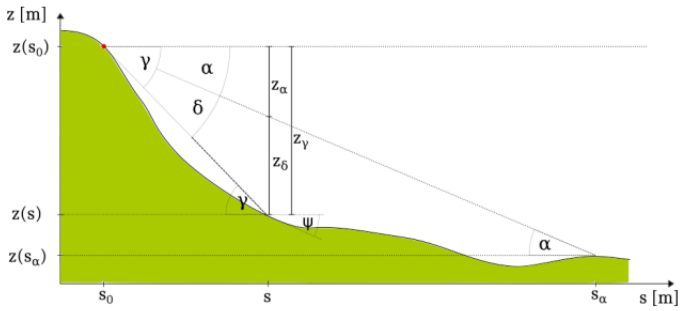


Figura 7. Relaciones geométricas a lo largo de una trayectoria de FGM en 2D. Tomado de D'Amboise et al. (2022).

.

La base del modelo se ilustra en la Figura 7, que representa las relaciones geométricas a lo largo de una trayectoria de FGM en 2D. Las variables clave son:

- s_0: punto de inicio del flujo.
- s_α: punto de detención (alcance).
- $z(s_0)$, $z(s)$, $z(s_\alpha)$: elevaciones en cada punto.
- α: ángulo de alcance (*runout angle*).
- γ: ángulo de viaje local.
- z_γ: desnivel total desde el inicio hasta un punto s.
- z_α: componente de disipación de energía.
- z_δ: altura de energía cinética, usada como medida de intensidad.

Flow-Py implementa un algoritmo de dirección de flujo múltiple basado en el trabajo de Holmgren (1994), incorporando también un factor de persistencia que tiene en cuenta la dirección e intensidad del movimiento anterior (Horton et al., 2013). La propagación del flujo se controla mediante un parámetro de divergencia (exp), que determina la concentración del flujo: valores altos favorecen un movimiento tipo bloque, mientras que valores bajos permiten una mayor dispersión lateral, similar a un flujo fluvial (D'Amboise et al., 2022).

La altura de energía Z^{δ}, derivada de relaciones geométricas asociadas al ángulo de alcance α (Heim, 1932), se utiliza como medida de la intensidad del proceso y también como criterio de parada. El flujo se detiene cuando $Z^{\delta} < 0$, lo que indica que el ángulo de viaje local γ es menor que el ángulo de alcance α. Adicionalmente, se aplica un umbral de flujo de enrutamiento R_{stop} para limitar la propagación lateral cuando el flujo se vuelve demasiado diluido.

En aplicaciones regionales, D'Amboise et al. (2022) emplean valores de referencia $\alpha = 25°$, $exp = 8$ y $R_{stop} = 3 \times 10^{-4}$, los cuales demostraron representar adecuadamente trayectorias y distancias de recorrido en flujos de alta movilidad, como avenidas torrenciales y deslizamientos superficiales.

Flow-Py está implementado en Python bajo un enfoque de programación orientada a objetos, lo que facilita la personalización y extensión del modelo. La herramienta requiere como datos de entrada un modelo digital de elevaciones (MDE) y un ráster de zonas de inicio, ofreciendo una alternativa eficiente y adaptable para modelar flujos gravitacionales a escala regional con tiempos de cálculo reducidos. El código base fue tomado y adaptado del repositorio *slope_stability* desarrollado por EAFIT (AppliedMechanics-EAFIT, 2025).

Modelación física

El modelo *r.avaflow* es una herramienta computacional de código abierto desarrollada como un módulo raster en *GRASS GIS*, orientada a la simulación y propagación de masas inestables previamente definidas, introducidas como alturas en mapas raster y/o como hidrogramas, simulando su desplazamiento sobre la topografía desde las zonas fuente hasta las áreas de deposición (Palacio Cordoba et al., 2025). Dependiendo de los datos de entrada y del tipo de análisis, el modelo genera mapas de altura, velocidad y presión del flujo, así como hidrogramas, gráficos de salida y animaciones tridimensionales.

La formulación del modelo se basa en el enfoque multifásico propuesto por Pudasaini (2012) y desarrollado posteriormente por Pudasaini and Mergili (2019). Para la modelacion en la cuenca de La Rayam se emplea la versión actual *r.avaflow 4.0*, la cual permite simulaciones monofásicas y multifásicas, considerando explícitamente la interacción entre fases mediante la redistribución de masa y momento, implementada a través de un esquema numérico conservativo (Palacio Cordoba et al., 2025).

El modelo considera tres fases: sólida (s), fino–sólida (fs) y fluida (f). La fase sólida representa material grueso y se modela mediante una reología plástica de Mohr–Coulomb, puramente friccional. La fase fino–sólida corresponde a material granular fino, desde arcillas hasta gravas finas, y se describe mediante una reología Coulomb–viscoplástica dependiente del esfuerzo y la presión. La fase fluida está compuesta por agua y partículas muy finas, y se representa mediante una reología viscoplástica dependiente de la tasa de corte (Palacio Cordoba et al., 2025).

La formulación trifásica se describe mediante ecuaciones de conservación de masa para cada fase (Eqs. 7–9) y momento (Eqs. 10–12) para las fases sólida (s), fino–sólida (fs) y fluida (f). En la formulación, ρ representa la densidad, δ el ángulo de fricción basal, ϕ el ángulo de fricción interna de las fases sólida y fino–sólida, y η la viscosidad de la fase fluida (Palacio Cordoba et al., 2025).

$$\frac{\partial \alpha_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_s \mathbf{u}_s) = 0 \tag{7}$$

$$\frac{\partial \alpha_{fs}}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_{fs} \mathbf{u}_{fs}) = 0 \tag{8}$$

$$\frac{\partial \alpha_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_f \mathbf{u}_f) = 0 \tag{9}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \mathbf{u}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \mathbf{u}_s \otimes \mathbf{u}_s) = \alpha_s \rho_s \mathbf{g} - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_s + \mathbf{C}_{DG}^{sf} + \mathbf{C}_{DG}^{sfs} + \mathbf{C}_{vm}^{sf} + \mathbf{C}_{vm}^{sfs} \tag{10}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_{fs} \rho_{fs} \mathbf{u}_{fs}) + \nabla \cdot (\alpha_{fs} \rho_{fs} \mathbf{u}_{fs} \otimes \mathbf{u}_{fs}) = \alpha_{fs} \rho_{fs} \mathbf{g} - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_{fs} - \mathbf{C}_{DG}^{sfs} - \mathbf{C}_{DG}^{fsf} - \mathbf{C}_{vm}^{sfs} + \mathbf{C}_{vm}^{fsf} \tag{11}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f \mathbf{u}_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \mathbf{u}_f \otimes \mathbf{u}_f) = \alpha_f \rho_f \mathbf{g} - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_f - \mathbf{C}_{DG}^{sf} - \mathbf{C}_{DG}^{fsf} - \mathbf{C}_{vm}^{sf} - \mathbf{C}_{vm}^{fsf} \tag{12}$$

donde $\mathbf{u} = (u, v, w)$ representa el vector de velocidades en las direcciones del flujo (x, y, z) y α las fracciones volumétricas de cada fase, cumpliéndose $\alpha_s + \alpha_{fs} + \alpha_f = 1$. Los términos $\mathbf{C}_{DG}$ y $\mathbf{C}_{vm}$ representan las densidades de fuerzas interfaciales asociadas al arrastre y a la masa virtual, respectivamente. El tensor $\mathbf{T}$ corresponde al tensor de tensiones de Cauchy negativo, $\boldsymbol{\tau}$ al tensor de tensiones adicionales y p a la presión. La formulación matemática y física completa del modelo se presenta en detalle en Pudasaini and Mergili (2019).

Con base en esto, *r.avaflow* permite dos enfoques principales para la propagación de los flujos, definidos mediante la proporción entre las fases sólida y líquida. En el primer enfoque, la propagación se inicia a partir de zonas fuente previamente demarcadas con una composición inicial de fases. En el segundo enfoque, se emplean hidrogramas basados en lluvia y caudal, que permiten propagar inicialmente la fase sólida e incorporar progresivamente la fase líquida a medida que el flujo atraviesa puntos específicos del dominio, siendo este enfoque adecuado para procesos controlados por precipitación. Inicialmente en este documento se incorporará el primer enfoque para modelar la propagación.

Esta modelación se implementará en la cuenca piloto seleccionada, con el objetivo de establecer un esquema de simulación que incorpore una base física sólida de las variables hidrológicas y geotécnicas involucradas.

Resultados

Disponibilidad de sedimentos

Con el fin de evaluar los aportes potenciales de material inestable, se aplicaron los modelos de estabilidad de ladera (SHALSTAB y TRIGRS) en las cinco cuencas con mayor priorización en el ranking: La Raya, La Madera, Montañita, La Ortega y Doña Ana. La ejecución de estos modelos permite identificar y delimitar las principales zonas fuente de sedimentos en cada cuenca, aportando uno de los insumos para la modelación del tránsito de las avenidas torrenciales.

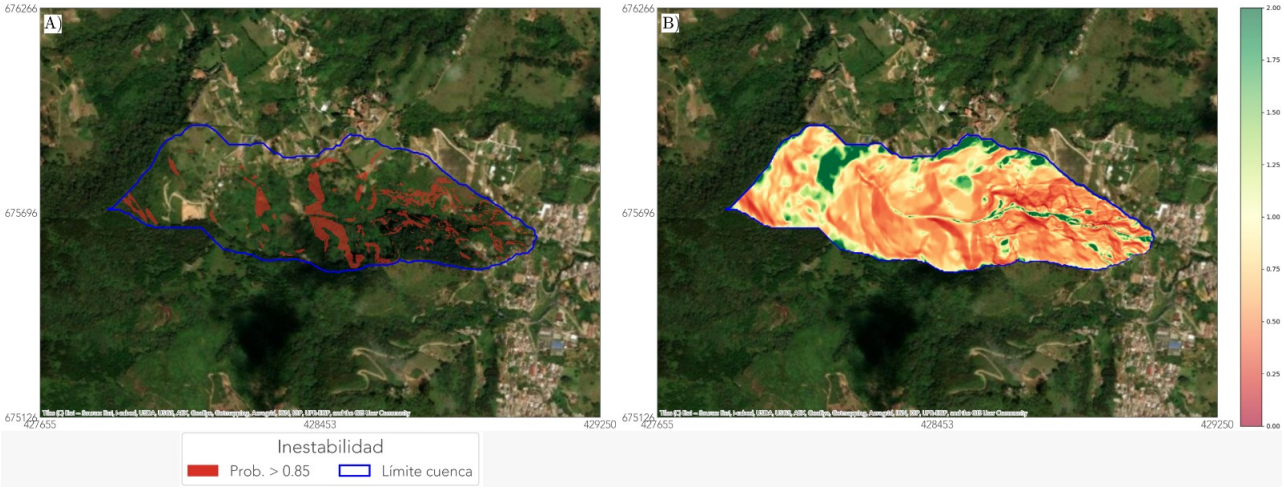


Figura 8. Zonas fuentes modeladas con: a) SHALSTAB y b) TRIGRS para la cuenca La Raya

.

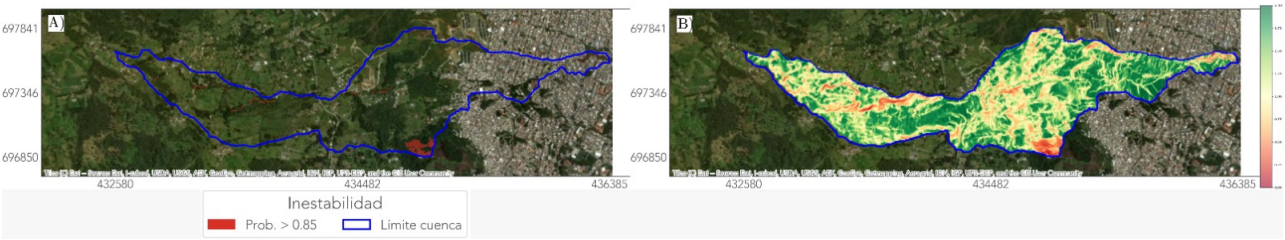


Figura 9. Zonas fuentes modeladas con: a) SHALSTAB y b) TRIGRS para la cuenca La Madera

.



Figura 10. Zonas fuentes modeladas con: a) SHALSTAB y b) TRIGRS para la cuenca Montañita

.

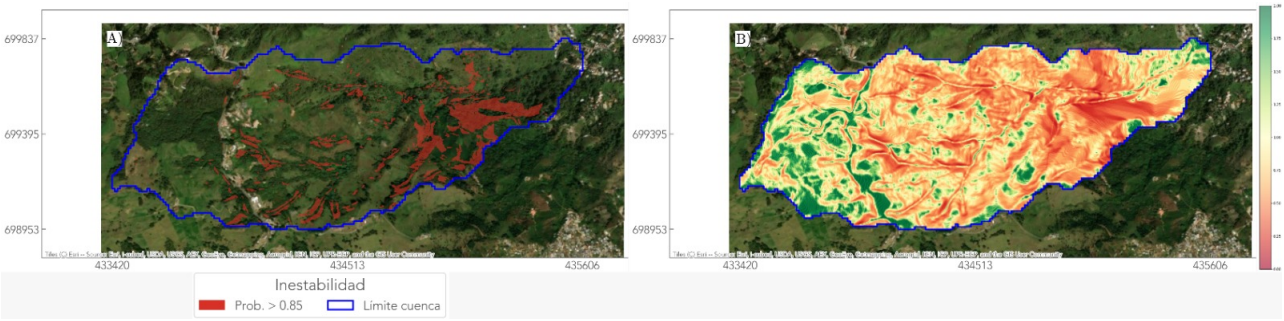


Figura 11. Zonas fuentes modeladas con: a) SHALSTAB y b) TRIGRS para la cuenca La Ortega

.

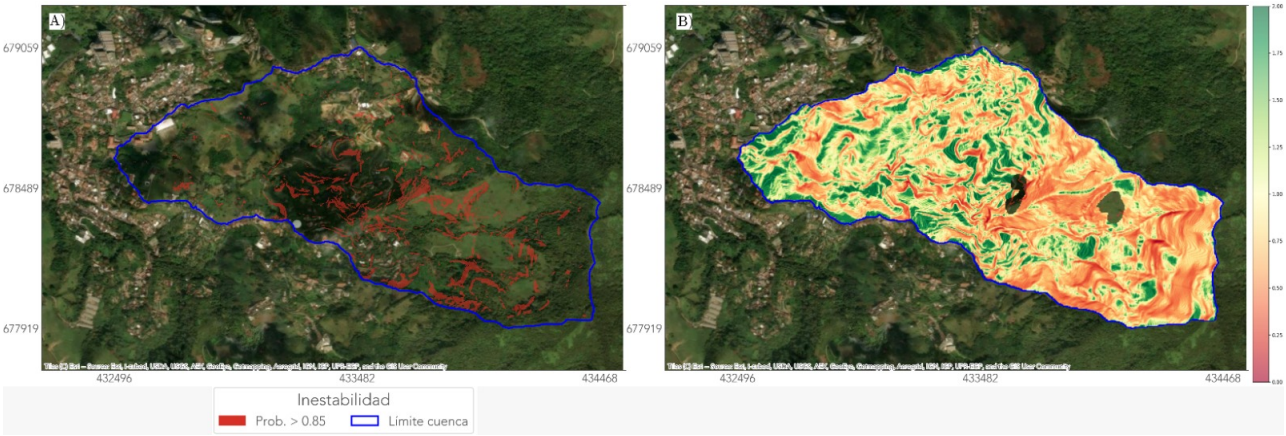


Figura 12. Zonas fuentes modeladas con: a) SHALSTAB y b) TRIGRS para la cuenca Doña Ana

.

En las Figuras 8, 9, 10, 11 y 12 se presentan los resultados obtenidos con los modelos SHALSTAB y TRIGRS para las cuencas priorizadas. En cada panel (A) se muestra la zonificación de inestabilidad generada con SHALSTAB, donde se resaltan en color rojo las áreas con probabilidad de inestabilidad superior al 85 %, consideradas como zonas fuente potenciales de sedimentos. En cada panel (B) se observa la salida de TRIGRS, expresada en términos del factor de seguridad (FS); en este caso, aquellas áreas con FS <1 son clasificadas como inestables, mientras que valores superiores indican condiciones más estables, de acuerdo con los criterios de estabilidad ampliamente aceptados en la literatura geotécnica (Medinaceli Tórrez, 2024). La comparación de ambas modelaciones muestra una coincidencia en la identificación de sectores críticos dentro de las cuencas; sin embargo, se resalta que en las cuencas La Madera y Montañita se identifican menores extensiones de zonas potencialmente inestables, lo que sugiere una menor disponibilidad de material susceptible de ser movilizado hacia el cauce principal en comparación con las demás cuencas priorizadas.

Modelación del tránsito de las avenidas torrenciales

Flow-Py Para la modelación del tránsito de avenidas torrenciales en las cinco cuencas priorizadas, se implementó el modelo empírico Flow-Py utilizando como zonas fuentes aquellas áreas identificadas como

inestables por los modelos SHALSTAB y TRIGRS. Específicamente, se seleccionaron puntos en las zonas mas altas en donde la probabilidad de inestabilidad era superior al 85 % en SHALSTAB y factor de seguridad inferior a 1 en TRIGRS, considerándolas como puntos fuente potenciales de movilización de sedimentos hacia los cauces principales.

Los parámetros de modelación se basaron en los valores de referencia propuestos por D'Amboise et al. (2022) para flujos de alta movilidad: ángulo de alcance (α) de 25°, exponente de divergencia (exp) de 8, y umbral de flujo (R_{stop}) de 3×10^{-4}.

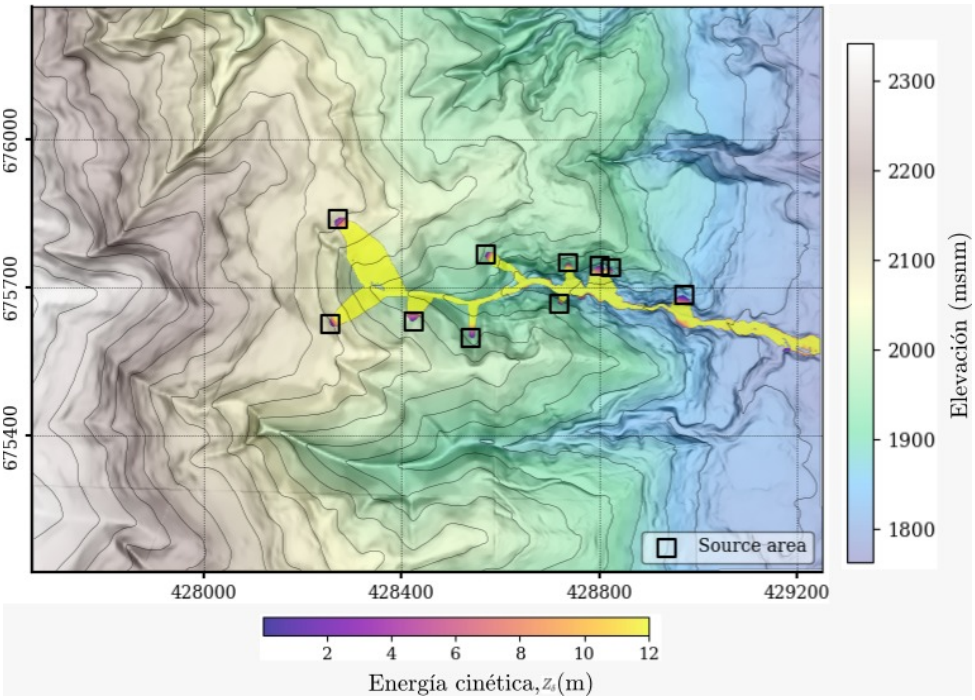


Figura 13. Modelación del tránsito con Flow-Py para la cuenca La Raya.

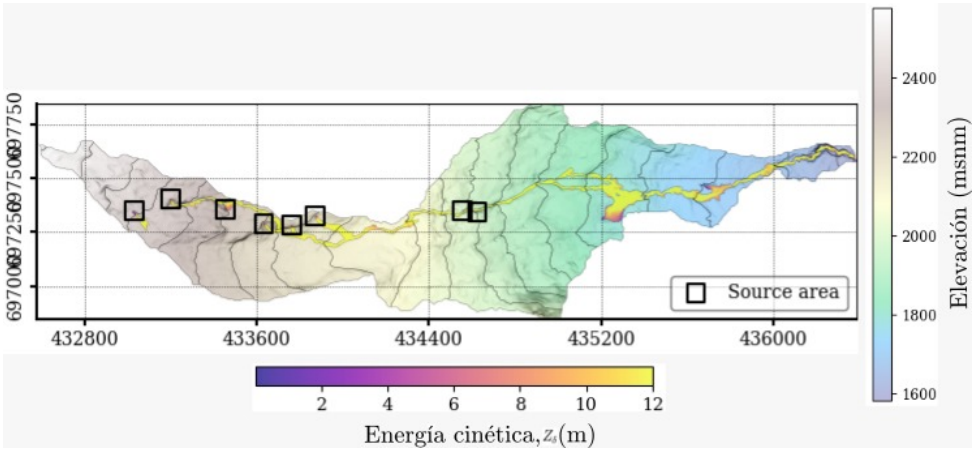


Figura 14. Modelación del tránsito con Flow-Py para la cuenca La Madera.

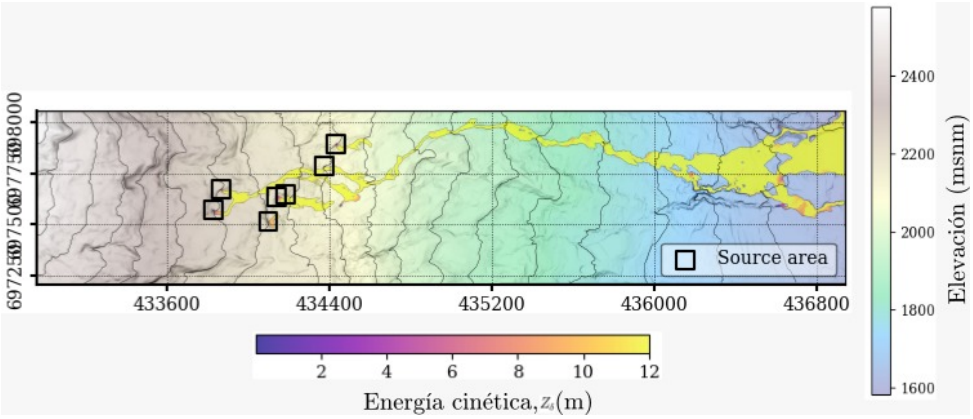


Figura 15. Modelación del tránsito con Flow-Py para la cuenca Montañita.

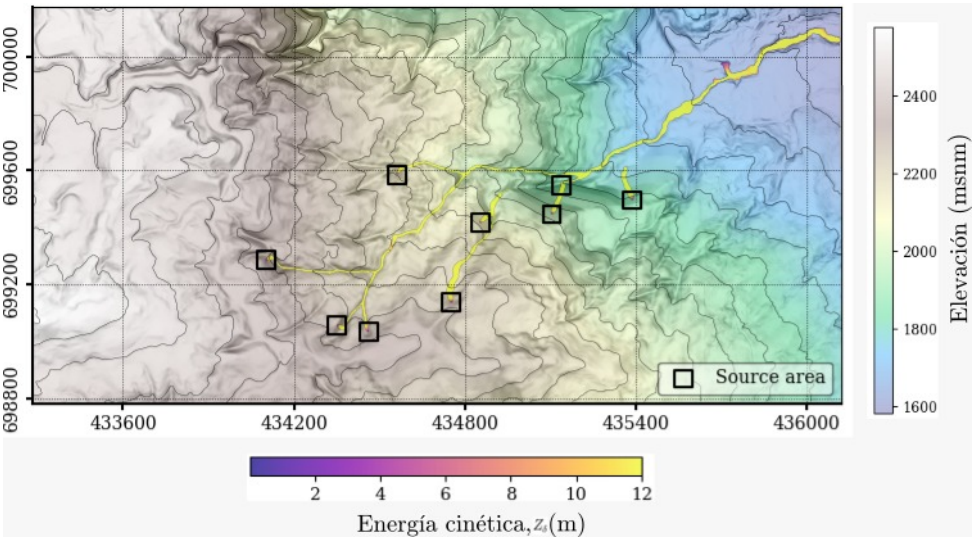


Figura 16. Modelación del tránsito con Flow-Py para la cuenca La Ortega.

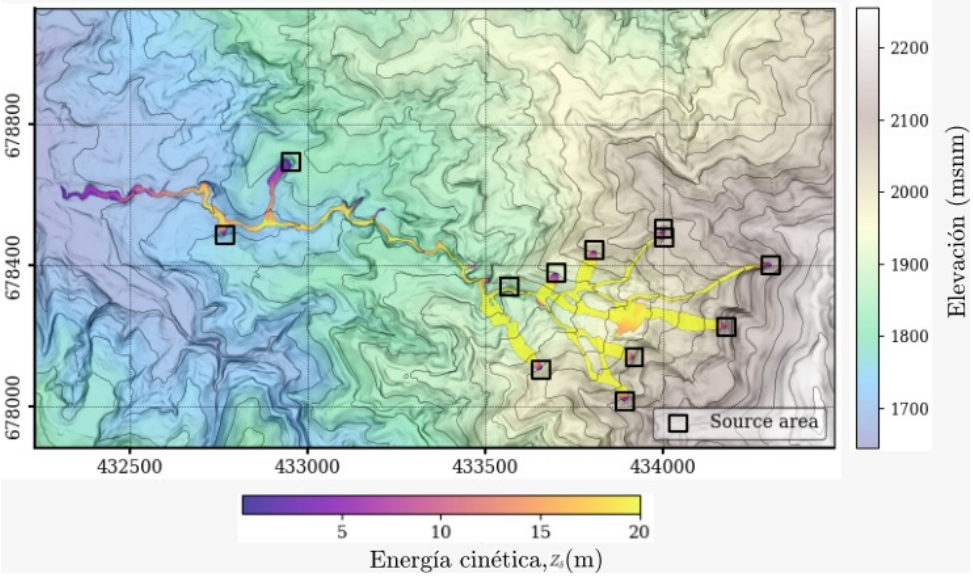


Figura 17. Modelación del tránsito con Flow-Py para la cuenca Doña Ana.

En las Figuras 13 a 17 se presentan los resultados de la modelación del tránsito mediante Flow-Py para cada una de las cuencas priorizadas. Los mapas muestran la intensidad del flujo (Z^{δ}_{max}) a lo largo de las trayectorias potenciales, donde los tonos más cálidos (rojos/naranjas) indican mayores valores de energía cinética asociados a una mayor intensidad del proceso.

Los resultados permiten identificar claramente las rutas preferenciales de propagación de flujos desde las zonas fuente hacia las partes bajas de las cuencas, destacándose la conectividad entre las laderas inestables y la red de drenaje principal. Se observa que las cuencas La Raya, Montañita y Doña Ana presentan una mayor extensión de áreas potencialmente afectadas por el tránsito de flujos, coincidiendo con la mayor disponibilidad de zonas fuente identificadas previamente. Por el contrario, las cuencas La Madera y La Ortega muestran trayectorias más restringidas, lo que concuerda con la menor extensión de áreas inestables identificadas en la fase de modelación de estabilidad de laderas.

r.avaflow A partir de la modelación física realizada con r.avaflow, el primer enfoque implementado no arrojó resultados satisfactorios. En general, la mancha de flujo modelada no presentó coherencia hidrológica ni topográfica, ya que remontaba los altos topográficos y se desplazaba hacia otros cauces donde la topografía impedía el tránsito lateral del material. Adicionalmente, al comparar los resultados con el registro histórico observado en la sección inferior, no se evidenció concordancia con la distribución espacial del flujo reportada. En la Figura 18 se presenta la altura del flujo y la mancha modelada correspondiente a la mayor proporción agua–sedimento evaluada.

Estos resultados evidencian la necesidad de implementar estrategias alternativas de modelación, particularmente mediante el uso de hidrogramas que representen de forma más realista las fases líquida y sólida, y que permitan reproducir de manera más adecuada los patrones de propagación del flujo.

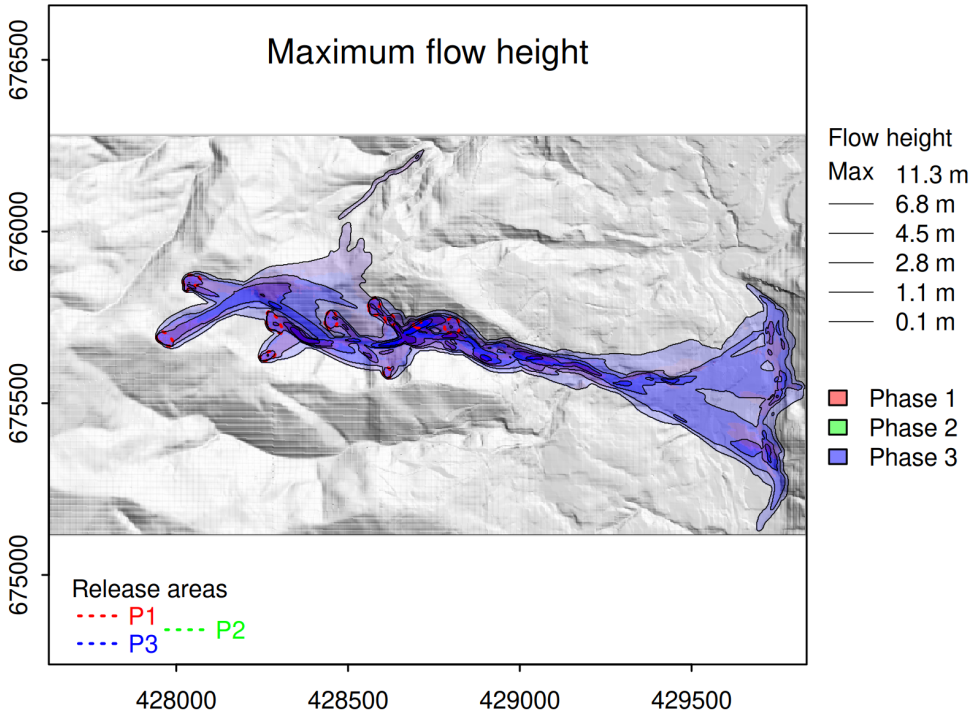


Figura 18. Modelación del tránsito con avaflow para la cuenca La Raya.

Análisis histórico con imágenes satelitales

A partir del análisis multitemporal realizado en Google Earth Pro se identificaron ocho eventos torrenciales ocurridos en la cuenca La Raya. Estos corresponden a diciembre de 2010, febrero de 2012, enero de 2013, julio de 2013, noviembre de 2014, mayo de 2017, febrero de 2018 y julio de 2023. Las imágenes históricas permitieron observar que la mayoría de estos eventos presentaron un comportamiento canalizado, con trayectorias bien definidas y, en todos los casos, con evidencia de arrastre de material asociado a deslizamientos que depositaron sedimentos directamente en la quebrada.

Aunque se utilizaron imágenes Sentinel mejoradas a una resolución cercana a 1 m mediante el algoritmo S2DR3, estas no resultaron muy útiles para delimitar de manera precisa la mancha de los eventos debido a las limitaciones en el contraste y la dificultad para distinguir las áreas afectadas, especialmente para las ocurrencias previas a 2015. Un ejemplo de esta limitación se observa en la Figura 19. En el tramo previo a la zona poblada (zona alta) es posible distinguir parcialmente la mancha del evento; sin embargo, aguas abajo, en el sector donde se presentaron las posibles afectaciones, la huella no resulta visible en las imágenes (Figura 20).



Figura 19. Flujo torrencial para 2023, zona alta.



Figura 20. Flujo torrencial para 2023, zona baja.

Por otra parte, el recorrido virtual con Street View permitió identificar 24 puntos potencialmente expues-

tos dentro de la franja afectada por los eventos históricos y la modelación de FlowPy, de los cuales 22 corresponden a viviendas y 2 a pequeños puentes. En varios de estos sitios se observan viviendas construidas directamente sobre el cauce o en su margen inmediata, donde las imágenes evidencian arrastre de material asociado a eventos previos. Con base en esta información se definieron puntos estratégicos, como se muestra en la Figura21, con el fin de realizar una visita de campo que permita evaluar la viabilidad de instalar sensores sísmicos y cámaras en zonas representativas tanto del área fuente como del corredor de transporte del flujo.

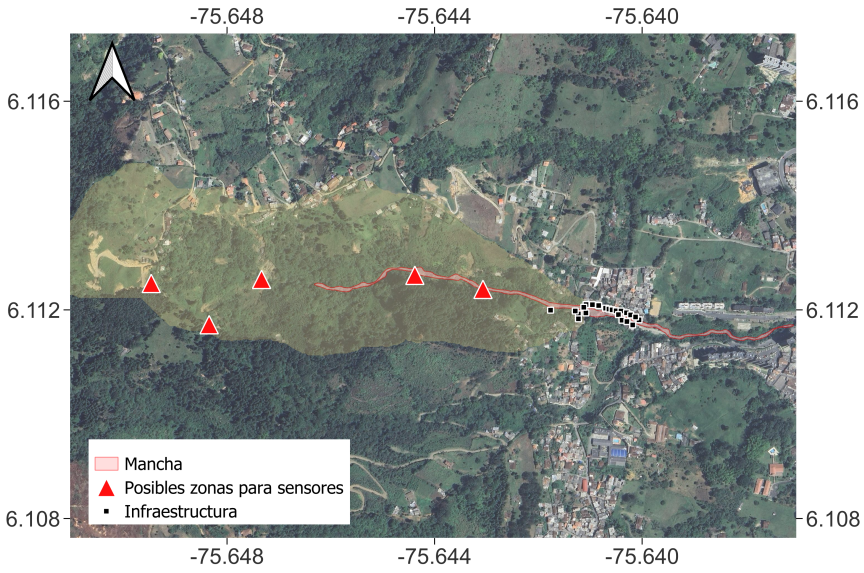


Figura 21. Mancha y posible infraestructura afectada.

Discusión y conclusiones

La ejecución de los modelos de estabilidad SHALSTAB y TRIGRS tuvo como finalidad identificar y delimitar las zonas potencialmente inestables dentro de las cuencas priorizadas, con el propósito de estimar la disponibilidad de material susceptible de ser movilizado en un eventual evento torrencial. Esta etapa es de gran importancia, ya que permiten reconocer las áreas fuente que podrían aportar sedimentos al cauce principal condicionando de esta manera la magnitud y el comportamiento del flujo. En términos generales, SHALSTAB concentró las áreas con probabilidad de inestabilidad superior al 85 % sobre laderas medias y altas, mientras que TRIGRS delimitó con mayor detalle los sectores con FS <1.

A nivel comparativo, La Raya, Montañita y Doña Ana presentan mayores extensiones de inestabilidad, por lo que se supone una mayor disponibilidad de material susceptible de ser movilizado hacia el cauce principal. En cambio, La Madera y La Ortega muestran áreas más acotadas de inestabilidad, lo que sugiere un menor aporte potencial. Estas diferencias son relevantes ya que se cuenta con una idea previa de la dinámica de la cuenca.

Finalmente, los resultados deben interpretarse a la luz de sus supuestos y fuentes de incertidumbre: los

umbrales adoptados (85 % y $FS<1$), parámetros hidráulicos y precipitación utilizados en la estabilidad transitoria.

La modelación del tránsito mediante Flow-Py permitió identificar las trayectorias potenciales de propagación de flujos desde las zonas fuente identificadas hacia las partes bajas de las cuencas. Los resultados obtenidos con la parametrización inicial propuesta por D'Amboise et al. (2022) ($\alpha = 25°$, $exp = 8$, $R_{stop} = 3 \times 10^{-4}$) mostraron resultados acordes a la topografía del terreno, incluso en la cuenca La Raya se logra obtener una mancha similar a la ocurrida en el 2013 cuando ocurrió una avenida torrencial en esta cuenca. Sin embargo, se reconoce que estos parámetros representan una primera aproximación y requieren ser calibrados con información local para mejorar la precisión de las simulaciones.

Por otra parte, la modelación física realizada con r.avaflow presentó limitaciones al ser implementada bajo el primer enfoque adoptado, lo que evidencia que la incorporación de información hidrológica más precisa, mediante el uso de hidrogramas, resulta indispensable para lograr una simulación con una base física coherente y representativa de las condiciones reales de la cuenca.

El análisis histórico permitió identificar ocho eventos torrenciales en la cuenca La Raya entre 2010 y 2023, mostrando patrones recurrentes de flujos canalizados y zonas donde se presentó material deslizado hacia el cauce. Aunque se utilizaron imágenes Sentinel mejoradas con el algoritmo S2DR3, estas no permitieron delimitar con claridad la mancha de los eventos, lo que evidencia limitaciones para su uso en este tipo de análisis.

El recorrido con Street View permitió registrar 24 puntos expuestos, principalmente viviendas ubicadas muy cerca del cauce y dos puentes. Esta información, junto con la distribución de los eventos históricos, permitió definir cinco zonas que requieren verificación en campo para evaluar su idoneidad como posibles sitios para la instalación de sensores en áreas representativas de la zona fuente y del corredor de transporte.

WP1.2.5 | Diseño de Sensores

Metodología

El desarrollo de esta etapa busca la evaluación de tecnologías, dispositivos y algoritmos de procesamiento, para el desarrollo de un sistema de monitoreo y alerta en tiempo real basándose en una revisión y análisis del estado del arte sobre sistemas de alerta temprana para avenidas torrenciales.
En un inicio se realizó una búsqueda sistemática de literatura científica y técnica orientada a identificar las metodologías y tecnologías utilizadas para la detección y monitoreo de avenidas torrenciales. En esta búsqueda se analizaron aspectos como:

- Tipo y principios de funcionamiento de los sensores utilizados (sísmicos, infrasónicos, hidrometeorológicos, ópticos, entre otros).
- Estrategias de adquisición y transmisión de datos (modos continuo y evento, envío de datos etc).
- Algoritmos y criterios para detección temprana (basados en umbrales, energía espectral, correlación multisensorial, etc.).
- Configuración espacial y operativa de las redes de monitoreo (estaciones, alimentación, comunicación).

En este análisis bibliográfico se observó una predominancia de soluciones enfocadas en el procesamiento de señales mecánicas generadas por el transito de una avenida torrencial; las cuales son capturadas por diferentes tipos de sensores, como sismometros (Dietze et al. (2022); Hürlimann et al. (2019)), sensores de infrasonido (Schimmel and Hübl (2016); Hürlimann et al. (2019)), geófonos (Schimmel and Hübl (2016); Dietze et al. (2022); Arattano et al. (2014); Hürlimann et al. (2019)), y acelerómetros (Chmiel et al. (2022); Liu and Wei (2024)). De igual manera la mayoría de autores y estaciones incorporan sensores meteorológicos como pluviómetros, sensores de humedad del suelo, potencial de agua, ademas de la utilización de cámaras de video, sensores de nivel del agua, entre otros (Hürlimann et al. (2019)). De estas, las variables sismológicas tuvieron mayor predominancia a la hora de generar la alerta por avenida torrencial, ya que permiten implementar diferentes estrategias de procesamiento para la detección del fenómeno, como umbrales de energía espectral (Wei and Liu (2020); Liu and Wei (2024)), umbrales de amplitud (Wei

and Liu (2020)) o modelos de clasificación con machine learning (ML) (Chmiel et al. (2021)).

En paralelo a la revisión bibliográfica se llevó a cabo un análisis de diferentes sensores de vibraciones mecánicas que estaban a disposición de SIATA, como unidades de medición inercial (IMU por sus siglas en ingles) y sistemas sísmicos compuestos por geófonos (RaspberryShake). Las IMUs son dispositivos que detectan la orientación, velocidad y movimiento de un objeto en tiempo real, a través de la combinación de sensores como acelerómetros, giroscopios o magnetómetros en un solo módulo. Por su parte, los geófonos constituyen transductores electromecánicos diseñados específicamente para registrar vibraciones del suelo y ondas sísmicas; su principio operativo se fundamenta en la inducción electromagnética generada por el desplazamiento relativo entre una masa móvil y una bobina en presencia de un campo magnético.

Para el análisis de los IMUs se estudiaron 3 modelos diferentes: gama alta (HWT9073), gama media (WT901C) y gama baja (MCU-6050). Uno de los parámetros analizados de estos sensores fue su estabilidad temporal y susceptibilidad al ruido ambiente, teniendo como referencia los valores definidos por el fabricante. Para estos análisis se tomaron un conjunto de datos de estos sensores sometidos a condiciones controladas (Ausencia de perturbaciones externas y en estado estacionario) por un periodo de 8 meses, tomando muestras cada minuto. A este conjunto de datos se les realizó un filtrado de eventos atípicos (Regiones con amplitudes desfasadas de su valor estacionario) para luego calcular su desviación estándar y media temporal, esta ultima con el objetivo de establecer la presencia de upsets en las medidas.

Luego de estos análisis, se decidió buscar en la literatura acelerómetros con características necesarias para la detección del fenómeno estudiado (ancho de banda, densidad de ruido espectral o resolución). Para este proceso se analizó un registro capturado por una Raspberry Shake posicionada en la vereda Potrerito el día 25 de Junio del 2021, donde, según información de la base de datos geohazard se desarrolló un evento de avenida torrencial cerca de la Raspberry Shake R23F9 a disposición de SIATA [REF DOC Sebas]. Con este registró re realizó el calculo de la tasa de ruido espectral (SNR por sus siglas en ingles), donde, se definió si la señal captada por cada acelerómetro o IMU podría superar un umbral de por lo menos 10 dB, valor por medio del cual se ha evidenciado una detección acertada de avenidas torrenciales (Liu and Wei (2024)).

De igual manera, se realizó un análisis del SNR de la señal respecto al evento sísmico del día 21 de septiembre de 2025, con el objetivo de evaluar el comportamiento respecto a un evento con mayor magnitud; para este proceso se tomó el registro de la estación R134D a disposición de SIATA.

Caracterización Raspberry Shake

Para el análisis de la Raspberry Shake 1D (RS1D), se estudiaron aspectos relacionados con el formato de los datos adquiridos, consumo energético, protocolo de comunicación o adquisición de los datos en tiempo real, mediante la implementación de bibliotecas como ObsPy o a través de protocolos de transmisión implementados en el sistema.

Caracterización de consumo eléctrico y computacional

Para la caracterización del consumo eléctrico del RS1D se implementó un ensayo experimental en el cual, el dispositivo fue alimentado mediante una fuente de voltaje regulada con medidor de corriente integrado, registrándose la intensidad consumida con una frecuencia de muestreo de 1 Hz durante un lapso de aproximadamente 120 s. El procedimiento se ejecutó en dos escenarios, donde cada uno de ellos se divide en dos etapas, el primer escenario es la medición de corriente consumida al ejecutar un algoritmo de procesamiento de señales sísmicas y el segundo es al ejecutar un código de carga computacional (el cual implementa estrés controlado de recursos mediante multiplicación intensiva de matrices de 500×500 elementos en paralelo con 3-4 hilos de ejecución, junto con gestión activa de memoria RAM mediante alocación cíclica de bloques de 10-50 MB hasta alcanzar 500 MB de uso, generando consumo máximo de CPU y patrones sostenidos de acceso a memoria), las etapas de estos procesos son la medición en estado basal, limitado al procesamiento nativo del sistema, y (ii) ejecución de cada algoritmo (procesamiento de señales y carga computacional).

Luego de determinar el consumo de una Raspberry Shake con una Raspberry pi 4 como elemento de procesamiento principal, se decidió evaluar el rendimiento del sistema tanto en términos computacionales como en términos de consumo para una Raspberry Shake con una Raspberry pi Zero como elemento de procesamiento y con una Raspberry pi 3B y de esta manera evaluar la viabilidad de su implementación para el sistema de detección de avenidas torrenciales en función a sus rendimientos de potencia y computación.

Para la medición de la potencia de consumo de la Raspberry pi Zero y la Raspberry pi 3B se realizó el mismo procedimiento realizado para la Raspberry pi 4. Por otra parte, se evaluó el rendimiento computacional de cada Raspberry al ejecutar el algoritmo de procesamiento principal de las señales capturadas por los geófonos (ver sección); para este proceso se tomó como métrica de evaluación el tiempo de procesamiento por ciclo (donde un ciclo corresponde a los proceso realizados por el algoritmo para procesar 1 segundo de información, que corresponde al tamaño de vector que se envía por medio del protocolo UDP), donde, si el tiempo de procesamiento es mayor al tiempo de recepción del paquete se considera inviable su implementación ya que de esta manera se generarían colas de datos a lo largo del tiempo, lo que representa primeramente un consumo incremental de la memoria RAM y también un procesamiento temporalmente desfasado del estado actual.

Análisis datos Raspberry Shake

Por otro parte, para el análisis del formato de los datos enviados por la Raspberry Shake se contó con registros provenientes de diferentes estaciones RS1D instaladas en la red de SIATA en distintos puntos del valle de Aburrá. El análisis se orientó inicialmente a la apertura de los archivos a través de ObsPy, con el fin de interpretar la estructura de los registros y poder implementar transformaciones en las señales, tales como la velocidad de oscilación y su representación en el dominio frecuencial.

La exploración del acceso en tiempo real a los datos incluyó el ingreso manual al RS1D mediante protocolo SSH, donde se examinó la estructura de almacenamiento y captura de los registros. Posteriormente, se estableció la conexión de un computador externo al sistema, mediante el protocolo de adquisición de datos en tiempo real seedlink y UDP, lo que permitió obtener la señal con la mínima latencia posible impuesta por las capacidades del hardware y por cada protocolo de transmisión.

De manera complementaria, y para la síntesis de la información asociada a cada sensor estudiado, se elaboró una matriz comparativa y una matriz de decisión, en donde se consideraron aspectos relevantes para el problema de estudio, como: precio, ruido, resolución, entre otros. Estos análisis se dieron para cada uno de los sensores entregados por SIATA y para los sensores encontrados en la literatura.

Implementación de algoritmos de procesamiento

Luego del proceso de selección de sensores, se llevó a cabo una búsqueda sistemática en la literatura científica orientada a identificar modelos y algoritmos de procesamiento aplicados a señales de vibración mecánica (tales como las registradas por acelerómetros o geófonos), así como métodos de procesamiento de imágenes para la detección de avenidas torrenciales a partir de videos capturados por cámaras.

Entre los trabajos analizados, el estudio desarrollado por *Shih-Chao Wei et al.* [Liu and Wei (2024)] fue adoptado como base metodológica para la implementación de los algoritmos de detección, tanto en el dominio de señales mecánicas como en el de información visual, debido a sus reducidos requerimientos computacionales, según lo reportado por los autores.

En su propuesta, *Wei et al.* analizan la señal sísmica capturada por un geófono a través de su densidad espectral de potencia, obtenida mediante la transformación de los datos al dominio de la frecuencia utilizando una transformada de Fourier de ventana corta (STFT, por sus siglas en inglés), la cual se expresa matemáticamente como:

$$X(n\Delta t, m\Delta f) = \sum_{p_n s-Q}^{nS+Q} x(p\Delta\tau) e^{-j2\pi pm\Delta\tau\Delta f}\Delta\tau, \tag{13}$$

donde $x(p\Delta\tau)$ es la señal discreta en el tiempo capturado por un geófono, $p\Delta\tau$ es el tiempo, $\Delta\tau$ es la frecuencia de muestreo, $X(n\Delta t, m\Delta f)$ corresponde a la transformada de Fourier rápida, $n\Delta t$ y $m\Delta f$ son el intervalo de tiempo y frecuencia mínima respectivamente y $S = \Delta t/\Delta\tau (Q = \Delta t/2/\Delta\tau)$ es el punto medio de cada segmento de la transformada de Fourier.

Ahora, el rango de frecuencias de una avenida torrencial es entre 10 y 40 Hz por lo que se aplica un filtro en este rango y al resultado se le calcula la potencia acumulada $P(t)$

$$P(n\Delta t) = \sum_{m=f_1/\Delta f}^{(f_u-\Delta f)} \frac{\Delta f}{2}\left[X(n\Delta t, , m\Delta f) + X(n\Delta t, (m+1)\Delta f)\right]. \tag{14}$$

Además otro parámetro de gran valor es la variación temporal de la potencia acumulada,lo que se calcula mediante una diferencia finita centrada como se presenta en la siguiente ecuación:

$$S(n\Delta t) = \frac{dP}{dt} = \frac{P((n+1)\Delta t) - P((n-1)\Delta t)}{2\Delta t}. \tag{15}$$

A partir de los valores obtenidos para la potencia acumulada y su cambio, se calcula inicialmente el valor para dos umbrales P_n y S_n que corresponden al máximo valor en un rango de 10 minutos para la potencia y su cambio respectivamente, cabe aclarar que estos valores se actualizan cada diez minutos para que así la métrica se adapte al ambiente, lo que permite que opere a cualquier hora del día y que factores

climáticos no generen falsos positivos. Ahora, la métrica para saber si se trata de una avenida torrencial propuesta por Shun Liu et al. considera que entre el momento previo a la avenida torrencial y mientras se propaga, hay un aumento de al menos un orden de magnitud en la potencia, por lo cual el umbral para saber si se trata o no de una avenida torrencial es:

$$P(n\Delta t) > 10 \cdot P_n, t_0 \leq n\Delta t < t_0 + 10\ min, \tag{16}$$

$$o$$

$$P(n\Delta t) > 10 \cdot P_n, t_0 \leq n\Delta t < t_0 + 10\ min, \tag{17}$$

$$y$$

$$S(n\Delta t) > 10 \cdot S_n, t_0 \leq n\Delta t < t_0 + 10\ min, \tag{18}$$

$$o$$

$$S(n\Delta t) > 10 \cdot S_n, t_0 \leq n\Delta t < t_0 + 10\ min. \tag{19}$$

La elección de usar un coeficiente de 5 o de 10 para las métricas depende de cuan sensible quieres que sea la métrica, en el caso del coeficiente 5 el sistema podrá detectar más rápido una avenida torrencial, aunque con la desventaja de que será más propenso a ejercer un falso positivo, por el contrario el coeficiente 10 es más robusto frente a los falsos positivos a costa de una detección más tardía respecto al 5, sin embargo, para elegir entre los dos, es importante considerar también la posición del geófono respecto a la cuenca.

En cuanto a la metodología utilizada para el procesamiento de imágenes se implementó el algoritmo expuesto en [Liu and Wei (2024)], el cual toma el video capturado por la cámara en el punto de estudio y a cada frame del video le realiza una conversión a niveles de grises de la forma []:

$$M_G = 0{,}229 \times R + 0{,}587 \times G + 0{,}114 \times B, \tag{20}$$

donde M_G corresponde a la imagen en escala de grises, R, G y B los niveles de intensidad de los canales rojo, verde y azul respectivamente (considerando una imagen de 3 canales RGB); esta matriz M_G es una matriz con valores en el rango de 0 a 255. Luego de esta conversión a mono-canal en escala de grises, se selecciona una región de interés (ROI por sus siglas en ingles) la cual será la zona a la que se le aplicará el procesamiento.
A cada ROI se le calcula el nivel promedio de grises (AGL por sus siglas en ingles) de la formas:

$$AGL = \frac{\sum M_{G-ROI}}{M \times N}, \tag{21}$$

donde M y N corresponden a las dimensiones laterales de la ROI. Luego, para disminuir las variaciones temporales del AGL se realiza un promedio sobre 11 frames donde el frame central corresponde al instante t; ya que el frente de una avenida torrencial se caracteriza por cambios extremadamente rápidos en su

flujo, el AGL de cada frame presentará cambios muy rápidos, en otras palabras, la derivada del AGL respecto al tiempo es muy grande frente al estadio estacionario. Esta derivada o pendiente, se calcula de la forma [REF]:

$$s(t) = (AGL(t + \Delta t) - AGL(t - \Delta t))/(2\Delta t). \quad (22)$$

Donde $s(t)$ corresponde a la derivada del AGL en el tiempo t (desarrollada como una diferencia centrada), y Δt el tiempo entre cada frame, que corresponde a $1/f$ donde f es la frecuencia de muestreo de la cámara o frame rate. Luego, sea S_{Max} el promedio de s a lo largo de 10 segundos, de esta manera, se define un evento de avenida torrencial si s supera un umbral definido como $2S_{max}$ en al menos 5 veces en 1 segundos.

Para la adquisición de video se implementó una cámara de red Axis P1455-LE, la cual opera bajo el estándar IEEE 802.3bt (PoE++), permitiendo la alimentación eléctrica y la transmisión de datos digitales a través de un único enlace Ethernet. Este dispositivo incorpora un sensor CMOS de alta sensibilidad y un procesador interno que realiza la compresión del flujo de video en formatos H.264/H.265, optimizando así el uso del ancho de banda disponible. La comunicación se establece mediante el protocolo IP (Internet Protocol), lo que posibilita la transmisión de secuencias de video en tiempo real hacia un dispositivo receptor compatible.

La cámara se conectó a través de un inyector U-PoE++, que cumple la función de suministrar la tensión eléctrica de alimentación sobre los pares de transmisión de datos del cable Ethernet, conforme a la norma PoE++. Este inyector cuenta con dos puertos diferenciados: uno marcado como PoE++ (Power + Data Out), destinado a la conexión directa con la cámara, y otro identificado como LAN (Data In), que se enlaza con el dispositivo de procesamiento —en este caso, una Raspberry Pi—. De este modo, el inyector actúa como un elemento pasivo que combina alimentación y datos, sin funciones de conmutación ni direccionamiento de red.

La Raspberry Pi opera como nodo de adquisición y procesamiento embebido, recibiendo directamente el flujo de datos proveniente de la cámara mediante su interfaz Ethernet (eth0). En la configuración de red, se asignaron direcciones IP estáticas a ambos dispositivos, garantizando una comunicación punto a punto dentro de una subred privada. Esta configuración elimina la necesidad de servidores DHCP o conexión a Internet, permitiendo un enlace autónomo y estable.

El acceso al flujo de video se realiza mediante el protocolo RTSP (Real Time Streaming Protocol), el cual permite establecer sesiones de transmisión continua entre el servidor (la cámara) y el cliente (la Raspberry Pi). En este caso, la cámara actúa como servidor RTSP, publicando un canal de video accesible mediante la ruta de red $rtsp://usuario:contraseña@direccion_IP/axis-media/media.amp$. La Raspberry Pi, configurada como cliente RTSP, decodifica el flujo de video utilizando librerías multimedia como FFmpeg o OpenCV, permitiendo tanto la visualización en tiempo real (ffplay) como el procesamiento local.

Conexión y envío de datos al servidor

Luego de la revisión bibliográfica, la implementación de algoritmos de procesamiento de señales de vibraciones mecánicas y señales visuales (cámaras de video), y el desarrollo general de cada sistema de medición, se configuró un servidor de prueba en un *ASUS NUC 13 Pro* para la recepción de datos y de alertas en cada punto de estudio, tanto para los sistemas basados en *Raspberry Shake* como para las cámaras. Para este fin, se implementó el protocolo de sincronización de archivos `rsync` mediante un programa de solicitud periódica, en el cual el servidor accede automáticamente a cada dispositivo y realiza una copia de los archivos en un directorio designado, garantizando así una sincronización completa entre el servidor y los diferentes sistemas.

Cabe resaltar que, para la correcta implementación de este protocolo, es indispensable que todos los sistemas permanezcan en la misma red. Este requisito se cumple mediante la configuración de una conexión VPN basada en el servicio *StrongSWAN* y las herramientas suministradas por los fabricantes de algunos componentes electrónicos utilizados.

Para establecer una conexión VPN en la red de SIATA convencionalmente se utilizan ciertos modems y routers que ya tienen incluido la VPN basada en seguridad IPSEC (Considerando que la red esta bajo este protocolo de seguridad) como el *Módem 4g Sierra Wireless Raven RV50X* y el *Módem 4G industrial rut200 Teltónica* los cuales son dispositivos que están diseñados para entornos industriales, sin embargo, comparados con equipos como los que ofrece *WaveShare*, en particular, su modem *Modem SIM7600G-H 4G DTU* presentan un precio mucho más elevado (aproximadamente 10 veces más costoso). Si bien este ultimo es una solución mucho mas viable en términos económicos, presenta una consideración y es el hecho de que este dispositivo no cuenta con servicios para establecer conexiones con seguridad IPSEC, es por ello que, a forma de abaratar futuras versiones tanto de este proyecto como de cualquier otro que requiera ingresar a algún servidor dentro de la red interna del proyecto se ha utilizado el servicio de *StrongSwan* para generar una VPN que permita conectarse a la red interna del proyecto usando un *modem SIM7600G-H 4G DTU* y una Raspberry Pi 4.

El primer paso para establecer la VPN consiste en la instalación de *StrongSwan*, en particular, para sistemas Raspberry Shake se recomienda instalar una versión precompilada que incluya los servicios más recientes y soporte para *XAUTH*. Este último es un método de autenticación utilizado en una de las redes internas y consiste en una capa adicional de seguridad en la cual se solicita un nombre de usuario y una contraseña, provistos previamente por el administrador de la red, con el fin de verificar que el dispositivo o la persona que intenta conectarse pertenece al proyecto.

El uso de *StrongSwan* se fundamentó en el hecho de que es un servicio para la creación de la VPN de código abierto que ofrece una amplia variedad de configuraciones, entre ellas VPN con seguridad IPsec, y que cuenta con una comunidad activa y soporte para sistemas basados en Raspbian, incluyendo versiones antiguas como las utilizadas en las Raspberry Shake.

Para configurar el tipo de VPN y sus características se emplean dos archivos principales, los cuales se crean en el directorio donde se instala el servicio de *StrongSwan*, estos archivos son `ipsec.secrets` e `ipsec.conf`. El primero contiene las credenciales que serán solicitadas por la red; en el caso de la red principal, se deben completar campos adicionales debido a la utilización del servicio *XAUTH* previamente mencionado. Para una mejor comprensión de esta configuración, se puede consultar la estructura disponible en el repositorio de GitHub del grupo de Geotecnia, específicamente en el repositorio *VPN_connection_IPSEC*.

Por su parte, el archivo `ipsec.conf` se utiliza para definir las características de la conexión, es decir, en él se especifican los parámetros de seguridad y las etapas necesarias para establecer la conexión con la red interna. Un aspecto crítico de esta configuración es la correcta especificación de la subred a la cual se desea acceder, ya que, aunque se establezca una conexión VPN, si se estructura de manera errada la configuración puede impedir la comunicación entre el cliente y los dispositivos de la red interna, dejando en términos prácticos la VPN fuera de uso.

Una vez configurados ambos archivos, se realizaron pruebas de conexión utilizando inicialmente una Raspberry Pi 4 y una Raspberry Shake, empleando tanto la red de la Universidad EAFIT como un punto de acceso móvil generado desde un teléfono celular. El objetivo de estas pruebas fue verificar que la VPN se estableciera correctamente y que la conexión fuera bilateral. Para ello, la conexión VPN se inició siguiendo el procedimiento indicado en el repositorio de GitHub.

Sin embargo, al intentar establecer la conexión utilizando el *módem SIM7600G-H*, se identificó una problemática asociada a su configuración interna. En este caso, la VPN logra establecerse, pero la comunicación

no es bilateral debido a que el módem utiliza mecanismos de NAT para incrementar la seguridad de la conexión, lo que genera conflictos al momento de permitir solicitudes entrantes desde el servidor. Como consecuencia, dichas solicitudes son bloqueadas, impidiendo la comunicación en ambos sentidos.

Antes de conectar el módem vía USB a la Raspberry, se debe deshabilitar el servicio `nmcli` con el fin de evitar configuraciones automáticas que puedan sobrescribir o bloquear los nuevos parámetros, luego, para establecer el módem en un estado que permita una conexión bilateral, es necesario configuralo mediante una serie de comandos AT, los cuales se pueden ejecutar de manera automática por medio del código de Python *configuracion_ modem.py*.

Por otra parte, se desarrolló un algoritmo para el almacenamiento local de los eventos detectados por la cámara de video, donde el sistema guarda pasivamente los frames pertenecientes a los últimos 30 segundos respecto al presente de forma temporal, eliminándose aquellos que superen esta condición; si el sistema identifica un evento de alerta generado por el algoritmo de detección se almacenan los frames correspondientes a los 30 segundos previos al inicio de la detección del evento y a los 30 segundos posteriores respecto a la última detección del mismo.

Para formalizar este proceso, se define:

- t_i: instante de tiempo en el que ocurre la activación i del algoritmo de detección.
- t_{i-1}: instante de tiempo correspondiente a la activación anterior.
- t_0: instante de tiempo asociado al inicio de la primera activación del conjunto de eventos consecutivos.
- t_f: instante de tiempo asociado al final de la última activación registrada.

Se considera que múltiples alertas forman parte del mismo evento si cumplen la condición:

$$t_i - t_{i-1} \leq 30\,\text{s},$$

garantizando así que todas las detecciones dentro de un margen de 30 s sean agrupadas como un único evento.

Con base en lo anterior, el intervalo temporal completo almacenado para cada evento queda definido por:

$$[\,t_0 - 30\,\text{s},\ t_f + 30\,\text{s}\,].$$

Finalmente, cada evento se guarda en una carpeta independiente, identificada mediante la hora y fecha del mismo. Cabe resalte que, el algoritmo de detección requiere inicialmente de 30 segundos para la inicialización de los umbrales, lo que significa que los primeros 30 segundos de operación los algoritmos omiten los procesos de detección y guardado, por lo cual se cumple la condición de que

$$t_0 \geq 30 \rightarrow t_0 - 30 \geq 0.$$

Resultados

Análisis de acelerómetros

Teniendo en consideración los datos analizados de los IMUs HWT9073, WT901C y MCU-6050 se observó una alta estabilidad en la señal medida, tanto para la aceleración como para la velocidad angular, pre-

sentando una desviación estándar promedio (sobre x,y,z) para el sensor WT901C de 0,0055m/s^2 en su aceleración, y de 6,6 $\times 10^{-5^\circ}/s$ para la velocidad angular; luego, para el sensor HWT9073 una desviación estándar promedio para la aceleración de 0,0018m/s^2 y para la velocidad de 0,0022$^\circ/s$ y finalmente para el MCU-6050 de 0,022m/s^2 en su aceleración y 0,087$^\circ/s$.

Por otra parte, se observó la presencia de upsets en las señales medidas (considerando 0m/s^2 como valor teórico para x, y y 9,8m/s^2 para z);aunque estos valores no son significativos en el comportamiento o la naturaleza del fenómeno, para problemas donde la exactitud en la medida es importante es necesario realizar un proceso de calibración de estas magnitudes.

Luego de estos análisis, se realizó una búsqueda de acelerómetros en la literatura, donde, se seleccionaron los acelerómetros ADXL355 y AXO®305 por sus capacidades para la detección de micro vibraciones (basados en información de los fabricantes), o incluso, en su implementación en sistemas de detección de avenidas torrenciales(Liu and Wei (2024)). Luego de esta selección, se sintetizó la información mas relevante de cada sensor teniendo en consideración el problema estudiado (Tablas 5, 6 y 7), con el objetivo de realizar una matriz de decisión para la selección de los elementos mas idóneos en el desarrollo del proyecto (Tabla 8). Esta selección se basó en una ponderación de diferentes atributos de los sensores, en donde las métricas utilizadas se estructuraron en función a información de los fabricantes y opiniones de expertos (Tabla 9).

Por otra parte, se realizó un análisis de sensibilidad de los sistemas para la detección de vibraciones mecánicas asociadas a avenidas torrenciales, detección de sismos o detección de micro vibraciones del suelo, para ello se definió un umbral limite para cada sistema basado en sus niveles de ruido, en particular, alrededor de la densidad espectral de ruido. Este análisis, se realizó para los sensores MCU-6050, ADXL355, AXO®305 y WT901C, ya que para el sensor HWT9073 no se reportan datos sobre sus niveles de ruido más allá de la deriva por temperatura.

Teniendo en consideración que la densidad de ruido espectral es la medida del ruido en la señal por unidad de ancho de banda, se calculó la señal de ruido para cada sensor, en función a su ancho de banda, donde se obtuvo una señal de ruido para el sensor MCU-6050 ajustando el ancho de banda a 100 Hz de $\pm 39{,}2 \times 10^{-3} m/s^2$, para el ADXL355 en un rango de 100 Hz de $\pm 2{,}2 \times 10^{-3} m/s^2$, para el AXO®305 de $\pm 1 \times 10^{-3} m/s^2$ y para el WT901C de $\pm 7{,}4 \times 10^{-3} m/s^2$. Luego, se realizó una comparación de este nivel de ruido respecto a una señal captada por un geófono en condiciones estacionarias, la cual se puede observar en la Figura 22.

En la figura 22 no se graficó el nivel de ruido del MCU-6050 ya que presenta un orden de magnitud más que el resto de señales, limitando la visualización. Luego, se puede observar que, si bien los sensores como el ADXL355 o el AXO®305 presentan valores mínimos de ruido, se evidencia una gran diferencia en términos de sensibilidad entre los acelerómetros o IMUs y los geófonos, factor que puede limitar la captación de micro vibraciones asociadas a avenidas torrenciales.

Finalmente, el SNR de cada sensor para el evento capturado por el sistema R23F9 asociado a una avenida torrencial se calculó como se enseña en la ecuación 23,

$$SNR_{dB} = 20 log_{10} \left(\frac{A_S}{A_N} \right). \tag{23}$$

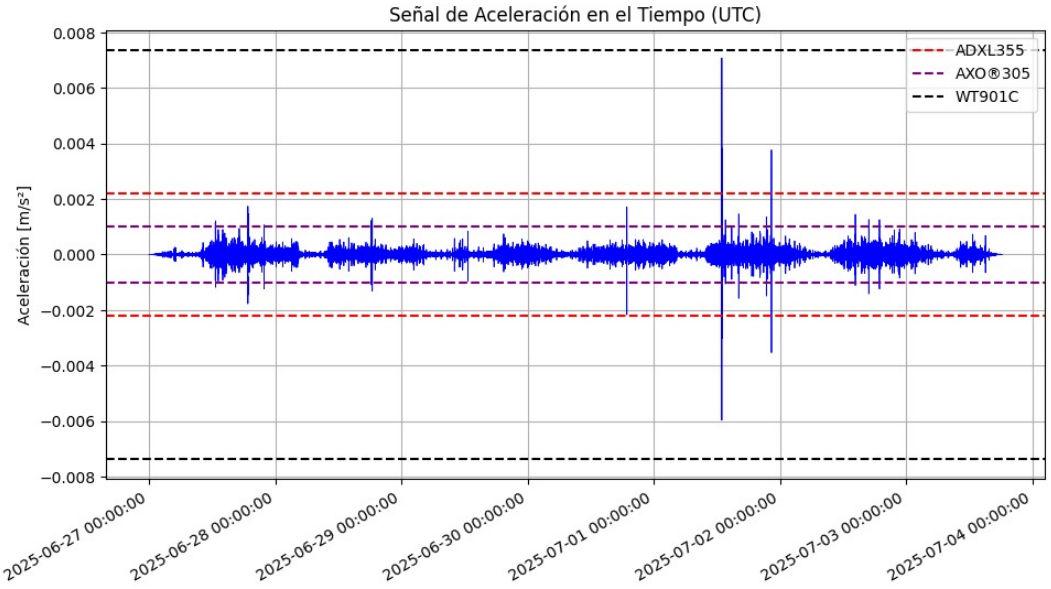


Figura 22. Comparación señal de geófono vs nivel de ruido de sensores

Donde A_S corresponde a la amplitud de la señal del evento, y A_N la amplitud de la señal del ruido (para nuestro caso A_N es el ruido asociado a cada sensor para un ancho de banda de 100 Hz y A_S es la amplitud media de la señal capturada por los geófonos estudiados). Lo que dio como resultado un SNR_{dB} para el sensor MCU-6050 de $-51{,}8dB$, para el sensor ADXL355 de $-26{,}88dB$, para el sensor AXO®305 de $-20dB$ y para el sensor WT901C de $-37{,}3dB$. Los valores negativos indican que la señal captada por el geófono es absorbida por el nivel de ruido de los sensores (ver Figura 23).

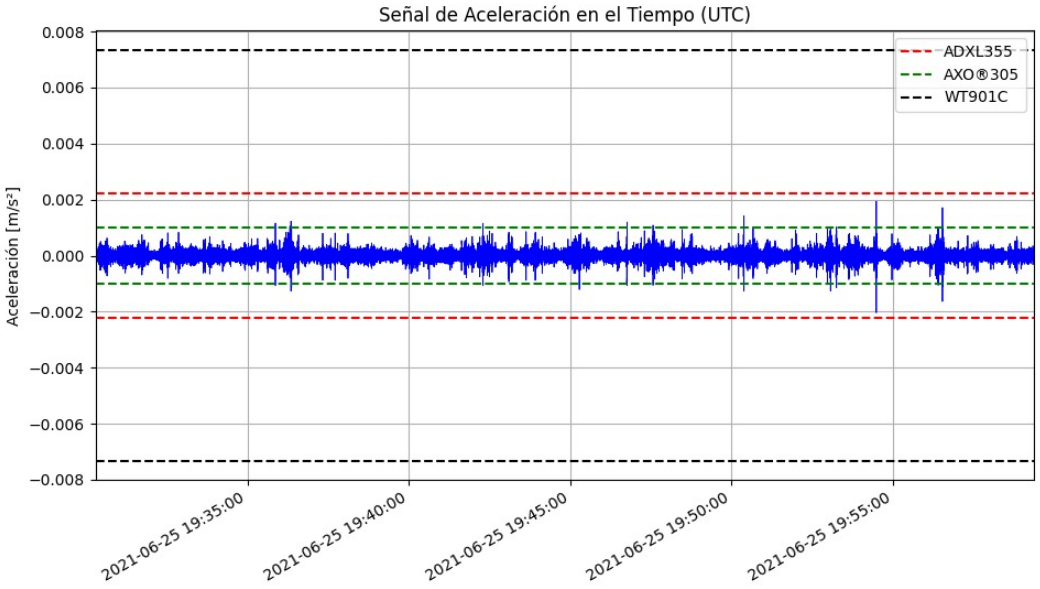


Figura 23. Señal de evento de avenida torrencial captada por un geófono [REF Sebas] y niveles rms de ruido de acelerómetros e IMU

Luego, los valores del SNR_{dB} para el evento del sismo del día 21 de septiembre del 2025 fueron de 0,17dB para el sensor MCU-6050, de 25,1dB para el ADXL355, de 32dB para el AXO®305 y de 14,7dB para el WT901C (ver Figura 24). Estos valores indican que para un evento de alto impacto como un sismo los sensores ADXL355, AXO®305 y WT901C presentan una relación mayor a 10dB respecto a su señal de ruido, presentando un mejor comportamiento los sensores ADXL355 y el AXO®305.

Análisis Raspberry Shake RS1D

En primera instancia, se descargaron varios archivos provenientes del servidor NAZCA, los cuales corresponden a diferentes Raspberry Shake instaladas a lo largo del Valle de Aburrá. Estos archivos fueron abiertos utilizando la librería ObsPy, dado que toda la información generada por las tarjetas Shake se encuentra codificada en el formato MiniSEED. Una vez realizado este proceso de decodificación, fue posible visualizar el comportamiento de los datos captados por el geófono en condiciones estacionarias como se muestra en la figura 25 que corresponde a las muestras por una semana de una raspberry shake posicionada en el municipio de Girardota.

Posterior a este análisis, se procedió a establecer la comunicación del RS1D con un computador. Se identificó que, para una conexión local, es necesario utilizar un cable Ethernet y asignar manualmente una dirección IP; de lo contrario, se debe identificar la IP que el RS1D tenga asignada en ese momento. Una vez establecida la conexión, es posible acceder mediante el protocolo SSH, lo que permite revisar la estructura de almacenamiento de los datos. Sin embargo, al consultar el archivo correspondiente al día actual se presenta la limitación de que no es posible visualizar los datos en tiempo real, ya que solo se actualizan una vez se llena completamente el buffer.

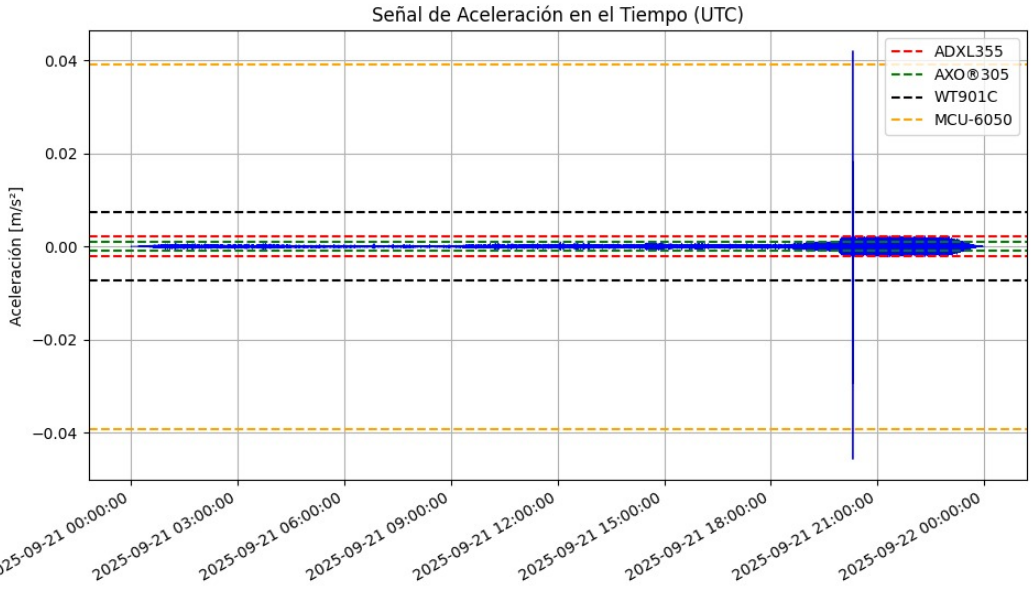


Figura 24. Señal de evento de sismo captada por el geófono R134D de SIATA y niveles rms de ruido de acelerómetros e IMU

Para lograr la comunicación en tiempo real con la Raspberry Shake, los fabricantes proponen utilizar el protocolo SeedLink o UDP, cada uno tiene sus ventajas y desventajas, en especifico, Seedlink es un protocolo diseñado para la transmisión continua y confiable de datos sísmicos. Está basado en TCP, por lo que garantiza la entrega ordenada y completa de los paquetes de información. Además, permite la recuperación de datos perdidos, cuando un cliente se reconecta, el servidor identifica los datos faltantes según el rango temporal y los reenvía automáticamente.

Por otro lado, UDP (User Datagram Protocol) es un protocolo de transporte no orientado a conexión, diseñado para enviar datos de forma rápida y directa a una dirección IP y puerto determinados. Su principal ventaja es la baja latencia, pero a costa de no garantizar la entrega ni el orden de los datos. En caso de pérdida de paquetes o interrupción en la conexión, la información no se puede recuperar.

Ahora, inicialmente se empleó el software SWARM (Figura 26a), una aplicación de monitoreo en tiempo real muy usada en sismología para la visualización de datos sísmicos. Posteriormente, se desarrolló un programa en Python que replica este proceso (Figura 26b). Esta última implementación abre la posibilidad de procesar las señales directamente en Python, lo que permite, por ejemplo, calcular parámetros derivados como la aceleración o la velocidad de la señal de acuerdo con las necesidades del análisis.

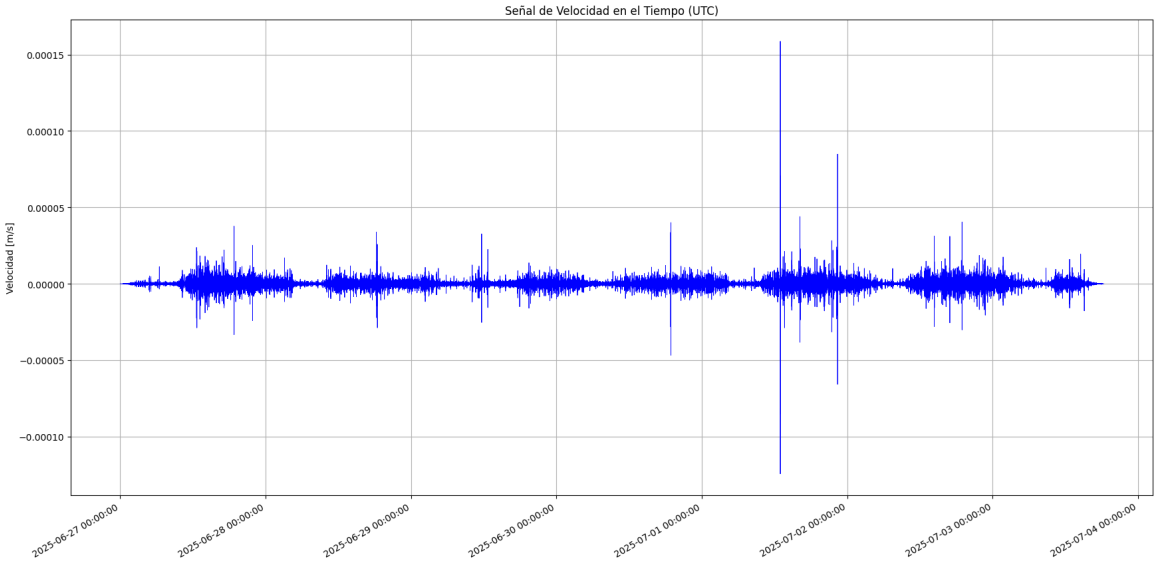


Figura 25. Calculo de la velocidad obtenida por un RS1D ubicada en Girardota

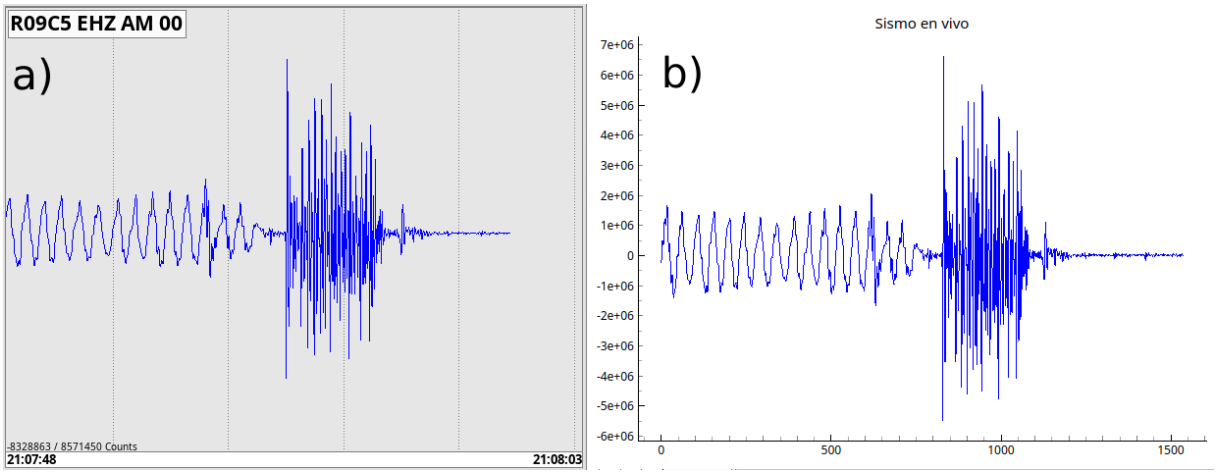


Figura 26. Medicion hecha por un RS1D conectada mediante Seedlink a) en SWARM b) usando Obspy

Al comparar el comportamiento entre SWARM y el programa desarrollado en Python, se observa que ambos presentan resultados equivalentes, lo que confirma que la implementación en Python funciona de manera correcta. Además, la latencia registrada fue prácticamente idéntica entre SWARM y Seedlink, mientras que UDP tiene una menor latencia, pero es por la naturaleza de los protocolos como se menciono anteriormente.

Caracterización de consumo eléctrico y consumo computacional

Luego de seguir los procedimientos expuestos en la metodología se obtuvo un consumo eléctrico al someter el sistema al programa de computo pesado, una corriente media en estado basal para la Raspberry pi 4 de 637 mA y en proceso de computo de 932 A, para la Raspberry Pi 3B una corriente en estado basal de 362 mA y en proceso de computo de 660 mA y para la Raspberry Pi Zero de 245 mA para el estado basal y de 280 mA para el estado de computo (Figura 27, 28 y 29).

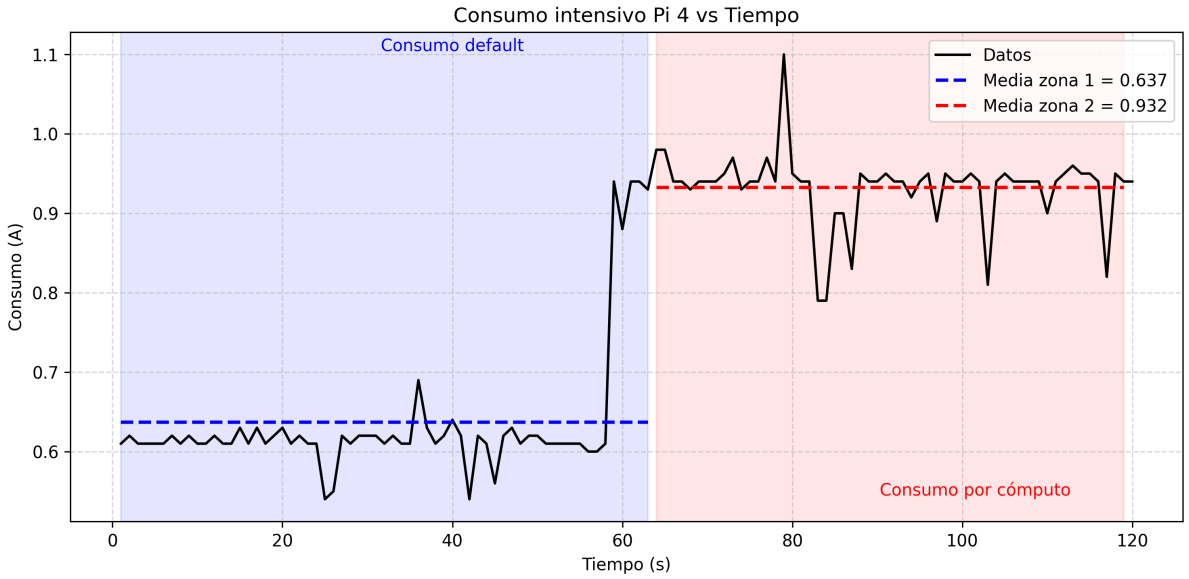


Figura 27. Consumo eléctrico en estado estático y bajo alta demanda computacional en una Raspberry Pi 4.

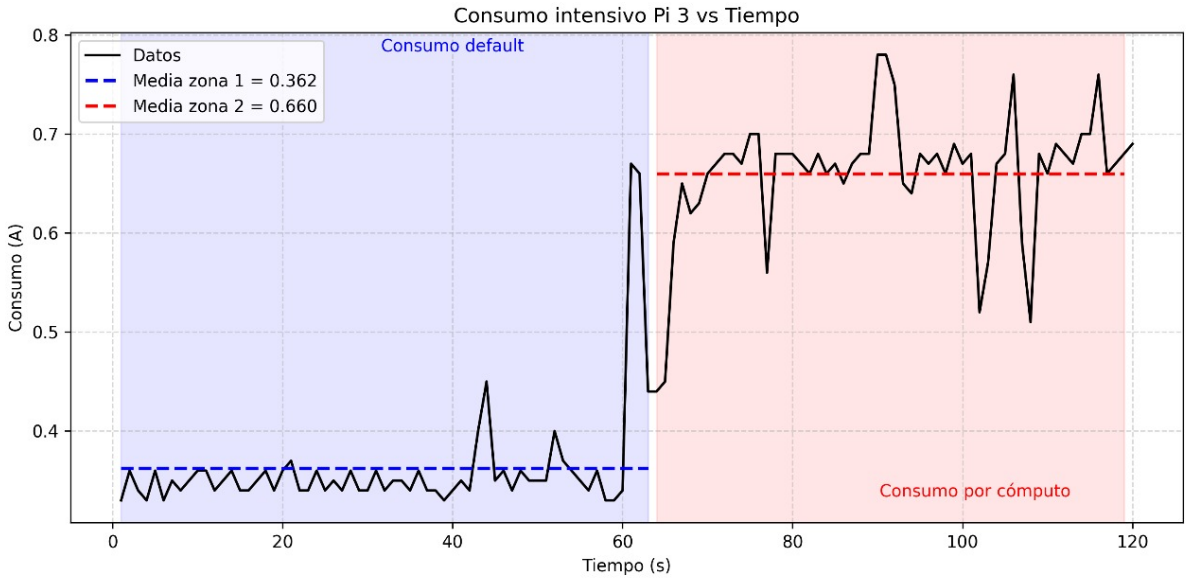


Figura 28. Consumo eléctrico en estado basal y bajo alta demanda computacional en una Raspberry Pi 3B

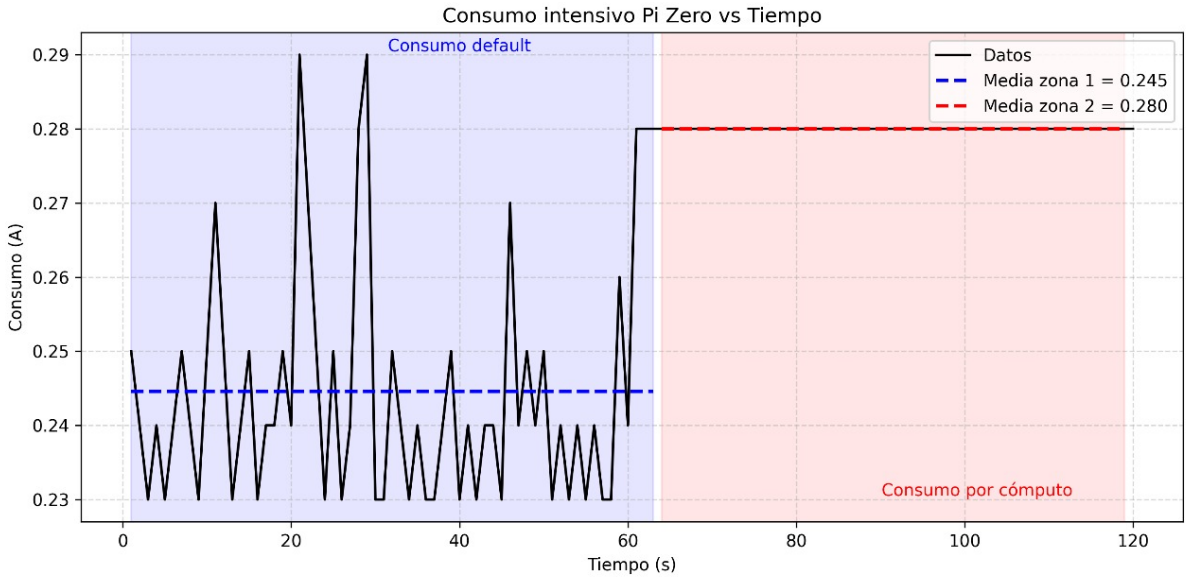


Figura 29. Consumo eléctrico en estado basal y bajo alta demanda computacional en una Raspberry Pi Zero

Luego, los consumos de corriente de los diferentes sistemas al ejecutar el algoritmo de procesamiento se pueden observar en las figuras 30, 31 y 32.

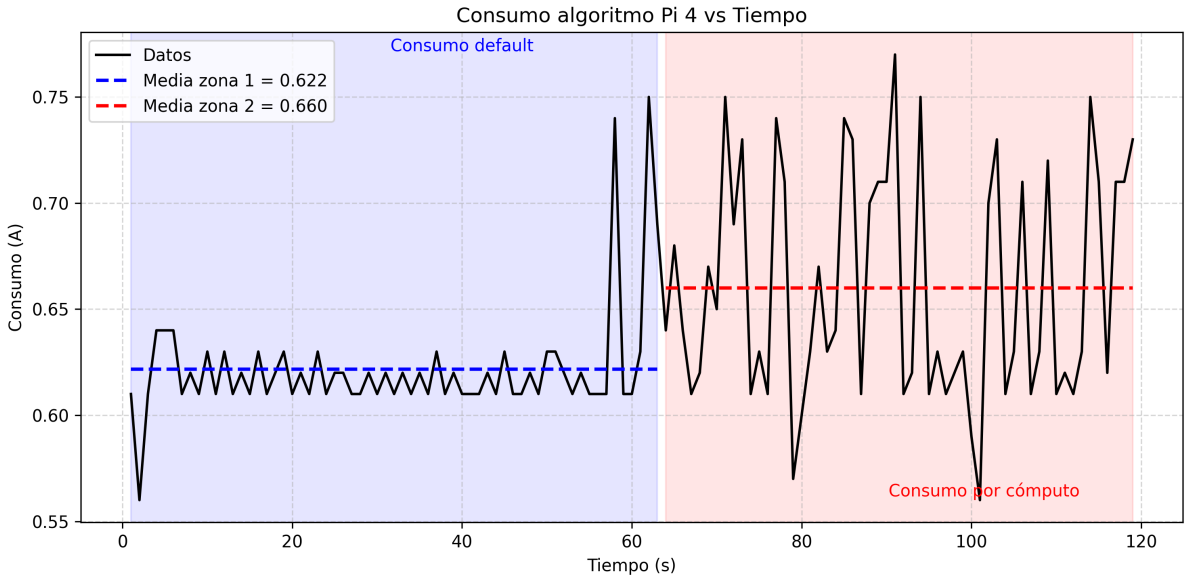


Figura 30. Consumo eléctrico en estado basal y bajo procesamiento de algoritmo de señales del geófono en una Raspberry Pi 4

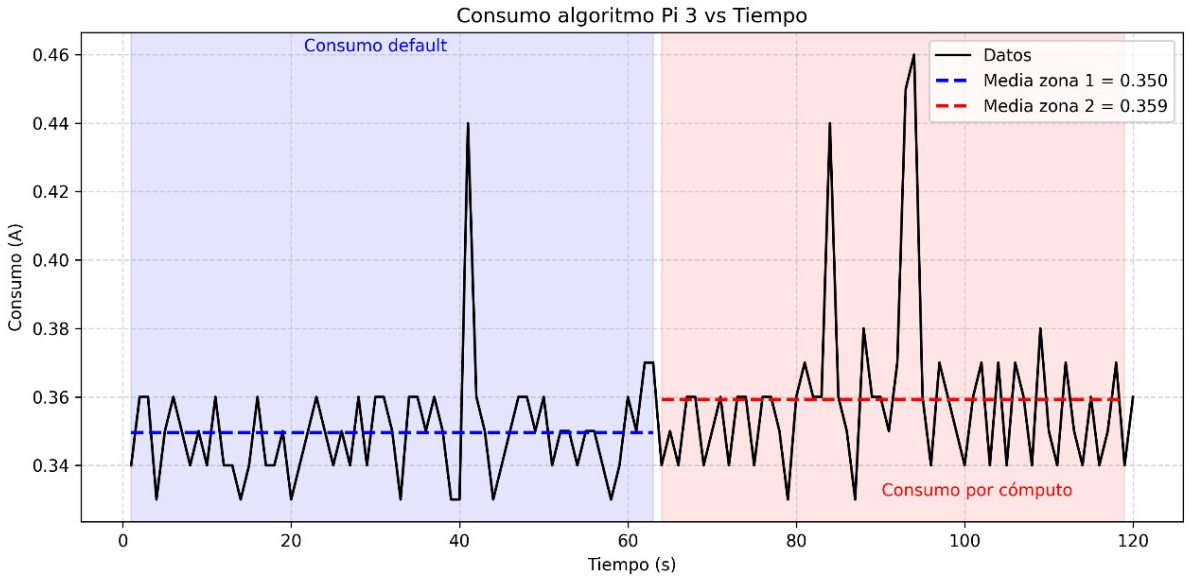


Figura 31. Consumo eléctrico en estado basal y bajo procesamiento de algoritmo de señales del geófono en una Raspberry Pi 3B

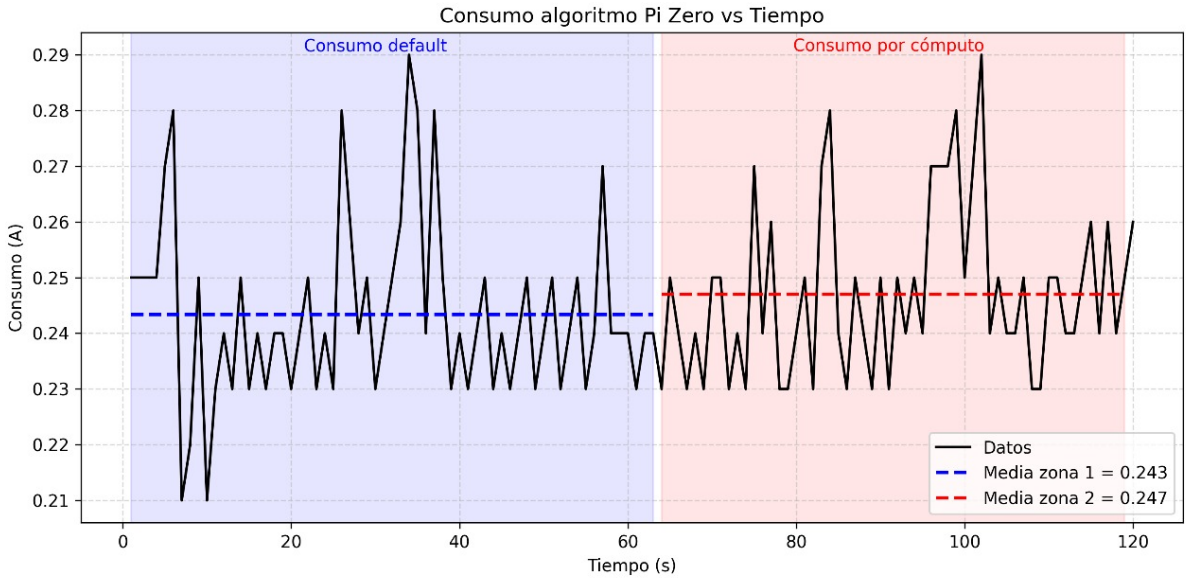


Figura 32. Consumo eléctrico en estado basal y bajo procesamiento de algoritmo de señales del geófono en una Raspberry Pi Zero

Luego de este proceso de caracterización del consumo eléctrico, se realizó una caracterización de los tiempos de computo que emplea cada sistema para procesar un 1 seg de datos del geófono, en donde se obtuvieron los resultados expuestos en la tabla 4.

Tabla 4. Comparativa de Rendimiento: Raspberry Pi 4 vs Raspberry Pi 0

Parámetro	Valor
Procesamiento Total	
Raspberry Pi 4 (Promedio)	1.45 ms
Raspberry Pi 4 (Mínimo)	1.23 ms
Raspberry Pi 4 (Máximo)	3.33 ms
Raspberry Pi 3 (Promedio)	2.78 ms
Raspberry Pi 3 (Mínimo)	2.06 ms
Raspberry Pi 3 (Máximo)	8.91 ms
Raspberry Pi 0 (Promedio)	21.52 ms
Raspberry Pi 0 (Mínimo)	8.21 ms
Raspberry Pi 0 (Máximo)	60.14 ms
Ratio Pi 4 / Pi 0 (Promedio)	14.4× más rápido
Ratio Pi 3 / Pi 0 (Promedio)	8× más rápido
Ratio Pi 4 / Pi 3 (Promedio)	1.8× más rápido
Envío de Paquetes	
Raspberry Pi 4 (Promedio)	0.05 ms
Raspberry Pi 4 (Mínimo)	0.03 ms
Raspberry Pi 4 (Máximo)	0.13 ms
Raspberry Pi 3 (Promedio)	0.09 ms
Raspberry Pi 3 (Mínimo)	0.05 ms
Raspberry Pi 3 (Máximo)	0.36 ms
Raspberry Pi 0 (Promedio)	0.72 ms
Raspberry Pi 0 (Mínimo)	0.26 ms
Raspberry Pi 0 (Máximo)	11.68 ms
Ratio Pi 4 / Pi 0 (Promedio)	14.4× más rápido
Ratio Pi 3 / Pi 0 (Promedio)	8× más rápido
Ratio Pi 4 / Pi 3 (Promedio)	1.8× más rápido

Luego de obtener estos datos y considerando que un sistema es apto para la implementación en el sistema de detección de avenidas torrenciales si su tiempo de procesamiento para 1 seg de datos es menor a 1 seg, se puede observar que si bien, la Raspberry Pi 4 y Pi 3 presentan tiempos de procesamiento mucho mas cortos que una Raspberry Pi Zero (8 y 14 veces respectivamente) el tiempo medio de procesamiento para el algoritmo implementado en la Raspberry Pi Zero es de 21.52 ms, valor por medio del cual es posible determinar que la implementación de una Raspberry Pi Zero es viable para nuestro caso particular, ademas, de que es un sistema que consume 247 mA de media y 290 mA pico, en comparación con los 359 mA de media y 460 mA pico para la Pi 3 y

Matrices de decisión

Se realizaron dos matrices comparativas, la primera de datos generales de los sensores como se observa en la tabla 10, mientras que la segunda están los datos técnicos asociados a los sensores integrados, tal como se muestra en la tabla 11.

Tabla 5. IMUs y acelerómetros seleccionados para el análisis

Link	Sensor	Fabricante	Precio [$]	Protocolo de comunicación	Protección	Consumo
HWT9073	HWT9073	WitMotion	$439	RS485 o CAN	IP68	12mA
WT901C	WT901C	WitMotion	$51,48	TTL	NO	11,5mA
MPU-6050	MPU-6050	DFRobot	$12,9	I2C	NO	3,9mA
ADXL355	ADXL355	Analog Devices	$44,81	SPI, I2C, y UART	NO	0,2mA
Axo®305	Axo®305	Tronics	Requiere cotización	SPI	NO	25mA

Tabla 6. Características electrónicas de IMUs y acelerómetros

Sensor	Variables	Resolución	Precisión	Drift	Ancho de banda
HWT9073	Aceleración	3,9 10^{-6}(g/LSB) (20 BITS) Resolución real: ±24,5cm/s^2	NAN	Drift estático: ±0.025g Drift por temperatura: ±0.0001g/°C	5-256Hz
	Giroscopio	Ejes XY 0.061 (°/s)/(LSB)	NAN	Drift estático: ±0.5 1°/s Drift por temperatura: ±0.005 0.015 (°/s)/°C	
		0.000055 (°/s)/(LSB)	NAN	Resolución: 0.000055 (°/s)/(LSB) Drift estático: ±1°/s Drift por temperatura: ±5 (°/s)/°C	
	Magnetometro	8.333nT/LSB	NAN	NAN	NAN
	Angulo	0.0055°	X,Y: 0.001°. Z: 0.1°	Drift por temperatura: 0.5 1°/°C	
WT901C	Aceleración	0.0005 (g/LSB) (16BITS)	0.01g	Estabilidad: 0.005g 0.75 1mg-rms Drift por temperatura: ±0.00015 g/°C	5-256Hz
	Giroscopio	XY Ejes 0.061 (°/s)/(LSB)	NAN	Estabilidad: 0.05°/s Drift por temperatura: ±0.0015 0.015 g/°C	
	Magnetometro	6.67 nT/LSB	NAN	NAN	NAN
	Angulo	0.0055°	X,Y: 0.2°. Z: 1°(con calibración magnetica) y 0.5° (presencia de error integral acumulativo)	Drift por temperatura: ±0.5 1 g/°C	

Tabla 7. Características electrónicas de IMUs y acelerómetros

Sensor	Variables	Resolución	Precisión	Drift	Ancho de banda
MPU-6050	Aceleración	16384 LSB/g @ ±2 g; 8192 @ ±4 g; 4096 @ ±8 g; 2048 @ ±16 g (16 BITS)	NAN	Drift por temperatura ±0.02 %/°C (a ±2g full-scal) Ruido de densidad espectral: $400\mu g/\sqrt{Hz}$	5-256Hz
	Giroscopio	Sensibilidad: ±3 % 131 LSB/(°/s) @ ±250°/s; 65.5 @ ±500°/s; 32.8 @ ±1000°/s; 16.4 @ ±2000°/s	NAN	Drift estático: ±20°/s Drift por temperatura: ±2 %	
ADXL355	Aceleración	256000 (g/LSB) (20 BITS)	NAN	Ruido de densidad espectral: $22.5\mu g/\sqrt{Hz}$. Drift por temperatura : 0.00015 g/(°C). Cross-Ejes Sensibilidad: ≤1 %. Temporal drift: X,Y Ejes= ±0.002 Z Ejes= ±0.003	Configurable desde 0.977-1000 Hz hasta 0.0095-10
Axo®305	Aceleración	1000000 (g/LSB) (24 BITS)	NAN	Ruido de densidad espectral: $10\mu g/\sqrt{Hz}$. Drift por temperatura : 0.0005 g/(°C). Temporal drift: $3\mu g$	120Hz

Tabla 8. Matriz de decisión de los acelerómetros

Sensor	Parameter	Puntuación
HWT9073	Consumo	4,3
	Resolución (Precisión)	4,7
	Signal drift	4,7
	Precio	3,5
	Precisión Giro	4
	Usado en literatura	0
	Total	**3,53**
WT901C	Power	4,3
	Resolución (Precisión)	4
	Signal drift	4,7
	Precio	4,4
	Precisión Giro	4
	Usado en literatura	0
	Total	**3,57**
MPU-6050	Power	4,7
	Resolución (Precisión)	4
	Signal drift	3,5
	Precio	4,9
	Precisión Giro	3,5
	Usado en literatura	0
	Total	**3,43**
ADXL355	Power	5
	Resolución (Precisión)	4,7
	Signal drift	4,7
	Precio	4,5
	Precisión Giro	0
	Usado en literatura	5
	Total	**4**
Axo®305	Power	4
	Resolución (Precisión)	5
	Signal drift	5
	Precio	0
	Precisión Giro	0
	Usado en literatura	0
	Total	**2,33**

Tabla 9. Criterios para la calificación los acelerómetros

Descripción	Criterio
Consumo	5: Menor a 1 mA
	0: Mayor que 100 mA
Resolución (Precisión)	5: ADC 24 Bits
	0: ADC 8 Bits
Signal Drift	5: Es de 0,001 %/°C
	0 : Es de 0,1 %/°C
Precio	5: Menor a 10 $
	0: Mayor que 1000$
Precisión Giro	5: Ruido de la señal $\leq$ 0.0005 °/s
	0: Ruido de la señal 100 °/s
Usado en la literatura	5: Ha sido usado y es util
	0: No ha sido usado

Tabla 10. Sistemas accesibles de sismologia con Geófonos

Link	Sensor	Fabricante	Precio [$]	Protocolo de comunicación	Protección	Consumo
RS1D	Raspberry shake 1D (RS1D)	Raspberry	294,99 o 584.99 con la raspberry	Seedlink, SeisComP	IP 67 a 834,99 $	0,550 A default - 1.2 A ejecutando un programa pesado
RS3D	Raspberry shake 3D (RS3D)	Raspberry	954,99 o 1134,99 con la raspberry	Seedlink, SeisComP	IP 67 a 1404,99 $	0,550 A default
RS4D	Raspberry shake 4D (RS4D)	Raspberry	604,99 o 784,99 con la raspberry	Seedlink, SeisComP	IP67 a 1054,99 $	0,550 A default
RS&BOOM	RS&BOOM	Raspberry	794,99 o 934,99 con la raspberry	Seedlink, SeisComP	IP 67 a 1254,99 $	0,550 A default
Anyshake	AnyShake	SensePlex	730 (No incluye microcontrolador)	SeedLink, raw TCP stream	No aplica	0,05 A (No incluye microcontrolador)
Grillo Pulse	Grillo Pulse	Grillo	699	Seedlink, SeisComP	Opcional IP 67	0,4 A

Tabla 11. Datos tecnicos para los sensores integrados en los sistemas de sismologia accesibles

Sensor	Sensores integrados	Referencia	Rango de medición	Precisión	Ancho de banda	Frecuencia natural [Hz]	Tolerancia	Distorcion	Taza de muestreo
RS1D	Geófono	RGI-20DX	No aplica	No aplica	0,7 Hz a 44 Hz	4,5	5 %	<0,2 %	100
RS3D	Geófono x,y,z	3 Sunfull PS-4.5B	No aplica	No aplica	0,7-39	4,5	10 %	<0,3 %	100
RS4D	Geófono	RGI-20DX	No aplica	No aplica	0,7 a a 44 Hz	4,5	5 %	<0,2 %	100
	Acelerometro	sensor ±2g 3 ejes	±2g	10 %	0,1 Hz a 44 Hz	No aplica	No aplica	No aplica	
RS&-BOOM	Microbar	MEMS	No aplica	10 %	1 Hz to 44 Hz	No aplica	No aplica	No aplica	100
	Geófono	RGI-20DX	No aplica	No aplica	0,7 Hz to 44 Hz	4,5	5 %	<0,2 %	
Any-Shake	Geófonos x,y,z	3 LGT 20D4.5	No aplica	No aplica	0,7 Hz a 39 Hz	4,5	10 %	<0,3 %	50 - 250
	Acelerometer	LSM6DSC	±2g	1 %	1 Hz a 400 Hz	No aplica	No aplica	No aplica	
Grillo Pulse	Geófono	No especifica	No aplica	No aplica	1 Hz a 100 Hz	4,5	No especifica	No aplica	31 - 125
	Acelerometro	No especifica	No especifica	No especifica	1 Hz a 125 Hz	No aplica	No aplica	No aplica	

Tabla 12. Criterios para la evaluación de los sistemas que integran geófonos

Descripción	Criterios
Consumo eléctrico	5: Menor a 500 mA
	0: Mayor a 1 A
Taza de muestro máxima	5: 200
	0: 50
Precio	5: Menor a 500 $
	0: Mayor que 1000$
Tolerancia del geófono	5: Menor o igual a 0,2 %
	0 : Mayor o igual a 0,4 %
Precisión (Acel)	5: Menor o igual a 10 %
	0: Mayor o igual 20 % o no posee acelerómetro
Uso en la literatura	5: Ha sido utilizado y es util
	0: No ha sido usado o no es util

Tabla 13. Matriz de decisión de los sistemas que integran geófonos

Sensor	Parámetro	Puntuación
RS1D	Consumo	4,7
	Max taza de muestreo	3
	Precio	5
	Tolerancia del geófono	5
	Precisión (Acel)	0
	Uso en la literatura	5
	Total	**4,425**
RS3D	Consumo	4,7
	Max taza de muestreo	3
	Precio	1
	Tolerancia del geófono	3
	Precisión (Acel)	0
	Uso en la literatura	5
	Total	**2,925**
RS4D	Consumo	4,7
	Max taza de muestreo	3
	Precio	4
	Tolerancia del geófono	3,5
	Precisión (Acel)	4
	Uso en la literatura	5
	Total	**3,8**
RS&BOOM	Consumo	4,7
	Max taza de muestreo	3
	Precio	2
	Tolerancia del geófono	3,5
	Precisión (Acel)	4
	Uso en la literatura	5
	Total	**3,3**
AnyShake	Consumo	5
	Max taza de muestreo	5
	Precio	2,5
	Tolerancia del geófono	3
	Precisión (Acel)	4
	Uso en la literatura	0
	Total	**3,875**
Grillo Pulse	Consumo	5
	Max taza de muestreo	3,3
	Precio	3
	Tolerancia del geófono	0
	Precisión (Acel)	4
	Uso en la literatura	0
	Total	**2,825**

Implementación de algoritmos de detección de avenidas torrenciales

Algoritmo para procesamiento de señales de vibraciones mecánicas

En relación con los algoritmos de detección implementados, se identificó inicialmente que la Raspberry Shake contaba con Python 3.5, una versión que presenta numerosas incompatibilidades con librerías necesarias para el procesamiento de señales, como NumPy o SciPy. Por este motivo, se procedió a actualizar la versión de Python a la más reciente permitida por el sistema operativo de la Raspberry Shake disponible, alcanzando la versión Python 3.7.3. Aunque esta versión es considerablemente antigua (la versión actual de Python es la 3.14), permite el uso de librerías básicas para el procesamiento numérico; sin embargo, no incluye soporte para ObsPy, la librería especializada en procesamiento de señales sísmicas.

Debido a lo anterior, y considerando que la versión seguía estando desactualizada, se revisó la documentación y la literatura disponible sobre la última versión del sistema operativo de Raspberry Shake. Se intentó actualizar el sistema, pero el resultado fue el mismo entorno operativo, ya que Raspberry Shake no ha publicado actualizaciones del sistema desde 2021. En consecuencia, se repitió el proceso de instalación manual de Python 3.7.3, y el desarrollo del algoritmo se llevó a cabo bajo esta configuración.

El algoritmo de procesamiento de la señal sísmica inicia adquiriendo la señal del geófono mediante un canal UDP, para luego calcular la potencia acumulada y su variación temporal, las cuales se envían a un servidor remoto (en este caso, un computador) utilizando tres puertos independientes. Cada puerto, a través del protocolo Seedlink, transmite respectivamente:

I. La señal cruda del geófono

II. La potencia acumulada

III. El cambio de dicha potencia.

Tras los primeros 10 minutos de funcionamiento, se definen los parámetros P_n y S_n mencionados en la metodología, y se activa un cuarto puerto, utilizado para enviar alertas en caso de detectarse una avenida torrencial.

Para la visualización de los resultados, se desarrolló un programa en Python que se conecta a todos los puertos mencionados, diferenciando cada flujo de datos y presentándolos de forma simultánea en una misma interfaz. Esta aplicación muestra en total cuatro gráficos, correspondientes a cada tipo de dato transmitido, tal como se ilustra en la Figura ##.

Este código fue probado tanto para una Raspberry Shake con una Raspberry Pi 4,una Raspberry Pi 0 y una Raspberry Pi 3 lo que dio como resultado la tabla 4

Es importante destacar que la Raspberry Pi 4 presenta un desempeño aproximadamente 14 veces más rápido que la Raspberry Pi 0 en la ejecución del algoritmo desarrollado. Sin embargo, esto no implica que la Raspberry Pi 0 sea inadecuada para el propósito del proyecto. En este caso, el cálculo de la potencia acumulada y su variación se realiza cada segundo, dado que se requieren 100 muestras del geófono para obtener estos parámetros, condición que se cumple dentro del mismo intervalo de muestreo.

Por lo tanto, la Raspberry Pi 0 resulta completamente funcional, ya que su tiempo de procesamiento es considerablemente inferior a un segundo, tanto para el cálculo de los parámetros como para el envío de paquetes. Además, su menor consumo energético —aproximadamente seis veces inferior al de la Raspberry Pi 4— la convierte en una opción más adecuada para la aplicación de este algoritmo en campo, donde la eficiencia energética es un factor relevante.

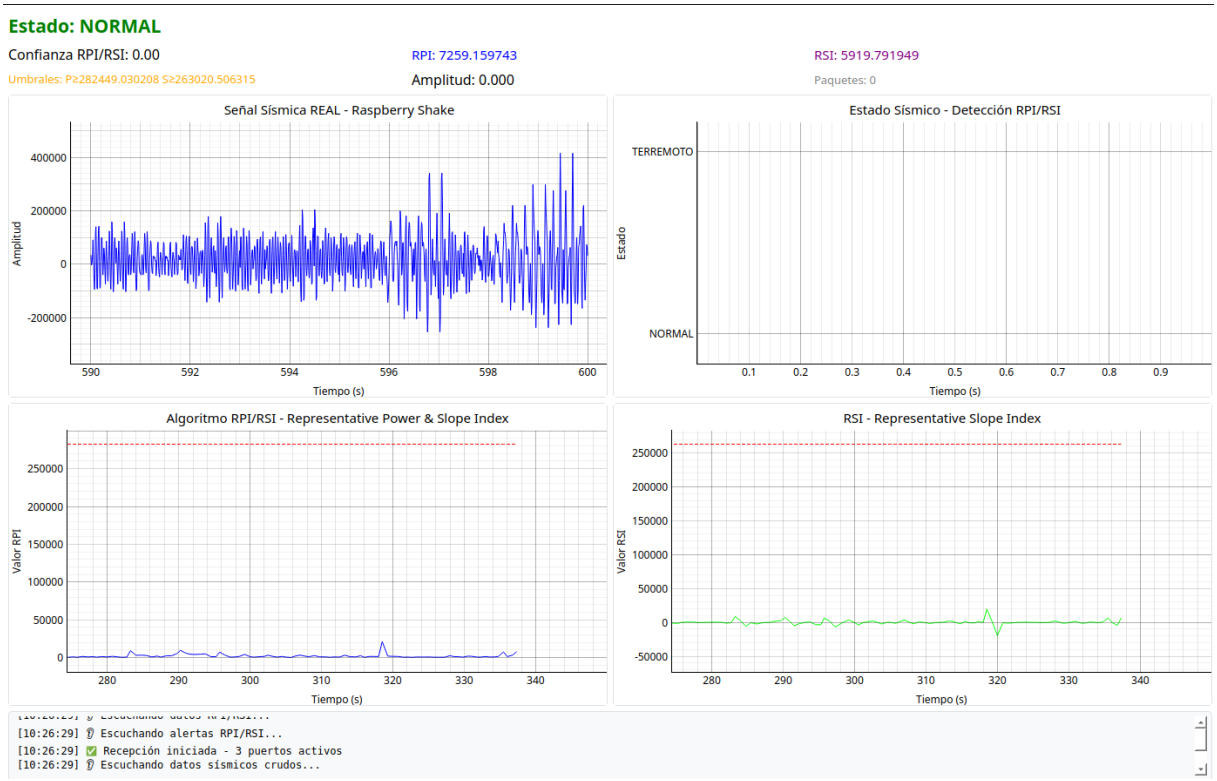


Figura 33. Interfaz desarrollada para monitoreo de la señal del geófono y valores calculados por el algoritmo

Conexión VPN a la red interna

Para establecer la conexión con la red una vez instalado *StrongSwan*, es necesario configurar el archivo `ipsec.conf`, donde, si la conexión VPN requiere de autenticación *XAUTH*, es necesario configurarlo de la siguiente manera:

```
config setup
    strictcrlpolicy=no
    charondebug="ike 3, knl 3, cfg 3, xauth 3"

conn nombre_de_la_vpn
    keyexchange=ikev1
    aggressive=yes
    ike=aes128-sha256-modp2048,aes256-sha256-modp2048!
    esp=aes128-sha256-modp2048,aes256-sha256-modp2048!
    xauth=client
    left=%defaultroute
    leftid="nombre_de_la_vpn"
    leftsourceip=%config
    leftauth=psk
    rightauth=psk
    leftauth2=xauth
    right=ip_del_dispositivo
    rightsubnet=ip_a_la_que_te_vas_a_conectar/mascara
    xauth_identity="usuario_xauth"
    auto=add
```

Esta configuración corresponde a una conexión IPsec que utiliza una fase 1 en modo agresivo (*aggressive mode*), la cual se compone de un intercambio de tres mensajes entre el cliente y el servidor. Durante esta etapa se establece la visibilidad entre ambas partes y se verifica la clave compartida previamente (*Pre-Shared Key*, PSK). Al completar de manera exitosamente la fase 1, se ejecuta el proceso de autenticación *XAUTH*, en el cual se validan las credenciales de usuario, luego, la fase 2 se encarga de negociar los parámetros de seguridad del canal IPsec y establecer los *Security Associations* (SA) necesarios para el intercambio seguro de datos.

Para esta configuración, el archivo `ipsec.secrets`, encargado de almacenar las credenciales, debe seguir el formato que se presenta a continuación:

```
    190.71.241.210 : PSK "clave_psk"        # PSK para el grupo
    usuario_xauth : XAUTH "constraseña_xauth"        # Contraseña para XAuth
```

Una consideración adicional importante es que al archivo `ipsec.secrets` se le deben asignar permisos de acceso restringidos por motivos de seguridad. Esto se logra ejecutando el comando:

```
sudo chmod 600 #Directorio#/ipsec.secrets
```

siempre y cuando el archivo `ipsec.secrets` haya sido creado previamente.

De manera análoga, si se desea establecer una conexión con la red de Sensores, la cual no emplea una capa adicional de autenticación *XAUTH*, la configuración requerida en el archivo `ipsec.conf` se muestra a continuación:

```
config setup

conn nombre_de_la_vpn
    keyexchange=ikev1
    aggressive=yes
    ike=aes256-sha1-modp1536!
    esp=aes256-sha1
    left=%defaultroute
    leftsubnet=Tu_ip/mascara
    right=Ip_del_servidor
    rightsubnet=ip_a_la_que_te_vas_a_conectar/mascara
    authby=secret
    auto=add
```

En esta configuración, la línea `leftsubnet` puede ser comentada o eliminada si se desea. No obstante, en algunos casos omitar este parametro puede provocar que el sistema enrute todo el tráfico a través de la VPN, lo cual podría interrumpir conexiones activas, como sesiones SSH o enlaces por Ethernet, establecidas antes o después de iniciar la conexión VPN.

Para esta red, el archivo `ipsec.secrets` debe configurarse con el siguiente formato:

```
%any ip_servidor : PSK "clave_psk"
```

Ahora, el procedimiento para inicializar la VPN requiere que se detengan el servicio de strongswan y/o ipsec, esto se logra ejecutando el comando sudo ipsec stop, esperar uno o más segundos y reiniciar el servicio con el comando sudo ipsec start, de esta forma los archivos de configuración y credenciales serán correctamente inicializados, posteriormente se puede establecer la conexión mediante el comando sudo ipsec up nombre_de_la_vpn, comando que puede demorar unos cuantos segundos dependiendo mayormente de la calidad del internet, y cuando culmine se estará dentro de la red. En la figura 34 se presenta como se debería ver la consola al ejecutar estos procesos junto con pruebas de conexión al servidor de NAZCA creando una VPN a la red de Sensores para comprobación de funcionalidad.

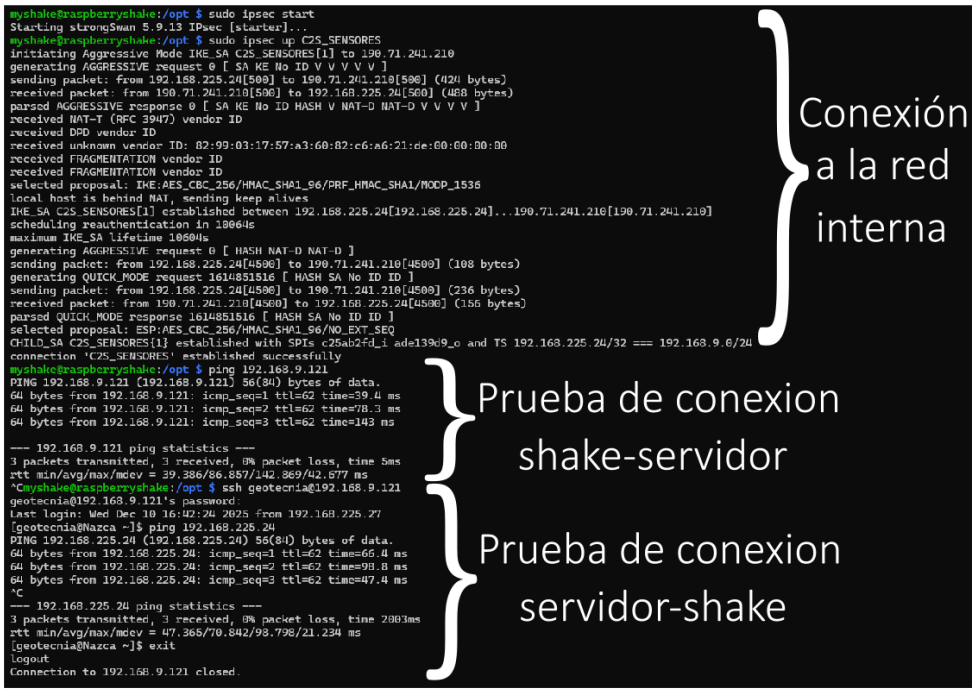


Figura 34. Prueba de conexión VPN a la red de Sensores desde una Raspberry shake usando un modem *SIM 7600G-H 4G DTU*

Nótese que el único comando que no ha sido ejecutado es el de sudo ipsec stop, pues el servicio ya había sido detenido previamente, además se pueden observar que en la prueba de conexión consistió en realizar un ping para determinar si un servidor interno conocido de la red (NAZCA) era visible y si este último podía visualizar la raspberrry shake (conectando la shake previamente al servidor desde ssh), cosa que para ambos casos funcionó correctamente, lo que quiere decir que la conexión es bilateral.

Algoritmo para procesamiento de imágenes

Para la validación del algoritmo de procesamiento de imágenes destinado a la detección de avenidas torrenciales, descrito previamente en la metodología, se implementaron dos modos de operación. El primero corresponde al procesamiento en tiempo real, en el cual las imágenes son adquiridas directamente desde la cámara y procesadas de manera continua. No obstante, dado que en la etapa inicial del proyecto la cámara aún no se encuentra instalada en el sitio de estudio, no es posible realizar pruebas con imágenes representativas del fenómeno.

Por esta razón, se desarrolló un segundo modo de operación, orientado al procesamiento local de secuencias de video. En este caso, el sistema permite cargar un video previamente registrado y, a través de una interfaz gráfica, seleccionar la región de interés (ROI). Posteriormente, se ejecuta un servidor local encargado de desplegar los resultados del procesamiento, incluyendo: la visualización en tiempo real del video analizado, los indicadores y métricas calculadas, el apartado correspondiente al parámetro AGL y el módulo de estimación de la pendiente temporal $s(t)$.

Para la validación experimental del algoritmo, se analizó un video correspondiente a un evento real de

avenida torrencial, disponible en `https://www.youtube.com/watch?v=0jmck2shkXE&t=20s` . Los resultados obtenidos evidenciaron un desempeño correcto del algoritmo en la detección del fenómeno. En condiciones de ausencia de evento, el sistema no genera señales de alerta (Figura 35.a); sin embargo, cuando el frente de la avenida es captado por la cámara, el algoritmo activa de manera inmediata la alerta correspondiente (Figura 35.b).

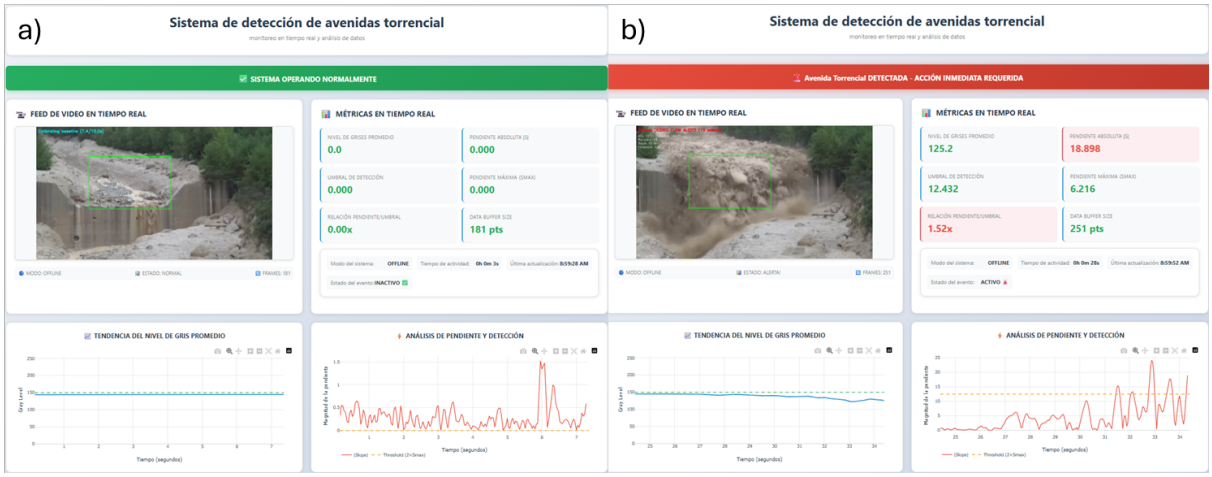


Figura 35. Interfaz procesamiento de imágenes en modo offline a) el frente de la avenida torrencial no ha sido captado por la cámara, b) el frente de la avenida torrencial llega a la visual de la cámara

Discusión y conclusiones

Si bien en esta etapa preliminar se han presentado evaluaciones de diferentes sensores que podrían resultar útiles para el desarrollo del proyecto, la selección definitiva de los dispositivos que conformarán el sistema de alerta temprana aún está pendiente de revisión por parte de los asesores. Hasta el momento, se cuenta con una revisión de la literatura y un análisis que han permitido identificar de manera preliminar algunos sensores con mayor potencial.

Sensores como el ADXL355 y el AXO®305 si bien son sensores con un bajo nivel de ruido son sensores que basados en los datos de una estación de geófono de un evento de avenida torrencial no son capaces de detectar el fenómeno. Cabe resaltar que estos datos son de una estación que no estaba posicionada en el epicentro del evento, por esto, resulta necesario realizar un análisis mas completo de la intensidad de ruido captado por un geófono en una avenida torrencial, donde el sistema de medición este situado en una posición estratégica para su captación, esto, ya que según la literatura, sensores como el ADXL355 son implementados para la detección de avenidas torrenciales.

En el caso particular de los geófonos, se consideraron soluciones que integran no solo el sensor, sino también un sistema de adquisición, amplificación y filtrado de la señal. Bajo este criterio, se evaluaron dispositivos como AnyShake y Raspberry Shake. Estos últimos presentan una ventaja adicional —no contemplada inicialmente como criterio de selección— relacionada con la amplia comunidad y el ecosistema de soporte que los acompaña. No obstante, su principal limitación radica en el elevado consumo energético en comparación con AnyShake, lo cual implica mayores requerimientos y costos en el sistema de telemetría asociado (paneles solares, baterías, entre otros).

Otra consideración relevante respecto a los sistemas Raspberry Shake es que, de fábrica, el acceso a la

señal cruda del geófono se encuentra restringido. Esto obliga a que el dispositivo dependa del uso de la Raspberry Pi como microcontrolador y, debido a la arquitectura y a los protocolos implementados tanto en la tarjeta Shake como en el sistema operativo de Raspberry Shake, se generan limitaciones que impiden acceder a la información con una latencia inferior a un segundo. Como alternativa, se exploró el protocolo UDP con el que se evidencio una menor latencia en el envío de datos a costa de no poder recuperar datos en caso de un fallo en el envío, por lo que se propone usar UDP para pasar los datos del geófono a la raspberry y utilizar Seedlink como método de envío al servidor, ya que la conexión UDP entre la raspberry y los datos del geofono no debería fallar debido a la cercanía del hardware, mientras que con el servidor puede darse el caso de que el internet o radio enlace baje su señal por cualquier motivo, lo que resultaría en una perdida de información si se usa el protocolo UDP, por lo que sería mejor usar seedlink para tener certeza de que siempre se comunicaran todos los datos posibles entre la raspberry y el servidor.

En cuanto a la elección de la Raspberry, se evidenció que la raspberry pi 0 tiene un consumo seis veces menor que la raspberry pi 4, a costa de reducir la capacidad y velocidad computacional, aunque en el caso particular de este proyecto este último es irrelevante debido a que ambas tarjetas logran procesar la información en un tiempo mucho menor que el necesario físicamente para calcular los parámetros en los que se basa el algoritmo de procesamiento de señales sísmicas.

Referencias

AppliedMechanics-EAFIT (2025). slope_stability. `https://github.com/AppliedMechanics-EAFIT/slope_stability`. Repositorio GitHub. Teaching tools for the slope stability class at EAFIT University.

Arattano, M., Abancó, C., Coviello, V., and Hürlimann, M. (2014). Processing the ground vibration signal produced by debris flows: the methods of amplitude and impulses compared. *Computers Geosciences*, 73:17–27.

Aristizábal, E., Arango Carmona, M. I., and García López, I. K. (2020). Definición y clasificación de las avenidas torrenciales y su impacto en los andes colombianos. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 29(1):242–258.

Cañón, A. M. R., Reyes, A. A., Alejandra, M. M., Lucía, M. P. G., Viviana, R. P. S., Steve, M. C. M., Felipe, R. F. L., Ángel, P. S. M., Eduardo, C. C., Nicolás, R. P., et al. (2021). Guía metodológica para zonificación de amenaza por avenidas torrenciales.

Chen, X., Zhang, L. M., and Chang, D. S. (2014). Mechanisms and modeling of rainfall-induced shallow landslides. *Engineering Geology*, 176:54–65.

Chmiel, M., Godano, M., Piantini, M., Brigode, P., Gimbert, F., Bakker, M., Courboulex, F., Ampuero, J.-P., Rivet, D., Sladen, A., et al. (2022). Brief communication: Seismological analysis of flood dynamics and hydrologically triggered earthquake swarms associated with storm alex. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(5):1541–1558.

Chmiel, M., Walter, F., Wenner, M., Zhang, Z., McArdell, B. W., and Hibert, C. (2021). Machine learning improves debris flow warning. *Geophysical Research Letters*, 48(3):e2020GL090874.

D'Amboise, C. J. L., Neuhauser, M., Teich, M., Huber, A., Kofler, A., Perzl, F., Fromm, R., Kleemayr, K., and Fischer, J.-T. (2022). Flow-py v1.0: a customizable, open-source simulation tool to estimate runout and intensity of gravitational mass flows. *Geoscientific Model Development*, 15(6):2423–2439.

Dietze, M., Hoffmann, T., Bell, R., Schrott, L., and Hovius, N. (2022). A seismic approach to flood detection and characterization in upland catchments. *Geophysical Research Letters*, 49(20):e2022GL100170. e2022GL100170 2022GL100170.

Heim, A. (1932). *Bergsturz und menschenleben*. Number 20. Fretz & Wasmuth.

Holmgren, P. (1994). Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid based elevation models: An empirical evaluation. *Hydrological Processes*, 8(4):327–334.

Horton, P., Jaboyedoff, M., Rudaz, B., and Zimmermann, M. (2013). Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(4):869–885.

Hungr, O., Evans, S. G., Bovis, M. J., and Hutchinson, J. N. (2005). *A review of the classification of landslides of the flow type*, volume 11.

Hürlimann, M., Coviello, V., Bel, C., Guo, X., Berti, M., Graf, C., Hübl, J., Miyata, S., Smith, J. B., and Yin, H.-Y. (2019). Debris-flow monitoring and warning: Review and examples. *Earth-Science Reviews*, 199:102981.

Ilinca, V. (2021). Using morphometrics to distinguish between debris flow, debris flood and flood (southern carpathians, romania). *Catena*, 197:104982.

Iverson, R. M. (1997). The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, 35(3):245–296.

Liu, K. and Wei, S. (2024). Real-time debris flow monitoring and automated warning system. *Journal of Mountain Science*, 21(12):4050–4061.

Major, J. J. and Iverson, R. M. (1999). Debris-flow deposition: Effects of pore-fluid pressure and friction concentrated at flow margins. *Geological Society of America Bulletin*, 111(10):1424–1434.

Medinaceli Tórrez, R. (2024). Análisis probabilístico de estabilidad de taludes en roca: aplicación de métodos de confiabilidad y ecuaciones de estados límite para falla plana. In *Proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE), and 2nd Latin-American Regional Conference of the International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG)*, pages 1–8, La Serena, Chile. International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). Open-access conference paper.

Palacio Cordoba, J., Mergili, M., Aristizábal, E., and Echeverri, O. (2025). The basal friction in the modeling of the propagation of shallow landslides – debris flow using r.avaflow. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 82(1):100–115. Accedido el 15 de diciembre de 2025.

Pereira, V., Basilio, M. P., and Santos, C. H. T. (2024). Enhancing decision analysis with a large language model: pydecision a comprehensive library of mcda methods in python. *arXiv preprint arXiv:2404.06370*. Available at: `https://arxiv.org/abs/2404.06370`.

Pudasaini, S. P. (2012). A general two-phase debris flow model. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F3).

Pudasaini, S. P. and Mergili, M. (2019). A multi-phase mass flow model. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124(12):2920–2942.

Páez Pedraza, J. P. (2025). Modelado de flujos de lodo y escombros como herramienta de evaluación de riesgos. *Ingeniería y Universidad*, 29.

Schimmel, A. and Hübl, J. (2016). Automatic detection of debris flows and debris floods based on a combination of infrasound and seismic signals. *Landslides*, 13(5):1181–1196.

Servicio Geológico Colombiano and Pontificia Universidad Javeriana (2021). Guía metodológica para zonificación de amenaza por avenidas torrenciales.

Takahashi, T. (2014). *Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures*. CRC Press, Boca Raton, FL.

Wei, S.-C. and Liu, K.-F. (2020). Automatic debris flow detection using geophones. *Landslides*, 17(2):349–359.