

Anexos

Anexos Actividad 12

Diseño de un piloto para la creación de una red de humedad en el terreno

Resumen Los movimientos en masa pueden considerarse uno de los fenómenos amenazantes de origen natural más comunes del planeta; teniendo gran impacto en la pérdida de vidas humanas y económicas. El Valle de Aburrá, situado en el departamento de Antioquia, presenta características particulares que generan estos fenómenos amenazantes, con el potencial de causar graves afectaciones a las comunidades vulnerables. Intervenir las áreas susceptibles a movimientos en masa para su mitigación a menudo presenta problemas relacionados a dificultades para realizar obras de infraestructura, por esta razón, es fundamental implementar herramientas que permitan emitir alertas tempranas. En distintas investigaciones se ha tratado la predicción de movimientos en masa en el Valle de Aburrá, sin embargo, estas han estado centradas en la definición de umbrales de precipitación, sin tener en cuenta características hidrogeológicas del terreno, por lo que a menudo tienen el inconveniente de generar falsas alarmas, lo que limita su aplicación en una escala regional, por esta razón se hace necesario incorporar variables como la humedad del suelo. En esta investigación se desarrolla una metodología para explorar la relación entre la humedad del suelo, la precipitación y la ocurrencia de movimientos en masa, con el objetivo de aportar conocimiento para la implementación de sistemas de alerta temprana y de esta manera generar insumos para la toma de decisiones asertivas que ayuden a llevar un adecuado ordenamiento territorial y gestión del riesgo, los resultados revelan una implementación efectiva de los sensores de humedad en el suelo y su relación con la lluvia, así como un marco estructurado para realizar una instalación piloto de sensores de humedad bajo un ambiente semi-controlado.

Introducción Los movimientos en masa se definen como, el movimiento de una masa de roca, escombros o tierra a lo largo de una ladera, siendo impulsados por la fuerza de la gravedad (Cruden, 1991), pueden considerarse una de las amenazas más comunes que generan grandes catástrofes, poniendo en riesgo tanto la vida humana como las actividades económicas (Achour and Pourghasemi (2020)).

Para entender las causas que dan origen a la ocurrencia de movimientos en masa es importante saber que existen dos tipos de factores generales que controlan la aparición de este fenómeno. Los primeros son los factores internos, inherentes del terreno o condicionantes, estos explican las condiciones iniciales del suelo antes de que ocurra el movimiento, por ejemplo, el tipo de roca o de suelo de la ladera, las pendientes, estructuras geológicas, los cuales son factores que se encargan de condicionar el terreno y lo hacen susceptible a este tipo de procesos. Otros factores que influyen son los factores detonantes, los cuales activan la inestabilidad de la ladera disminuyendo su resistencia; algunos de ellos son lluvias, sismos erupciones volcánicas y/o intervenciones antrópicas (UNGRD (2021)).

El crecimiento acelerado de la población urbana en las últimas décadas ha resultado en la ocupación de áreas propensas a fenómenos amenazantes, lo cual ha llevado a un incremento significativo en las pérdidas humanas y económicas, representando una gran amenaza para la vida humana e infraestructura (Aristizabal et al. (2019)).

Colombia, en Sudamérica, es uno de los focos de movimientos en masa mortales (García et al., 2022), siendo Antioquia, uno de los departamentos que registra la mayor cantidad de eventos asociados a movimientos en masa en el país (?). Según bases de datos como Desinventar, y otras pertenecientes a entidades locales gestoras del riesgo como el Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres de Antioquia (DAGRAN), se observa una distribución desigual de estos fenómenos y afectaciones en el departamento, aparentemente asociada a la densidad poblacional, teniendo el Valle de Aburrá grandes afectaciones.

Desde el punto de vista espacial, intervenir las áreas propensas a movimientos en masa para su mitigación a menudo enfrenta problemas relacionados con la falta de recursos económicos, impacto ambiental y/o diversas dificultades que pueden presentarse para la realización de obras de infraestructura (Marín (2017)), por esta razón, es fundamental implementar herramientas que permitan emitir alertas tempranas con el fin de prevenir desastres relacionados con estos fenómenos amenazantes. El Área Metropolitana del Valle de Aburrá ha configurado un equipo especializado para afrontar el estudio de riesgo ante movimientos en masa dentro del Sistema de Alertas Tempranas de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA) en donde se han desarrollado y se implementan sistemas de alerta temprana para distintos tipos de amenazas, sin embargo, aún no se encuentra establecido un Sistema de Alerta Temprana para movimientos en masa que permita realizar evacuaciones efectivas, por lo que es de suma importancia el aporte científico enfocado en variables que puedan contribuir al entendimiento de estos.

En este contexto, los avances científicos, han sido centrados en la definición de umbrales de precipitación para predecir movimientos en masa en el Valle de Aburrá (Aristizabal et al., 2011). Sin embargo, diversos autores como (Abraham et al., 2021) han encontrado que cuando los umbrales son solo definidos con la precipitación, no se tienen en cuenta las características hidrogeológicas presentes, por lo que a menudo tienen el inconveniente de generar falsas alarmas, lo que limita su aplicación en una escala regional. Por tanto, es crucial incorporar variables que brinden una comprensión más profunda del comportamiento del suelo, de esta manera ha destacado la importancia de evaluar la humedad antecedente del suelo, incluyendo mediciones directas del contenido de agua, zonas de recarga y niveles de aguas subterráneas, para mejorar la capacidad de predecir movimientos en masa (Bogaard y Greco, 2018)

En este contexto, el objetivo de la presente investigación consiste en desarrollar un proyecto piloto para establecer una red de monitoreo de humedad en el terreno, con el propósito de contribuir a la gestión del riesgo asociado a movimientos en masa. A través de este piloto, se pretende implementar metodologías que permitan obtener información crucial sobre el avance del frente húmedo, la interacción suelo-atmósfera, la caracterización de los suelos y la identificación de zonas de recarga. Este enfoque facilitará la comprensión y priorización de áreas propensas a movimientos en masa.

La metodología propuesta en este piloto se fundamenta en tres pilares. En primer lugar, se plantea llevar a cabo un análisis de datos existentes de humedad del suelo, a continuación, se contempla la realización de montajes experimentales en laboratorios de suelos, incorporando sensores de humedad para obtener mediciones precisas. Finalmente, se propone el diseño de una red de monitoreo de humedad en el terreno, este enfoque integral tiene como objetivo principal la creación de un piloto eficiente para el estudio de este fenómeno, así como para comprender su relación con los movimientos en masa.

Datos y Metodología Datos

Desde el proyecto SIATA, en el Valle de Aburrá, se han tomado datos a lo largo del tiempo mediante la instalación de 19 estaciones de medición de humedad del suelo. Estas estaciones, distribuidas en diferentes municipios del valle, hacen parte del monitoreo realizado por los equipos de Hidrología y Geotecnia. La implementación de estas estaciones se inició en 2017, y actualmente, 9 siguen en funcionamiento. En Tabla 1 se observan todas las estaciones que han sido instaladas, junto con su fecha de instalación y desinstalación y el tipo de sensor.

Tabla 1: Estaciones de humedad instaladas dentro del proyecto SIATA

Estación	Código	Equipo	T. Sensor	Fecha Ins.	Fecha Des.
Ancon 2	436	Geotecnia	Stevens	3/12/2020	6/20/2021
Atavanza	570	Geotecnia	5Te	12/03/2021	12/21/2021
Bermejala	618	Geotecnia	5Te	6/29/2022	Activo
Canalon	141	Geotecnia	5Te	6/24/2015	Inactivo
Canalon	142	Geotecnia	5Te	6/23/2015	Inactivo
La Sanin	188	Geotecnia	5Te	6/27/2017	1/01/2020
Manga Arriba	424	Geotecnia	5Te	3/01/2020	Activo
Montanita	455	Geotecnia	Stevens	12/16/2020	4/04/2022
Oasis	576	Geotecnia	5Te	12/10/2021	12/01/2022
Pueblo Viejo	555	Geotecnia	Stevens	1/10/2021	1/04/2022
San Jose	568	Geotecnia	Stevens	12/01/2021	11/01/2022
Santa Elena	577	Geotecnia	5Te	1/26/2022	11/02/2023
Finca Altamira	532	Hidrología	Stevens	19/05/2021	Activo
Quebrada Larga	396	Hidrología	Stevens	26/09/2019	Activo
Naranjal	613	Hidrología	Stevens	21/06/2022	Activo
Cabana	620	Hidrología	Stevens	29/06/2022	Activo
Ie San Luis	608	Hidrología	Stevens	8/06/2022	Activo
Laguna Quitasol	611	Hidrología	Stevens	14/06/2022	Activo
Vereda Protrerito	541	Hidrología	Stevens	18/06/2021	Activo

Las estaciones registran datos de humedad cada minuto, lo que garantiza una frecuencia de muestreo significativa para análisis detallados. Dos tipos de sensores se han utilizado en este proceso, inicialmente, se empleó el sensor Decagon 5Te, el cual fue posteriormente reemplazado por el sensor Stevens Hydraprobe, que ha emergido como el sensor principal utilizado actualmente para medir la humedad en el suelo.

El sensor Stevens Hydraprobe es fundamental en esta investigación, especialmente en áreas como montajes experimentales, ya que son los sensores con los que se hacen todas las pruebas necesarias.

Descripción de sensores de humedad Steven Hydraprobe

Los sensores de humedad Stevens emplean una radiofrecuencia oscilante para estimar el contenido de humedad en el suelo y se expresa en una fracción volumétrica. La señal oscilante resultante se relaciona con la permitividad dieléctrica compleja del suelo. Esta variable describe la capacidad de un material para permitir un campo eléctrico. La permitividad contiene componentes tanto reales como imaginarias y depende de la frecuencia, la temperatura y las propiedades del material (Stevens, 2018). Esto se expresa de la siguiente manera:

$$\kappa = \epsilon r - j\epsilon i$$

donde κ es la permitividad dieléctrica compleja, ϵr es la permitividad dieléctrica real, ϵi es la permitividad dieléctrica imaginaria y $j = \sqrt{-1}$ (Topp et al., 1980).

Luego, las calibraciones posteriores llevan la respuesta del sensor sin procesar a una estimación de la humedad del suelo.

Datos adquiridos con el sensor Stevens Hydraprobe El sensor de humedad Stevens Hydraprobe mide la temperatura del suelo, la humedad del suelo, la conductividad eléctrica del suelo y la permitividad dieléctrica compleja. Adicionalmente, calcula otras variables mediante ecuaciones de calibración que vienen configuradas por defecto. En la Tabla 2, se pueden observar los distintos parámetros adquiridos y sus respectivas unidades.

Tabla 2: Medidas tomadas por el sensor de humedad (Tomados de (Stevens, 2018))

Orden del parámetro	Parámetro	Unidad
Parámetro 1	Humedad del suelo	Fracción de agua por volumen
Parámetro 2	Conductividad eléctrica con Corrección de temperatura	S/m
Parámetro 3	Temperatura	C
Parámetro 4	Temperatura	F
Parámetro 5	Conductividad eléctrica	S/m
Parámetro 6	Permitividad dielectrica real	Sin unidad
Parámetro 7	Permitividad dielectrica imaginaria	Sin unidad

Calibración del sensor Stevens Hydraprobe

De acuerdo al manual de los sensores Stevens Hydraprobe, la calibración de suelo general ha sido probada y utilizada en distintos tipos de suelo y se han obtenido buenos resultados para la mayoría de los suelos agrícolas y minerales con tamaños arena, limo y arcilla. Se recomienda mantener el HydraProbe configurado en la calibración de suelo GENERAL. Otras calibraciones de fábrica incluyen O (suelo orgánico) y R (lana de roca) (Stevens, 2018).

Las curvas de calibración son polinomios que calculan la humedad del suelo a partir de la permitividad dieléctrica real. Las calibraciones de humedad del suelo típicamente tomarán una de dos fórmulas generales diferentes. Hay dos fórmulas generales que matemáticamente tendrán la apariencia de la ecuación 1 o 2 (Stevens, 2018):

$$\theta = A + B\epsilon_r + C\epsilon_r^2 + D\epsilon_r^3 \quad (1)$$

$$\theta = A\sqrt{\epsilon_r} + B \quad (2)$$

Donde θ es la humedad, ϵ_r es la permitividad dieléctrica real y A , B , C y D son coeficientes. Este procedimiento permitirá al usuario seleccionar sus valores A , B , C y D para las ecuaciones [A1] y [A2].

En la tabla 3 se muestran los modos de calibración que trae el sensor Stevens Hydraprobe:

Tabla 3: Modos de calibración de fábrica (Tomado de Stevens (2018) Tabla C1)

Prueba	Probeta	Humedad
G	Mayoría de los suelos (Por defecto)	A2
O	Suelos de alto contenido orgánico, Turba y abono fino	A1, C= 0 y D= O
R	Lana mineral de roca (Rock wool)	A1, C= 0 y D= O
C	Custom 1	A1
K	Kustom 2	A1

La tabla 4, muestra los coeficientes de calibración para cada ecuación de fábrica para el sensor Stevens.

Tabla 4: Coeficientes para calibraciones de fábrica (tomado de (Stevens, 2018), Tabla C2)

Calibración	Aplicación	A	B	C	D
G	A2	0.109	-0.179	NA	NA
O	A2	-0.02134	0.013148	0	0
R	A1	-0.02134	0.013148	0	0
C (CUS1)	A1	0	0.0224	-0.00047	0.00000514
K (KUS2)	A2	0.109	-0.179	NA	NA

Metodología La metodología planteada para el análisis de humedad en el suelo, engloba 3 líneas de trabajo principales para su ejecución, las cuales son: Validación de datos y análisis de históricos existentes, montajes experimentales y Recuperación y análisis de información en campo (Figura 1).

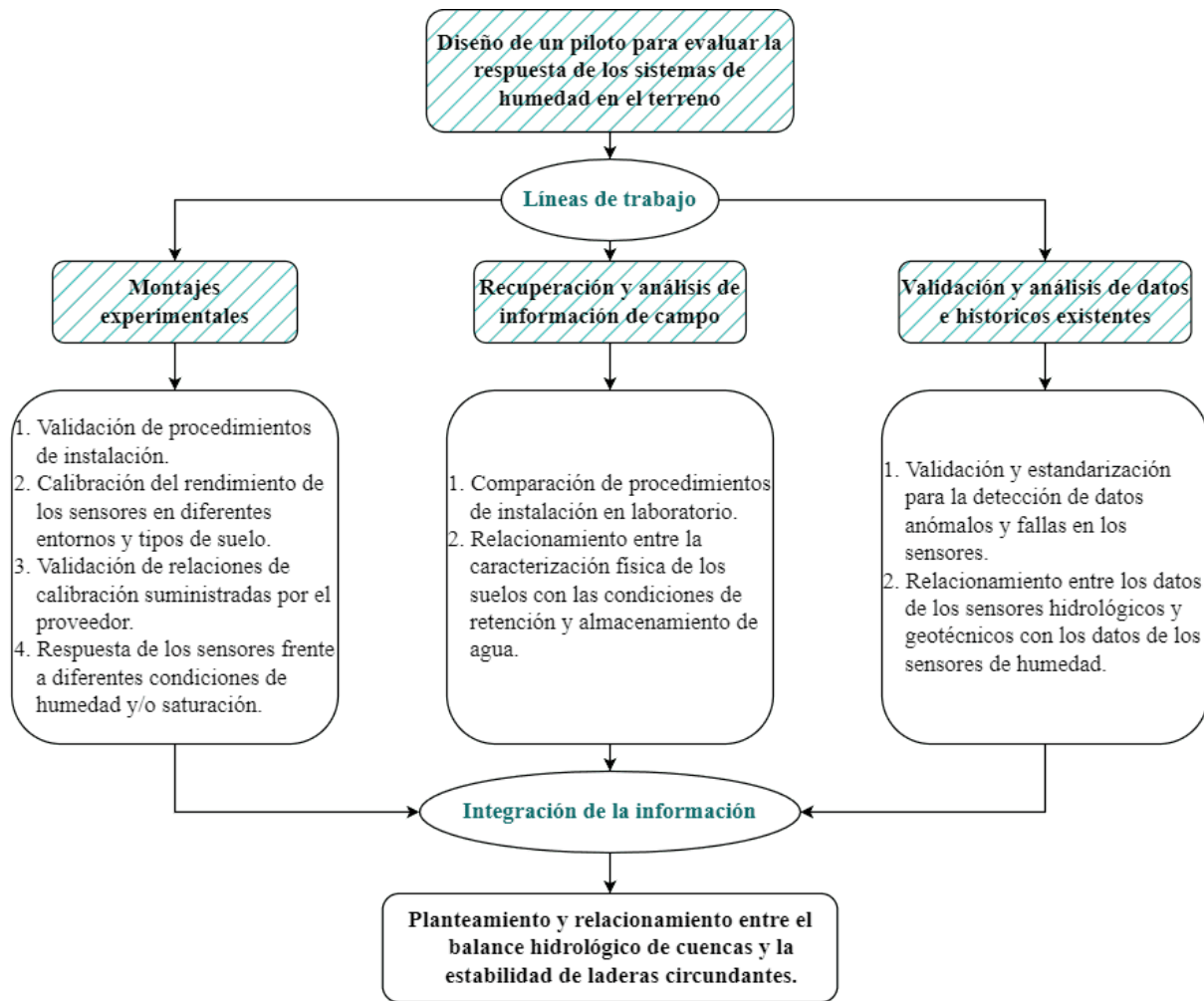


Figura 1: Metodología planteada para el análisis de humedad en el suelo

Validación de datos y análisis de históricos existentes

Para la investigación, los datos de humedad son estudiados como una serie de tiempo, que es una secuencia de datos que se encuentran ordenados cronológicamente y espaciados en intervalos iguales o desiguales (Amat and Ortiz, 2021). La revisión de las series de tiempo permite realizar análisis de datos con el propósito de encontrar patrones, datos anómalos y generar el entendimiento completo de las señales a medida que el tiempo avanza (Nieto et al., 2002). Adicionalmente, las series de tiempo están relacionadas con el análisis de predicción y pronóstico, y se pueden implementar siempre y cuando exista una dependencia entre el fenómeno estudiado y el tiempo, una tendencia de los datos y correlación entre ellos. Particularmente, en este estudio el entendimiento de las series de tiempo y los registros históricos que se tienen de los sensores de humedad, favorecen en gran medida el planteamiento y o diseño del piloto de humedad y la interpretación de los datos que surjan de este.

Inicialmente, para la exploración de datos, se realizan pruebas de estacionariedad, seguido por un modelo que identifica de forma automática las áreas con cambios bruscos en la serie de datos, esto con el fin de detectar los puntos en los que se producen transiciones significativas. También se realiza la des-

composición de las series en tres componentes fundamentales: tendencia, estacionalidad y residuo para comprender mejor el comportamiento de la serie y facilitar su análisis. Finalmente, se hace un análisis de autocorrelación de la serie de tiempo con el objetivo de identificar los datos que presentan significancia estadística para su posterior predicción.

A continuación, se presentan algunos de los aspectos teóricos y metodológicos tenidos en cuenta para el análisis de datos:

Estacionariedad

Consiste en que las propiedades estadísticas (media, mediana, desviación estándar) de una serie temporal tiendan a ser constantes a lo largo del tiempo, dado que una serie estacionaria permite que la predicción de modelos estadísticos aplicados sea más efectiva (Vijay, 2023). Las metodologías estadísticas comúnmente empleadas para la definición de estacionariedad son ADF y KPSS ((Vijay, 2023)), para estas existe un factor importante llamado “Valor p”. Este valor representa la probabilidad de que la hipótesis sea nula. En ADF si “p” es mayor que 0.05 quiere decir que la serie es estacionaria, en cambio, en KPSS se da de manera inversa ((Kwiatkowski et al., 1992)), . Por otro lado se tiene el test estadístico Philips y Perrón, el cual permite comprobar la presencia de fluctuaciones estacionarias en torno a diferentes niveles de ruptura, que consisten en puntos en los cuales hay un cambio significativo en el patrón o comportamiento de los datos de la serie de tiempo (Presno, Maria, López, 2001).

Detección de puntos de cambio en la serie de tiempo

En el análisis de series de tiempo, una ruptura (también conocida como “break.” o “change point”) se refiere a un punto o periodo en el cual hay un cambio significativo en el patrón o comportamiento de los datos de la serie de tiempo. Representa una interrupción en la tendencia, la estacionalidad o la variabilidad de los datos Lund et al. (2007). Detectar y comprender las rupturas en una serie de tiempo es importante para el análisis y la predicción precisos. Esto permite ajustar los modelos y tener en cuenta los cambios en el patrón de los datos, mejorando así la precisión de las predicciones o el análisis posterior. Con el fin de identificar las rupturas en las series de tiempo se usó la librería Ruptures” de python. Este paquete proporciona métodos para el análisis y la segmentación de señales. Los algoritmos implementados incluyen detección exacta y aproximada para varios modelos paramétricos y no paramétricos (Truong et al., 2018).

Descomposición de series de tiempo: Método clásico

El método de descomposición clásico se originó en la década de 1920. Los datos de series de tiempo pueden mostrar una gran variedad de patrones, y a menudo resulta útil dividir una serie temporal en varios componentes, cada uno de los cuales representa una categoría de patrón subyacente (Rob J Hyndman and George, 2018). La descomposición de series de tiempo en estacionalidad, tendencia y residuo es una herramienta importante para comprender y analizar los diferentes patrones y componentes presentes en los datos. Proporciona información valiosa para el pronóstico, detección de cambios, análisis de estacionalidad y evaluación de la variabilidad no sistemática en la serie de tiempo.

Autocorrelación

El coeficiente de correlación entre dos valores en una serie de tiempo se denomina función de autocorrelación (ACF). Es una medida de asociación entre valores actuales y pasados e indican cuáles son los valores más viejos y útiles para predecir valores futuros. Con estos datos se podría determinar el orden de los procesos en un modelo ARIMA. En otras palabras, mide la correlación entre los valores de una secuencia temporal X_t , distanciados en un lapso de tiempo k . A este tiempo k se le conoce como retardo, retraso o rezago. El rezago denota el período entre los valores de la secuencia para la cual se mide el tipo y grado de auto correlación de la variable considerada (León-álvarez et al., 2016). Para calcular la autocorrelación se usa la librería de Python Statsmodels.

Análisis de la relación entre humedad, precipitación y temperatura Tras realizar el primer análisis general de las series de tiempo, se posigue con un análisis más detallado entre humedad, lluvia y precipitación, para ello se propone una metodología basada en la utilización de datos históricos disponibles en las redes de humedad de los equipos de Geotecnia e Hidrología del proyecto SIATA a lo largo del Valle de Aburrá. La ubicación precisa de las estaciones de humedad consideradas en este análisis se presenta en la Figura 2, las cuales son elegidas por medio de las pruebas mencionadas anteriormente como estacionariedad, estacionalidad y demás, que dan evidencia de la calidad de datos del sensor. Además, se tuvieron en cuenta únicamente, aquellas estaciones de humedad que contaban con más de un año de transmisión de datos, asegurando así una base de información robusta y consistente para el análisis de la relación entre humedad, precipitación y temperatura.

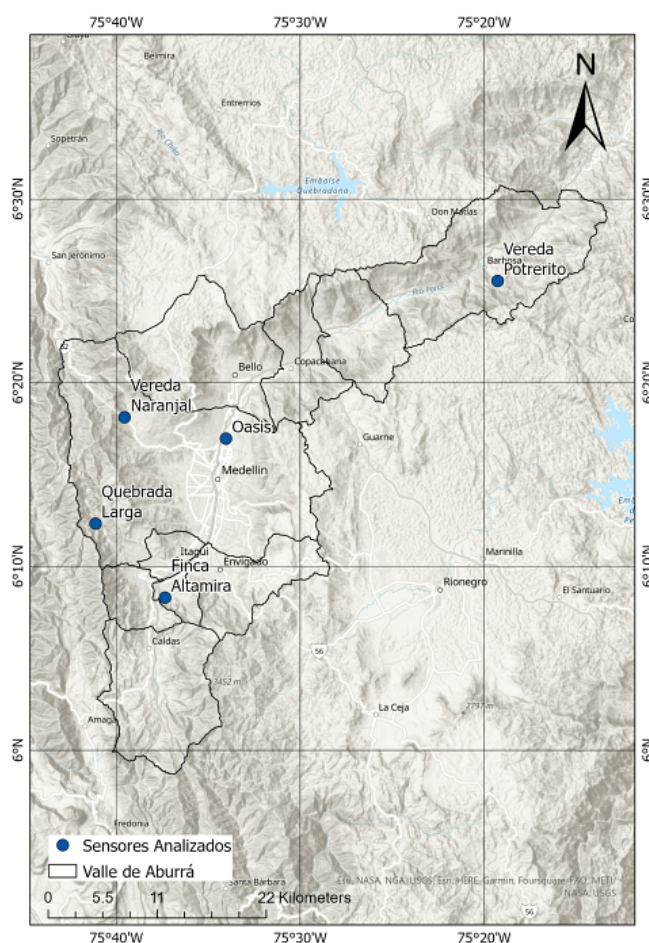


Figura 2: Ubicación de las estaciones de humedad consideradas en este estudio

tiene como objetivo realizar un análisis exploratorio de las variables incluyendo ciclos, correlaciones, correlaciones rezagadas y pruebas de causalidad a través de distintas escalas de tiempo, con el fin de identificar patrones de interés en la interacción suelo-atmósfera.

Montajes experimentales

Los montajes experimentales son pruebas llevadas a cabo en un ambiente controlado, que tienen como fin verificar la calidad de datos emitidos por el sensor. Estas pruebas se llevaron a cabo en el laboratorio

de suelos de la Universidad EAFIT en un periodo de 4 semanas, para el montaje usaron 5 sensores de humedad Stevens Hydraprobe. Estos sensores emplean una tecnología de radiofrecuencia oscilante para estimar el contenido de humedad en el suelo, expresado en forma de fracción volumétrica (mayor detalle en la descripción de los datos). Mediante estos montajes se tiene como objetivo validar el rendimiento de los sensores calculando el contenido de humedad en el suelo.

Los sensores Stevens Hydraprobe capturan 7 variables (Tabla 2). Sin embargo, para este estudio, se priorizó el seguimiento de dos variables, el contenido volumétrico de agua y la permitividad real. Estas son las variables que se consideran en las ecuaciones de calibración de los sensores proporcionadas por el proveedor y consecuentemente las que se alinean con el objetivo principal de las pruebas.

Adicionalmente, para las pruebas se definió el uso de 15 probetas de suelo fabricadas en laboratorio con características específicas de tipo de suelo, densidad y humedad. Las probetas se conformaron con un suelo limo-arenoso, comúnmente encontrado en la región del Valle de Aburrá, y con características hidráulicas y de comportamiento que favorecen la ejecución de las pruebas. Es importante destacar que, los niveles de humedad y el grado de compactación del suelo se definieron a partir de los resultados de ensayos de compactación.

Las curvas de compactación corresponden a la relación entre el contenido de humedad de la muestra y la densidad seca después de realizar el procedimiento de compactación bajo una energía conocida. Esta curva presenta forma de parábola cóncava, cuyo pico corresponde a la humedad y densidad óptima del material, en donde a su izquierda se tiene la rama seca y a su derecha se tiene la rama húmeda. El valor de humedad mínimo identificado en la curva de compactación fue del 4 % y el valor máximo fue del 20 %, teniendo una humedad y densidad óptima de 17.5 kN/m³ respectivamente como se observa en la Figura 3.

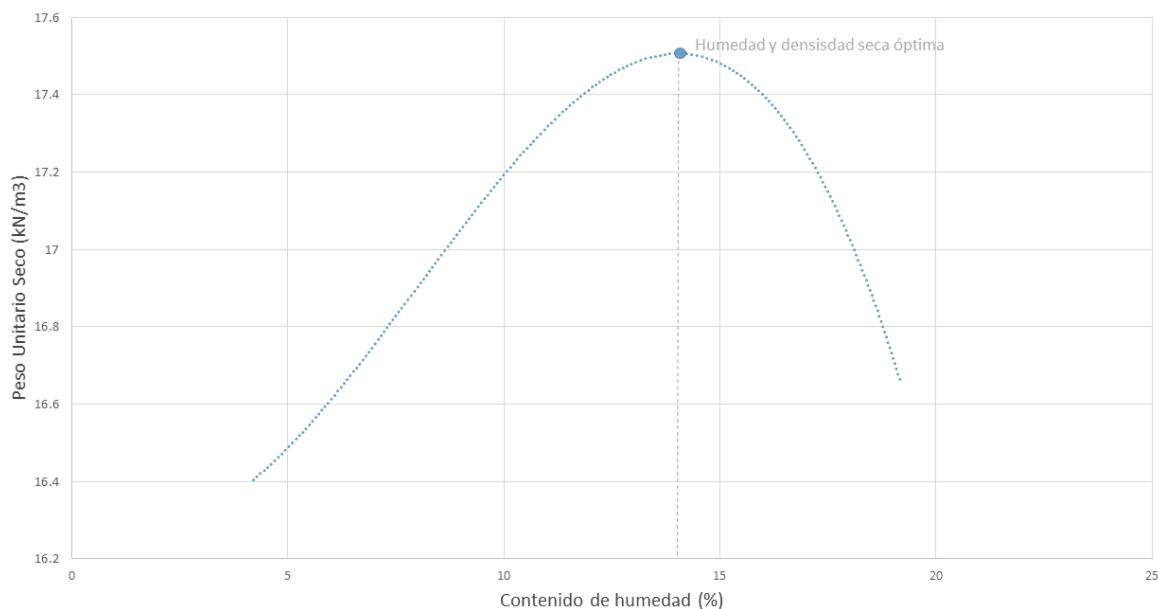


Figura 3: Curva de compactación del suelo limoarenoso.

De acuerdo con los resultados del ensayo de compactación se plantearon 5 porcentajes de humedad de

referencia para realizar las mediciones con los sensores Stevens Hydraprobe, estos fueron 4 %, 8 %, 12 %, 16 % y 20 %, con una densidad de 14.5 kN/m³. Esta densidad corresponde al 80 % de la densidad óptima obtenida en el ensayo, y se define tratando de recrear las condiciones de densidad que se encuentra normalmente en campo.

Una vez definidos los porcentajes de humedad de referencia y considerando la conformación de las 15 probetas, se plantea la estructuración de 3 pruebas con 3 grupos de medición en etapas consecutivas. Cada grupo estuvo compuesto por 5 probetas con diferentes contenidos de humedad, con valores de humedad fijados en 4 %, 8 %, 12 %, 16 % y 20 %. Cada probeta se equipó con un sensor y, en intervalos semanales, los sensores se alternaron entre los diferentes grupos de probetas, específicamente en los días 18 y 25 de julio. El propósito subyacente era medir diversas humedades en diferentes probetas utilizando los mismos sensor, permitiendo así la comparación de resultados y la evaluación de la precisión de los sensores.

En la Tabla 5, se muestra el plan de rotación propuesto, allí se evidencia el orden de las pruebas, sus respectivas probetas, porcentajes de humedad a medir y número de sensor.

Tabla 5: Plan de rotación de los 5 sensores de humedad Stevens Hydraprobe en las 15 probetas.

Prueba	Probeta	Humedad	Sensor
Prueba 1	1A	4 %	1
Prueba 1	1B	8 %	2
hline Prueba 1	1C	12 %	3
Prueba 1	1D	16 %	4
Prueba 1	1E	20 %	5
Prueba 2	2A	4 %	5
Prueba 2	2B	8 %	1
Prueba 2	2C	12 %	2
Prueba 2	2D	16 %	3
Prueba 2	2E	20 %	4
Prueba 3	3A	4 %	4
Prueba 3	3B	8 %	5
Prueba 3	3C	12 %	1
Prueba 3	3D	16 %	2
Prueba 3	3E	20 %	3

Evaluación de ecuaciones de calibración

Es fundamental destacar que los sensores Stevens Hydraprobe ofrecen mediciones del contenido volumétrico de agua basadas en cinco ecuaciones de calibración mostradas en la descripción de los datos. Estas ecuaciones son definidas por el fabricante de acuerdo con el tipo de suelo, utilizando la permitividad real medida por el sensor como dato de entrada. En consecuencia, después de llevar a cabo diversas mediciones de humedad con las 15 probetas y las tres pruebas planteadas, se propone validar cada ecuación de calibración con el objetivo de identificar aquella que mejor se ajuste a los datos. Además, se busca proponer una ecuación propia con el fin de evaluar si podría ofrecer resultados superiores a las proporcionadas por el fabricante.

Este análisis se lleva a cabo mediante la comparación del porcentaje de humedad obtenido con el porcentaje de humedad teórico. Se emplea una línea de tendencia obtenida a partir de una regresión lineal, acompañada de un intervalo de confianza de acuerdo a la desviación estándar de los datos y adicionalmente, se incorpora el valor de R-cuadrado, dando información de la calidad del ajuste de la regresión lineal a los datos, este valor se considera una medida de cuánto el modelo explica la variabilidad de los datos, siendo mayor su capacidad cuanto más cercano a 1 sea el valor de R-cuadrado.

Verificación de detección de cambios de humedad

Tras encontrar la mejor ecuación de calibración para los sensores y con el objetivo de profundizar en la comprensión de los datos obtenidos, se busca llevar a cabo un ensayo adicional que tiene como objetivo observar la respuesta del suelo y de los sensores ante variaciones en la humedad. Dicha variabilidad se

genera mediante la simulación de precipitaciones controladas, permitiendo examinar su comportamiento en condiciones similares a las de una situación de campo.

Para llevar a cabo el ensayo, se emplea una probeta de PVC con dimensiones de 10 cm de ancho por 20 cm de alto. En esta probeta se conformo una muestra de suelo limo-arenoso, de la misma manera en que se realizó en la validación de la calibración de los sensores.

Este ensayo se inicia estableciendo la humedad de la rama seca del suelo del 4 %, de acuerdo a la curva de compactación previamente obtenida en el laboratorio, buscando aumentar la humedad gradualmente.

De acuerdo al análisis de calibración realizado en etapas anteriores, se estableció que la adición de 87 ml de agua aumenta la humedad del suelo en un 4 % aproximadamente, bajo las condiciones específicas de la probeta. Esto se traduce en una equivalencia de 11 mm de lluvia en función del área expuesta en la probeta. Por lo tanto, semanalmente se adicionó agua sin permitir la evaporación, buscando saturar el suelo. En la Tabla 6 se muestra la cantidad de agua adicionada en fechas determinadas para cada etapa.

Tabla 6: Adiciones de agua realizadas durante el ensayo de cambios de humedad

Fecha	Lluvia simulada(mm)	Humedad esperada (%)	Saturación esperada %
3-ago	11	8	23
8-ago	11	12	35
15-ago	11	16	47
22-ago	11	20	59
29-ago	34	32	94
1-se	5	34	99

En este contexto, es importante tener en cuenta el incremento del porcentaje de saturación del suelo, el cual se calcula usando la siguiente ecuación del libro Das (2004):

$$S(\%) = \frac{W(\%) \cdot G_s}{e}$$

Donde S representa el porcentaje de saturación, W indica el porcentaje de humedad, el cual es determinado a través del sensor. Además, G_s hace referencia a la gravedad específica del suelo, obtenida mediante ensayos previos de laboratorio, cuyo valor es 2.75, y representa la presión de poros, calculada mediante la densidad seca de la muestra (1.4 g/cm³) y la gravedad específica mencionada.

Recuperación y análisis de información de campo

Selección de ambiente semicontrolado

Para la recuperación y análisis de información de campo es importante establecer una red de monitoreo de humedad con el fin de tener mayor información del riesgo asociado a movimientos en masa. A través de esta red, que propone construir con sensores de humedad Stevens Hydraprobe, es posible aplicar enfoques que proporcionen datos acerca del comportamiento de la humedad en los suelos de acuerdo a su caracterización, el avance del frente húmedo, la interacción entre el suelo y la atmósfera y la identificación de zonas recarga, lo que es útil para comprender y priorizar zonas susceptibles a movimientos en masa.

Es importante tener en cuenta que esta red piloto de monitoreo de humedad en el suelo, debe estar ubicada en una subcuenca del Valle de Aburrá con características que generen amenaza alta por movimientos

en masa. Para seleccionar la cuenca, se realizó una etapa inicial de revisión bibliográfica, seguida por análisis de características morfométricas que permiten determinar la influencia de variables condicionantes ante la ocurrencia de movimientos en masa, disponibilidad de información secundaria que sea útil para caracterizar la cuenca y visitas de campo que permiten tener un contexto más amplio de la zona.

Para evaluar cada una de las cuencas que se obtengan mediante revisión bibliográfica, se plantean 11 variables para evaluar la factibilidad de realizar el piloto de humedad, las cuales son:

- Área de la cuenca.
- Área de zonas de amenaza alta por movimientos en masa dentro de la cuenca.
- Área de zonas de amenaza alta por avenidas torrenciales dentro de la cuenca.
- Área de zonas de riesgo alto por movimientos en masa dentro de la cuenca.
- Área de zonas de riesgo alto por avenidas torrenciales dentro de la cuenca.
- Unidades Geológicas presentes en la cuenca.
- Área de zona urbana dentro de la cuenca.
- Usos del suelo presentes en la cuenca.
- Inventario de movimientos en masa.
- Disponibilidad de información secundaria asociada a exploraciones geotécnicas.
- Presencia de sensores del proyecto SIATA, como pluviómetros y niveles de agua.

Adicionalmente, con el objetivo de mejorar la precisión en las estimaciones y reducir la incertidumbre en la elección entre subcuencas preseleccionadas a partir de las 11 variables mencionadas, se implementó un proceso analítico jerárquico (Analytic Hierarchy Process o AHP), este proceso fue evaluado por los 7 integrantes del equipo de Geotecnia. Es basado en la escala SAATY, que refleja juicios de valor al comparar dos alternativas según criterios técnicos (Mendoza et al. (2019)).

En el último paso de la selección de la subcuenca, se propone una salida de campo a las tres mejores subcuencas obtenidas mediante el método SAATY. El objetivo es verificar la viabilidad logística para la instalación de los sensores, considerando aspectos como la señal, la accesibilidad y otros factores relevantes asociados a las variables condicionantes que pueden ser importantes ante la ocurrencia de movimientos en masa.

Caracterización de la cuenca de la quebrada La Despensa

Para realizar un análisis detallado de la cuenca La Despensa, se recopiló información secundaria proveniente de estudios previos, incluyendo el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Medellín. A partir de esta información, se creó una base de datos cartográfica con información asociada al modelo digital de elevación digital (DEM) con resolución de 1 m y 12.5 m, mapas de geología y geomorfología a escala 1:10.000, inventario de movimientos en masa y parámetros morfométricos de la cuenca, con el fin de determinar sus principales características y así mismo definir posibles puntos de monitoreo.

Definición de puntos de instalación

La selección de ubicaciones para instalar las estaciones de humedad dentro de la cuenca de la quebrada La Despensa tuvo como objetivo abarcar una diversidad de características en la cuenca, como geomorfología, geología, morfometría y usos del suelo, asegurando así la recopilación de datos representativos para

diversas condiciones y contextos en toda la cuenca. Es importante destacar que, al elegir las ubicaciones de los sensores, se consideró también la proximidad a viviendas para garantizar fuentes de energía cercanas que posibilitaran una transmisión eficiente de los datos.

Se realizó inicialmente un análisis utilizando sistemas de información geográfica y análisis geoespacial para identificar puntos con diversas características geomorfológicas, geológicas y relacionadas con el uso del suelo en la cuenca de acuerdo a la información secundaria recopilada. Luego, se llevaron a cabo visitas de campo para evaluar la viabilidad operativa de la instalación en los puntos preseleccionados.

Posteriormente, se empleó el índice de humedad topográfica (TWI) para precisar la ubicación de los puntos preseleccionados en zonas de laderas con mayores contenidos de humedad. El TWI permite identificar las áreas potenciales donde la humedad se concentra o donde el agua tiende a acumularse, su cálculo se basa en un Modelo de Elevación Digital (DEM), considerando la pendiente y la acumulación de flujo, según se muestra en la ecuación 3. Aquí, St representa la tangente de la pendiente y UCA indica la contribución de aguas arriba en un punto específico de la ladera, basándose en la acumulación de flujo. En nuestra investigación, se utilizó el DEM de Carto-Antioquia, el cual ofrece la resolución espacial más detallada disponible para la cuenca, con una precisión de 2.0m.

$$TWI = \ln\left(\frac{UCA}{St}\right) \quad (3)$$

Finalmente, basándose en los resultados obtenidos en el análisis de datos históricos se determina que es de gran relevancia tener dos sensores de humedad en la misma ladera, dado que los tiempos de respuesta en términos de infiltración y transporte de agua a través del suelo varían, por lo que de acuerdo a todos los análisis anteriores se busca determinar puntos óptimos para la instalación de 2 sensores en la misma ladera de acuerdo a la viabilidad en términos operativos a lo largo de la ladera y el comportamiento de la humedad espacialmente según el TWI.

Resultados Validación de datos y análisis de históricos existentes

Estacionariedad

La estacionariedad es un factor estadístico importante encaminado a la predicción de series de tiempo. A partir de los resultados obtenidos por la metodología ADF y KPSS en los datos históricos existentes en los sensores de humedad, se evidencia que la mayoría de estaciones presentan un comportamiento estacionario diferencial de acuerdo, debido a que el test de ADF da como resultado que las series de tiempo son estacionarias, sin embargo según el test KPSS no lo son.

De acuerdo al análisis realizado a las series de tiempo que tienen comportamiento estacionario diferencial, se encuentra que estos se deben a cambios causados por agentes externos, como cambios en la precipitación, dando como resultado fluctuaciones alrededor de un comportamiento estacionario, lo que conlleva a aplicar la prueba de Phillips y Perrón con el fin de tener resultados acordes al comportamiento de la serie temporal.

Siguiendo el marco teórico de la prueba Phillips y Perrón, todas las estaciones son estacionarias menos la estación de Pueblo Viejo, lo que puede explicarse con una intermitencia en la transmisión de los datos presentada durante el mes de marzo, generando inconsistencia en los datos, lo que provoca un fuerte cambio en el comportamiento de la serie de tiempo.

Puntos de cambio Mediante el modelo de detección de puntos de cambio en la serie de tiempo, se lograron identificar fechas en las cuales se produjeron cambios significativos en las propiedades estadísticas de la serie. Este procedimiento resulta de suma importancia, ya que permite examinar las posibles causas

de las rupturas observadas en la serie de tiempo. En la Tabla 7 se muestran las fechas de cambios fuertes en el porcentaje de humedad el suelo para cada una de las estaciones.

Tabla 7: Rupturas en las series de tiempo.

Estación	Rupturas	Media móvil
Oasis	25/02/2022	Aumenta
	16/12/2022	Disminuye
Montañita	14/03/2021	Aumenta
	26/04/2021	Aumenta
	03/07/2021	Disminuye
	08/10/2021	Aumenta
La Bermejala	10/12/2022	Disminuye
Santa Elena	16/04/2022	Aumenta
	30/06/2022	Disminuye
Pueblo viejo	07/04/2022	Aumenta

De acuerdo a los datos presentados en la Tabla 7, se puede observar que, por ejemplo para la estación Montañita registró información para el año 2021. A través del análisis de rupturas, se identificó que en los meses de marzo, abril y octubre se produjo un aumento en el porcentaje de humedad del suelo, lo cual generó una media móvil ligeramente mayor en esta zona en comparación con el resto de la serie de tiempo. Adicionalmente, se observa que en el mes de julio de 2021 se produjo un punto de quiebre, en el cual la humedad en el suelo disminuyó.

Estos resultados son de gran relevancia, ya que los meses de marzo, abril y mayo de 2021 corresponden a la primera temporada de lluvias del año, y aproximadamente de septiembre a noviembre de 2021 se presenta la segunda temporada de lluvias. Estos hallazgos concuerdan significativamente con los puntos de ruptura identificados.

Descomposición de series de tiempo

Se realizó descomposición de series de tiempo de manera aditiva, en tres componentes: tendencia, estacionalidad y residuo. En donde se evidencia para la mayoría de estaciones no hay una tendencia creciente o decreciente marcada, ya que se mantiene relativamente constante durante la mayor parte de su período. Sin embargo, se identificaron puntos de ruptura significativos previamente mencionados.

Por otro lado, en el segundo componente correspondiente a la estacionalidad, da evidencia de la presencia de estacionalidad en la serie de tiempo, con períodos aproximados de 25 días. Esto indica que existen patrones recurrentes en los datos a lo largo del tiempo.

Finalmente, el residuo mostrado el componente de residuo muestra picos de humedad muy notorios, los cuales destacan y podrían estar relacionados, según los análisis realizados, con episodios de lluvia intensa. Estos picos representan desviaciones significativas de la tendencia y la estacionalidad esperadas.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos a través de la descomposición para las estaciones analizadas.

Tabla 8: Resultados descomposición de series de tiempo.

Estación	Tendencia	Estacionalidad	Periodos
Oasis	Sin tendencia	Si	Aproximadamente 25 días
Montañita	Sin tendencia	Si	Aproximadamente 30 días
La Bermejala	Sin tendencia	Si	Aproximadamente 25 días
Santa Elena	Tendencia decreciente	Si	Aproximadamente 25 días
Pueblo viejo	Tendencia creciente	Si	Aproximadamente 25 días

Se puede destacar que en las estaciones que no tuvieron fallas asociadas a la toma de datos se tienen series de tiempo sin tendencia. Por otro lado, es de resaltar que los periodos calculados, son aproximados sin embargo todos se encuentran al rededor de un mes.

Autocorrelación Como fue definido anteriormente la autocorrelación en series de tiempo es una medida estadística que cuantifica la relación entre los valores pasados de una serie y los valores presentes. En otras palabras, la autocorrelación mide la similitud entre los valores sucesivos de una serie de tiempo. En el contexto de una serie de tiempo que representa porcentajes de humedad en el suelo, la autocorrelación mostraría cómo los valores anteriores de humedad se relacionan con los valores actuales.

Para calcular la autocorrelación en las series de tiempo de humedad para cada una de las estaciones del estudio, se tuvieron en cuenta retrasos iguales a longitud de los datos, por lo tanto, cada retraso representa un minuto en la serie de tiempo. Teniendo como resultado los valores que se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9: Resultados autocorrelación.

Estación	Último retraso aproximado con SE	Tipo de correlación
Oasis	40000	Positiva
Montañita	30000	Positiva
La Bermejala	40000	Positiva
Santa Elena	40000	Positiva
Pueblo viejo	20000	Positiva

En la mayoría de estaciones el último retraso con significancia estadística corresponde a aproximadamente 40000. Este valor traducido a días seria igual a un valor cercano al día 27; Los valores actuales de la serie de tiempo se relacionan con sus valores anteriores positivamente.

Esto permite concluir que la presencia de una significativa autocorrelación positiva hasta el día 27 en las series de tiempo de humedad en el suelo sugiere que los valores de humedad en un día determinado están influenciados por los valores de humedad en los días anteriores.

Análisis de la relación entre humedad, lluvia y precipitación

Como resultado de los ciclos anuales, mensuales y diarios, para las 5 estaciones analizadas se destaca una relación inversamente proporcional entre la temperatura y la humedad. La coherencia de este patrón se ve

respaldada por las correlaciones de Pearson (ver teoría en el Anexo de la actividad 12/Sección de aspectos teóricos y metodológicos), cuyo resultado aproximado de -0.6 sugiere una influencia moderada y consistente en sentido inverso entre ambas variables, lo que se fortalece al examinar las correlaciones rezagadas, las cuales revelan que la temperatura tienen una influencia inversa significativa sobre la humedad en días cercanos y horas próximas, este efecto se manifiesta especialmente a partir de la segunda hora anterior, subrayando la relevancia de la variabilidad temporal en esta dinámica. Adicionalmente, mediante el análisis de causalidad de Granger, se confirma que la temperatura desempeña un papel causal en la variabilidad de la humedad en escalas de días y horas.

A través de los análisis de los ciclos anuales, mensuales y diarios, y de las correlaciones de Pearson entre humedad y precipitación en las estaciones seleccionadas, se determina una clara relación directamente proporcional entre ambas variables. Además, al emplear las correlaciones rezagadas, se logró identificar el impacto temporal de la precipitación sobre la humedad del suelo en términos de horas y días para cada estación. Los resultados, presentados de manera ilustrativa en la Figura 4 muestran correlaciones rezagadas (eje Y) entre humedad y precipitación en términos de horas (eje X) en donde las barras azules muestran las correlaciones con significancia estadística y las barras grises son las que no tienen significancia estadística, por lo que para el análisis son interesantes las barras azules, mostrando así patrones interesantes.

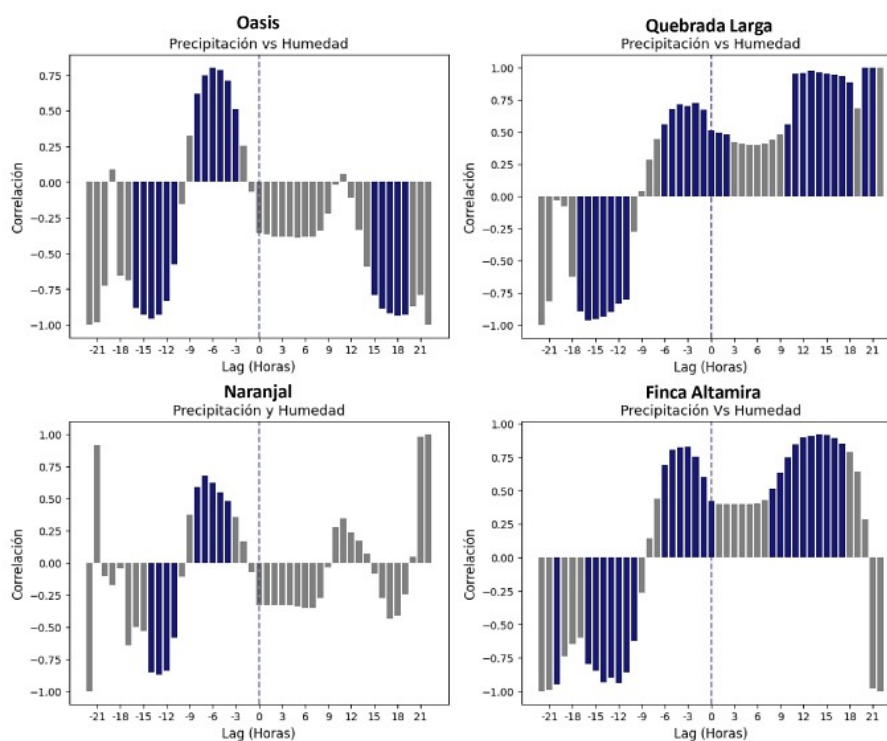


Figura 4: Correlaciones rezagadas entre humedad y precipitación para 4 de las estaciones analizadas

En particular, las estaciones Oasis, Naranjal y Finca Altamira exhiben una influencia positiva de la precipitación a partir de la segunda o tercer hora anterior hasta la novena hora anterior. Sin embargo, la estación Finca Altamira destaca por mostrar correlaciones estadísticamente significativas desde las 9 horas anteriores hasta las 3 horas posteriores, es relevante destacar que, a diferencia de las otras estaciones, Finca Altamira se ubica en la parte baja de una ladera, lo que podría explicar estas variaciones particulares y su

rápida de respuesta de la humedad ante eventos de precipitación, este hallazgo resalta la importancia de considerar la topografía local al interpretar las dinámicas de humedad del suelo en diferentes ubicaciones.

En cuanto a la velocidad de respuesta de los frentes de humedad a la precipitación, se observa que en algunas estaciones responde más rápido el frente de humedad más profundo, mientras que en otras, es el frente de humedad más superficial el que muestra mayor velocidad en la respuesta, lo que podría depender del tipo de suelo y la vegetación de la zona.

Estos resultados ofrecen una comprensión más amplia de las relaciones dinámicas entre la humedad, la precipitación y la temperatura en diferentes escalas temporales y ubicaciones, brindando información de interés para la comprensión de fenómenos hidrogeológicos.

Montajes experimentales

En la Figura 5 se puede observar el montaje realizado en el laboratorio. En la imagen, aprecian las probetas de PVC con sus respectivos sensores de humedad. Además, se observa que las probetas están selladas con plástico, lo cual se hizo con el propósito de evitar variaciones en las condiciones de humedad asignadas al suelo.



Figura 5: Montaje de sensores de humedad en el laboratorio de suelos de la Universidad EAFIT.

En la Figura 6 se muestra la gráfica relacionada con los datos obtenidos respecto al contenido volumétrico de agua para cada sensor, lo cual se relacionar con el plan de rotación mostrado en la Tabla 5.

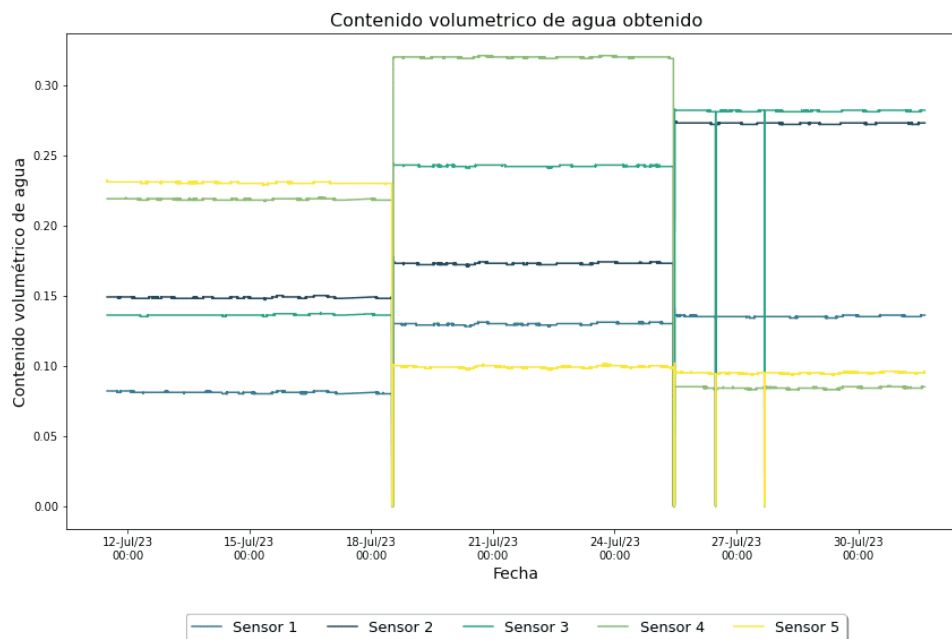


Figura 6: Serie de tiempo de contenido volumétrico de agua para los 5 sensores instalados en el laboratorio.

En la Figura 6 se puede apreciar que los datos de contenido volumétrico de agua mantuvieron un comportamiento constante durante las semanas en las que los sensores estuvieron instalados, como era de esperarse. Sin embargo, se observan datos anómalos en las fechas en las que se realizaron los cambios de sensores, es decir, el 18 y 25 de julio. A partir de esas fechas, se notan cambios en las mediciones debido a la sustitución de sensores en las probetas con distintos porcentajes de humedad. En conclusión, estas variaciones en los datos son atribuidas a los procedimientos de cambio de sensores y se observa que los datos son consistentes con las rotaciones realizadas, sin mostrar ruidos externos que puedan afectar la calidad de la información obtenida.

Adicionalmente, en la Figura 7, se puede observar que la permitividad presenta un comportamiento similar al contenido volumétrico de agua, manteniéndose constante durante las semanas en las que los sensores estuvieron instalados, pero mostrando anomalías y cambios asociados a las rotaciones de sensores. No obstante, es relevante resaltar que el sensor 3 muestra registros de permitividad con valores muy bajos y con escasa variabilidad. A pesar de esta aparente limitación, cuando estos datos se transforman al contenido volumétrico de agua, se obtienen resultados coherentes y consistentes.

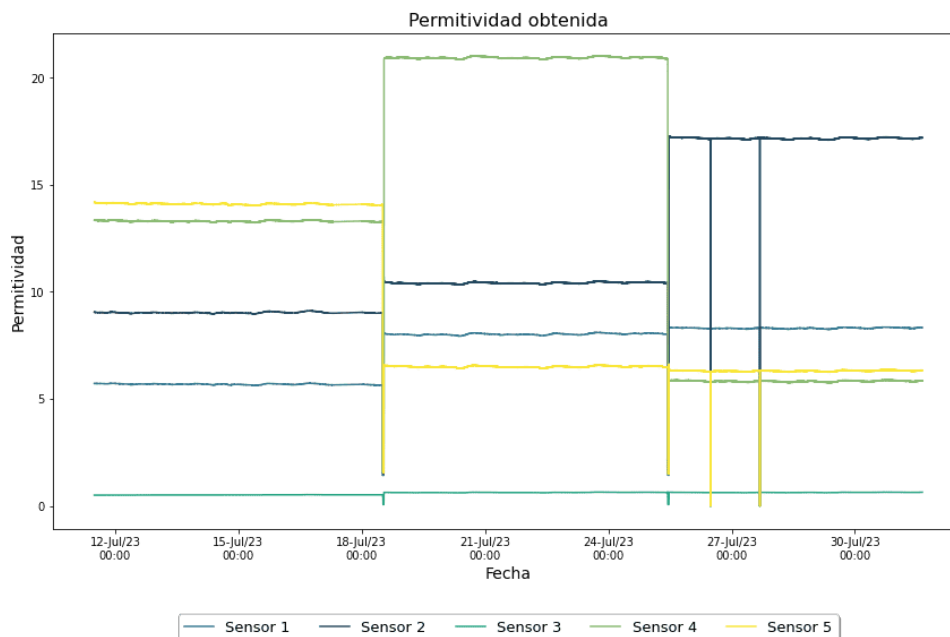


Figura 7: Serie de tiempo de permitividad obtenida en los 5 sensores instalados en el laboratorio.

Evaluación de ecuaciones de calibración

La Figura 8 presenta la comparación entre el porcentaje de humedad obtenido mediante cada ecuación de calibración y el porcentaje de humedad teórico definido a partir de la curva de compactación. Esta visualización permite evaluar la precisión de las distintas ecuaciones en la estimación de la humedad del suelo. Allí se puede observar una línea de tendencia, la cual fue calculada mediante una regresión lineal, el intervalo de confianza el cual es representado con una sombra azul y el valor de R-cuadrado, que indica qué tan bien se ajusta la regresión lineal a los datos y se considera como una medida de cuánto el modelo explica la variabilidad de los datos, y en cuanto más cercano a 1 sea el valor de R-cuadrado, mayor será la capacidad del modelo.

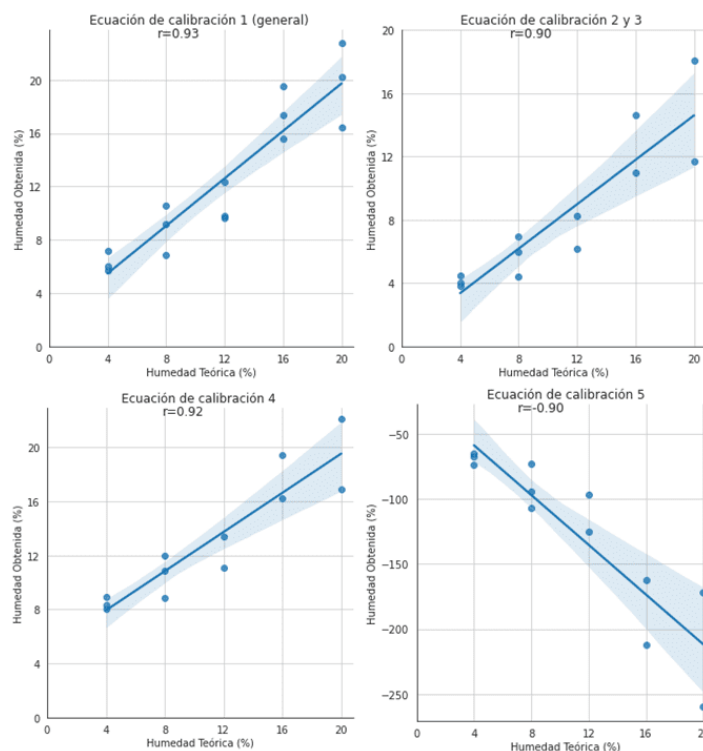


Figura 8: Comparación de porcentajes de humedad obtenidos a partir de distintas ecuaciones de calibración

De acuerdo con lo que se muestra en la Figura 8 la ecuación de calibración 1, definida como la ecuación general y aplicable para las medidas de todos los tipos de suelos, muestra porcentajes de humedad más cercanos al valor teórico, y tiene un intervalo de confianza menor, lo que indica una mayor precisión en el cálculo del dato. Esto se respalda con un valor de R-cuadrado igual a 0.93, el cual es el más alto entre todos los casos evaluados.

En contraste, las ecuaciones 2 y 3 presentan porcentajes de humedad considerablemente menores que los teóricos para los valores intermedios (8% y 12%), y sus intervalos de confianza son mucho más amplios, lo que muestra una mayor dispersión en los datos.

Con respecto a la ecuación 3, se observa que los porcentajes de humedad obtenidos tienden a ser mucho más altos que los teóricos. Por último, mediante la ecuación 5 no se obtienen datos de humedad que concuerden con el porcentaje teórico.

Evaluación ecuación propia

Con el propósito de mejorar la exactitud de los datos de humedad recopilados a través del sensor, se trabajó en la formulación de una ecuación propia. Esta ecuación emplea las mismas variables que se consideran en las ecuaciones predefinidas por el fabricante (permitividad real y contenido volumétrico de agua). La formulación de la ecuación se hace a partir de una regresión logarítmica, ya que se observa que los datos de contenido volumétrico de agua y permitividad se ajustan a esta tendencia. Esta selección genera un ajuste más preciso del modelo a la muestra de datos disponible como se muestra en la Figura 9.

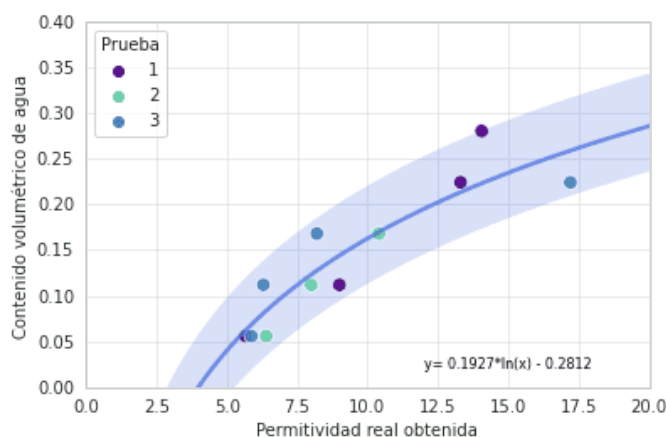


Figura 9: Ecuación propia calculada mediante regresión logarítmica

Para evaluar los resultados derivados de la ecuación propia, se realiza una comparativa con la ecuación de calibración general. Esta comparación se llevó a cabo mediante gráficos que muestran los porcentajes de humedad teóricos y los porcentajes de humedad obtenidos a través de ambas ecuaciones. En la Figura 12, es posible observar una línea de tendencia de color azul, generada mediante una regresión lineal. Asimismo, se incluye un intervalo de confianza, el cual es representado mediante una sombra azul. Para cada curva se proporciona el valor del coeficiente de determinación (R-cuadrado), el cual señala el grado de ajuste de la regresión lineal a los datos. Este valor se considera una medida de la capacidad del modelo para explicar la variabilidad presente. Cuanto más próximo a 1 sea el valor de R-cuadrado, mayor será la eficacia del modelo en este sentido.

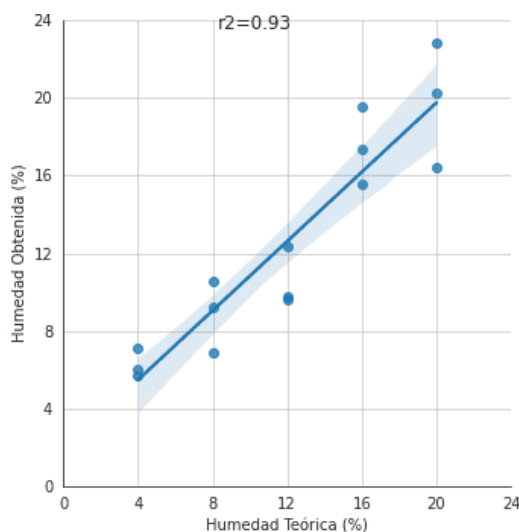


Figura 10: Ecuación propia

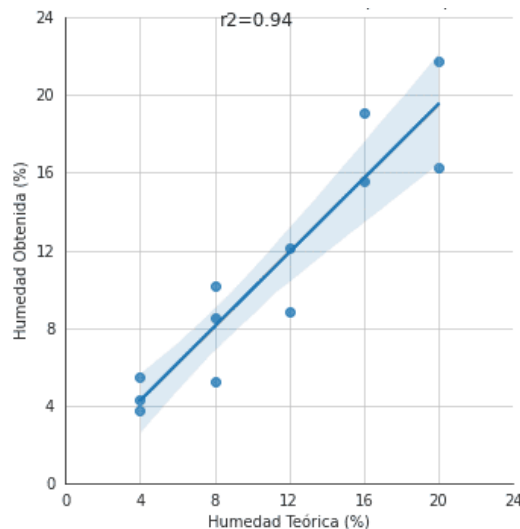


Figura 11: Ecuación General

Figura 12: Comparativo de resultados con la ecuación general del sensor y la ecuación propia calculada

A partir de las gráficas mostradas en la Figura 12, se puede apreciar que la ecuación de calibración propia presenta un R-cuadrado igual a 0.94, mientras que la ecuación de calibración general muestra un R-cuadrado de 0.93. Ambas ecuaciones exhiben dispersión similar en los datos, lo que sugiere que la ecuación de calibración propia no conlleva una mejora sustancial en los resultados.

Verificación de detección de cambios de humedad

Como resultado del ensayo, en la Etapa 1 se obtuvo la gráfica mostrada en la Figura 13, en donde se evidencia en el eje Y derecho el porcentaje de humedad y en el eje Y izquierdo el porcentaje de saturación, el cual se obtiene con la fórmula especificada en los Anexos de la actividad 12 en la Sección Piloto de humedad. Esta visualización revela los incrementos tanto en humedad como en saturación ocasionados por la adición semanal de agua. Esta gráfica es significativa, ya que ilustra el tiempo necesario para la infiltración del agua en el suelo y proporciona una mejor comprensión sobre la respuesta del suelo a estos eventos de precipitación simulados. Además, demuestra la efectiva respuesta del sensor ante estos cambios de humedad.

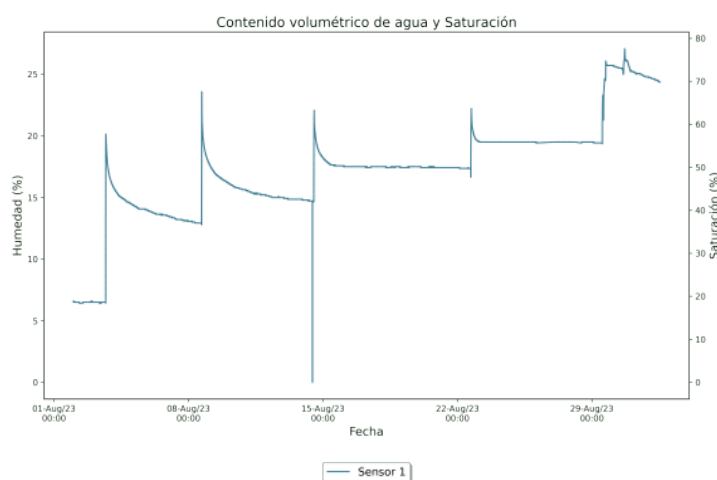


Figura 13: Cambios de humedad realizados durante la Etapa 1

Es importante resaltar que de acuerdo a los cálculos realizados (Tabla 6) con las condiciones iniciales de la probeta y el agua adicionada, el suelo debió llegar a porcentajes de saturación cercanos al 100 %, sin embargo, esto no se evidencia en la gráfica, donde se observa una saturación máxima de 70 %. Lo anterior puede estar relacionado con características físicas del suelo como la relación de vacíos, la cual cambia al adicionar gran cantidad de agua como se hizo durante el ensayo, provocando un posible colapso en las partículas de suelo, y reduciendo su capacidad de almacenamiento. Adicional a esto, es posible que la saturación del 100 % no se logre debido a que la mezcla homogénea de las partículas del suelo con el agua es difícil de conformar.

Con el propósito de validar las medidas captadas por el sensor y su eficacia frente a niveles altos de humedad y saturación, se llevó a cabo una nueva prueba utilizando una probeta que estuvo completamente saturada desde su estado inicial, lo que se refiere a una humedad del 34 % para el tipo de suelo usado. Los resultados mostraron que el sensor registró una saturación del 92 % y un porcentaje de humedad del 32 %, como se ilustra en la Figura 14. Lo que confirma que el sensor es efectivo incluso en condiciones de humedad y saturación elevadas, validando su veracidad en situaciones de alta humedad del suelo.

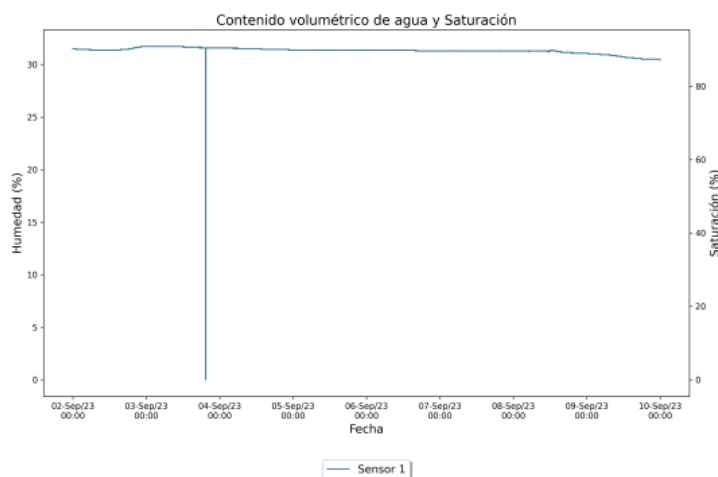


Figura 14: Medidas tomadas en muestra de suelo saturada

Recuperación y análisis de información de campo Selección del ambiente semicontrolado

Dadas las particularidades físicas y la evolución de la ocupación en laderas y cauces del Valle de Aburrá, se identifican diversas zonas de alta amenaza y riesgo ante avenidas torrenciales y movimientos en masa. Para preseleccionar subcuencas aptas para el piloto de humedad, se llevó a cabo una revisión bibliográfica consultando autores como Caballero (2011) y Aristizabal (2008). Estos autores hacen referencia a cuencas con historial de eventos de avenidas torrenciales y movimientos en masa. Destacan que la mayoría de eventos ocurren en el municipio de Medellín, seguido por Itagüí. Además, mencionan cuencas con mayor amenaza, como Quebrada La Iguaná, La Madera, La Presidenta, La Poblada, La López, Piedras Blancas, La Doctora, Doña María, La Valeria, entre otras.

Por otro lado, se realizó una socialización del tema con el equipo de Hidrología de SIATA en donde, proporcionaron subcuencas, que tienen un estudio hidrológico más completo y/o donde se realizaron análisis previos con los sensores de humedad.

Como resultado de la revisión bibliográfica y la socialización con el equipo de Hidrología, se preseleccionaron 8 subcuencas mostradas en la Tabla 10

Tabla 10: Subcuencas del Valle de Aburrá preseleccionadas para el montaje piloto de una red de humedad

Municipio	Cuenca	Subcuenca
Itagüí	Q. Doña María	Q. Larga
Itagüí	Q. Doña María	Q. Candela
Itagüí	Q. Doña María	Q. La Manguala
Itagüí	Q. Doña María	Q. La Despensa
Medellín	Q. La Iguaná	Q. Potreritos
Medellín	Q. La Presidenta	Q. La Presidenta
Caldas	Q. La Valeria	Q. La Valeria
Barbosa	Q. La López	Q. La López

Luego para estas 8 cuencas seleccionadas se aplicó el Análisis Jerárquico Ponderado (AHP), teniendo en cuenta las 11 variables definidas en la sección de metodología, lo que da como resultado una calificación para de cada cuenca. En la tabla 11 se pueden ver los resultados, donde el valor 1 denota la calificación más baja, mientras que el valor 5 representa la calificación más alta. Como resultado, se determinó que la subcuenca más idónea para la implementación del piloto de la red de monitoreo de humedad, basándose en los criterios técnicos, es La Maguala, seguida por La Presidenta y en tercer lugar, La Despensa.

Tabla 11: Calificación de las subcuencas preseleccionadas mediante el método AHP.

Subcuenca	Calificación AHP
Q. La Maguala	4.44
Q. Potreritos	3.28
Q. Larga	3.10
Q. La Despensa	3.31
Q. Candela	2.84
Q. Presidenta	3.60
Q. Lopez	1.61
Q. La Valeria	2.14

Teniendo las 3 subcuencas preseleccionadas, se llevó a cabo una visita de campo a cada una, acompañada por los integrantes del equipo de movimientos en masa, el equipo de drones y una persona del equipo de Mantenimiento. Para esta visita se propuso un recorrido que permitiera verificar las características de las cuencas desde su parte alta hasta su parte baja, buscando tener una amplia percepción de todas sus unidades geológicas, sus características geomorfológicas, escenarios de riesgo y su viabilidad en términos de instalación de sensores. El recorrido realizado se encuentra representado en el mapa de la Figura 15.

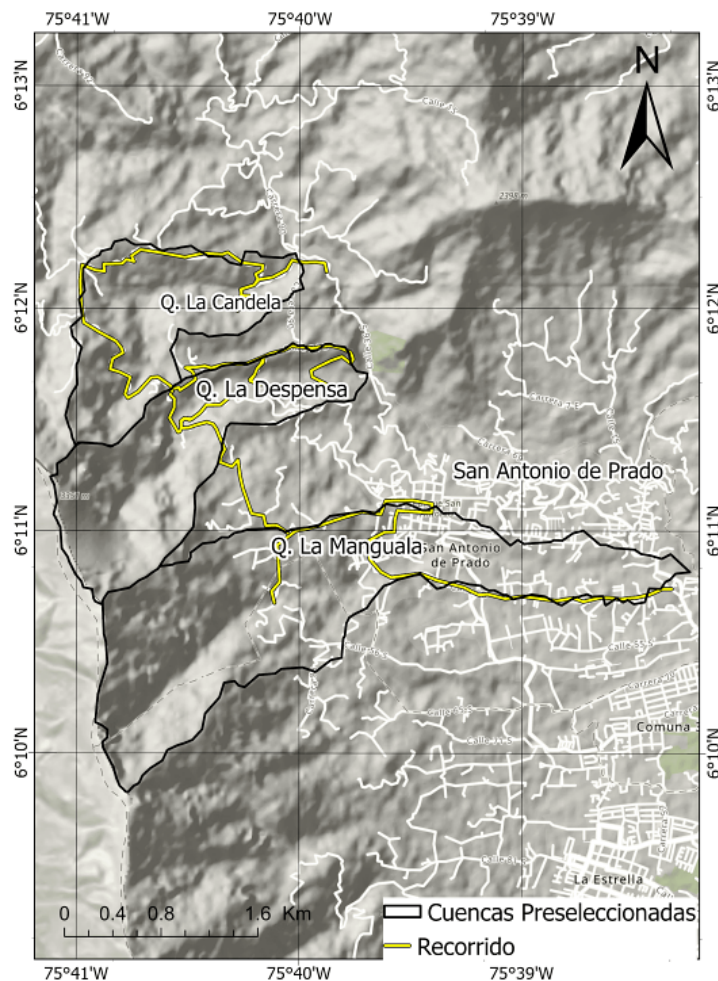


Figura 15: Recorrido realizado en cuencas preseleccionadas

A partir de la visita fue posible identificar características relevantes para cada una de las subcuencas, estas son descritas a continuación:

- **La Manguala:** Se identificaron puntos susceptibles a movimientos en masa, se identificaron procesos morfodinámicos activos, además, dentro del cauce fue posible evidenciar bloques de rocas que dan evidencia de la capacidad de arrastre de la quebrada. Adicionalmente, se observó que la cuenca tiene varias vías que permiten fácil accesibilidad a diversos puntos de la cuenca, sin embargo, se identificó que la cuenca se encuentra muy urbanizada, lo que dificulta el proceso de instalación de sensores y sesga el análisis a realizar con los sensores de humedad.



Figura 16: Imágenes tomadas con dron en la cuenca de la quebrada La Manguala

- **La Despensa:** Durante la visita, se detectaron zonas con alto potencial para movimientos en masa, así como procesos morfodinámicos activos. Además, se destacó la existencia de múltiples vías que facilitan el acceso a diversas áreas de la cuenca. Durante el recorrido, se notó una amplia variedad de geoformas y la presencia de distintas unidades geológicas, lo que sugiere que los sensores de humedad podrían utilizarse de manera efectiva para llevar a cabo una buena caracterización de los suelos.



Figura 17: Imágenes tomadas con dron en la cuenca de la quebrada La Despensa

- **La Candela:** Durante la visita, se detectaron zonas con alto potencial para movimientos en masa, así como procesos morfodinámicos activos de gran magnitud cercanos al cauce. No obstante, no se pudo explorar la totalidad de la cuenca debido a la falta de rutas de acceso públicas. Además, se experimentaron interrupciones frecuentes en la señal en el tramo que se pudo recorrer, lo que podría dificultar la transmisión de datos desde los sensores.



Figura 18: Imágenes tomadas con dron en la cuenca de la quebrada La Candela

Luego del realizar la evaluación, se seleccionó la cuenca La Despensa como la ubicación más adecuada para la instalación de los sensores, considerando las diversas características evaluadas en comparación con las otras opciones disponibles. En La Manguala, aunque se identificaron riesgos y procesos morfodinámicos activos, la alta urbanización representa un desafío significativo para la instalación de sensores y podría sesgar el análisis de humedad.

En el caso de La Candela, a pesar de las amenazas identificadas, las limitaciones de acceso y las interrupciones en la señal dificultarían la transmisión de datos. Por otro lado, La Despensa destacó por su variabilidad geológica y geomorfológica, así como por la disponibilidad de rutas accesibles, lo que promete un estudio efectivo de los suelos a través de los sensores de humedad.

Caracterización de la cuenca de la quebrada La Despensa La cuenca de la quebrada La Despensa se encuentra ubicada en el corregimiento San Antonio de Prado, en jurisdicción del municipio de Medellín, el cual se ubica en la subregión del Valle de Aburrá del departamento de Antioquia. Esta quebrada es un tributario de la quebrada Doña María, que, a su vez, es un afluente del río Aburrá. Es importante resaltar que de acuerdo a distintos autores como Caballero (2011) y Aristizabal (2008), la cuenca Doña María es considerada una cuenca con características torrenciales, al igual que algunos de sus afluentes. A continuación se describen detalladamente las características de la cuenca

Parámetros morfométricos: los principales parámetros morfométricos de la cuenca de la quebrada La Despensa se obtuvieron utilizando un Modelo de Elevación Digital con una resolución de 1 m. Estos parámetros se detallan en la Tabla 12.

Tabla 12: Parámetros morfométricos de la cuenca de la quebrada La Despensa

Parámetro	Valor
Área de la cuenca (km ²)	2,18
Perimetro (km)	7,83
Orden Strhaler	5
Longitud total de los canales (km)	18,72
Longitud total del canal principal (km)	2,97
Cota máxima de la cuenca (m)	2741
Cota mínima de la cuenca (m)	1812

Condiciones climáticas; la cuenca ocupa una faja altimétrica que se puede señalar entre 1800 m y 2750 m de acuerdo al modelo de elevación digital del Valle de Aburrá en resolución de 1 m. Lo que genera que se ubique en un piso térmico correspondientes frío principalmente. La temperatura promedio oscila entre los 12°C y los 18°C, con un promedio anual de precipitaciones que varía entre 1000 mm y 2000 mm (Corantioquia (2006)). De acuerdo con las mediciones de la estación pluviométrica del proyecto SIATA, ubicada en la vereda Montañita, que se encuentra cerca de la zona de estudio, se registraron 1338 mm de precipitación desde enero de 2023 hasta septiembre de 2023.

Geología: de acuerdo al mapa de geología en escala 1:10.000 proveniente de los estudios liderados por el AMVA and UNAL (2018), para la Microzonificación Sísmica del Valle de Aburrá, se pueden identificar principalmente tres unidades geológicas dentro de la cuenca La Despensa. La primera de ellas corresponde al Complejo Quebrada Grande (KvQG), que se extiende desde la parte media de la cuenca hasta su parte alta. En esta unidad geológica, se distinguen dos miembros: uno de naturaleza volcánica y otro sedimentario. En la zona, predomina el miembro volcánico.

Asimismo, se observa una estrecha franja en la zona intermedia de la cuenca, que corresponde a los Gabros de Romeral (JgR). Por último, en la parte baja de la cuenca, se localizan dos depósitos de flujos y escombros, los cuales se formaron en diferentes períodos de depositación (NFpreI y NQFII). Esta información es de gran relevancia, ya que proporciona una comprensión amplia de las unidades geológicas superficiales y los tipos de suelo presentes en la cuenca, lo que facilita la identificación de ubicaciones estratégicas para la instalación de sensores de humedad, con el objetivo de obtener datos asociados a diversos tipos de suelo. En el mapa de la Figura 19, se observan las unidades geológicas anteriormente descritas.

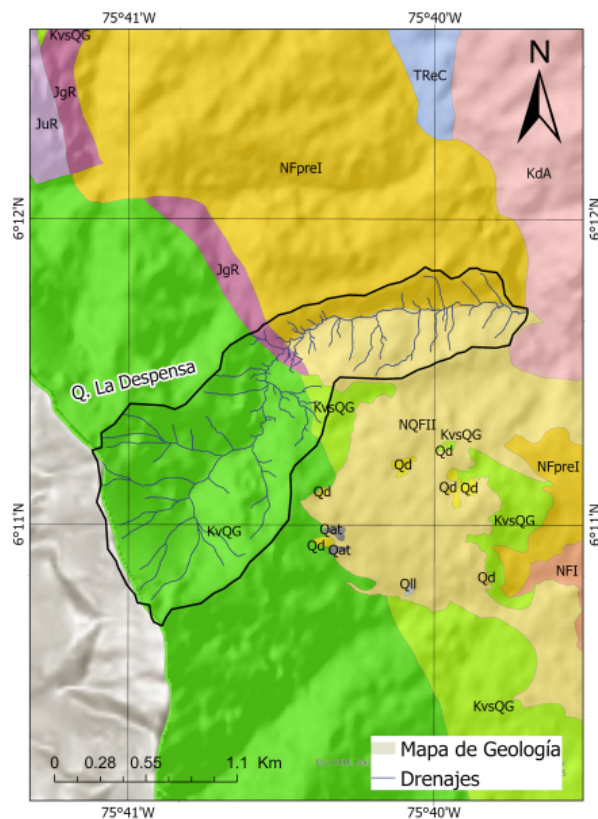


Figura 19: Geología 1:10.000 de la cuenca de la quebrada La Despensa (AMVA and UNAL (2018))

Geomorfología: de acuerdo al mapa de geomorfología en escala 1:10.000 proveniente de los estudios liderados por el AMVA und UNAL (2018), la cuenca de la quebrada La Despensa exhibe diversas geoformas que están asociadas tanto a procesos estructurales como denudacionales. Las geoformas estructurales se encuentran vinculadas al sistema de Fallas Romeral y se extienden desde la parte media de la cuenca hasta su zona superior. En esta área, se localiza el valle superior del bloque Romeral, caracterizado por la presencia de lomos (Vsl) y rasgos morfotectónicos (Vsr_m) (Figura 20).

Por otro lado, desde la parte media de la cuenca hasta su parte inferior, predominan superficies suaves, correspondiente a depósitos altamente incisados (Vsda1) (Figura 20). Esta información es de gran importancia ya que permite entender la dinámica de la evolución del paisaje dentro de la cuenca.

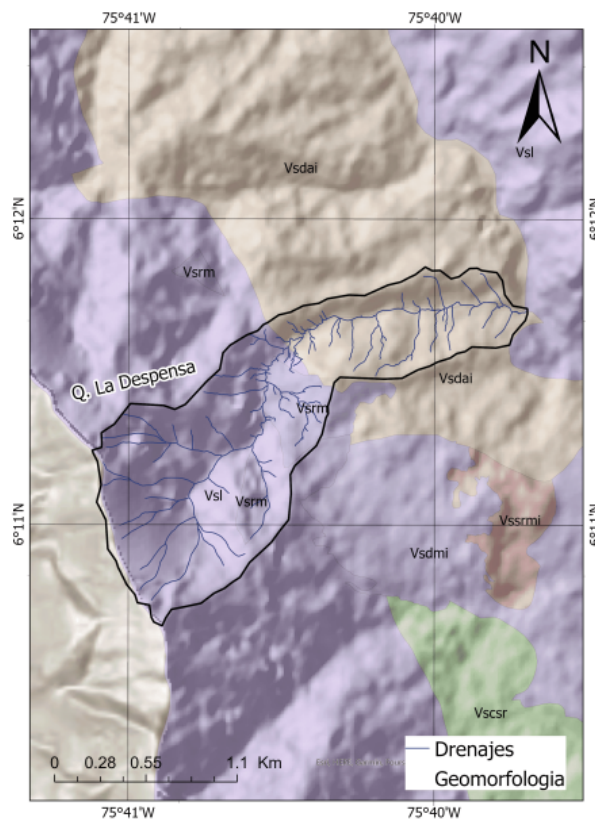


Figura 20: Geomorfología 1:10.000 de la cuenca de la quebrada La Despensa (AMVA and UNAL (2018))

Usos del suelo: para la identificación de los usos del suelo en la cuenca de la quebrada La Despensa, se recurrió a datos secundarios obtenidos del Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Medellín. Según esta información, se identificaron tres usos del suelo principales en la cuenca, que abarcan la producción forestal, la producción agroforestal y la producción agropecuaria. Vale la pena destacar que la producción forestal prevalece en la zona alta de la cuenca, donde se evidencian áreas boscosas, mientras que la producción agropecuaria se localiza principalmente en la parte media y baja de la cuenca, donde se observan cultivos y áreas destinadas a la ganadería.

Cabe resaltar la importancia de esta información, dado que los usos del suelo tienen un impacto significativo en el piloto de la red de humedad, influyendo en el comportamiento del agua en el suelo y brindando datos esenciales sobre la capacidad de infiltración y la escorrentía. La Figura 21 exhibe los distintos usos del suelo en la cuenca, lo que contribuye de manera notable al análisis.

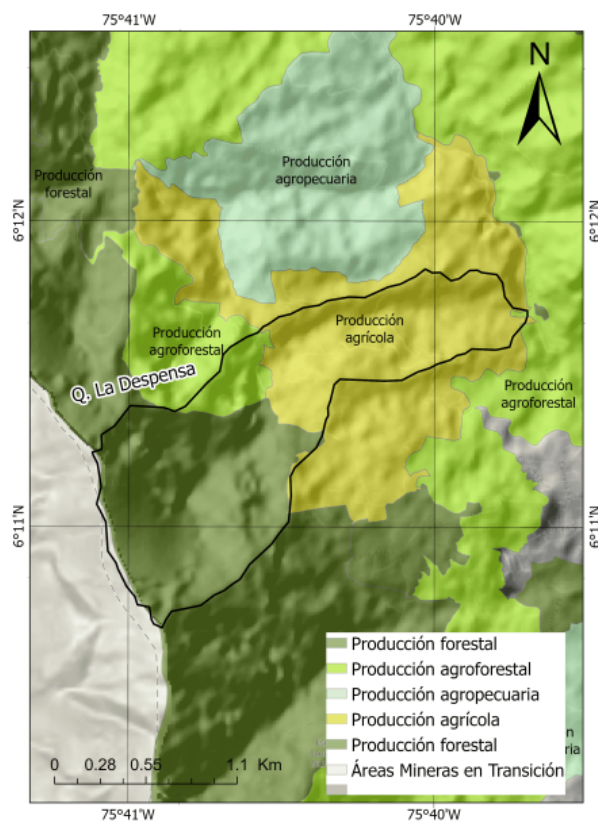


Figura 21: Usos del suelo de la cuenca de la quebrada La Despensa (de Medellín (2014))

Pendientes: el mapa de pendientes se obtuvo a partir del DEM con resolución de 1 m, mediante este se identificó que la cuenca cuenta con pendientes que van desde 0 grados hasta 80 grados. Las cuales fueron reclasificadas con el fin de obtener zonas de planicies, zonas de vertientes suaves, vertientes moderadas, vertientes empinadas, vertientes muy empinadas y escarpes; obteniendo así como resultado la Tabla 13.

Tabla 13: Pendientes en la cuenca de la quebrada La Despensa

	Pendiente (°)	Área en la cuenca (%)
Planicies	0 a 5	1
Vertientes suaves	5 a 15	7
Vertientes moderadas	15 a 25	15
Vertientes empinadas	25 a 32	17
Vertientes muy empinadas	32 a 45	49
Escarpes	mayor que 45	11

Es posible identificar que la zona de estudio tiene gran variación en sus pendientes siendo más frecuentes las que van desde 32° hasta 45° y menos frecuentes las zonas de planicie. En la Figura 22 se muestra el mapa de pendientes de la zona de estudio. Las cuales son de gran importancia ya que nos dan indicios importantes sobre la capacidad de 58, infiltración y susceptibilidad por movimientos en masa.

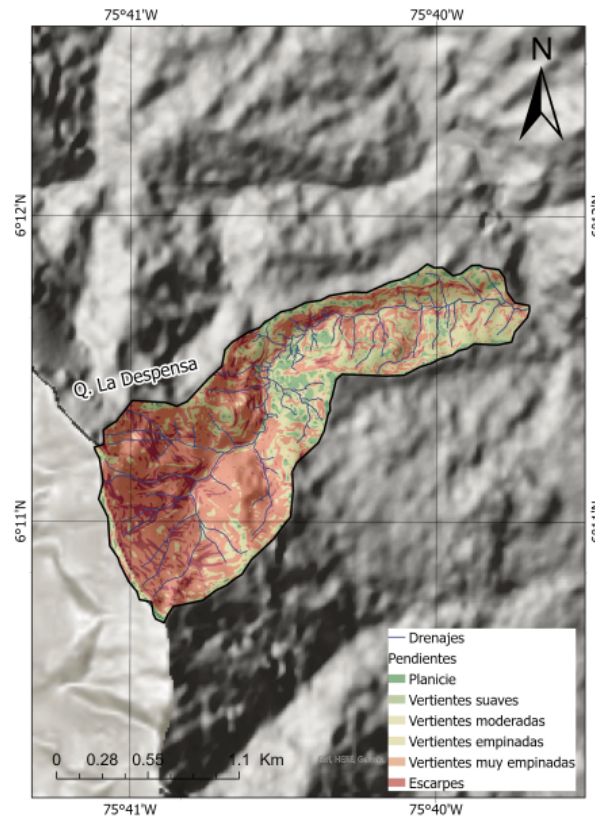


Figura 22: Pendientes de la cuenca de la quebrada La Despensa

Amenaza por movimientos en masa: para evaluar la amenaza de movimientos en masa en la cuenca de la quebrada La Despensa, se utilizó información secundaria. De acuerdo al inventario de movimientos en masa basado en fotointerpretación realizado por AMVA and UNAL (2018) en la cuenca se identificaron en total 88 procesos cartografiados. Además, de acuerdo a los mapas de amenaza y riesgo asociados al POT de Medellín, en la cuenca se determinó que la zona de amenaza alta por movimientos en masa abarca un área de 37 hectáreas, equivalente al 18 % del área de la cuenca. Esto es de gran importancia, ya que permite identificar las zonas susceptibles ante la ocurrencia estos procesos, lo que es útil para la ubicación de los sensores de monitoreo de la humedad del suelo.

En la Figura 23 se observa el inventario de movimientos en masa, junto con las zonas que presentan amenaza alta por movimientos en masa dentro de la cuenca.

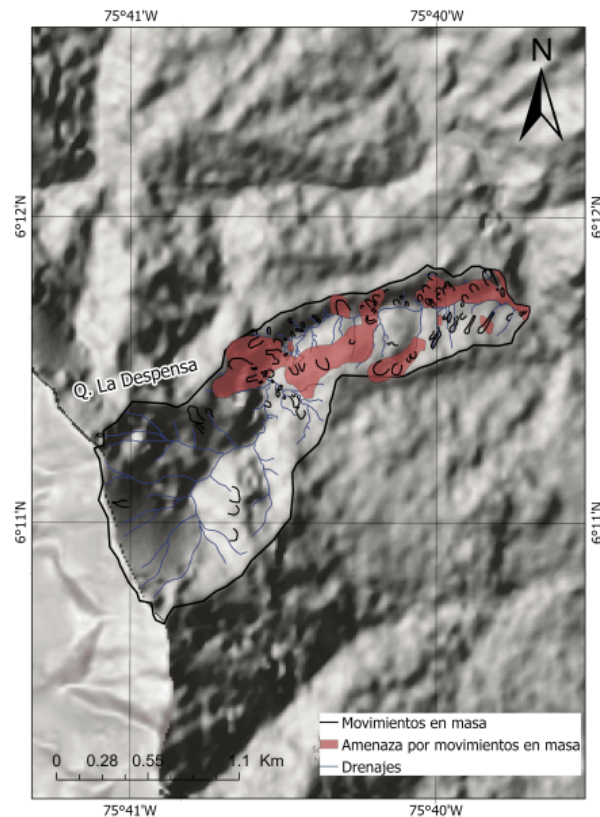


Figura 23: Amenaza por movimientos en masa e inventario de procesos en la cuenca de la quebrada La Despensa (AMVA and UNAL (2018))

Amenaza por avenidas torrenciales: para evaluar la amenaza por avenidas torrenciales en la cuenca de la quebrada La Despensa, se comenzó por utilizar información secundaria de los estudios de amenaza relacionados con los Estudios Básicos de Amenaza por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales realizados por AMVA and UNAL (2018). A partir de estos estudios, se encontró que la totalidad del cauce principal de la cuenca presenta amenaza alta por avenidas torrenciales, como se ilustra en la Figura 24.

Continuando el análisis, se busca determinar la susceptibilidad por avenidas torrenciales de la cuenca a través del método propuesto por Arango et al. (2020), el cuál usa algunos parámetros morfométricos asociados a el relieve, la forma de la cuenca y el orden de Strahler para agrupar las cuencas en torrenciales y no torrenciales, a continuación se describen los parámetros utilizados:

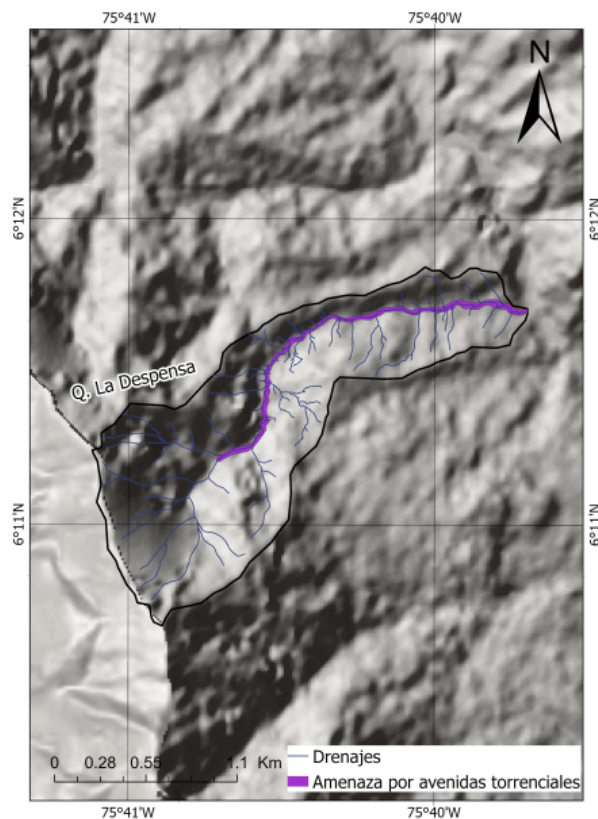


Figura 24: Amenaza por Avenidas torrenciales en la cuenca de la quebrada La Despensa (AMVA and UNAL (2018))

- Relación de relieve (Rh): este parámetro mide la inclinación general de la cuenca, representa la intensidad de los procesos erosivos presentes en esta. La relación de relieve es menor cuando se tiene una cuenca de gran área y pendientes bajas, siendo los valores más altos característicos de zonas montañosas (Schumm, 1956). Se calcula usando la diferencia de relieve de la cuenca y su longitud, obteniendo como resultado un valor de 0.32 para la cuenca de la quebrada La Despensa.
- Índice de Melton (M): se considera uno de los parámetros de mayor importancia para definir la torrencialidad de una cuenca. Mediante su análisis, es posible identificar la susceptibilidad de la cuenca a presentar flujos, ya que incluye la influencia de la geomorfología como el grado de resistencia del relieve a presentar dichos flujos Melton (1957). Se calcula usando la diferencia de relieve de la cuenca y su área, obteniendo como resultado un valor de 0.63 para la cuenca de la quebrada La Despensa.
- Orden del drenaje principal (Su): corresponde al máximo orden que hayan alcanzado los drenajes, usando el método de Strahler (1957), además, este será el orden de la cuenca. El orden de la cuenca permite hacer una aproximación de que tantos contribuyentes tiene el cauce principal, para la cuenca La Despensa el orden corresponde a 5.
- Área (A): Área en kilómetros cuadrados de la cuenca (2,18 km²).

Los resultados obtenidos para la cuenca La Despensa se presentan en la Figura 25, que muestra la combinación de las variables utilizadas por Arango et al. (2020). De acuerdo a los valores obtenidos en cada uno de los parámetros morfométricos evaluados, se agrupa la cuenca La Despensa dentro de las cuencas torrenciales.

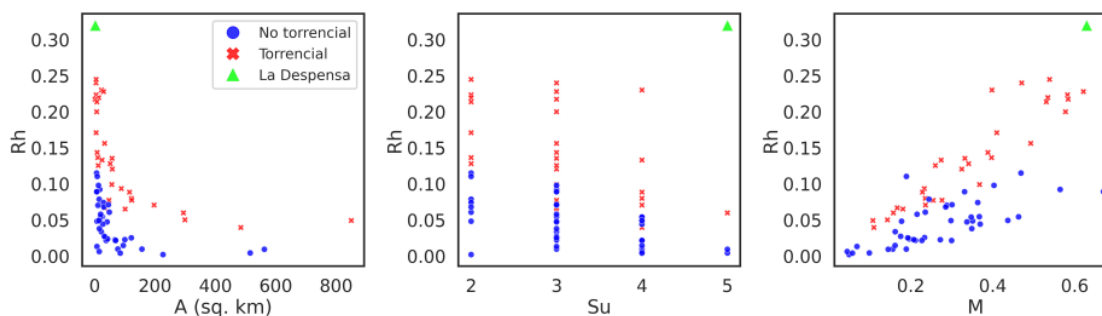


Figura 25: Comparación de variables asociadas a la morfometría para la cuenca de la quebrada La Despensa

Definición de puntos de instalación

De acuerdo a los análisis planteados en los aspecto metodológicos, en La Figura 26 se muestra la ubicación definitiva de las 7 puntos elegidos para realizar la instalación de de las estaciones de humedad, resaltando con color azul aquellos donde es posible realizar esta instalación dual de estaciones de humedad, por lo que en total se plantean un total de 11 estaciones de humedad. Adicionalmente, en la Tabla 14 se muestran las coordenadas exactas de cada punto.

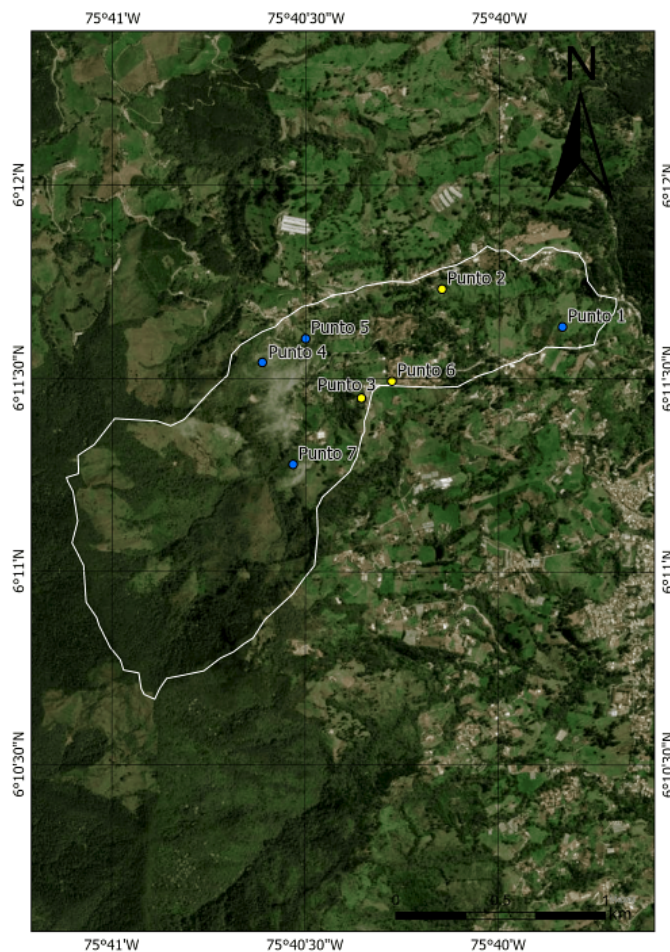


Figura 26: Puntos definidos para la instalación de sensores de humedad en la cuenca de la quebrada La Despensa

Tabla 14: Localización de estaciones de humedad en la cuenca de la quebrada La Despensa

Estación	Latitud	Longitud
1	6.193521	-75.664325
2	6.19574	-75.66885
3	6.19072	-75.67302
4	6.19236	-75.6773
5	6.19331	-75.67508
6	6.19162	-75.67116
7	6.18793	-75.67534

A continuación, se detallan las características de los puntos seleccionados para la instalación de estaciones

de humedad en la cuenca de la quebrada La Despensa:

- Punto 1: Situado a una altitud de 1900 m, sobre la unidad geológica correspondiente a depósitos de flujos de lodos y/o escombros (NQFII) de acuerdo al mapa de geología 1:10.000 proveniente del AMVA. Durante la visita de campo, en esta zona se observó un depósito con tamaño de grano areno limoso, matriz soportado, con bloques compuestos principalmente por basalto, variando en tamaño desde centímetros hasta dimensiones métricas, caracterizados por ser subangulares con baja esfericidad. El depósito se encuentra bien consolidado y según la escala de meteorización de Dearman, presenta grado 5 de meteorización, indicando que son suelos muy meteorizados que aún conservan su estructura.



(a) Suelo limorarenoso pardo rojizo

(b) Bloques métricos

Figura 27: Depósito de flujos de lodos y/o escombros (NQFII)

La unidad geomorfológica en esta área son lomos correspondientes a depósitos altamente incisados, con una pendiente promedio del 25°. Sobre la ladera se identificaron movimientos en masa tipo flujos de lodo en estado latente. En términos de uso del suelo, se encontraba en una zona agrícola, con pastizales circundantes. Es importante resaltar que, no hay vías o caminos concurridos cerca que puedan interferir con las señales de los sensores.

- Punto 2: Situado a una altitud de 1963 m, sobre la unidad geológica correspondiente a depósitos de flujos de lodos y/o escombros (NFprel), este depósito corresponde al depósito más antiguo de la cuenca, de acuerdo al mapa de geología 1:10.000 proveniente del AMVA. Durante la visita de campo, para esta unidad se observó un depósito con tamaño de grano arenolimoso de color pardo rojizo, matriz soportado, con bloques compuestos principalmente por filitas, conglomerados y basaltos, de tamaño centimétrico, caracterizados por ser angulares con baja esfericidad. El depósito se encuentra bien consolidado y según la escala de meteorización de Dearman, se observó un perfil que presenta grado 6 y grado 5 de meteorización, indicando que se tienen suelos muy meteorizados en su parte superior en donde no se conserva la estructura (1.5 m superiores en el perfil del suelo).



(a) Perfil de meteorización

(b) Bloques centimétricos

Figura 28: Depósito de flujos de lodos y/o escombros (NFprel)

La unidad geomorfológica en esta área son lomos correspondientes a depósitos altamente incisos, con una pendiente promedio de 30° . Sobre la ladera se identificaron movimientos en masa de pequeñas dimensiones en estado inactivo. En términos de uso del suelo, se encontraba en una zona agrícola, con pastizales circundantes. Es importante resaltar que, hay una vía cercana poco concurrida, por lo que se espera no tener afectaciones al sensor por la misma.

- Punto 3: Situado a una altitud de 2129 m, sobre la unidad geológica correspondiente al miembro sedimentario del complejo Quebradagrande. Durante la visita de campo, para esta unidad se observó un suelo limoarenoso de color pardo rojizo, el cuál según la escala de meteorización de Dearman, se presenta grado 6 en su parte superficial.

La unidad geomorfológica en esta área son rasgos morfotéctónicos, con una pendiente promedio de 23° . Sobre la ladera se identificó un movimiento en masa lento activo de grandes dimensiones. Es importante resaltar que, la vía cercana se encuentra destruida a causa del movimiento en masa.

- Punto 4: Situado a una altitud de 2158 m, sobre la unidad geológica correspondiente al miembro volcánico del complejo Quebradagrande, de acuerdo al mapa de geología 1:10.000 proveniente del AMVA. Durante la visita de campo, para esta unidad se observó un suelo limoarenoso de color pardo rojizo, el cuál según la escala de meteorización de Dearman, se presenta grado 6 en su parte superficial.



Figura 29: Miembro volcánico del complejo Quebradagrande

La unidad geomorfológica en esta área son lomos alargados, con una pendiente promedio de 32°. Sobre la ladera se identificaron un movimiento en masa superficiales en estado activo y latentes. En términos de usos del suelo, se encuentra en una zona correspondiente a bosques. Es importante resaltar que, no hay vías o caminos concurridos cerca que puedan interferir con las señales de los sensores.

- Punto 5: Situado a una altitud de 2062 m, sobre la unidad geológica correspondiente a gabros de romeral (JGR), de acuerdo al mapa de geología 1:10.000 proveniente del AMVA. Durante la visita de campo, para esta unidad se observó un suelo limoarcilloso de color pardo rojizo, el cuál según la escala de meteorización de Dearman, se presenta grado 6 en su parte superficial.



Figura 30: Gabros de romeral (JGR)

La unidad geomorfológica en esta área son lomos alargados, con una pendiente promedio de 26°. Sobre la ladera se identificaron movimientos en masa de pequeñas dimensiones en estado latentes e inactivos. En términos de usos del suelo, se encuentra en una zona correspondiente a pastizales. Es importante resaltar que, no hay vías o caminos concurridos cerca que puedan interferir con las señales de los sensores.

- Punto 6: Se encuentra situado a una altitud de 2119 m, sobre la misma unidad geológica y geomorfológica del sensor 1, siendo depósitos de flujos de lodos y/o escombros (NQFII), correspondiendo su geomorfología a lomos altamente incisados, con una pendiente promedio del 29°. Sobre la ladera no se identificaron procesos morfodinámicos activos. En términos de uso del suelo, se encuentra sobre una zona de pastizales. Es importante resaltar que, no hay vías o caminos concurridos cerca que puedan interferir con las señales de los sensores.
- Punto 7: Se encuentra situado a una altitud de 2119 m, sobre la misma unidad geológica y geomorfológica del sensor 4, siendo el miembro volcánico del Complejo Quebradagrande, correspondiendo su geomorfología a lomos alargados, con una pendiente promedio del 30°. Sobre la ladera no se identificaron procesos morfodinámicos activos. En términos de uso del suelo, se encuentra sobre una zona de pastizales y bosques circundantes. Es importante resaltar que, no hay vías o caminos concurridos cerca que puedan interferir con las señales de los sensores.

Conclusiones Validación de datos y análisis de históricos existentes

En la Tabla 15 se presenta un resumen de los hallazgos o validaciones extraídos de los análisis realizados.

Tabla 15: Tabla resumen de las estaciones analizadas

Cod	Características	Estacionariedad	Estacionalidad	Tendencias	Observaciones
618	Buenos datos, mayores anomalías en el sensor más superficial	Estacionaria	Estacional en periodos de 25 días	No se cruzan las tendencias de los dos frente e humedad	Se observan cambios importantes que marcan temporadas de más y menos lluvias
576	Buenos datos, mayores anomalías en el sensor más profundo	Estacionaria	Estacional en periodos de 25 días	No se cruzan las tendencias de los dos frente e humedad	Se observan cambios importantes que marcan temporadas de más y menos lluvias
577	Buenos datos, cambio anómalo en la media	Estacionaria	Estacional en periodos de 25 días		
Continúa en la siguiente página					

532	Ruido, mala señal en el sensor de menor profundidad, Intermittencia en algunos datos	Estacionaria	No estacional en periodos de 25 días	Se cruzan las tendencias de los dos frente e humedad	
396	Ruido, Intermittencia en algunas señales	Estacionaria	No estacional en periodos de 25 días	No se cruzan las tendencias de los dos frente e humedad	Se observan cambios importantes que marcan temporadas de más y menos lluvias
555	Mala señal en el sensor de mayor profundidad, Intermittencia en los datos	No estacionaria	No estacional en periodos de 25 días	Se cruzan las tendencias de los dos frente e humedad	

La información contenida en la Tabla 15 ha sido fundamental para la definición de algunas conclusiones generales. Estas se listan a continuación:

- De acuerdo con el comportamiento de las series de tiempo, se observa que cuando no hay intermitencia en los datos ni fallas técnicas, las series de tiempo tienden a ser estacionarias y presentan estacionalidad en un período calculado de 25 días.
- Se puede apreciar que las líneas de tendencia correspondientes a cada frente húmedo no se cruzan a lo largo del tiempo. Esto condición podría permitir la identificación de posibles anomalías relacionadas con la transmisión de los datos o fallas en los sensores.
- Es posible evidenciar, que los sensores HydraProbe generan mayor ruido que los sensores 5TE lo que se debe analizar con mayor profundidad con el fin de limpiar posibles ruidos que no aporten al análisis para movimientos en masa.
- se destaca que el análisis de los frentes húmedos constituye una herramienta valiosa para estudiar la infiltración en el suelo en función de la vegetación. Por ejemplo, al comparar las estaciones Oasis y Bermejala, se observa que Oasis puede presentar una mayor capacidad de infiltración debido a que el sensor más profundo muestra señales de ruido con un valor máximo mayor. Este comportamiento es contrario al observado en la estación Bermejala. Estas diferencias podrían estar asociadas tanto a las características de la vegetación, dado que Oasis tiene una menor densidad vegetal, como al tipo de suelo presente en cada ubicación.
- Finalmente, fue posible validar que la metodología empleada aporta valiosa información para comprender e identificar la calidad de los datos. Permite detectar posibles anomalías, como la intermitencia en los datos y las fallas en los sensores.

Análisis de la relación entre humedad, lluvia y precipitación El análisis arrojó resultados significativos acerca de cómo la humedad, la precipitación y la temperatura se relacionan en diversas escalas temporales y ubicaciones dentro del Valle de Aburrá. Estos resultados señalan que la respuesta del sensor

de humedad a la lluvia está directamente ligada a su ubicación en la ladera, destacando la necesidad de investigar este fenómeno durante la puesta en marcha del piloto a nivel de cuenca en la quebrada La Despensa.

Montajes experimentales

Tras la serie de análisis realizados en el laboratorio de suelos de la universidad EAFIT, con los sensores de humedad Stevens Hydraprobe, es posible concluir que estos proporcionan una visión general útil de la tendencia de la humedad en el suelo. A pesar de que los datos de humedad no son exactos, se observó coherencia y consistencia en la recopilación de datos de cada uno de los sensores. Además, se pudo determinar que la ecuación general con la que viene precalibrado el sensor proporciona resultados satisfactorios en relación al contenido volumétrico de agua, tanto en condiciones saturadas como no saturadas. Estos hallazgos respaldan la eficacia y confiabilidad de los sensores Stevens Hydraprobe para evaluar la humedad del suelo.

Es fundamental destacar que los sensores utilizados en el laboratorio solo presentaron datos anómalos durante los períodos en los que la energía estaba desconectada, lo que generaba dificultades en la transmisión de datos. No obstante, no se registraron datos anómalos ni ruidos adicionales durante el funcionamiento normal. Estos resultados indican que los análisis de datos históricos realizados en meses anteriores con el mismo tipo de sensores, que mostraron datos anómalos, podrían estar relacionados con errores en la instalación, interferencias ambientales o antrópicas y problemas en la transmisión de datos, y no necesariamente con incoherencias de los sensores.

Recuperación y análisis de información de campo

Se llevaron a cabo dos fases en la selección de subcuencas adecuadas para el proyecto piloto de monitoreo de humedad en el Valle de Aburrá. Inicialmente, la revisión bibliográfica y las consultas con el equipo de Hidrología de SIATA condujeron a la preselección de 8 subcuencas. Luego, se aplicó el Análisis Jerárquico Ponderado (AHP) a estas 8 subcuencas, resultando en que La Manguala, La Candela y La Despensa obtuvieran las calificaciones más altas. Entre estas, La Despensa fue seleccionada como la ubicación más idónea para la implementación de la red de monitoreo de humedad, destacando su elección basada en criterios técnicos, por ejemplo, fueron de gran importancia su variabilidad geológica, geomorfológica y accesibilidad, mientras que La Manguala presentó desafíos significativos debido a su alta urbanización, adicionalmente, en el caso de La Candela limitaciones asociadas al acceso y problemas de señal hicieron que fuera menos viable para la transmisión de datos desde los sensores.

La selección de los puntos de instalación de las estaciones de humedad en la cuenca de la quebrada La Despensa fue estratégica, teniendo un total de 7 puntos y 11 estaciones. La distribución considera diferentes condiciones geológicas, geomorfológicas y de uso del suelo, permitiendo capturar la variabilidad de la humedad en distintos entornos. Es importante resaltar que, los puntos de instalación están ubicados en áreas con diferentes tipos de unidades geológicas, como depósitos de flujos de lodos, miembros volcánicos y gabros de romeral, esta diversidad geológica contribuirá a entender cómo la geología y sus suelos derivados afectan la distribución de la humedad en la cuenca.

La identificación de movimientos en masa, como flujos de lodo y procesos morfodinámicos, en algunos puntos específicos de la cuenca es esencial para entender el riesgo asociado y comprender el potencial impacto que puede tener la distribución de la humedad. Además, la cuenca exhibe diversos usos del suelo, como zonas agrícolas, pastizales y bosques, lo que sugiere una variabilidad significativa en la capacidad de retención de humedad y en la respuesta del suelo a eventos hidrometeorológicos. Por otro lado, un aspecto favorable para la instalación de sensores es la ausencia de interferencias potenciales en la mayoría de los puntos seleccionados, ya que carecen de vías o caminos concurridos. Esta condición es importante para minimizar posibles perturbaciones en las señales de los sensores, asegurando así una recopilación de datos más precisa y confiable.

En última instancia, considerando las características de la cuenca, se puede concluir que proporciona un entorno semicontrolado propicio para la ejecución del piloto de monitoreo de humedad por movimientos en masa. Además, sus atributos ofrecen utilidad potencial para la investigación de otros fenómenos, como las avenidas torrenciales.

Referencias

- Achour, Y. and Pourghasemi, H. R. (2020). How do machine learning techniques help in increasing accuracy of landslide susceptibility maps? *Geoscience Frontiers*, 11(3):871–883.
- Amat, J. and Ortiz, J. (2021). Skforecast: forecasting series temporales con python y scikit-learn.
- AMVA and UNAL (2018). Estudios básicos de amenaza por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales en los municipios de caldas, la estrella, envigado, itagüí, bello, copacabana y barbosa, para la incorporación de la gestión del riesgo en la planificación territorial.
- Arango, M., Aristizábal, E., and Gómez, F. (2020). *Morphometrical analysis of torrential flows-prone catchments in tropical and mountainous terrain of the Colombian Andes by machine learning techniques*.
- Aristizabal, E. (2008). Inventario De Emergencias Y Desastres En El Valle De Aburrá. Originados Por Fenómenos Naturales Y Antropicos En El Periodo 1880-2007. *Gestión y Ambiente*, 10(2):17–30.
- Aristizabal, E., López, S., Sanchez, O., Vasquez, M., Rincón, F., and Ruiz, D. (2019). Evaluación de la amenaza por movimientos en masa detonados por lluvias para subregión de los andes colombianos estimando probabilidad espacial, temporal y magnitud. *Boletín de Geología*, 41.
- Caballero, J. (2011). Las Avenidas Torrenciales: Una Amenaza Potencial En El Valle De Aburrá. *Revista Gestión y Ambiente*, 14(3):45–50.
- Corantioquia (2006). ESTUDIO PARA LA REGLAMENTACIÓN DEL APROVECHAMIENTO, USO Y ADMINISTRACIÓN DE LAS AGUAS DE LA QUEBRADA DOÑA MARÍA, INCLUIDAS TODAS LAS SUBCUENCAS O MICROCUENCAS DE SUS QUEBRADAS AFLUENTES, HASTA SU DESEMBOCADURA EN EL RÍO ABURRÁ, LOCALIZADA ENTRE LOS MUNICIPIOS DE MEDELLÍN E ITAGÜÍ. .
- Das, B. M. (2004). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. Thomson International, Mexico City, 4th edition.
- de Medellín, A. (2014). Plan básico de ordenamiento territorial .
- Kwiatkowski, D., Phillips, P. C., Schmidt, P., and Shin, Y. (1992). Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root: How sure are we that economic time series have a unit root? *Journal of Econometrics*, 54:159–178.
- León-álvarez, A. L., Betancur-gómez, J. I., Jaimes-barragán, F., and Grisales-romero, H. (2016). Ronda clínica y epidemiológica . Series de tiempo. *Iatreia*, 29(3):373–381.
- Lund, R., Wang, X. L., Lu, Q. Q., Reeves, J., Gallagher, C., and Feng, Y. (2007). Changepoint detection in periodic and autocorrelated time series. *Journal of Climate*, 20(20):5178–5190.
- Marin, R. (2017). Importancia de la predicción de movimientos en masa en el Valle de Aburrá. *Revista Ingeniería y Sociedad*, 12.
- Melton, M. A. (1957). *An Analysis of the Relations Among Elements of Climate, Surface Properties, and Geomorphology*.

- Mendoza, A., Solano, C., Palencia, D., and Garcia, D. (2019). Application of the analytical hierarchy process (AHP) for decision-making with expert judgment. *Ingeniare*, 27(3):348–360.
- Nieto, J. J. ., Martínez, R. ., Regalado, J. ., and Hernández, F. (2002). Análisis de tendencia de series de tiempo oceanográficas y meteorológicas para determinar evidencias de cambio climático en la costa del ecuador item type journal contribution.
- Presno, Maria, López, A. (2001). Tratamiento estadístico de series con cambios estructurales. Un caso de estudio. *REVISTA ASTURIANA DE ECONOMÍA*, 22(1):123–141.
- Rob J Hyndman and George, A. (2018). Forecasting: Principles and Practice, 2nd edition. *Principles of Optimal Design*, (September):421–455.
- Schumm, S. A. (1956). EVOLUTION OF DRAINAGE SYSTEMS AND SLOPES IN BADLANDS AT PERTH AMBOY, NEW JERSEY. *BULLETIN OF THE GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA*., 67(1):56.
- Stevens (2018). Soil sensor ® users manual.
- Strahler, A. N. (1957). Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. *Transactions, American Geophysical Union*, 38(6):913–920.
- Topp, G. C., Davis, J. L., and Annan, A. P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16:574–582.
- Truong, C., Oudre, L., and Vayatis, N. (2018). Ruptures: change point detection in Python. *University Paris Descartes*, pages 1–5.
- UNGRD (2021). Movimientos en Masa en Colombia , ¿ dónde ocurren y cuáles son sus principales causas ? Technical report.
- Vijay, K. (2023). Statistical tests to check stationarity in time series-part 1.