

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**MODELAMIENTO DE PRECIPITACIÓN - ESCORRENTÍA DE LA
QUEBRADA CAICEDO**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

JONATHAN ANDRÉS LEMA VARELA

jonathan.lemma@epn.edu.ec

DIRECTOR: XAVIER EDUARDO ZAPATA RÍOS

xavier.zapata@epn.edu.ec

DMQ, Agosto 2023

CERTIFICACIONES

Yo, JONATHAN ANDRÉS LEMA VARELA declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

JONATHAN ANDRÉS LEMA VARELA

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por JONATHAN ANDRÉS LEMA VARELA, bajo mi supervisión.

DR. XAVIER EDUARDO ZAPATA RÍOS
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Jonathan Andrés Lema Varela

Dr. Xavier Eduardo Zapata Ríos

DEDICATORIA

A Dios que me dio la fuerza, el tiempo y las ganas de continuar aún en medio de los procesos difíciles que pase durante este trayecto, por darme la fortaleza que solo puede venir de Él, todo lo que soy es por su gracia, esa gracia que me ha sostenido en esta etapa de mi vida. A Él sea la honra y la gloria por esto.

A mis padres porque este esfuerzo es para ellos que siempre me acompañaron y me apoyaron para salir adelante en mi formación académica, con sus consejos, sus regañadas y sobre todo con su amor. Sin ellos no lo hubiera logrado.

Jonathan Lema

AGRADECIMIENTOS

A mis hermanas Jenny, Ma. Fernanda y Alexandra, a pesar de sus chistes sobre mi carrera, les agradezco por siempre estar ahí cuando lo necesitaba.

A mis sobrinas Paula y Emily que con sus locuras me acompañaron en este trayecto en mi vida, que les sirva de ejemplo que con esfuerzo y dedicación se pueden cumplir los sueños.

A mi pequeño sobrino Adriel, aunque no me dejaba hacer este trabajo porque quería que juegue con él, me acompañó en las etapas finales de mi carrera cuando estábamos en clases virtuales.

A mi Ruth que ella estuvo conmigo en los momentos buenos, malos y difíciles, por ser muy paciente y acompañarme en las desveladas, los momentos de estrés y los de felicidad.

A mi querida Iglesia Comunidad Cristiana El Poder de tu Amor, ellos han sido un pilar fundamental en mi formación académica porque me acompañaron y cubrieron en oración para lograr culminar mi carrera.

A mis chicos de ASLAN, que me motivaron para salir adelante y con sus bromas, risas y los espacios de comunidad me ayudaron a despejar la mente y esforzarme para alcanzar mis sueños.

A la Comunidad de Estudiantes Cristianos del Ecuador que durante toda mi etapa universitaria ayudaron a fortalecer mi relación con Dios y encontrar ese puente entre la Ciencia y la Fe.

A mis amigos los PA´S, amigos de la iglesia, amigos de la CECE, amigos de ASLAN, amigos de la universidad y demás personas que creyeron en mí y conocen todo mi esfuerzo y dedicación.

A mi director, el Dr. Xavier Zapata Ríos que ha sido muy paciente, excelente profesor y se ha preocupado mucho para que logre culminar de la mejor manera mi última etapa académica.

Jonathan Lema

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|-----|
| CERTIFICACIONES | I |
| DECLARACIÓN DE AUTORÍA | II |
| DEDICATORIA | III |
| AGRADECIMIENTOS..... | IV |
| RESUMEN..... | 1 |
| ABSTRACT | 3 |
| 1 INTRODUCCIÓN..... | 4 |
| 1.1 Objetivo general | 7 |
| 1.2 Objetivos específicos..... | 8 |
| 1.3 Alcance..... | 8 |
| 2 ESTADO DEL ARTE | 9 |
| 2.1 Estudios de Modelación Hidrológica en Quito..... | 9 |
| 2.2 Estudios de Vulnerabilidad hidrológica en Quito | 10 |
| 2.3 Escorrentía urbana en Quito y Estudios del drenaje pluvial en Quito..... | 10 |
| 2.4 Caracterización de aluviones en Quito..... | 11 |
| 3 MARCO TEÓRICO | 13 |
| 3.1 Aluvión..... | 13 |
| 3.2 Sistemas de información geográficos | 13 |
| 3.3 ArcGIS Pro | 13 |
| 3.4 Delimitación de una cuenca hidrográfica con ArcGIS Pro..... | 14 |
| 3.5 Procesos hidrológicos..... | 14 |
| 3.6 Cuenca Hidrográfica | 14 |
| 3.7 Modelo Hidrológico | 14 |
| 3.7.1 Tipos de modelos hidrológicos | 15 |
| 3.8 HEC-HMS..... | 17 |
| 3.9 Modelación la cuenca en HEC-HMS..... | 18 |
| 3.10 Tipos de pérdidas y sus métodos en HEC – HMS..... | 18 |
| 3.11 Especificación de control..... | 19 |
| 3.12 Método de entrada de datos..... | 19 |
| 3.13 Análisis de frecuencias..... | 20 |
| 3.14 Hydrognomon4..... | 20 |
| 4 MÉTODOS | 21 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.1 | Área de Estudio | 21 |
| 4.1.1 | Localización..... | 21 |
| 4.2 | Modelo de la Investigación | 22 |
| 4.2.1 | Delimitación de la cuenca hidrográfica de estudio | 22 |
| 4.2.2 | Información climática, de cobertura vegetal y suelos | 23 |
| 4.2.3 | Análisis de frecuencias hidrológicas en las estaciones pluviométricas..... | 23 |
| 4.2.4 | Construcción del modelo hidrológico usando el software HEC-HMS | 23 |
| 5 | RESULTADOS | 27 |
| 5.1 | Cuenca hidrográfica de estudio | 27 |
| 5.2 | Información climática, cobertura vegetal y suelos | 27 |
| 5.3 | Análisis de frecuencias hidrológicas de las dos estaciones de pluviométricas. ... | 37 |
| 5.3.1 | Periodos de retorno en Hydrognomon 4 | 39 |
| 5.4 | Construcción del modelo hidrológico usando el software HEC-HMS | 40 |
| 5.4.1 | Interpolación mediante el método de IDW | 40 |
| 5.4.2 | Cálculo del número de curva | 44 |
| 5.4.3 | El cálculo de Tiempo de Concentración..... | 44 |
| 5.4.4 | El cálculo del tiempo de Retardo | 44 |
| 5.4.5 | Cálculo del Umbral de Escorrentía | 44 |
| 5.4.6 | Espacialización de la cuenca de la quebrada Caicedo en HEC HMS | 45 |
| 5.4.7 | Primera tormenta en HEC-HMS: 13/12/2021 | 46 |
| 5.4.8 | Segunda tormenta en HEC-HMS: 31/01/2022 | 48 |
| 6 | DISCUSIÓN..... | 51 |
| 7 | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 53 |
| 7.1 | Conclusiones | 53 |
| 7.1.1 | Conclusiones respecto al objetivo general..... | 53 |
| 7.1.2 | Conclusiones respecto al primer objetivo específico | 53 |
| 7.1.3 | Conclusiones respecto al segundo objetivo específico | 53 |
| 7.1.4 | Conclusión respecto al tercer objetivo específico..... | 54 |
| 7.2 | Recomendaciones..... | 54 |
| 8 | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 55 |
| | ANEXO I..... | A |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 Representación espacial de una cuenca Fuente: Cabrera, 2012 | 16 |
| Figura 2 Ubicación de la quebrada Caicedo entre las coordenadas latitud 775.342E y 778.392E y la longitud 9'981.579N y 9'981.940N. Se muestra 2 estaciones pluviométricas con datos de precipitación. Las líneas verdes muestran curvas de nivel cada 100 metros. | 21 |
| Figura 3 Comparación de precipitación horaria entre la estación P11 Antenas y P70 El bosque de la tormenta del 13/12/2021. Fuente: Propia..... | 29 |
| Figura 4 Comparación de precipitación horaria entre la estación P11 Antenas y P70 El bosque de la tormenta del 31/01/2022. Fuente: Propia..... | 31 |
| Figura 5 Mapa de cobertura vegetal del suelo de la cuenca de la quebrada Caicedo. Se puede ver las plantaciones forestales ocupan más del 50% del área de estudio. Fuente: Propia | 32 |
| Figura 6 Mapa del uso del suelo de la cuenca de la quebrada Caicedo. Se puede ver que los patrones de uso del suelo el Bp (Bosque protector) ocupa en su mayoría un 40% de la zona. Fuente: Propia..... | 33 |
| Figura 7 Mapa de textura del suelo de la cuenca de la quebrada Caicedo. Se puede ver un predominio de suelos franco-arenosos en un 40%. Fuente: Propia | 34 |
| Figura 8 Mapa de susceptibilidad del suelo de la cuenca de la quebrada Caicedo. Se puede observar una alta susceptibilidad del suelo, lo cual indica que existe un mayor riesgo de erosión y deslizamientos en estas zonas. Fuente: Propia..... | 35 |
| Figura 9 Mapa de permeabilidad del suelo de la cuenca de la quebrada Caicedo. Se observa que existe una alta permeabilidad, abarcando aproximadamente el 95% de la cuenca. Fuente: Propia..... | 36 |
| Figura 10 Probabilidad de excedencia de las precipitaciones de la estación P11 ANTENAS. Elaboración propia..... | 38 |
| Figura 11 Probabilidad de excedencia de las precipitaciones de la estación P70 El Bosque. Elaboración propia..... | 39 |
| Figura 12 Vista 3D de la cuenca de la quebrada Caicedo con el perfil topográfico. La distancia entre la estación P11 Antenas con el centroide es 1141,90 m. y la distancia entre la estación P70 El Bosque con el centroide es 1865,85 m. Fuente: Propia..... | 41 |
| Figura 13 Hietograma de la tormenta del 13/12/2021. Elaboración: Propia..... | 43 |
| Figura 14 Hietograma de la tormenta del 31/01/2022. Elaboración: Propia..... | 43 |
| Figura 15 Espacialización de la cuenca de la quebrada Caicedo en HEC HMS. Elaboración propia | 45 |

| | |
|---|----|
| Figura 16 Resultados finales de precipitación, pérdidas y caudal de saluda para la tormenta 1 correspondiente al 13/12/2021..... | 47 |
| Figura 17 Resumen general del modelo hidrológico de la cuenca de la quebrada Caicedo para la tormenta correspondiente al 13 de diciembre del 2021 | 48 |
| Figura 18 Resultados finales de precipitación, pérdidas y caudal de saluda para la tormenta 2 correspondiente al 31/01/2022..... | 48 |
| Figura 19 Resumen general del modelo hidrológico de la cuenca de la quebrada Caicedo para la tormenta correspondiente al 31 de enero del 2022. Elaboración propia..... | 49 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1 Grupo hidrológico del suelo. Fuente: Bradbury, 2000 | 24 |
| Tabla 2 Precipitación Máxima Anual en 24 horas. Fuente: EPMAPS | 27 |
| Tabla 3 Precipitación Horaria en mm de la tormenta ocurrida el 13/12/2021. Fuente: EPMAPS..... | 28 |
| Tabla 4 Precipitación Horaria en mm de la tormenta ocurrida el 31/01/2022. Fuente: EPMAPS..... | 30 |
| Tabla 5 Condiciones del suelo. Fuente. Elaboración propia | 36 |
| Tabla 6 Precipitaciones máximas para estación P11 Antenas. Elaboración Propia. | 39 |
| Tabla 7 Precipitaciones máximas para estación P70 El Bosque. Elaboración Propia | 40 |
| Tabla 8 Resultado de la precipitación horaria interpolada por el método IDW para las Tormentas: 13/12/2021 y 31/01/2022 | 42 |
| Tabla 9 Promedio ponderado para calcular el número de curva de la cuenca hidrográfica de la quebrada Caicedo. Elaboración propia | 44 |
| Tabla 10 Método de perdidas SCS Curve Number. Elaboración propia | 46 |
| Tabla 11 Método de transformación SCS Unit Hydrograph. Elaboración Propia..... | 46 |

RESUMEN

El propósito de este trabajo de integración curricular fue realizar un modelamiento de precipitación - escorrentía en la cuenca de la quebrada Caicedo. La cuenca que tiene una extensión de 1,2 km² se encuentra ubicada en el noroccidente del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ). Para analizar la respuesta hidrológica de la cuenca frente a los eventos extremos ocurridos el 13 de diciembre de 2021 y el 31 de enero de 2022, se utilizó información de cobertura vegetal y del suelo, así como datos de información climática de las estaciones pluviométricas P11 Antenas y P70 El Bosque. Estas estaciones registraron precipitaciones diarias de 37,30 mm y 38,70 mm durante la primera tormenta, y de 51,40 mm y 55,30 mm durante la segunda tormenta, respectivamente. Además, se realizó un análisis de frecuencias utilizando el software Hydrognomon4 para conocer las intensidades de lluvias en la zona noroccidental del DMQ. Este análisis permitió determinar la probabilidad de excedencia de que vuelvan a ocurrir tormentas similares o mayores a las ocurridas el 13 de diciembre de 2021 y el 31 de enero de 2022. Los resultados indicaron que, para la estación P11 Antenas, la media \pm 1 desviación estándar indica que alrededor del 68.3% de los datos se encuentran entre 20 mm y 38 mm. Para la estación P70 El Bosque, la media \pm 1 desviación estándar indica que alrededor del 68.3% de los datos se encuentran entre 23 mm y 47 mm. Se determinaron los periodos de retorno para 10, 20 y 50 años en ambas estaciones. Para la estación P70 El Bosque, los valores fueron de 41,4 mm, 44,7 mm y 48,5 mm, respectivamente. Para la estación P11 Antenas, los valores fueron de 52,0 mm, 58,3 mm y 71,5 mm, respectivamente. Estos datos permiten conocer la probabilidad de que ocurran precipitaciones de cierta intensidad en un periodo determinado. Posteriormente, se procedió a construir un modelo hidrológico utilizando el software HEC-HMS. Para ello, se emplearon el método de pérdidas de SCS Curve Number y el método de transformación de SCS Unit Hydrograph, con el propósito de simular ambas tormentas y obtener información sobre los caudales generados en cada una de las tormentas. En la primera tormenta, el caudal alcanzó un valor de 0,4 m³/s, mientras que en la segunda tormenta fue de 0,8 m³/s. Asimismo, se registró la precipitación total para cada evento, siendo de 37,71 mm para la primera tormenta y 52,38 mm para la segunda tormenta. También se analizaron los diferentes componentes de la precipitación, incluyendo la pérdida previa a la conversión en escurrimiento, que fue de 33,61 mm y 41,92 mm respectivamente, También se determinó la precipitación que contribuyó al escurrimiento, que fue de 4,10 mm para la primera tormenta y 10,46 mm para la segunda tormenta. Y finalmente el

escurrimiento superficial, que tuvo valores de 3,38 mm y 10,45 mm respectivamente. Todos estos datos permitieron obtener una visión integral sobre la respuesta hidrológica de la cuenca ante estas tormentas extremas.

PALABRAS CLAVE: Tormentas, Análisis de frecuencias, HEC-HMS, Precipitación, Escorrentía, Caudal.

ABSTRACT

The purpose of this curricular integration work was to carry out a rainfall-runoff modeling in the Caicedo Creek basin. The watershed has an area of 1.2 km² and is located in the northwest of the Metropolitan District of Quito. To analyze the hydrological response of the watershed to extreme events occurring on December 13, 2021, and January 31, 2022, information on vegetation and soil cover was used, as well as climatic data from the P11 Antenas and P70 El Bosque rainfall stations. These stations recorded daily rainfall of 37.30 mm and 38.70 mm during the first storm, and 51.40 mm and 55.30 mm during the second storm, respectively. In addition, a frequency analysis was performed using Hydrognomon4 software to determine rainfall intensities in the northwestern zone of the DMQ. This analysis made it possible to determine the exceedance probability of recurrence of storms similar to or greater than those that occurred on December 13, 2021, and January 31, 2022. The results indicated that, for station P11 Antenas, the mean \pm 1 standard deviation indicates that about 68.3% of the data are between 20 mm and 38 mm. For station P70 El Bosque, the mean \pm 1 standard deviation indicates that about 68.3% of the data are between 23 mm and 47 mm. Return periods for 10, 20 and 50 years were determined for both stations. For station P70 El Bosque, the values were 41.4 mm, 44.7 mm and 48.5 mm, respectively. For station P11 Antenas, the values were 52.0 mm, 58.3 mm and 71.5 mm, respectively. These data show the probability of occurrence of precipitation of a certain intensity in a given period. Subsequently, a hydrological model was constructed using the HEC-HMS software. For this purpose, the SCS Curve Number loss method and the SCS Unit Hydrograph transformation method were used to simulate both storms and obtain information on the flows generated in each of the storms. In the first storm, the flow rate reached a value of 0.4 m³/s, while in the second storm it was 0.8 m³/s. The total precipitation for each event was also recorded, being 37.71 mm for the first storm and 52.38 mm for the second storm. The different components of precipitation were also analyzed, including the loss prior to conversion to runoff, which was 33.61 mm and 41.92 mm respectively. The precipitation that contributed to runoff was also determined, which was 4.10 mm for the first storm and 10.46 mm for the second storm. And finally, surface runoff, which had values of 3.38 mm and 10.45 mm respectively. All these data allowed us to obtain a comprehensive view of the hydrological response of the basin to these extreme storms.

KEY WORDS: Storms, Frequency analysis, HEC-HMS, Precipitation, Runoff, Streamflow.

1 INTRODUCCIÓN

Los países de Latinoamérica están expuestos a eventos naturales los cuales pueden generar desastres, dolor y pérdidas económicas (Bello, 2014). Estos eventos naturales han causado daños irreparables para familias dependiendo de su nivel de vulnerabilidad. Uno de los desastres que más afecta a la población son los aluviones (Campos, 2022). Se entiende por aluvión como un fenómeno natural con barro y agua que arrastra material suelto por una ladera, cause de río o quebrada. Un aluvión puede viajar varios kilómetros transportando rocas, ramas y todo lo que encuentra en su camino, alcanzando un gran tamaño y velocidad (Campos, 2022). Los grados de intensidad de los aluviones dependen de diversos factores ambientales tales como la topografía, el tipo de suelo, cobertura vegetal, la intensidad y duración de la lluvia, etc.

En el año 2000, se registraron en Latinoamérica y el Caribe un total de 66 deslizamientos de tierra que resultaron en la pérdida de unas 3000 vidas humanas (Campos, 2022). Los aluviones más devastadores que han ocurrido en esta zona geográfica han sido el aluvión de Guatemala en 2015, que cobró la vida de 350 personas, y el aluvión de Colombia en 2017, que se cobró la vida de 349 personas (ONU, 2020). Un estudio reciente muestra que el 90% de todos los deslizamientos de tierra registrados en América Latina y el Caribe fueron provocados por fuertes lluvias, lo que aumenta la cantidad de humedad en el suelo (Posner, 2016). Un nuevo conjunto de datos ha sido compilado para proporcionar una nueva visión del impacto de los deslizamientos de tierra en esta parte clave del mundo. Este conjunto de datos indica que en el período de 10 años desde 2004 hasta 2013 inclusive, un total de 11,631 personas perdieron la vida en toda la región en 611 deslizamientos de tierra (Sepulveda y Petley, 2015). La distribución geográfica de los deslizamientos es altamente heterogénea, con áreas de alta incidencia en partes del Caribe, especialmente en Haití, América Central, Colombia y el sureste de Brasil (Sepulveda y Petley, 2015).

En el caso de Ecuador se ha identificado 1286 muertes por eventos climatológicos entre 1972-2010 (Bello et al., 2014). En particular, los aluviones han afectado principalmente a las ciudades de la región Andina, siendo Quito una de las más recurrentemente afectadas debido a sus condiciones geográficas, clima y alta densidad poblacional. El crecimiento demográfico poco planificado ha dado lugar a asentamientos humanos en zonas de riesgo, lo cual se agrava por los eventos extremos de precipitación que generan un exceso de humedad en el suelo y la

acumulación de agua en los cauces naturales, desencadenando movimientos de masa y aumentando la vulnerabilidad de la población.

La ciudad de Quito, ubicada en las faldas del volcán Guagua Pichincha, es propensa a sufrir aluviones de gran magnitud (Murillo, 2021). Quito una ciudad asentada sobre montañas según el mapa de Amenazas Naturales tiene al menos 100 barrios vulnerables a movimientos en masa con una susceptibilidad mediana y alta. Por esa razón la ciudad a lo largo del último medio siglo desde el año 1961 ha sido afectada por 8 aluviones, los cuales han cobrado vidas, daños a bienes materiales públicos y privados, además de la inseguridad que genera estar en estos sectores (Bermeo, 2022). Un estudio reveló que el 36.8% de la basura generada en Quito es recolectada en las laderas, mientras que aproximadamente el 31.5% es depositado en las quebradas, lo que aumenta los riesgos de obstrucción en los colectores y la propensión a los aluviones (Fernández, 1996). Estos antecedentes resaltan la importancia de estudiar y comprender los procesos de precipitación - escorrentía en las quebradas que drenan el Distrito Metropolitano de Quito, con el objetivo de fortalecer las estrategias de prevención y mitigación de desastres naturales en el país (Olcina et al., 2021).

En los últimos años, la ciudad ha experimentado dos aluviones significativos, uno en 2019 en el barrio del Pinar Alto y otro en 2022 en el barrio de la Gasca y La Comuna. Un análisis de las características topográficas de diferentes áreas de Quito ha demostrado un elevado riesgo y vulnerabilidad ante posibles amenazas de aluviones, lo que puede resultar en pérdidas materiales y humanas (IGM, 2010). El caso más reciente fue el aluvión ocurrido en la ciudad de Quito el día 31 de enero del 2022. En este evento, el Servicio Nacional De Gestión De Riesgos Y Emergencias (SNGRE, 2022) reportó un desbordamiento de la quebrada Tejado causando un aluvión que afectó a 555 personas (SNGRE, 2022).

Existen zonas con ocupación informal e invasiones en áreas propensas a quebradas en el Distrito Metropolitano de Quito, lo cual representa un riesgo para la población y el entorno natural, especialmente frente a eventos climáticos extremos. En la parte norte de la ciudad, como en los sectores de Comité del Pueblo, Calderón, Zabala y Carapungo, las viviendas están construidas en las pendientes de las quebradas, lo que aumenta el peligro de aluviones. En el área del centro histórico, construida sobre zonas de relleno, y en el sector sur de Quito, donde existen zonas áridas y extensas

con alta humedad, las viviendas carecen de los permisos municipales correspondientes y una estructura adecuada (Murillo, 2021).

El crecimiento urbano desordenado ha generado un total de 70 desastres por aluviones en la ciudad de Quito desde 1900 hasta 1988, principalmente en las quebradas con relleno (Peltre, 1989). Las condiciones climáticas y la configuración del terreno incrementan los riesgos, y la falta de una adecuada gestión de los recursos naturales complica aún más esta problemática. Durante las lluvias intensas, se producen flujos torrenciales que erosionan las laderas y han causado la formación de cauces profundos de hasta 10 o 30 metros de profundidad (Zeballos, 2002).

Dentro de las 182 quebradas en Quito, algunas albergan bosques secos, bosques andinos y diversos ecosistemas, así como una notable biodiversidad dentro del área urbana (Egas, 2012). Entre estas quebradas se encuentran Caicedo, Osorio y Caupichu, que requieren mayor atención para su estudio. Por lo tanto, en el marco de este trabajo de integración curricular, se llevará a cabo un estudio en la quebrada Caicedo (Zeballos, 2002).

La quebrada Caicedo en el sector del Bosque fue elegida área de estudio debido a la presencia de una alta susceptibilidad a los aluviones, ya que se utiliza como drenaje de la parte oriental del Pichincha. Tiene una configuración geográfica similar a la quebrada El Tejado donde se produjo el aluvión del 31 de enero del 2022. Las pendientes medias del cauce de la Quebrada Caicedo son de 47,95%. Esta similitud en la amenaza de aluviones entre ambas quebradas brinda una oportunidad para analizar y comprender los procesos de precipitación-escorrentía en un contexto similar.

Además, es importante destacar que la relevancia de este estudio se ve resaltada por eventos trágicos ocurridos recientemente en la quebrada Caicedo, donde se perdieron vidas humanas durante labores de limpieza y desbloqueo en una estructura de captación de agua cercana al sector El Bosque. Estos sucesos subrayan la importancia de comprender y gestionar los riesgos asociados a los aluviones en la zona, proporcionando una perspectiva valiosa para la prevención y mitigación de desastres naturales en áreas con características similares.

Los estudios realizados por el Instituto Francés de Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación (ORSTOM) y el colegio de geógrafos del Ecuador indican que los aluviones en la ciudad de Quito son más destructivos que las inundaciones, aunque no son muy comunes (Fernández et al., 1996). Los aluviones comparten la misma naturaleza que las inundaciones, ya que el aumento de una crecida es capaz

de movilizar cargas sólidas (Peltre, 1989). Debido a la corta distancia entre la zona más elevada del Ruco Pichincha y la zona más baja de la ciudad, existen pendientes empinadas que van desde el 30% hasta el 60% (Zeballos, 2002).

Para mitigar los desastres relacionados con los aluviones, se han llevado a cabo diversos proyectos en la ciudad de Quito. La empresa pública metropolitana encargada del suministro de agua y saneamiento (EPMAPS) ha trabajado en colaboración con el municipio para proteger el sistema de drenaje natural y controlar las inundaciones (Vidal, 2018).

La EPMAPS ha diseñado planes y proyectos que incluyen una adecuada planificación urbana y la implementación de obras civiles para proteger los cauces de ríos (La Hora, 2000). Un ejemplo destacado es el "Proyecto Laderas del Pichincha", que involucró la intervención en 32 quebradas desde Miraflores hasta Cotocollao, con una inversión de 20 millones de dólares y beneficiando a alrededor de 100,000 personas. Se llevaron a cabo obras de ingeniería en un área natural de 5,000 ha y un área urbana de 2,000 ha, desde la quebrada El Rancho hasta la quebrada de San Juan (Vidal et al., 2018).

A pesar de los esfuerzos realizados, es fundamental continuar con los estudios y monitoreo de las quebradas para prevenir futuros eventos adversos, teniendo en cuenta los factores ambientales y geográficos que influyen en la generación de caudales excesivos (Saavedra et al., 2022). En este contexto, se enfocará en la quebrada Caicedo. El objetivo de este estudio hidrológico es mejorar la comprensión de los fenómenos de precipitación y escorrentía en la quebrada Caicedo, lo cual contribuirá a fortalecer la gestión de riesgos y proteger a la población de Quito ante eventos naturales adversos, mejorando la capacidad de respuesta y prevención en la ciudad.

El enfoque hidrológico se fundamenta en la recopilación y análisis de datos de precipitación provenientes de diversas tormentas. Este enfoque proporciona una comprensión de la relación existente entre la cantidad de lluvia y la respuesta hidrológica de la quebrada Caicedo. Al explorar aspectos como la generación de escorrentía y el notorio incremento del caudal, se obtiene una aproximación de cómo los patrones de precipitación influyen en el comportamiento hidrológico de la quebrada.

1.1 Objetivo general

Evaluar la generación de caudales y la respuesta hidrológica ante eventos de precipitación extremos en la quebrada Caicedo, ubicada en la parte occidental de la ciudad de Quito.

1.2 Objetivos específicos

- 1) Realizar un análisis de frecuencias y estimar los periodos de retorno de las precipitaciones máximas anuales en 24 horas, utilizando datos históricos de precipitación recopilados durante el periodo comprendido entre 2001 y 2021.
- 2) Desarrollar un modelo hidrológico precipitación - escorrentía con el programa HEC-HMS para dos tormentas ocurridas en la quebrada Caicedo.
- 3) Evaluar la respuesta hidrológica de la quebrada Caicedo frente a los dos eventos extremos ocurridos en la ciudad de Quito, mediante la aplicación del modelo hidrológico en HEC-HMS.

1.3 Alcance

El presente trabajo de integración curricular se enfoca en modelar la relación entre la precipitación y la escorrentía en la quebrada Caicedo utilizando herramientas de análisis hidrológico. El objetivo principal es comprender cómo las lluvias afectan el escurrimiento en la quebrada. Para lograrlo, se emplearán métodos de modelación hidrológica que permitirán simular y evaluar el proceso de precipitación - escorrentía. Se utilizarán datos de precipitación provenientes de dos estaciones cercanas al área de estudio.

Una de estas estaciones, llamada P11 Antenas, se encuentra ubicada dentro de la cuenca de la quebrada Caicedo, mientras que la otra estación, llamada P70 El Bosque, se localiza aproximadamente a 500 metros de la quebrada en dirección Noroccidente. Estos datos de precipitación se utilizarán para simular dos eventos extremos ocurridos el 13 de diciembre de 2021 y el 31 de enero de 2022.

El estudio de estos eventos extremos es importante para fortalecer el conocimiento sobre los procesos de precipitación y escorrentía en la cuenca. Al proporcionar una base sólida para comprender y gestionar los impactos de eventos hidrológicos en el área de estudio, este estudio también brindará información para la toma de decisiones y la gestión de riesgos asociados a eventos de lluvia en la zona. Esto permitirá a las autoridades y a la comunidad local estar mejor preparados para enfrentar futuros eventos extremos.

2 ESTADO DEL ARTE

A continuación, se presentan una revisión de literatura sobre investigaciones sobre el modelamiento de precipitación y escorrentía mediante el uso del software HEC-HMS. El objetivo de esta revisión es identificar las metodologías y enfoques utilizados, brindando una base sólida para el presente trabajo de integración curricular. Los aluviones son estudiados utilizando diversos métodos y enfoques. Uno de los principales análisis para entender los aluviones implica la recopilación de información sobre la cuenca hidrográfica en estudio, que incluye datos hidrológicos, geológicos y topográficos. Una de las herramientas más usadas es la modelación hidrológica mediante el uso de modelos como HEC-HMS para simular el flujo de agua en la cuenca y estimar los caudales, teniendo en cuenta la relación de precipitación – escorrentía. Otra herramienta es el empleo de modelos de análisis hidráulico, como HEC-RAS, para simular la propagación del flujo de agua en el río y las áreas de inundación resultantes.

El análisis de datos históricos de aluviones anteriores en la cuenca se utiliza para comprender los patrones de ocurrencia y evaluar los efectos de eventos pasados. Finalmente, la utilización de modelos numéricos que integran datos hidrológicos, hidráulicos y geomorfológicos para simular y predecir el comportamiento de los aluviones. Estos métodos requieren de la disponibilidad de datos confiables y actualizados para obtener resultados precisos y confiables (Ichazo, 2001).

2.1 Estudios de Modelación Hidrológica en Quito

Un estudio publicado en el año 2010 sobre la modelación de crecidas en Quito, específicamente en secciones del río Machángara. El estudio definió tres escenarios de uso del suelo en la cuenca que responden a las condiciones naturales, actuales y futuras. La evaluación de precipitación – escurrimiento se estimaron mediante el programa HEC-HMS 3.1.0 y se crearon mapas de inundación para períodos de retorno de 50, 100 y 200 años (Aguilar, 2010).

El software HEC-HMS ha sido exitosamente utilizado para la modelación hidrológica en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ). Un estudio de Escenarios Hidrológicos en la cuenca del río Guayllabamba se realizó en 2015, enfocándose en la Modelación de caudales mínimos. Para este estudio, se aplicó el método del Ing. Otto Pfafstetter publicado en 1996, que divide la cuenca del río Guayllabamba en unidades hidrográficas nivel 5. Se analizaron cinco eventos y cinco escenarios de caudales mínimos. Se realiza la modelación de los caudales mínimos en el software HEC-HMS 4.0 (Orellana, 2015). En el 2016 en este mismo río se realiza un estudio de Modelación

de crecidas también con HEC-HMS que analizaba el período de los años 1970-2010 (Revelo y Tualombo, 2016).

En 2016, mediante técnicas SIG y percepción remota, se calculó el parámetro hidrológico número de curva en la cuenca de la quebrada El Batán. Se utilizó el método número de curva que es ampliamente utilizado a nivel mundial para estimar el potencial de escurrimiento. La combinación de varios parámetros clave, como el uso y la cobertura vegetal del suelo, los tipos de grupos hidrológicos del suelo y la pendiente del terreno, es la base de este método, que fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales. Se ha elaborado un mapa del número CN que muestra estas combinaciones, y se proporcionan tablas con asignaciones de del número CN en función de los parámetros analizados, así como tablas con correcciones de humedad. Este enfoque se ha difundido ampliamente debido a su eficacia y aplicabilidad a diferentes regiones. (Córdova, 2016).

2.2 Estudios de Vulnerabilidad hidrológica en Quito

En 2015 Robert d'Ercole y Pascale Metzger realizaron un estudio de Vulnerabilidad del DMQ en el que evaluaron elementos esenciales: redes de agua y energía eléctrica, movilidad, empresas y población. Se consideraron seis aspectos relacionados con la vulnerabilidad: la vulnerabilidad intrínseca, la exposición a las amenazas y la susceptibilidad a los daños, las dependencias, las alternativas de funcionamiento, la capacidad de control y la preparación para el manejo de crisis. (d'Ercole y Pascale, 2015). En el 2016 se profundiza en el análisis de la vulnerabilidad de la red de agua de Quito al analizar la influencia de los lahares Volcán Cotopaxi en las fuentes de agua cruda (Peña, 2016).

2.3 Escorrentía urbana en Quito y Estudios del drenaje pluvial en Quito

En 2017, se utilizó el modelo SWMM 5.1 como base para publicar un modelo multiobjetivo para la rehabilitación de un sistema de drenaje urbano en el área de la subcuenca del colector Mirador Sur, Quito. Para establecer los parámetros iniciales del modelo, se recopiló información topológica, topográfica, hidráulica e hidrológica. A partir de esta configuración, se realizaron simulaciones que generaron resultados que se utilizaron para implementar un prototipo en una aplicación. Se crearon tres escenarios que sirvieron como base para el desarrollo de la red en estudio y su posterior evaluación (Ureña y Del Cisne, 2017).

En 2019, se diseñó a nivel de factibilidad un sistema de almacenamiento temporal de aguas de drenaje urbano ubicado en el complejo deportivo Fundeporte de la parroquia Quitumbe. El sistema de almacenamiento más adecuado para la zona del proyecto fue un estanque de retención, según diversos estudios previos realizados por la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS). Esta elección se basa en las características topográficas y urbanísticas del área, que hacen que este tipo de sistema sea el más apropiado para gestionar eficientemente el agua en la zona (Correa y García, 2019).

2.4 Caracterización de aluviones en Quito

El estudio Caracterización del depósito del flujo de lodo de la quebrada El Tejado, Quito, se presentó en el 2022, con el objetivo de analizar el aluvión que afectó a los sectores de La Comuna, La Gasca, Santa Clara y La Mariscal el 31 de enero del 2022. Se empleó información obtenida en campo, así como fotos y videos de los sectores afectados, y se usó un Sistema de Información Geográfica (SIG) para calcular el espesor, área y volumen del depósito. (Rondal, 2022). Se usaron métodos estadísticos y composicionales para estudiar el transporte, el escenario de deposición y la procedencia de los componentes, basándose en tres muestras de la parte más delgada del depósito. Los resultados muestran que los componentes tienen origen en el Complejo Volcánico Pichincha, que está formado por andesitas, dacitas y pómez. El agua y la gravedad fueron los agentes de transporte más importantes, y los componentes se movieron principalmente por saltación en un medio de alta energía y con poco tiempo de transporte desde una fuente cercana.

El aluvión también erosionó material de una escombrera en el sector de La Comuna, lo que agregó componentes antrópicos al depósito. El depósito tuvo un volumen total de 7,162.77 m³, lo que indica que fue un evento pequeño en términos de volumen, pero con grandes consecuencias debido al alto grado de exposición de las viviendas y la población. Los resultados de esta investigación tienen como objetivo ser útiles para la planificación del territorio, el uso del suelo y la gestión del riesgo en la ciudad de Quito (Troncoso et al., 2022).

Para el estudio de la cuenca de la quebrada Caicedo, hemos optado por utilizar el método de modelación hidrológica a través de HEC-HMS. Esta herramienta nos permite simular y analizar el movimiento del agua en una cuenca hidrográfica. La modelación hidrológica en HEC-HMS es esencial para comprender y evaluar el riesgo

de inundación, identificar áreas vulnerables y tomar decisiones fundamentadas en la gestión de eventos de este tipo. Además, podremos evaluar el movimiento del agua en la cuenca frente a distintos eventos de precipitación, lo cual resulta de vital importancia para implementar medidas de mitigación adecuadas (Ramírez, 2020).

En el estudio de la cuenca de la quebrada Caicedo, mi aporte consiste en el uso del modelo hidrológico HEC-HMS como una herramienta para la toma de decisiones en la respuesta hidrológica de la zona. Además, mediante el análisis de frecuencias con datos históricos y la simulación de tormentas, se pueden evaluar posibles impactos hidrológicos y entender la frecuencia en la que ocurren precipitaciones extremas en la zona. Desde un punto de vista ingenieril, el modelo hidrológico desarrollado es especialmente útil para la EPMAPS. El modelo proporciona información valiosa para la planificación urbana, la gestión de cuencas hidrográficas y la protección de áreas vulnerables. Además, el modelo se puede utilizar para el diseño de infraestructuras hidráulicas y la evaluación de riesgos.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 Aluvión

Un aluvión se refiere a un desastre natural en el cual una gran cantidad de agua y sedimentos se desplazan rápidamente hacia abajo, llevando consigo rocas, tierra y otros materiales. Los elementos desencadenantes de estos eventos incluyen la gravedad, la intensidad y magnitud de las precipitaciones, las características del suelo y del terreno, así como la deforestación (Montoya, 2018).

Las fuertes lluvias pueden ocasionar erosión, transportando partículas del suelo pendiente abajo y aumentando su volumen a medida que avanzan. Asimismo, los ríos desbordados pueden alterar su curso natural, erosionando el suelo y convirtiéndolo en barro. La deforestación, al eliminar la cobertura vegetal, reduce la capacidad de retención de agua y aumenta la erosión. La meteorización mecánica y la presión de poros también contribuyen a la formación de aluviones al fragmentar rocas, crear barreras de sedimentos y debilitar la resistencia del suelo. Estos factores interactúan entre sí y pueden dar lugar a aluviones catastróficos que representan un riesgo para las áreas afectadas (Montoya, 2018).

3.2 Sistemas de información geográficos

El Sistema de Información Geográfica (SIG) es una herramienta tecnológica utilizada para gestionar y analizar información espacial, se destaca la importancia de los SIG en la hidrología y el estudio de los recursos hídricos. Los SIG permiten analizar la regionalización de variables hidrológicas, clasificar áreas ecológicamente homogéneas y utilizar mapas de suelo, cobertura vegetal, humedades y modelos digitales de elevación como base para estimar parámetros de modelos matemáticos e hidrológicos, los SIG son herramientas esenciales en la gestión de información y el análisis de resultados en el ámbito hidrológico y de recursos hídricos (Zimmermann et al., 2004).

3.3 ArcGIS Pro

ArcGIS Pro es una herramienta que permite a los usuarios trabajar de manera eficiente con información geográfica. Con esta herramienta, es posible recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir datos geográficos, como mapas, imágenes satelitales y modelos digitales del terreno (Chasquero, 2021).

3.4 Delimitación de una cuenca hidrográfica con ArcGIS Pro

En el contexto de la delimitación de cuencas hidrográficas con el software ArcGIS Pro, se utilizan diversas herramientas y pasos para procesar, analizar y visualizar datos geográficos. La herramienta "Hydrology" es fundamental en este proceso y se utiliza junto con un Modelo de Elevación Digital (DEM) previamente obtenido. A través de pasos como el llenado y corrección del DEM, la generación de la dirección de flujo y la obtención del modelo de acumulación de flujo, se logra la delimitación de la cuenca. Se identifica el punto de salida mediante una proyección y etiquetado de la red hídrica, y se utiliza la herramienta "Watershed" para definir la forma final de la cuenca. El resultado se convierte en un polígono a partir del formato ráster, y se realizan operaciones adicionales como el recorte de la red hídrica y el cálculo de parámetros básicos. En resumen, ArcGIS Pro es una herramienta completa que optimiza el manejo de información geográfica y facilita la delimitación de cuencas de manera precisa y eficaz (Chasquero, 2021).

3.5 Procesos hidrológicos

Conjunto de fenómenos que implican el flujo del agua entre la superficie terrestre y la atmósfera. Este concepto se enfoca en la distribución del agua en un área determinada y abarca los procesos de movimiento, almacenamiento y transformación del agua. El ciclo hidrológico está compuesto por diversas fases del agua, tales como la evaporación, condensación y precipitación (Breña y Jacobo, 2006).

3.6 Cuenca Hidrográfica

Dentro de la hidrología es una unidad principal de estudio, su delimitación que se da por la línea de agua subterráneas. Una cuenca hidrográfica es un elemento fundamental para la obtención del agua y atender las necesidades que tenga el usuario. Las cuencas hidrográficas se dividen en cuencas altas, medias y bajas (Cardona, 2001).

3.7 Modelo Hidrológico

El modelo hidrológico se refiere a una representación simplificada de los procesos principales y las variables involucradas en la generación de caudales en un sistema hidrológico. Conjunto de ecuaciones matemáticas que representa la respuesta de un componente de un sistema hidrológico a cambio de condiciones de entrada (Cabrera, 2012).

3.7.1 Tipos de modelos hidrológicos

Existen numerosos enfoques y clasificaciones para abordar la modelización hidrológica de cuencas. No obstante, podemos centrarnos en el análisis de tres características fundamentales que resultan útiles en este contexto:

3.7.1.1 Según cómo se conceptualicen los procesos fundamentales

Existen tres categorías de clasificación para los modelos hidrológicos: empíricos, conceptuales y basados en procesos. Los modelos empíricos, también conocidos como modelos de regresión, funcionan a través de una relación calibrada entre las entradas y las salidas.

Estos modelos no intentan explicar el comportamiento causado por procesos individuales, sino que se enfocan en las relaciones entre las entradas y las salidas. Algunos modelos que siguen este enfoque son el método de Kostiakov y Green Ampt para calcular la infiltración, el método racional y el método del número de curva para obtener los caudales, y los modelos estocásticos de series temporales (Cabrera, 2012).

Los modelos teóricos o de base física son aquellos que consideran todos los procesos que intervienen en la transformación. Estos modelos se fundamentan en ecuaciones físicas que simulan todos los procesos relacionados con el fenómeno a estudiar, lo que elimina la necesidad de calibración. No obstante, estos modelos también tienen incertidumbre y pueden requerir calibración debido a la escasez de información sobre los procesos en el suelo, el subsuelo, la vegetación, etc. También se mencionan los modelos conceptuales que se utilizan cuando se conocen algunos de los procesos internos del modelo. Estos modelos suelen simplificar las leyes físicas (Cabrera, 2012).

3.7.1.2 En cuanto a la naturaleza de los algoritmos básicos utilizados.

Un modelo formal es una expresión simbólica en términos lógicos que simula una situación idealizada, conservando las propiedades estructurales del sistema real. Estos modelos describen el comportamiento del sistema mediante un conjunto de ecuaciones (Cabrera, 2012), que se muestra a continuación:

$$y_t = f^*(x_t, x_{t-1}, x_{t-2}, \dots; y_{t-1}, y_{t-2}, \dots; a_1, a_2, \dots) + \varepsilon_t$$

Donde:

- "x_t" representa la variable de entrada
- "f^{*}()" es una función específica
- "a_i" (donde i = 1,2, ...) son parámetros que se miden o estiman.

- " ϵ " representa la discrepancia entre la salida observada " y_t " y la salida ajustada por la función " f^* ".

3.7.1.3 Con respecto a su representación espacial

Los modelos hidrológicos pueden dividirse en dos categorías: agrupados o distribuidos. La modelación de cuencas tiene como principal obstáculo la falta de información sobre las propiedades del suelo y los procesos que afectan a los flujos subsuperficiales y subterráneos. Esta dificultad se resuelve suponiendo que la cuenca es homogénea en cuanto a sus procesos superficiales, subsuperficiales y subterráneos.

Esta suposición es válida para cuencas muy pequeñas. En este caso, la cuenca se representa como un único elemento con características constantes, lo que da lugar a los llamados "modelos agregados" o "agrupados". A medida que una cuenca se vuelve más grande, es probable que los suelos y sus características varíen en diferentes partes de la cuenca, lo que hace que los modelos agregados sean menos representativos. Para cuencas de mayor tamaño, se emplean modelos semi-distribuidos, los cuales identifican zonas con comportamiento hidrológico similar y las analizan de manera independiente antes de combinar sus efectos.

Sin embargo, estos modelos semi-distribuidos aún simplifican la realidad. Para lograr una representación más precisa, las cuencas se dividen en elementos más pequeños que representa una pequeña área dentro de la cuenca y actúa como una unidad de análisis individual y se utilizan modelos distribuidos, los cuales calculan el balance hídrico en cada grilla y transmiten sus efectos a las grillas adyacentes (Cabrera, 2012). En la figura 1 se visualiza un diagrama que ilustra la representación espacial de una cuenca en relación con los tres tipos de modelos mencionados.

- a) modelos agregados, b) modelos semi-distribuidos y c) modelos distribuidos.

Figura 1 Representación espacial de una cuenca Fuente: Cabrera, 2012



3.8 HEC-HMS

HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) es un programa de modelación hidrológica que incluye variedad de modelos. El programa busca simplificar procesos hidrológicos de un sistema de cuenca hidrográfica. El programa está enfocado en proceso de precipitación – escorrentía. El modelo utilizado emplea diferentes enfoques para representar la respuesta y los componentes del proceso hidrológico. Se divide la cuenca en subcuencas y se asignan métodos o submodelos distintos a cada una de ellas, lo que lo convierte en un modelo semidistribuido (Álvarez, 2021). La selección de los métodos se basa en las necesidades del estudio, las características de la cuenca y la disponibilidad de datos. La mayoría de los métodos utilizados en el modelo son agregados para cada subcuenca, pero también se han incorporado métodos que permiten una representación distribuida a nivel de celda (Álvarez, 2021).

HEC-HMS está diseñado para facilitar la representación y simulación de los diferentes componentes del ciclo hidrológico, permitiendo un enfoque integral en el modelado de eventos hidrológicos (Gonzales, 2011). El programa permite ingresar diversos datos hidrometeorológicos, como precipitación, temperatura y evaporación, así como datos topográficos, características de la cuenca y parámetros hidrológicos relevantes. Antes de realizar la simulación, el programa permite realizar operaciones de preprocesamiento, como la agregación de datos, interpolación espacial, corrección de errores y filtrado de información. HEC-HMS ofrece una variedad de modelos hidrológicos para simular los procesos en una cuenca, como la generación de precipitación, la transformación de la precipitación en escorrentía, la estimación de la infiltración, el enrutamiento de flujo y la predicción de caudales (Ortega y Benjumea, 2018).

El programa permite dividir la cuenca en subcuencas y establecer conexiones entre ellas mediante enlaces. Cada subcuenca puede tener características hidrológicas distintas, y se les asignan los modelos y parámetros correspondientes, además de proporcionar herramientas para calibrar y validar los modelos hidrológicos utilizando datos observados, lo que permite ajustar los parámetros del modelo para que se adecuen mejor a las condiciones locales y mejorar la precisión de las simulaciones (Ortega y Benjumea, 2018). Después de la simulación, el programa genera resultados detallados, como gráficos, tablas y series temporales de variables hidrológicas, como caudales, niveles de agua y almacenamiento. Estos resultados son útiles para el

análisis y la toma de decisiones relacionadas con la gestión de los recursos hídricos (Álvarez, 2021)

3.9 Modelación la cuenca en HEC-HMS

El modelo de la cuenca es una representación esquemática que busca capturar las características hidrológicas de la cuenca física. Esta representación se logra a través de la utilización de diversos elementos hidrológicos. El programa toma en cuenta los siguientes elementos para construir el modelo de la cuenca de manera detallada y precisa. La subcuenca (Subbasin-1) calcula el flujo resultante de la precipitación al restar las pérdidas hidrológicas, transformar el exceso de precipitación en escorrentía y sumar el flujo básico.

Los tramos de tránsito (Reach 1) describen y modelan el movimiento descendente del agua en el sistema hidrológico, considerando el flujo de entrada proporcionado por los elementos aguas arriba y utilizando un método de tránsito específico. Las uniones (Junction 1) consolidan los tramos aguas arriba sumando los flujos de entrada y asumiendo que no hay almacenamiento significativo. Las fuentes (Source 1) introducen flujos definidos por el usuario en el modelo de la cuenca. Los sumideros (Sink 1) representan el punto final de la cuenca, recibiendo y registrando la información del flujo proveniente de elementos aguas arriba. Los embalses (Reservoir 1) simulan la retención de un hidrograma debido a la presencia de un embalse específico, calculando el flujo de salida utilizando el método seleccionado. Las derivaciones (Diversion 1) simulan el flujo que se desvía del canal principal, con flujos de salida que se desvían y que permanecen en el canal principal, requiriendo datos de flujo proporcionados por el usuario. Estos elementos en el modelo HEC-HMS permiten representar y analizar de manera precisa los diferentes aspectos hidrológicos de la cuenca de estudio (Fleming y Brauer, 2016).

3.10 Tipos de pérdidas y sus métodos en HEC – HMS

En una de las versiones de HEC-HMS, se ofrecen diversos métodos que permiten calcular las pérdidas, el tránsito y el flujo base con el objetivo de determinar el caudal de salida en un análisis hidrológico. Estos modelos, integrados en el programa, proporcionan diferentes enfoques para estimar y analizar los procesos hidrológicos en una cuenca.

Cada modelo tiene características y suposiciones propias, lo que brinda al usuario la posibilidad de seleccionar el método más apropiado para su estudio específico. HEC-HMS cuenta con una variedad de herramientas y opciones, entre las que se

encuentran los métodos de pérdidas como déficit y tasa fija, inicial y tasa fija, exponencial, número de curva CN SCS, Green y Ampt, análisis de la humedad del suelo (SMA), DC por celdas, CN SCS por celdas y SMA por celdas. Asimismo, se ofrecen métodos de transformación como el Hidrograma Unitario (HU) de Clark, onda cinemática, ModClark, HU SCS, HU Snyder, HU definido por el usuario y Hidrograma en S del usuario. Para el flujo base, se disponen de métodos como la recesión restringida, constante mensual, depósito lineal y recesión. Estas herramientas y opciones de HEC-HMS permiten realizar análisis detallados y precisos del flujo de agua en una cuenca hidrográfica (Fleming y Brauer, 2016).

3.11 Especificación de control

Las especificaciones de control en HEC-HMS desempeñan un papel fundamental al establecer la duración de la simulación y definir los límites temporales del proyecto. Estas especificaciones permiten determinar el período de tiempo en el cual se llevará a cabo el análisis hidrológico y se calcularán los resultados pertinentes. Al establecer la duración de la simulación y definir los parámetros temporales, se proporciona un marco temporal preciso y claro que facilita la realización del análisis y la obtención de los resultados deseados (Fleming y Brauer, 2016).

3.12 Método de entrada de datos

En este estudio, se emplean datos de precipitación horaria de 2 tormentas tomados de 2 estaciones pluviométricas, sin realizar ponderaciones ni cálculos de pesos en las estaciones. Aunque no se utilizan pesos personalizados en los pluviómetros, HEC-HMS ofrece diversos métodos para el cálculo y generación de patrones de precipitación. Entre ellos, se encuentra la tormenta de frecuencia, que establece patrones coherentes de precipitación considerando la probabilidad de excedencia para diferentes duraciones de lluvia.

También se puede aplicar el método de inversa de la distancia para obtener una estimación más precisa de la precipitación promedio en la subcuenca. Además, se puede utilizar la distribución temporal del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) para distribuir el volumen total de lluvia a lo largo de un período de 24 horas, considerando la variación de la intensidad de la lluvia en el tiempo. HEC-HMS brinda la capacidad de definir y utilizar hietogramas personalizados según las características hidrológicas y las necesidades específicas del estudio. Sin embargo, es importante mencionar que el método de tormenta de proyecto estándar está calibrado para las condiciones hidrológicas y climáticas de los Estados Unidos.

En resumen, aunque no se empleen series temporales ni ponderaciones en las estaciones pluviométricas, HEC-HMS proporciona diversas opciones y herramientas para realizar un análisis detallado del flujo de agua en una cuenca hidrográfica considerando diferentes características y patrones de precipitación (Fleming y Brauer, 2016)

3.13 Análisis de frecuencias

El análisis de frecuencia es una técnica que permite estimar las intensidades de precipitación, y cuando los datos históricos son limitados, se puede recurrir a ecuaciones empíricas o generar series sintéticas con modelos matemáticos para llevar a cabo el análisis. Esto proporciona una base sólida para el diseño y la planificación de obras e infraestructuras hidrológicas, así como para evaluar los riesgos asociados a eventos de lluvia de diferentes magnitudes y duraciones (López et al., 2018)

3.14 Hydrognomon4

Hydrognomon4 es un programa gratuito creado por el equipo de investigación de la National Technical University of Athens para el análisis estadístico y la aplicación de funciones de distribución en datos hidrológicos. Este programa ofrece diversas funciones, incluyendo el procesamiento de datos hidrológicos, la representación tabular de datos, el análisis de frecuencias y la capacidad de ajustar funciones de distribución y variables extremas (Chetyrina, 2017).

Su característica destacada es la capacidad de ajuste automático de la serie de datos a múltiples funciones de distribución, lo que permite un análisis más preciso de los patrones y comportamientos hidrológicos. HYDROGNOMON4 es una herramienta valiosa para profesionales en el campo de la hidrología, proporcionando una forma eficiente y precisa de analizar y modelar datos hidrológicos. (Chetyrina, 2017).

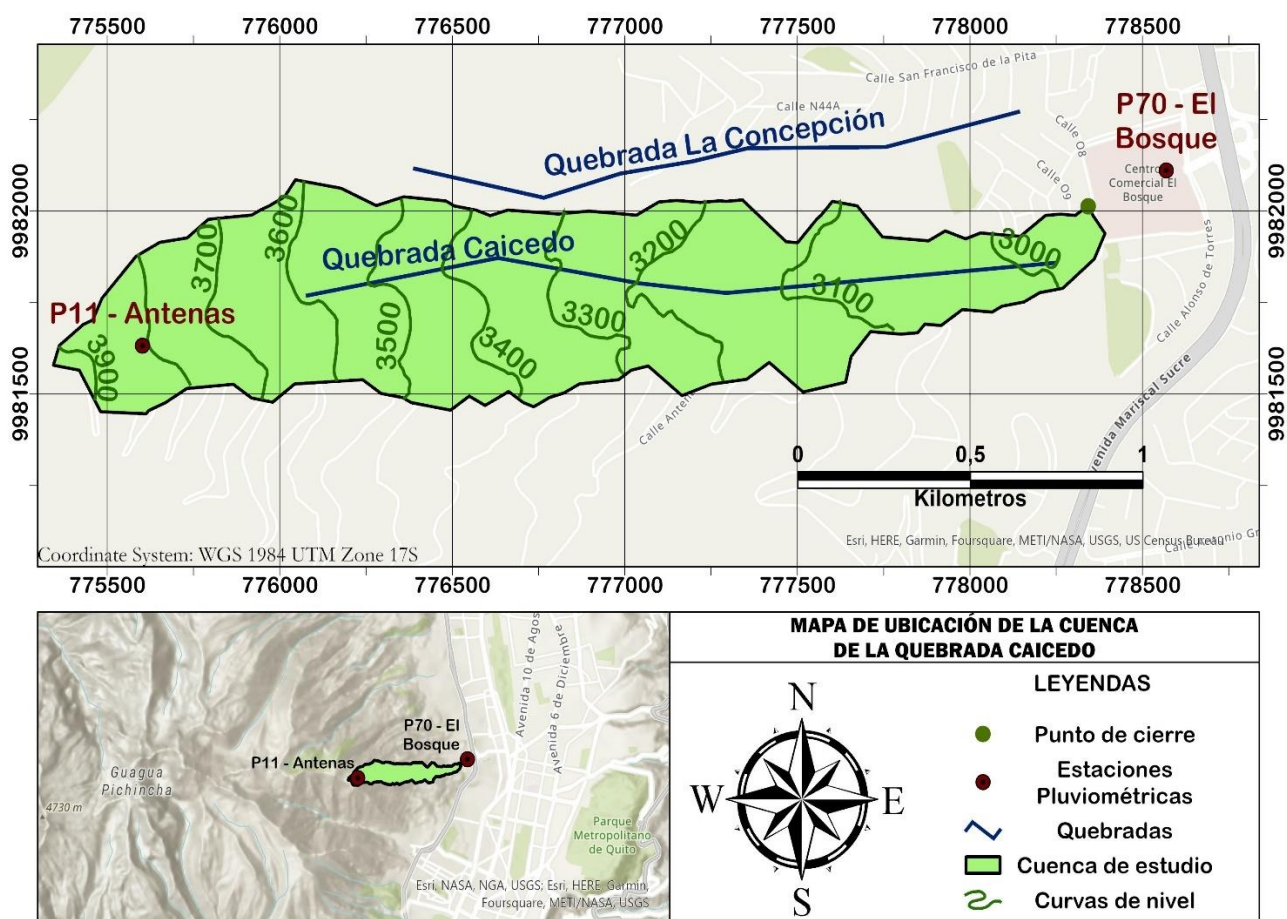
4 MÉTODOS

4.1 Área de Estudio

4.1.1 Localización

En el norte de la ciudad de Quito al oeste de la Av. Mariscal Sucre, entre las Atenas y el sector de El Bosque, se encuentra ubicada la Quebrada Caicedo. En las faldas del complejo volcánico El Pichincha. Específicamente la quebrada se encuentra entre la latitud 775.342E y 778.392E y la longitud 9'981.579N y 9'981.940N. La desembocadura de la quebrada Caicedo se encuentra en zona urbana como se muestra en la figura 2 a continuación.

Figura 2 Ubicación de la quebrada Caicedo entre las coordenadas latitud 775.342E y 778.392E y la longitud 9'981.579N y 9'981.940N. Se muestra 2 estaciones pluviométricas con datos de precipitación. Las líneas verdes muestran curvas de nivel cada 100 metros.



4.2 Modelo de la Investigación

Para realizar el presente trabajo de integración curricular, se llevará a cabo la delimitación de la cuenca hidrográfica de interés. Además, se recopilará información climática, así como datos sobre la cobertura vegetal y los suelos presentes en la zona de estudio. Con los datos de precipitación históricos de las dos estaciones pluviométricas se realizará un análisis detallado de las frecuencias hidrológicas utilizando los datos de precipitación máxima anual en 24 horas. Finalmente, se construirá un modelo hidrológico utilizando el software HEC-HMS, el cual permitirá simular 2 tormentas extremas y discutir la respuesta hidrológica de la cuenca de la quebrada Caicedo.

4.2.1 Delimitación de la cuenca hidrográfica de estudio

La extensión y recorrido de la quebrada Caicedo se determinó en base a las coordenadas levantadas por P. Peltre en su estudio de “Inundación, Aluviones y Hundimiento de Quito, Período 1900-1988” ver Anexo I. Esta información se cotejó con la cartografía de ríos del Ecuador, del Instituto Geográfico Militar (IGM), a través de los “shapes” publicados en su portal de Cartografía de Libre Acceso.

Los siguientes pasos fueron necesarios para delimitar una cuenca hidrográfica:

- Determinar el punto de cierre de la cuenca donde finaliza el área de drenaje de ésta y marca el límite geográfico sobre el cual se define la superficie de drenaje.
- Identificar la corriente principal, que recoge el agua de la zona. Esta corriente principal será la columna vertebral de la cuenca
- Delimitar el área geográfica que está drenando hacia la corriente principal identificada. Para ello, se utilizan técnicas de análisis topográfico y geoespacial que permiten determinar la dirección del flujo del agua y la forma de la cuenca.

Luego de hacer la delimitación de la cuenca se debe realizar un análisis de sus características, como la superficie total, la altitud, la pendiente, la permeabilidad, la susceptibilidad, la textura del suelo, la cobertura vegetal, el uso del suelo, precipitación, entre otras. Esta información es importante para entender cómo funciona la cuenca y su entorno. Se identificó la zona de la quebrada Caicedo, ver Anexo I. Este mapa permite ver la ubicación de la quebrada entre todos los drenajes naturales del DMQ.

4.2.2 Información climática, de cobertura vegetal y suelos

Se realiza la búsqueda de la información necesaria acerca de la quebrada Caicedo, como datos de precipitación, mapas de cobertura de suelo, tipos de suelo y proyectos de investigación anteriormente realizados en el área que faciliten el desarrollo de un modelo hidrológico en el programa HEC-HMS. En el caso de la precipitación los datos fueron facilitados por la EPMAPS. Los datos obtenidos incluyen datos de precipitación diaria desde el año 2001 hasta el 2021 los cuales pertenecen a la estación pluviométrica dentro de la cuenca de estudio que es la estación P11 - Antenas y la segunda estación más cercana a la desembocadura de la quebrada Caicedo es la estación P70 - El Bosque.

4.2.3 Análisis de frecuencias hidrológicas en las estaciones pluviométricas

4.2.3.1 Determinación de la Precipitación para diferentes Periodos de Retorno

Para determinar los periodos de retorno para diferentes años se realizó un análisis de frecuencias con datos de precipitación anual máxima en 24 horas para el periodo comprendido entre 2001 y 2021. Este análisis se desarrolla con los datos de las dos estaciones pluviométricas P11 ANTENAS Y P70 EL BOSQUE. Para determinar las precipitaciones máximas anuales en 24 horas para diferentes periodos de retorno, son necesarios los datos de precipitación de un periodo superior a 10 años.

4.2.4 Construcción del modelo hidrológico usando el software HEC-HMS

La construcción del modelo hidrológico en el software HEC-HMS implica la integración de datos de la cuenca hidrográfica, como información climática, cobertura vegetal y suelos. Mediante la configuración de parámetros y la selección de métodos, el modelo simula el flujo de agua en la cuenca de la quebrada Caicedo, proporcionando una comprensión de los procesos hidrológicos de esta zona. Esto permite saber cuál será la respuesta hidrológica en la cuenca hidrográfica, abordando de manera efectiva los desafíos asociados a las lluvias excesivas y las tormentas extremas en áreas urbanas.

El grupo hidrológico se determinó según la textura de suelo de acuerdo con las correlaciones establecidas por Bradbury et. al. (2000), como se muestra Tabla 1 a continuación.

Tabla 1 Grupo hidrológico del suelo. Fuente: Bradbury, 2000

| Grupo Hidrológico del Suelo | Infiltración cuando están húmedos | Características | Textura |
|-----------------------------|-----------------------------------|--|--|
| A B | Rápida Moderada | Alta capacidad de Infiltración > 76 mm/h Capacidad de infiltración 76-38 mm/h | Arenosa Arenosa-limosa Franca Franco-arcillosa-arenosa Franco-limosa |
| C | Lenta | Capacidad de infiltración 36-13 mm/h | Franco-arcillosa Franco-arcillo-limosa Arcillo-arenosa |
| D | Muy Lenta | Capacidad de infiltración < 13 mm/h | Arcillosa |

4.2.4.1 Interpolación mediante el método IDW

El método de interpolación IDW (Inverse Distance Weighted) se basa en la influencia decreciente de los puntos de datos con la distancia. Al aplicar este método, se otorga mayor peso a los puntos más cercanos a la ubicación a interpolar. Para lograr una interpolación precisa y representativa de la precipitación en toda la cuenca de estudio, se selecciona el centroide como el punto de interés para el cálculo. El centroide representa el punto equidistante a todas las estaciones de medición, lo que permite considerar de manera equitativa los datos de toda la cuenca y obtener estimaciones más fiables.

Además, al ser IDW un interpolador exacto, se asegura que el valor predicho en el centroide sea igual al valor medido en una ubicación muestreada, brindando así una mayor confianza en los resultados obtenidos (Hernández, 2011).

La fórmula que se utiliza para realizar la interpolación es:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i}{d_i^2} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^2} \right)}$$

Dónde:

P = Precipitación Final.

P_i = Precipitación de cada estación.

d_i = Distancia entre el punto a interpolar y la estación.

4.2.4.2 Cálculo del número de curva

El número de curva (CN) se usa para calcular la escurrentía total en una cuenca hidrográfica a partir de la precipitación, la cobertura vegetal, el uso del suelo y la capacidad de infiltración del suelo. El número CN es un valor numérico que indica la capacidad de infiltración del suelo y depende del uso del suelo, el tipo de suelo y la cobertura vegetal.

La siguiente fórmula permite determinar el número de curva de la cuenca de la quebrada Caicedo mediante una ponderación ya que al ser un área de estudio muy pequeña es recomendable utilizar este método.

$$CN = \frac{\sum CN_i \times A_i}{\sum A_i}$$

Dónde:

CN = número de curvas

A = Área por textura

4.2.4.3 El cálculo de Tiempo de Concentración

La fórmula que se presenta es una ecuación empírica que se utiliza para estimar el tiempo de concentración de una cuenca hidrográfica. Se aplica la fórmula para cuencas pequeñas a medianas con una superficie menor a 400 Km².

La ecuación se conoce como la fórmula de Kirpich y se expresa de la siguiente manera:

$$T_c = \frac{l^{0.8}(S + 1)^{0.7}}{1,140Y^{0.5}}$$

Donde:

T_c = time of concentration, h

l = flow length, ft

Y = average watershed land slope, %

S = maximum potential retention, in

Es importante tener en cuenta que esta fórmula es una aproximación y que puede haber variaciones según las características específicas de cada cuenca.

4.2.4.4 El cálculo del tiempo de Retardo

Para este caso, se utiliza una aproximación empírica que establece que el tiempo de retardo en el cauce principal es igual al 35% del tiempo de concentración. En este caso, se podría estimar el tiempo de retardo de la siguiente manera:

$$Tr = 0,35 \times T_c$$

Donde:

Tr = Tiempo de retardo

T_c = Tiempo de concentración

4.2.4.5 Cálculo del Umbral de Escorrentía

La fórmula que se presenta es una ecuación empírica utilizada para estimar umbral de escorrentía de un evento de precipitación en una cuenca hidrográfica. La ecuación se conoce como la fórmula racional de escorrentía y se expresa de la siguiente manera:

$$P_o = \frac{5080}{CN} - 50,8$$

Donde:

P_o = Umbral de Escorrentía

CN = Número de curva

4.2.4.6 Método de pérdidas SCS Curve Number en HEC HMS

El método de pérdidas SCS Curve Number representa la capacidad de retención de agua del suelo y la vegetación en una cuenca. Se ha optado por asignar un solo valor de número de curva a toda la cuenca porque la cuenca de estudio tiene un tamaño pequeño y se asume que las características de suelo y vegetación no varían mucho en distintas zonas. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta aproximación puede introducir cierta incertidumbre en las estimaciones, ya que no se consideran posibles variaciones locales en la capacidad de retención de agua.

4.2.4.7 Método de Transformación SCS Unit Hydrograph en HEC HMS

El método de Transformación SCS Unit Hydrograph es utilizado para estimar y analizar la respuesta hidrológica de una cuenca frente a diferentes patrones de precipitación. Al aplicar este método, se pueden simular y evaluar distintos escenarios de lluvia para comprender y predecir el comportamiento hidrológico de la cuenca.

En el proceso de transformación, se utiliza la curva de escorrentía unitaria del SCS junto con la precipitación registrada o estimada en la cuenca. Considerando el tiempo de retardo y aplicando una función de transformación adecuada, es posible obtener el hidrograma resultante, el cual proporciona información valiosa sobre la forma y magnitud del flujo de agua en la cuenca.

5 RESULTADOS

5.1 Cuenca hidrográfica de estudio

La cuenca hidrográfica de la quebrada Caicedo abarca aproximadamente 1,2 km², con una longitud total en su perímetro de 7,1 km. Presenta un desnivel de 972 m, desde su punto de cierre ubicado a 2941 msnm hasta su punto más elevado que alcanza los 3913 msnm. La red de drenaje de la cuenca se extiende a lo largo de 2,2 km, presentando una pendiente media de 47,5 grados. Estos datos resaltan las dimensiones y características topográficas montañosas de la cuenca hidrográfica de la quebrada Caicedo.

5.2 Información climática, cobertura vegetal y suelos

La tabla 2 muestra los datos de precipitación máxima anual en 24 horas de las estaciones P11 ANTENAS y P70 EL BOSQUE. Se puede ver que el año 2018 para la estación P11 ANTENAS se obtuvo el valor máximo de 49,2 mm y un valor mínimo registrado en el año 2008 de 13,6 mm entre toda la serie de tiempo presentada. De igual manera en el año 2020 para la estación P70 EL BOSQUE se obtuvo el valor máximo de 61,5 mm y un valor mínimo registrado en el año 2005 de 15,0 mm.

Se puede observar que a pesar de que las dos estaciones pluviométricas se encuentran a 3 km de distancia, los valores máximos y mínimos de eventos registrados en la estación P11 ANTENAS no coincide con los eventos registrados en la estación P70 EL BOSQUE, situación típica de variabilidad climática en zonas montañosas. Las diferencias en los valores de precipitación registrados entre las estaciones P11 ANTENAS y P70 EL BOSQUE pueden deberse a la influencia topográfica, la influencia de la vegetación y posibles errores de medición.

Tabla 2 Precipitación Máxima Anual en 24 horas. Fuente: EPMAPS

| Precipitación Máxima Anual en 24 horas (mm) | | |
|--|-------------|---------------|
| AÑO | P11 ANTENAS | P70 EL BOSQUE |
| 2001 | 36,2 | 44,8 |
| 2002 | 24,1 | 23,6 |
| 2003 | 42,8 | 47,8 |
| 2004 | 40,0 | 45,1 |
| 2005 | 29,4 | 15,0 |
| 2006 | 33,4 | 37,9 |
| 2007 | 33,5 | 34,9 |
| 2008 | 13,6 | 26,6 |

| | | |
|-------------|------|------|
| 2009 | 22,6 | 42,8 |
| 2010 | 21,7 | 39,5 |
| 2011 | 18,5 | 31,5 |
| 2012 | 32,7 | 25,5 |
| 2013 | 37,5 | 28,7 |
| 2014 | 16,0 | 16,2 |
| 2015 | 22,6 | 36,9 |
| 2016 | 27,4 | 35,6 |
| 2017 | 27,4 | 20,6 |
| 2018 | 49,2 | 32,0 |
| 2019 | 35,7 | 61,5 |
| 2020 | 25,8 | 61,6 |
| 2021 | 35,0 | 23,1 |

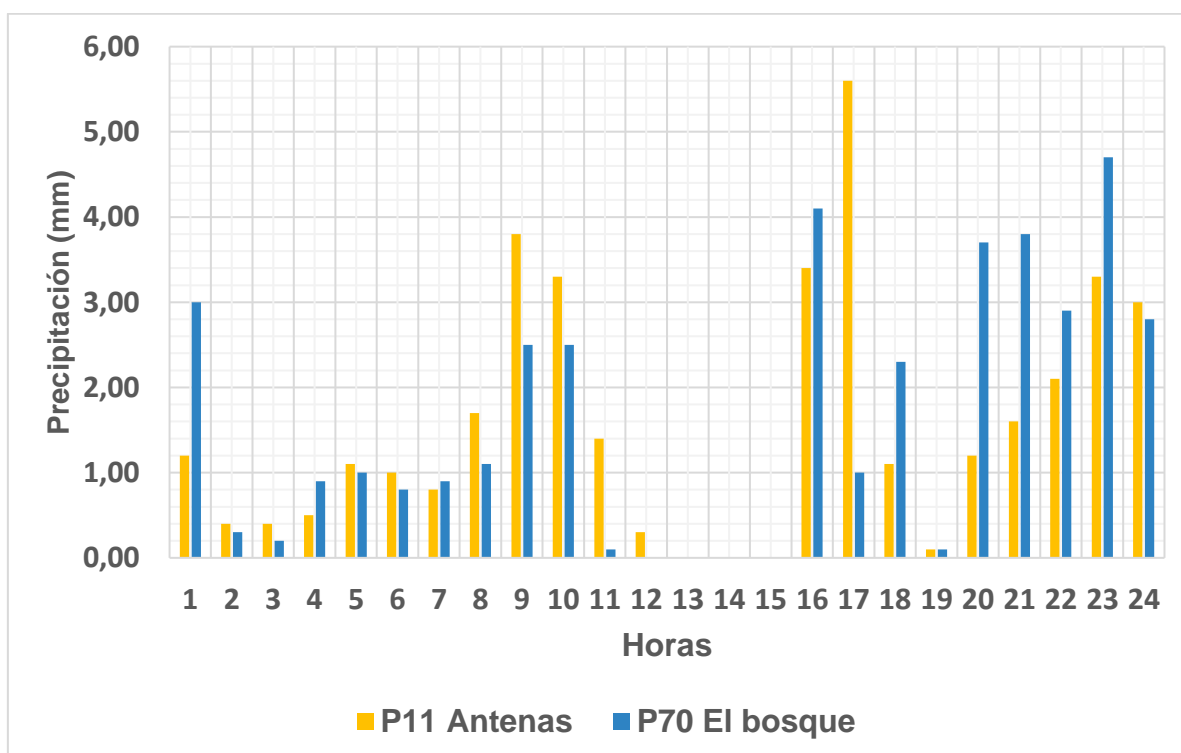
La tabla 3 muestra los datos de precipitación horaria de la tormenta extrema del 13 de diciembre de 2021, se observa una variabilidad en los valores de precipitación registrados en las estaciones P11 Antenas y P70 El Bosque a lo largo del día. Aunque ambos sitios presentan similitudes en ciertos momentos, los niveles de precipitación difieren en varios horarios. Además, se destaca la presencia de valores nulos en algunos períodos. La suma total de la precipitación acumulada muestra valores cercanos entre las estaciones, siendo 37,30 mm para P11 Antenas y 38,70 mm para P70 El Bosque. De igual manera se puede observar la comparación de precipitación horaria entre las 2 estaciones como se puede muestra en la figura 3.

Tabla 3 Precipitación Horaria en mm de la tormenta ocurrida el 13/12/2021. Fuente: EPMAPS

| FECHA | HORARIO | P11 Antenas (mm) | P70 El bosque (mm) |
|--------------|----------------|-------------------------|---------------------------|
| 13/12/2021 | 0 | 1,20 | 3,00 |
| 13/12/2021 | 1 | 0,40 | 0,30 |
| 13/12/2021 | 2 | 0,40 | 0,20 |
| 13/12/2021 | 3 | 0,50 | 0,90 |
| 13/12/2021 | 2 | 1,10 | 1,00 |
| 13/12/2021 | 4 | 1,00 | 0,80 |
| 13/12/2021 | 5 | 0,80 | 0,90 |
| 13/12/2021 | 6 | 1,70 | 1,10 |
| 13/12/2021 | 8 | 3,80 | 2,50 |
| 13/12/2021 | 9 | 3,30 | 2,50 |

| | | | |
|----------------------|----|-----------------|-----------------|
| 13/12/2021 | 10 | 1,40 | 0,10 |
| 13/12/2021 | 11 | 0,30 | 0,00 |
| 13/12/2021 | 12 | 0,00 | 0,00 |
| 13/12/2021 | 13 | 0,00 | 0,00 |
| 13/12/2021 | 14 | 0,00 | 0,00 |
| 13/12/2021 | 15 | 3,40 | 4,10 |
| 13/12/2021 | 16 | 5,60 | 1,00 |
| 13/12/2021 | 17 | 1,10 | 2,30 |
| 13/12/2021 | 18 | 0,10 | 0,10 |
| 13/12/2021 | 19 | 1,20 | 3,70 |
| 13/12/2021 | 20 | 1,60 | 3,80 |
| 13/12/2021 | 21 | 2,10 | 2,90 |
| 13/12/2021 | 22 | 3,30 | 4,70 |
| 13/12/2021 | 23 | 3,00 | 2,80 |
| | | | |
| P DIARIA (mm) | | 37,30 mm | 38,70 mm |

Figura 3 Comparación de precipitación horaria entre la estación P11 Antenas y P70 El bosque de la tormenta del 13/12/2021. Fuente: Propia



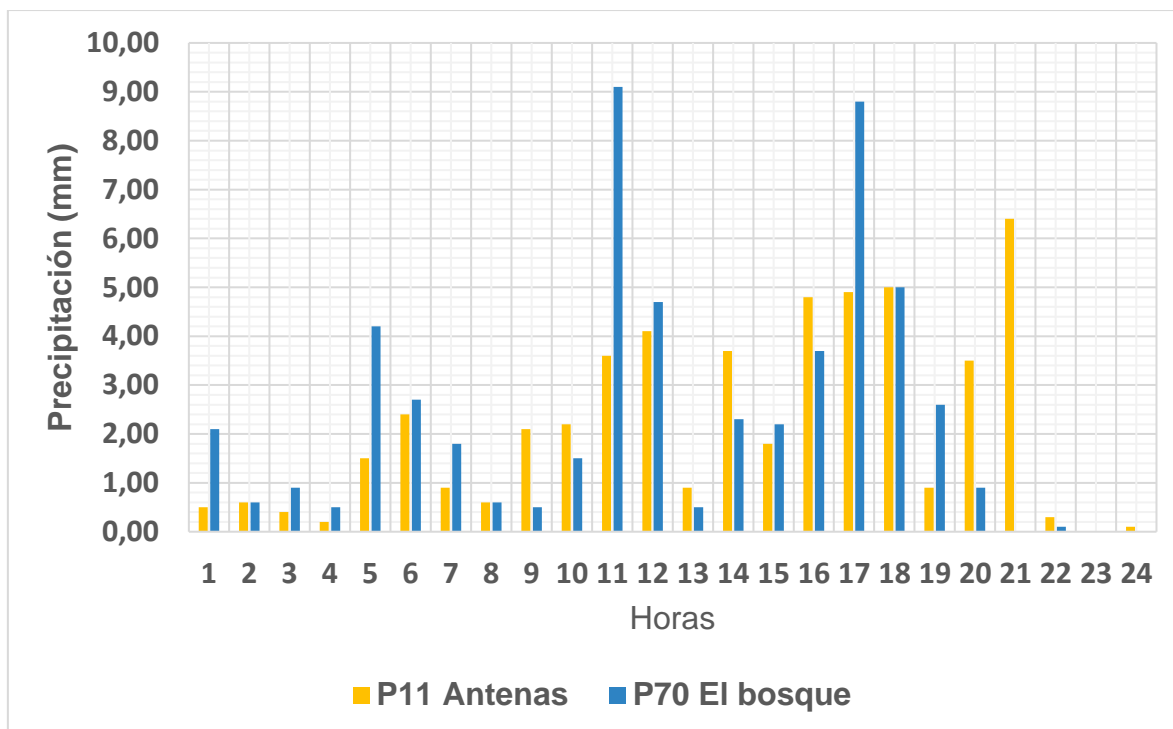
La tabla 4 muestra los datos de precipitación horaria de la tormenta extrema del 31 de enero de 2022, de igual manera se observa una variabilidad en los valores de precipitación registrados en las estaciones P11 Antenas y P70 El Bosque a lo largo del

día. Los niveles de precipitación difieren en diferentes horarios, aunque también se pueden identificar momentos de similitud en los valores entre las estaciones. La precipitación acumulada muestra valores cercanos, siendo 51,40 mm para P11 Antenas y 55,30 mm para P70 El Bosque como se muestra en la figura 4. Al igual que en la tabla anterior, se observan valores nulos en algunos horarios, lo que indica la ausencia de precipitación durante esos períodos. De igual manera se puede observar la comparación de precipitación horaria entre las 2 estaciones como se muestra en la figura 4.

Tabla 4 Precipitación Horaria en mm de la tormenta ocurrida el 31/01/2022. Fuente: EPMAPS

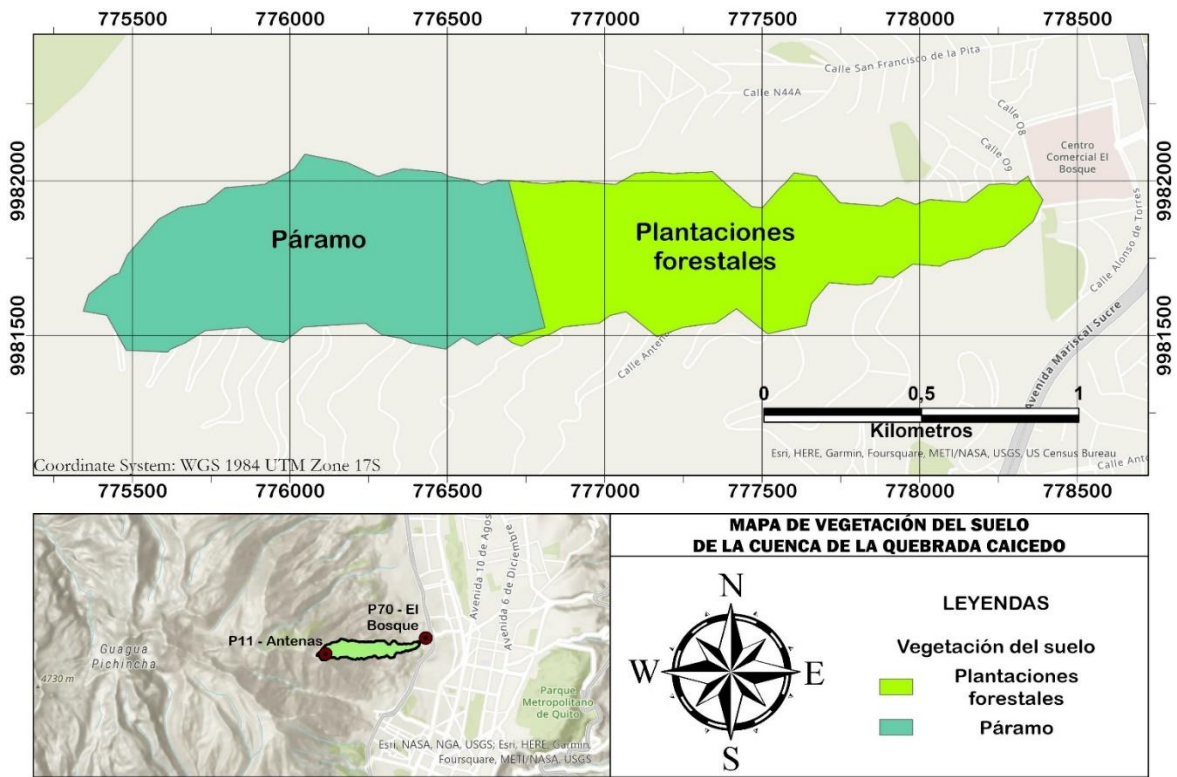
| FECHA | HORARIO | P11 Antenas (mm) | P70 El bosque (mm) |
|----------------------|---------|------------------|--------------------|
| 31/01/2022 | 0 | 0,50 | 2,10 |
| 31/01/2022 | 1 | 0,60 | 0,60 |
| 31/01/2022 | 2 | 0,40 | 0,90 |
| 31/01/2022 | 3 | 0,20 | 0,50 |
| 31/01/2022 | 4 | 1,50 | 4,20 |
| 31/01/2022 | 5 | 2,40 | 2,70 |
| 31/01/2022 | 6 | 0,90 | 1,80 |
| 31/01/2022 | 7 | 0,60 | 0,60 |
| 31/01/2022 | 8 | 2,10 | 0,50 |
| 31/01/2022 | 9 | 2,20 | 1,50 |
| 31/01/2022 | 10 | 3,60 | 9,10 |
| 31/01/2022 | 11 | 4,10 | 4,70 |
| 31/01/2022 | 12 | 0,90 | 0,50 |
| 31/01/2022 | 13 | 3,70 | 2,30 |
| 31/01/2022 | 14 | 1,80 | 2,20 |
| 31/01/2022 | 15 | 4,80 | 3,70 |
| 31/01/2022 | 16 | 4,90 | 8,80 |
| 31/01/2022 | 17 | 5,00 | 5,00 |
| 31/01/2022 | 18 | 0,90 | 2,60 |
| 31/01/2022 | 19 | 3,50 | 0,90 |
| 31/01/2022 | 20 | 6,40 | 0,00 |
| 31/01/2022 | 21 | 0,30 | 0,10 |
| 31/01/2022 | 22 | 0,00 | 0,00 |
| 31/01/2022 | 23 | 0,10 | 0,00 |
| P DIARIA (mm) | | 51,40 mm | 55,30 mm |

Figura 4 Comparación de precipitación horaria entre la estación P11 Antenas y P70 El bosque de la tormenta del 31/01/2022. Fuente: Propia



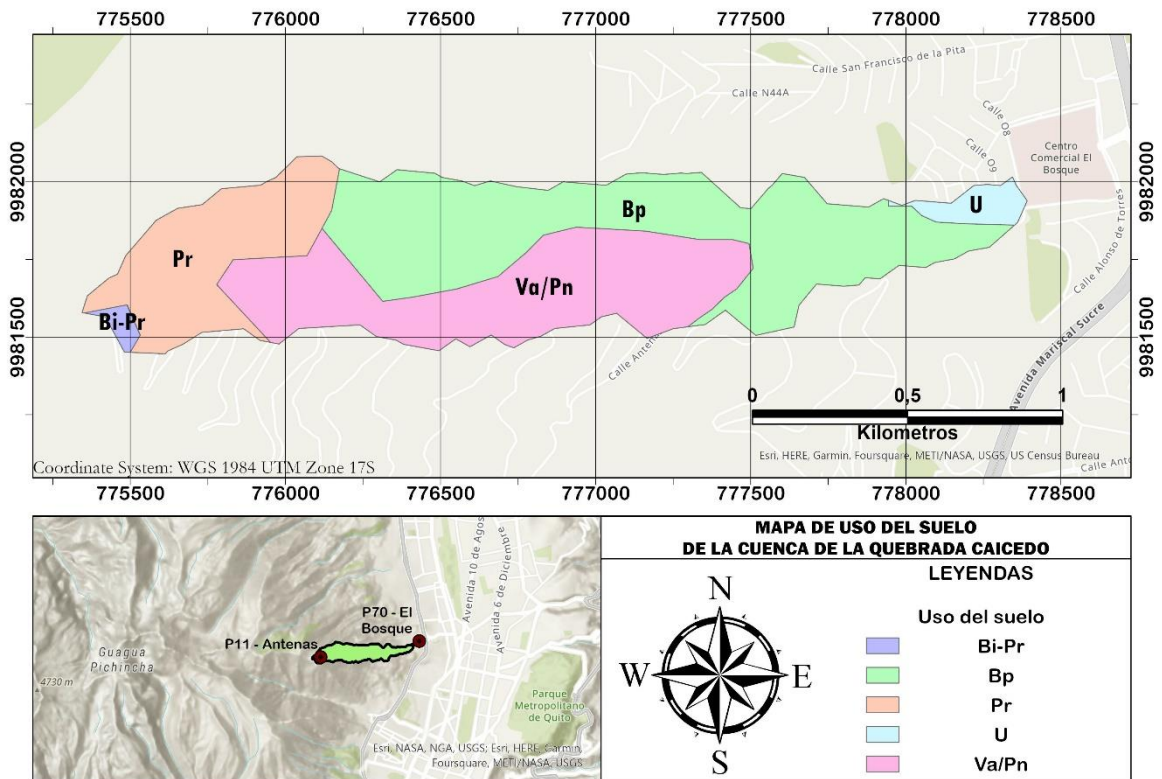
Los siguientes mapas que se muestran a continuación ofrecen una visión de las características y propiedades del suelo, siendo una herramienta valiosa para comprender la distribución y variabilidad de las condiciones del suelo en la zona de estudio. La cobertura vegetal predominante es paramo con un 45 % de la cuenca en el tramo superior y plantaciones forestales en la parte inferior con un 55 % como se muestra en la figura 5.

Figura 5 Mapa de cobertura vegetal del suelo de la cuenca de la quebrada Caicedo. Se puede ver las plantaciones forestales ocupan más del 50% del área de estudio. Fuente: Propia



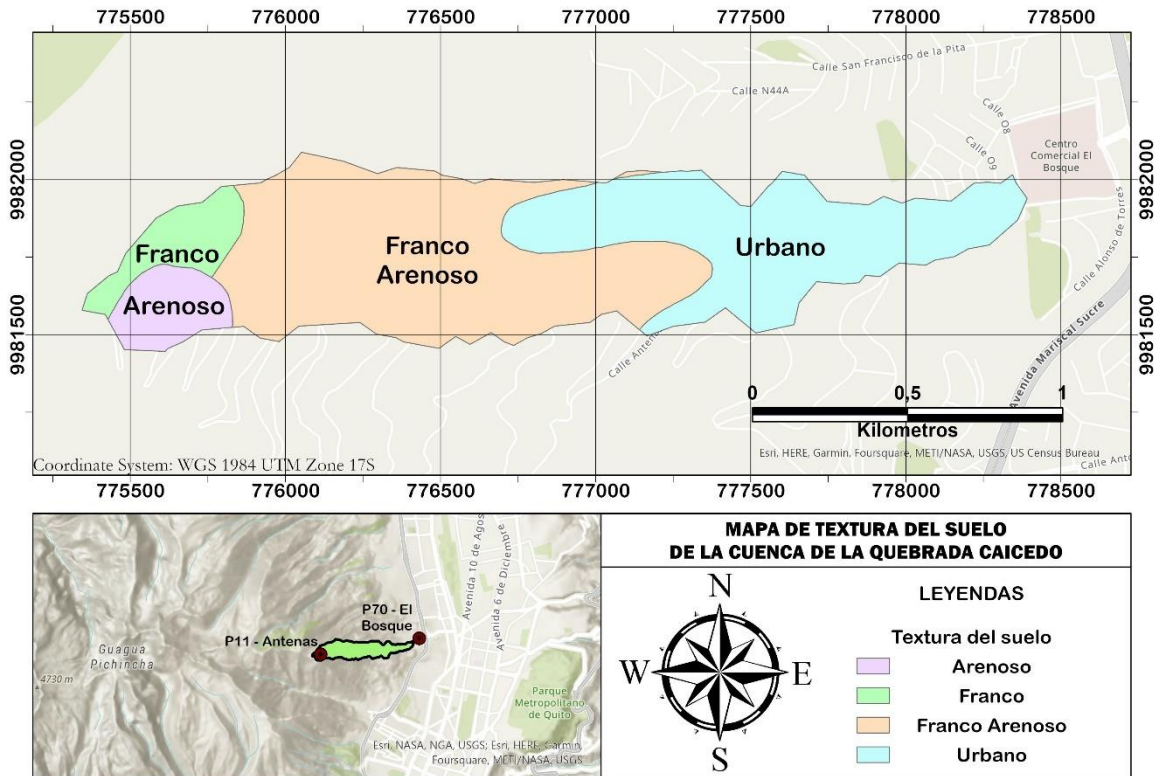
El uso del suelo en la cuenca de la quebrada Caicedo se divide en las siguientes categorías: Bi – Pr (50% Bosque intervenido con 50% páramo), Bp (100% Bosque protector), Pr (100% Páramo), U (Zona urbana) y Va/Pn (70% vegetación arbustiva con 30% páramo). La categoría que más predomina en la zona es Bp (100% Bosque protector) que abarca aproximadamente el 40% del suelo como se muestra en la figura 6.

Figura 6 Mapa del uso del suelo de la cuenca de la quebrada Caicedo. Se puede ver que los patrones de uso del suelo el Bp (Bosque protector) ocupa en su mayoría un 40% de la zona. Fuente: Propia



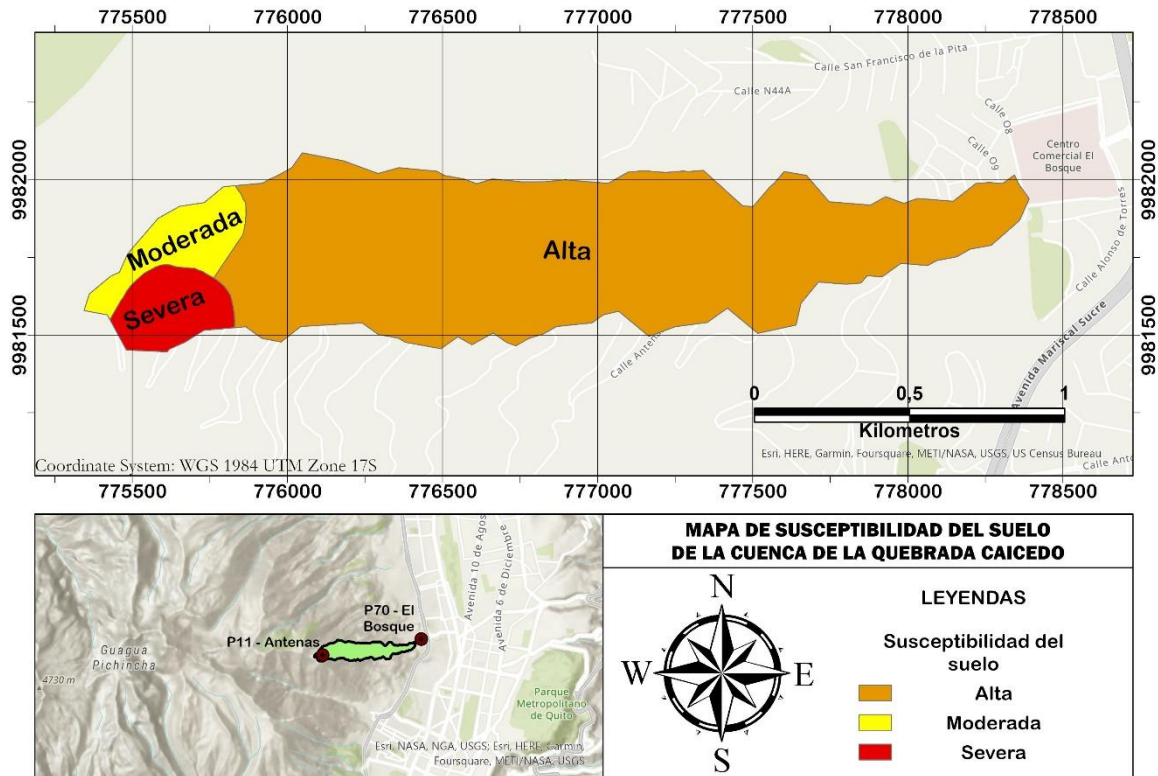
Se identificaron áreas con suelo arenoso, franco, franco arenoso y urbano, como se muestra en la figura 7. El suelo arenoso tiene partículas de mayor tamaño, mientras que el suelo franco muestra una combinación equilibrada de diferentes tamaños de partículas. El suelo franco arenoso presenta una textura intermedia con mayor proporción de partículas de arena. Las áreas urbanas presentan una variabilidad en la textura del suelo debido a la presencia de construcciones y pavimentos, La textura de suelo predominante en alrededor de un 40% corresponde a franco arenoso.

Figura 7 Mapa de textura del suelo de la cuenca de la quebrada Caicedo. Se puede ver un predominio de suelos franco-arenosos en un 40%. Fuente: Propia



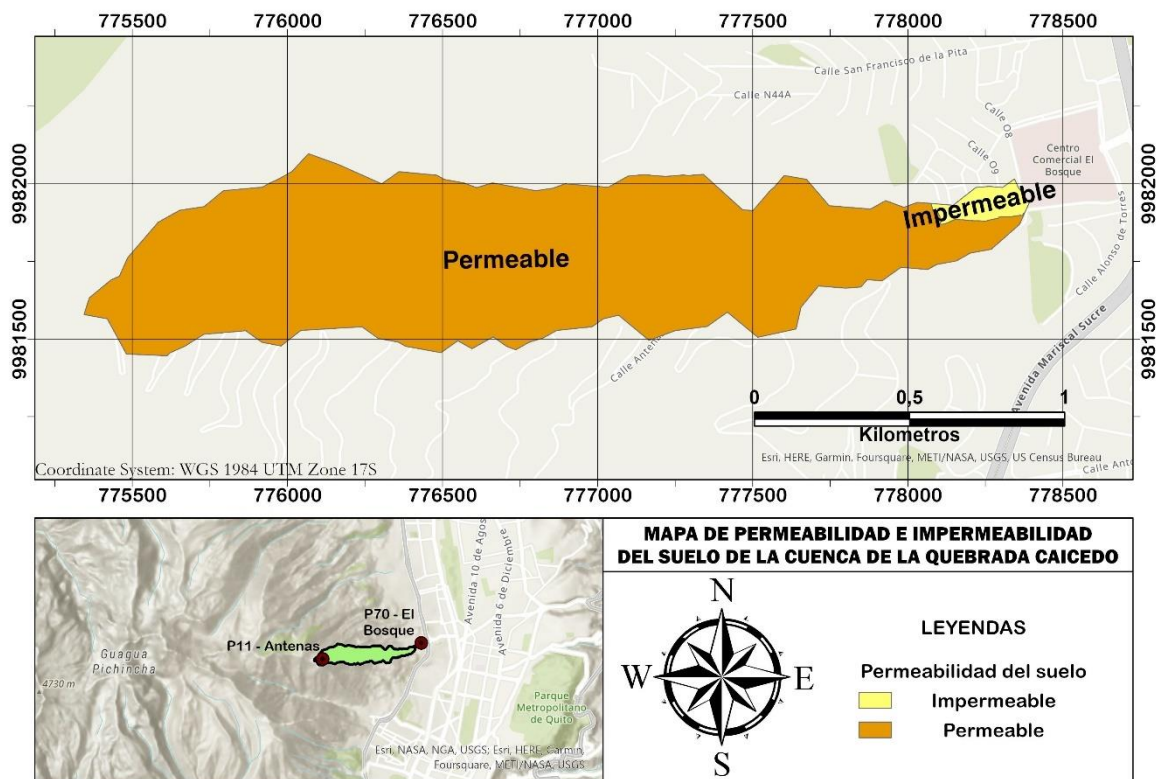
En la cuenca de la quebrada se ha identificado que la susceptibilidad del suelo a erosión y deslizamientos varía en distintas áreas como se muestra en la figura 8. Predominantemente, se encuentra una alta susceptibilidad del suelo, lo cual indica que existe un mayor riesgo de erosión y deslizamientos en estas zonas. Por otro lado, se han observado áreas con una susceptibilidad moderada y severa en la zona alta de la cuenca, lo que implica la presencia de condiciones más críticas en términos de estabilidad del suelo.

Figura 8 Mapa de susceptibilidad del suelo de la cuenca de la quebrada Caicedo. Se puede observar una alta susceptibilidad del suelo, lo cual indica que existe un mayor riesgo de erosión y deslizamientos en estas zonas. Fuente: Propia



Finalmente, se ha determinado que la permeabilidad del suelo muestra características distintivas en diferentes áreas. Predominantemente, se encuentra una alta permeabilidad, abarcando aproximadamente el 95% de la cuenca como se muestra en la figura 9. Esto indica que el suelo tiene una capacidad significativa para permitir la infiltración del agua y facilitar el drenaje adecuado. Sin embargo, se han identificado zonas de impermeabilidad en la zona baja de la cuenca. Estas áreas presentan una menor capacidad de absorción de agua y pueden experimentar problemas relacionados con la acumulación y el estancamiento del agua.

Figura 9 Mapa de permeabilidad del suelo de la cuenca de la quebrada Caicedo. Se observa que existe una alta permeabilidad, abarcando aproximadamente el 95% de la cuenca. Fuente: Propia.



La tabla 5 presenta un resumen sobre diferentes áreas en términos de su área expresada en metros cuadrados, textura del suelo, grupo hidrológico del suelo (GHS), susceptibilidad, drenaje, infiltración y permeabilidad. Cada fila representa un área específica. Por ejemplo, la primera fila indica un área de 0,62 Km² con una textura de suelo Franco Arenoso perteneciente al GHS tipo B, una susceptibilidad alta, un drenaje bueno o moderado, una infiltración moderada y suelo permeable.

Tabla 5 Condiciones del suelo. Fuente: Elaboración propia

| ÁREA (Km ²) | TEXTURA | GHS | SUSCEPTIBILIDAD | DRENAJE | INFLITRACIÓN | PERMEABILIDAD |
|---|----------------|-----|-----------------|------------------|--------------|---------------|
| 0,6 | Franco Arenoso | B | Alto | Bueno o moderado | Moderada | Permeable |
| 0,1 | Franco | B | Moderado | Bueno o moderado | Moderada | Permeable |
| 0,1 | Arenoso | A | Severo | Perfecto | Rápida | Permeable |
| 0,4 | Urbano | B | Alto | Bueno o moderado | Moderada | Permeable |
| ÁREA TOTAL: 1,2 Km² | | | | | | |

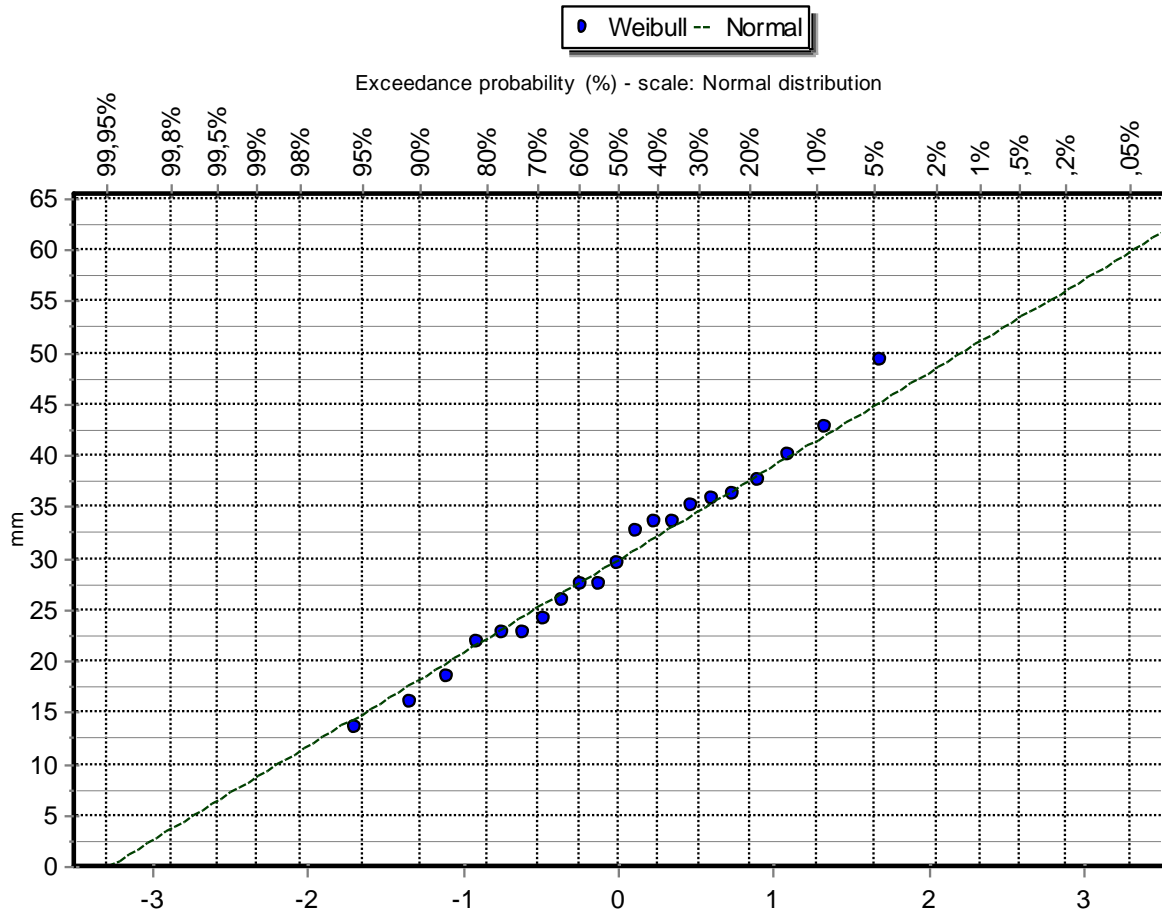
5.3 Análisis de frecuencias hidrológicas de las dos estaciones de pluviométricas.

Se realizó un análisis de frecuencias hidrológicas en las dos estaciones seleccionadas. Este análisis permitió estudiar la distribución y la probabilidad de eventos de lluvia en cada estación, brindando información clave sobre la frecuencia de las precipitaciones. El software Hydrognomon4 permite mostrar la probabilidad de excedencia, que es la probabilidad de que un evento de lluvia máxima anual en 24 horas sobrepase un cierto valor o umbral fijado. Para los datos de lluvia máxima anual en 24 horas de las dos estaciones, el cálculo de la probabilidad de excedencia ayuda a estimar la frecuencia con la que se producen eventos de precipitación intensa por encima de un nivel determinado.

En la figura 10 se observa una curva que se ajusta a una distribución de Weibull combinada con una distribución normal para los datos de la estación P11 Antenas. Esta combinación indica que va desde una lluvia excedida desde alrededor del 95% hasta que alcanza alrededor del 5%. La presencia de la distribución normal sugiere que también hay eventos de precipitación dentro de rangos más comunes.

El gráfico de probabilidad de excedencia proporciona información valiosa sobre la distribución de los datos y la probabilidad de ocurrencia de diferentes niveles de precipitación en la cuenca de estudio, por ejemplo, existe una probabilidad de excedencia de alrededor el 5% de que ocurra una precipitación mayor a 49,2 mm. De igual manera la media ± 1 de la desviación estándar indica que alrededor del 68.3% de los datos entre 20 mm y 38 mm están dentro del rango es decir se encuentran cerca de la media cuyo valor es alrededor de 30 mm. La media ± 2 de la desviación estándar significa que cerca del 95.5% de los datos se encuentran dentro de dos desviaciones estándar arriba y abajo de la media.

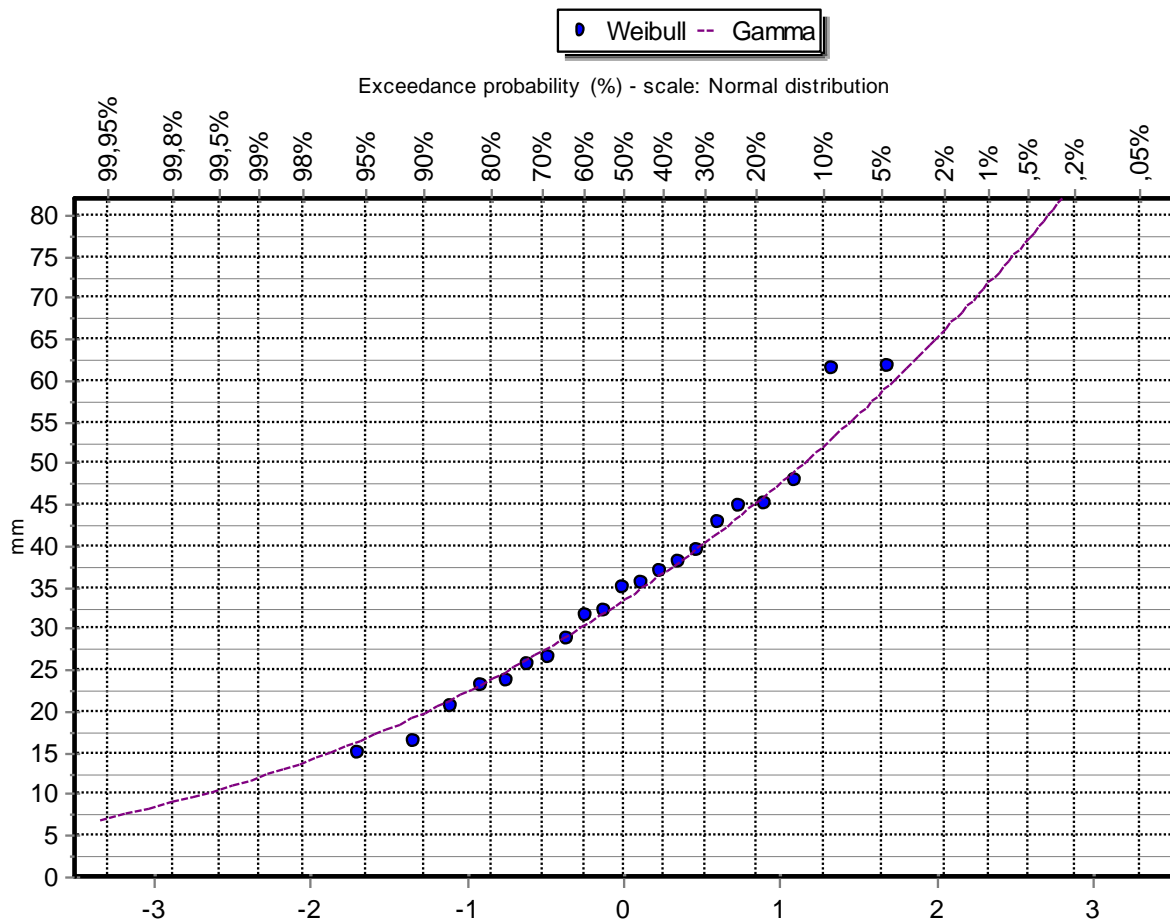
Figura 10 Probabilidad de excedencia de las precipitaciones de la estación P11 ANTENAS. Elaboración propia



La figura 11 muestra una curva que se ajusta a una distribución de Weibull -- gamma. Esta combinación indica que la distribución para los datos de precipitación de la estación P70 va desde una lluvia excedida desde alrededor del 95% hasta llegar a una lluvia excedida alrededor del 5% de todos los eventos, caracterizado por una forma de curva que se asemeja a una distribución de Weibull y una dispersión más amplia representada por la distribución gamma. El gráfico de probabilidad de excedencia permite visualizar la probabilidad de ocurrencia de diferentes niveles de precipitación en la cuenca a lo largo del periodo analizado.

Existe una probabilidad de excedencia de alrededor el 5% de que ocurra una precipitación de casi 63 mm. De igual manera la media ± 1 de la desviación estándar indica que alrededor del 68.3% de los datos entre 23 mm y 47 mm están dentro del rango es decir se encuentran cerca de la media cuyo valor es alrededor de 35 mm. Así mismo la mayoría de los datos se encuentra dentro de la media ± 2 de la desviación estándar.

Figura 11 Probabilidad de excedencia de las precipitaciones de la estación P70 El Bosque. Elaboración propia.



5.3.1 Periodos de retorno en Hydrognomon 4

El software Hydrognomon 4 utiliza método de la distribución de Weibull para calcular la precipitación correspondiente a diferentes periodos de retorno. Este método se fundamenta en la teoría de la probabilidad y en el análisis de frecuencia de datos hidrológicos existentes. En las tablas siguientes se muestra las precipitaciones máximas para 3 periodos de retorno.

Tabla 6 Precipitaciones máximas para estación P11 Antenas. Elaboración Propia.

| P11 ANTENAS | |
|--------------------|-------------|
| Periodo de retorno | P Máx. (mm) |
| 10 | 41,4 |
| 20 | 44,7 |
| 50 | 48,5 |

Tabla 7 Precipitaciones máximas para estación P70 El Bosque. Elaboración Propia

| P70 EL BOSQUE | |
|--------------------|-------------|
| Periodo de retorno | P Máx. (mm) |
| 10 | 52,0 |
| 20 | 58,3 |
| 50 | 71,5 |

Las dos tormentas registradas, el 13 de diciembre de 2021 y el 31 de enero de 2022, presentaron características de eventos extremos debido a la cantidad significativa de precipitación acumulada. La estación P11 Antenas reportó precipitaciones diarias de 37.30 mm y 51.40 mm, respectivamente, mientras que la estación P70 El Bosque registró 38.70 mm y 55.30 mm, respectivamente.

En el caso de la estación P11 Antenas, la primera tormenta presenta una probabilidad de excedencia de aproximadamente el 20%, lo que indica que existe un 20% de probabilidad de que la precipitación supere ese valor. Para la segunda tormenta, la probabilidad de excedencia es alrededor del 5%, lo que indica que existe un 5% de probabilidad de superar la cantidad de precipitación registrada.

En la estación P70 El Bosque, la primera tormenta muestra una probabilidad de excedencia de aproximadamente el 40%, lo que indica una probabilidad del 40% de superar la cantidad de precipitación registrada. Para la segunda tormenta, la probabilidad de excedencia es alrededor del 8%, lo que implica una probabilidad del 8% de superar el valor de precipitación. Estos resultados confirman la naturaleza extrema de ambas tormentas y subrayan la importancia de realizar la modelación en HEC HMS utilizando los datos horarios disponibles. Esto permitirá comprender la respuesta hidrológica de la quebrada Caicedo frente a estas precipitaciones extremas.

5.4 Construcción del modelo hidrológico usando el software HEC-HMS

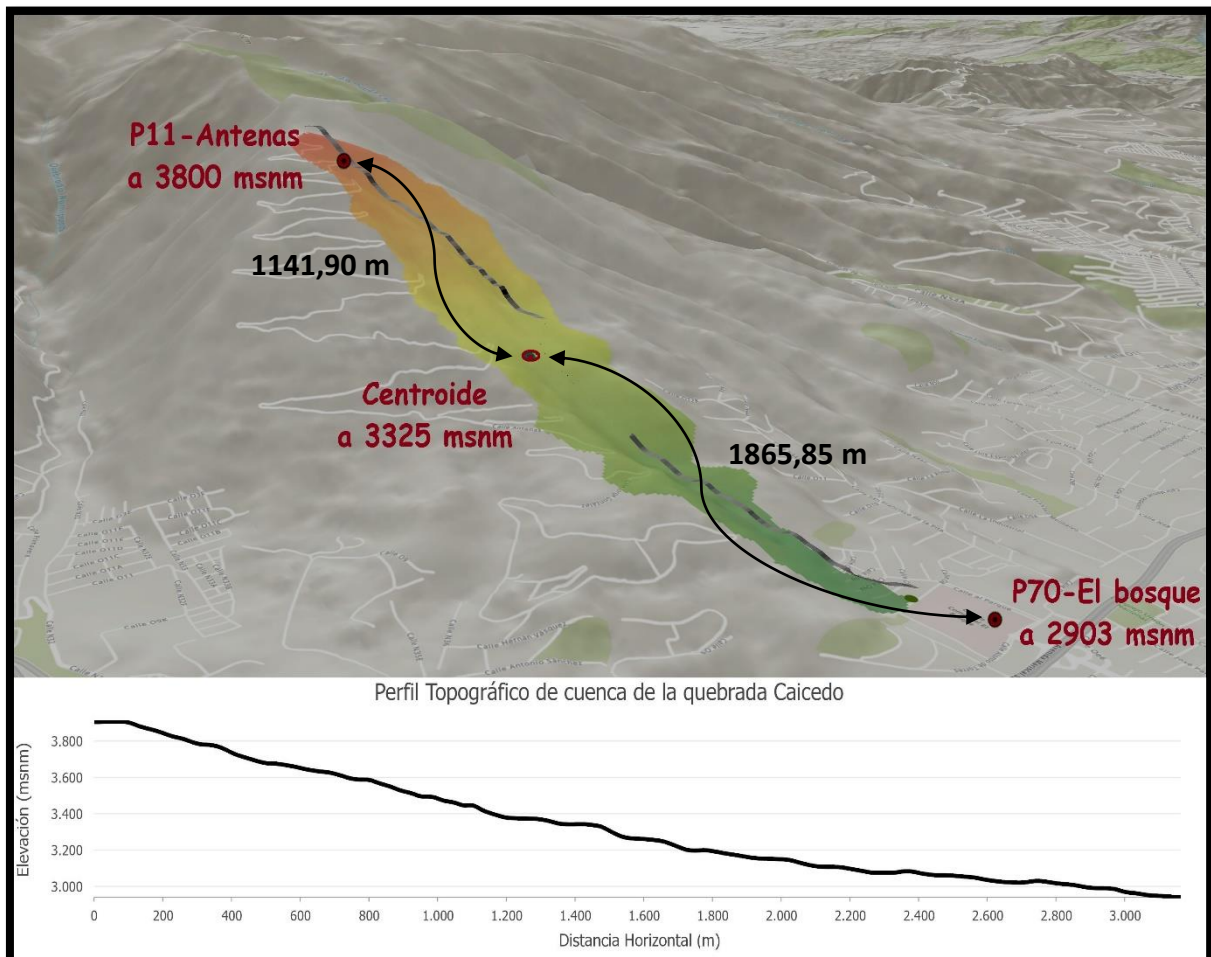
5.4.1 Interpolación mediante el método de IDW

A continuación, se muestra el resultado final de la interpolación de las precipitaciones horarias en las estaciones P11 Antenas y P70 El Bosque para las distintas tormentas extremas. Se utilizó el software ArcGIS Pro para calcular el centroide de la cuenca de estudio como punto de interés. El análisis indicó que el centroide tiene una latitud de 776.736,49N, una longitud de 9°981.761,86E y una altitud de 3325 msnm. La Figura 12 muestra la vista 3D de la cuenca de la quebrada Caicedo, y la distancia entre el

centroide con las estaciones P11 Antenas y P70 El Bosque de 1141.90 m y 1865.85 m, respectivamente, así como la altitud de las estaciones cuyos valores son 3800 msnm y 2903 msnm, respectivamente.

La selección del centroide como punto de estudio para toda la cuenca se debe las características morfométricas de la cuenca, el área de estudio es igual a 1,2 km², con una longitud total en su perímetro de 7,1 km y la diferencia de altitud entre las estaciones P11 Y P70 igual a 897 m. Además, al seleccionar el centroide como punto de interés, se busca tener una precipitación horaria representativa para cada tormenta en toda la cuenca.

Figura 12 Vista 3D de la cuenca de la quebrada Caicedo con el perfil topográfico. La distancia entre la estación P11 Antenas con el centroide es 1141,90 m. y la distancia entre la estación P70 El Bosque con el centroide es 1865,85 m. Fuente: Propia



La tabla 8 presenta los resultados finales de la interpolación realizada entre las dos estaciones para las tormentas registradas en las fechas del 13 de diciembre de 2021

y el 31 de enero de 2022. En cada horario, se muestra la precipitación registrada para cada tormenta. Por ejemplo, a las 0 horas del 13 de diciembre de 2021, se registró una precipitación de 1,69 mm, mientras que, en el mismo horario del 31 de enero de 2022, la precipitación fue de 0,94 mm. Además, se muestra la precipitación acumulada para cada tormenta, que fue de 37,68 mm para la tormenta del 13 de diciembre de 2021 y de 52,46 mm para la tormenta del 31 de enero de 2022.

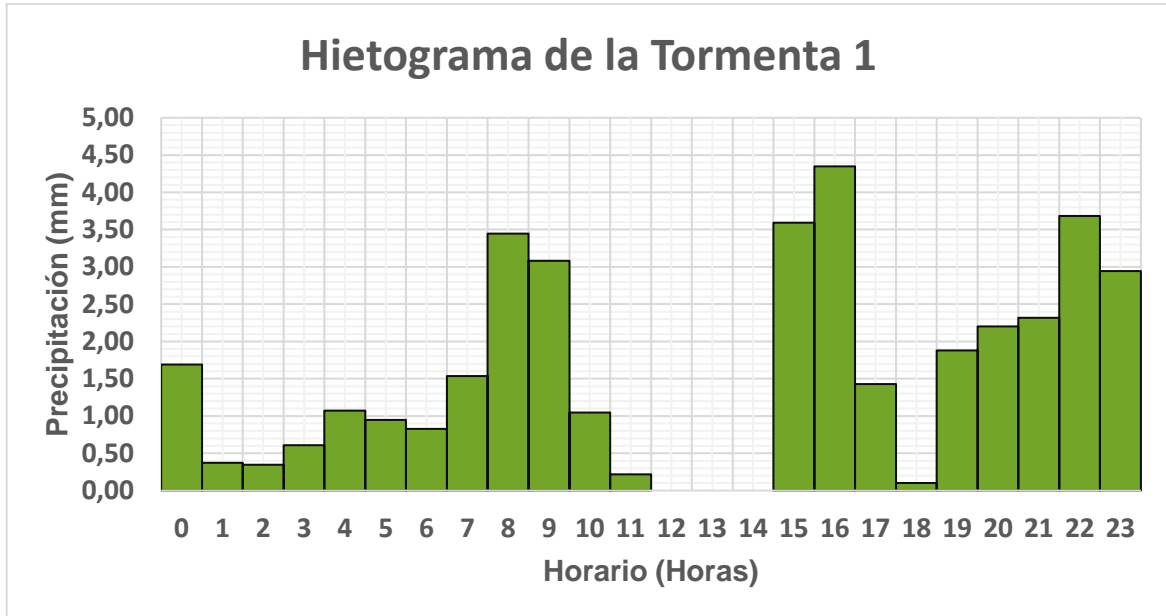
Tabla 8 Resultado de la precipitación horaria interpolada por el método IDW para las Tormentas: 13/12/2021 y 31/01/2022

| TORMENTA (mm) | 13/12/2021 | 31/01/2022 |
|-----------------------------|-------------------|-------------------|
| Horario | | |
| 0 | 1,69 | 0,94 |
| 1 | 0,37 | 0,60 |
| 2 | 0,35 | 0,54 |
| 3 | 0,61 | 0,28 |
| 4 | 1,07 | 2,24 |
| 5 | 0,95 | 2,48 |
| 6 | 0,83 | 1,15 |
| 7 | 1,54 | 0,60 |
| 8 | 3,45 | 1,66 |
| 9 | 3,08 | 2,01 |
| 10 | 1,05 | 5,10 |
| 11 | 0,22 | 4,26 |
| 12 | 0,00 | 0,79 |
| 13 | 0,00 | 3,32 |
| 14 | 0,00 | 1,91 |
| 15 | 3,59 | 4,50 |
| 16 | 4,35 | 5,96 |
| 17 | 1,43 | 5,00 |
| 18 | 0,10 | 1,36 |
| 19 | 1,88 | 2,79 |
| 20 | 2,20 | 4,66 |
| 21 | 2,32 | 0,25 |
| 22 | 3,68 | 0,00 |
| 23 | 2,95 | 0,07 |
| P Acumulada (mm) | 37,68 (mm) | 52,46 (mm) |

A continuación, se muestran los hietogramas para cada una de las tormentas. En la figura 13 se muestra que, en la tormenta del 13 de diciembre de 2021 en la cuenca, se registraron precipitaciones variadas a lo largo del día. El máximo se observó a las

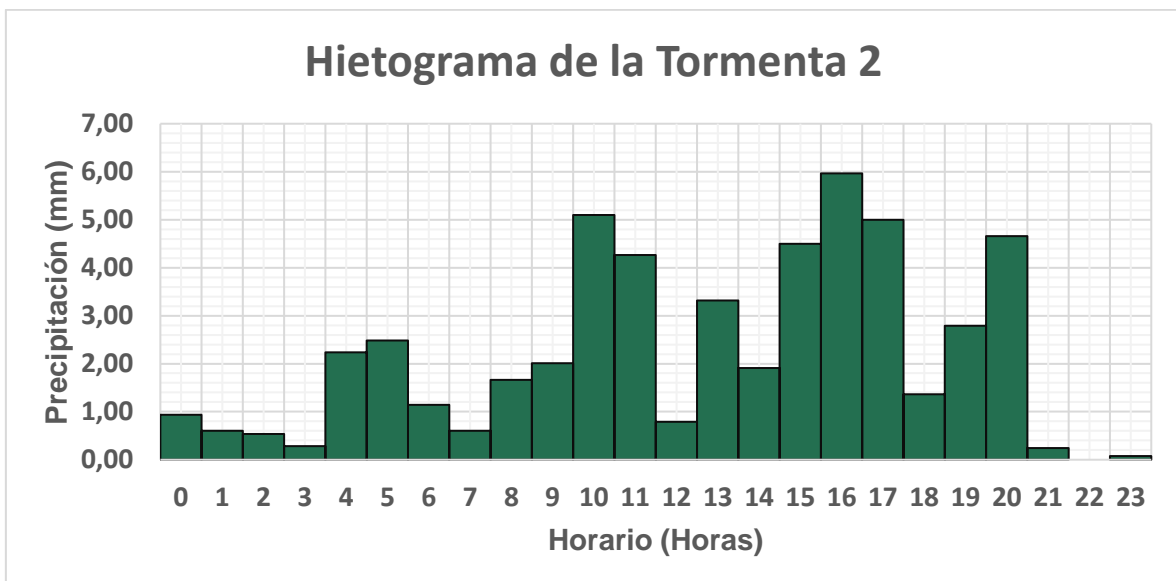
16:00 horas, con un valor de 4,35 mm. A partir de ese momento, la intensidad de la lluvia disminuyó un poco.

Figura 13 Hietograma de la tormenta del 13/12/2021. Elaboración: Propia



La tormenta del 31 de enero de 2022 en la cuenca fue caracterizada por una distribución irregular de la precipitación a lo largo del día como se observa en la figura 14. Se puede ver valores más altos de lluvia en las horas del mediodía y la tarde, con un pico máximo a las 16:00 horas, alcanzando 5,96 mm. A partir de ese momento, la intensidad de la lluvia disminuyó hasta llegar a un valor mínimo de 0,07 mm a las 23:00 horas.

Figura 14 Hietograma de la tormenta del 31/01/2022. Elaboración: Propia



5.4.2 Cálculo del número de curva

La tabla 9 presenta como resultado la identificación del número de curva correspondiente a cada categoría de textura y grupo hidrológico del suelo existente dentro de la cuenca. Con esta información se procedió a obtener un valor de CN ponderado para toda la cuenca.

Tabla 9 Promedio ponderado para calcular el número de curva de la cuenca hidrográfica de la quebrada Caicedo. Elaboración propia

| GHS | SUSCEPTIBILIDAD | TEXTURA | DRENAJE | INFLITRACIÓN | ÁREA (m ²) | CN | A*CN |
|------------------|-----------------|----------------|------------------|--------------|------------------------|----|-----------------|
| B | Alto | Franco Arenoso | Bueno o moderado | Moderada | 627111 | 65 | 40762225,49 |
| B | Moderado | Franco | Bueno o moderado | Moderada | 82640 | 65 | 5371573,033 |
| A | Severo | Arenoso | Perfecto | Rápida | 79848 | 43 | 3433479,151 |
| B | Urbana | Urbano | Bueno o moderado | Moderada | 439591 | 96 | 42200753,12 |
| Sumatorio | | | | | 1229190 | | 91768031 |

El análisis ponderado de la cuenca ha arrojado un número de curva igual a 75, lo cual indica una presencia significativa de vegetación en la zona. Este valor refleja la capacidad moderada de retención del suelo y la velocidad de escurrimiento en la cuenca. La vegetación desempeña un papel importante en la capacidad de retención de agua.

5.4.3 El cálculo de Tiempo de Concentración

El tiempo de concentración obtenido mediante la formula $T_c = \frac{l^{0.8}(S+1)^{0.7}}{1,140Y^{0.5}}$ es igual a 0,53 Horas. En este caso, un tiempo de concentración de 0,53 horas significa que el agua que cae en el punto más alejado de la cuenca de la quebrada Caicedo toma aproximadamente 0,53 horas en llegar al punto de salida principal de la cuenca. Esto indica que el escurrimiento de agua en la cuenca es relativamente rápido.

5.4.4 El cálculo del tiempo de Retardo

El tiempo de retardo obtenido de la formula $Tr = 0,35 \times T_c$ es igual a 0,19 Horas. Un tiempo de retardo de 0,19 Horas es relativamente corto, lo que sugiere que el escurrimiento de agua en la cuenca ocurre rápidamente después de la lluvia.

5.4.5 Cálculo del Umbral de Escorrentía

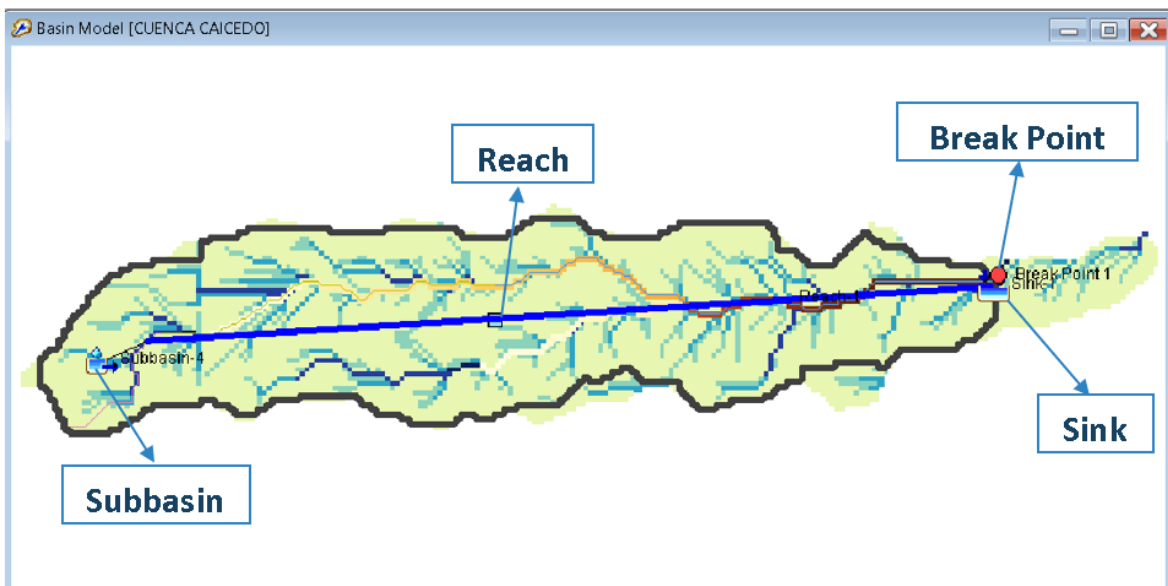
El resultado obtenido de umbral de escorrentía mediante la formula $P_o = \frac{5080}{CN} - 50,8$ es de 16,93 mm, lo cual indica que una vez que la precipitación acumulada alcanza o

supera los 16,93 mm, se generará escorrentía en la cuenca. Es decir, el exceso de agua que no puede ser absorbido o infiltrado y comenzará a fluir como escorrentía superficial.

5.4.6 Espacialización de la cuenca de la quebrada Caicedo en HEC HMS

La espacialización de una cuenca en HEC HMS utilizando el Basin Model implica la división y delimitación del área en diferentes elementos clave. Como se puede observar en la figura 15, el "sink" representa un punto de acumulación o infiltración de agua en la cuenca. Luego, el "break point" marca un cambio significativo en las características hidrológicas, como la topografía o la vegetación. A continuación, el "reach" se refiere a un tramo específico del sistema de drenaje, donde se analizan los flujos y almacenamientos de agua. Por último, el "subbasin" se utiliza para subdividir la cuenca principal en áreas más pequeñas y manejables. El área de la cuenca es de 1.2 Km², por tal motivo no se hace una división en la cuenca.

*Figura 15 Espacialización de la cuenca de la quebrada Caicedo en HEC HMS.
Elaboración propia*



En la tabla 10 se muestra los datos necesarios para aplicar el método de pérdidas SCS Curve Number con los resultados obtenidos previamente como el umbral de escorrentía igual a 16,93 mm y el número de curva igual a 75. Se escribe un valor del 0% en Impervious o Impermeabilidad ya que la cuenca tiene un 95% de permeabilidad, por tal motivo el manual del HEC - HMS recomienda colocar el valor del 0%.

Tabla 10 Método de pérdidas SCS Curve Number. Elaboración propia

| Subbasin | Initial Abstraction (MM) | Curve Number | Impervious (%) |
|------------|--------------------------|--------------|----------------|
| Subbasin-4 | 16.93 | 75 | 0.0 |

En la tabla 11 se muestra el dato necesario para aplicar el método de transformación SCS Unit Hydrograph con los resultados obtenidos previamente como el tiempo de concentración de 0,53 Horas y el tiempo de retardo de 0,19 horas que transformando a minutos da como resultado 11,21 minutos. Estos datos permiten una implementación adecuada del método y estimar la forma y la magnitud del hidrograma unitario resultante.

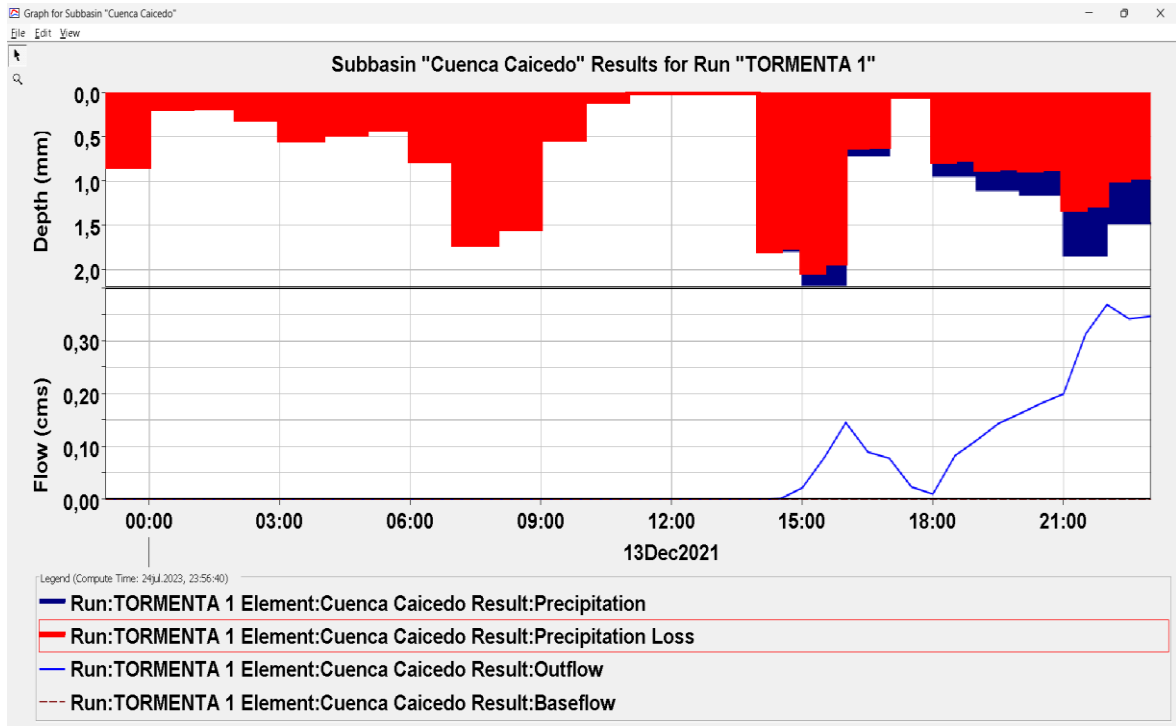
Tabla 11 Método de transformación SCS Unit Hydrograph. Elaboración Propia.

| Subbasin | Graph Type | Lag Time (MIN) |
|------------|--------------------|----------------|
| Subbasin-4 | Standard (PRF 484) | 11.21 |

5.4.7 Primera tormenta en HEC-HMS: 13/12/2021

Como resultados finales se puede observar en la figura 16 los resultados del modelo hidrológico para la cuenca de la quebrada Caicedo con los datos de precipitación de la tormenta 1 correspondiente al 13 de diciembre del 2021. Se puede observar las barras de color rojo que corresponden a "Precipitation Loss" lo que muestra las pérdidas de precipitación a lo largo del tiempo. Las barras de color azul corresponden a "Precipitation" que muestra la cantidad de lluvia que cae en la cuenca de la quebrada Caicedo y el "OutFlow" es la curva azul que muestra el caudal de salida a lo largo del tiempo.

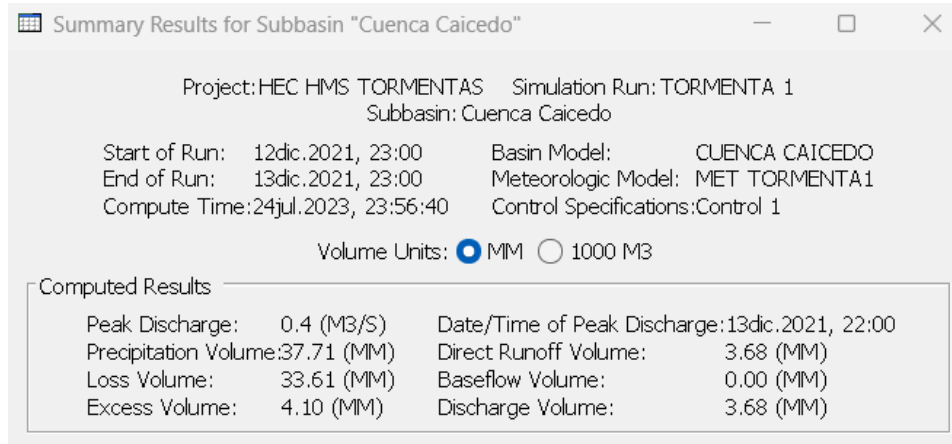
Figura 16 Resultados finales de precipitación, pérdidas y caudal de salida para la tormenta 1 correspondiente al 13/12/2021.



A continuación, se muestra un resumen general del modelo hidrológico de la cuenca de la quebrada Caicedo para la tormenta correspondiente al 13 de diciembre del 2021 como se indica en la figura 17. El valor máximo de caudal simulado "Peak Discharge" en el punto de salida de la cuenca de la quebrada Caicedo es igual a 0,4 m³/s, la cantidad de agua que ha caído en forma de lluvia "Precipitation Volume" es igual a 37,71 mm. La precipitación que se pierde antes de convertirse en escurrimiento "Loss Volume" es igual a 33,61 mm. La precipitación que contribuye directamente al escurrimiento "Excess Volume" es igual a 4,10 mm.

La precipitación que fluye directamente hacia el cauce del agua sin infiltrarse "Direct Runoff Volume" es igual a 3,68 mm. El "Baseflow Volume" indica el flujo de agua que proviene de almacenamiento subterráneo, en este caso el valor es 0,00 mm. Y finalmente la suma de escurrimiento superficial y flujo subterráneo "Discharge Volume" es igual a 3,68 mm.

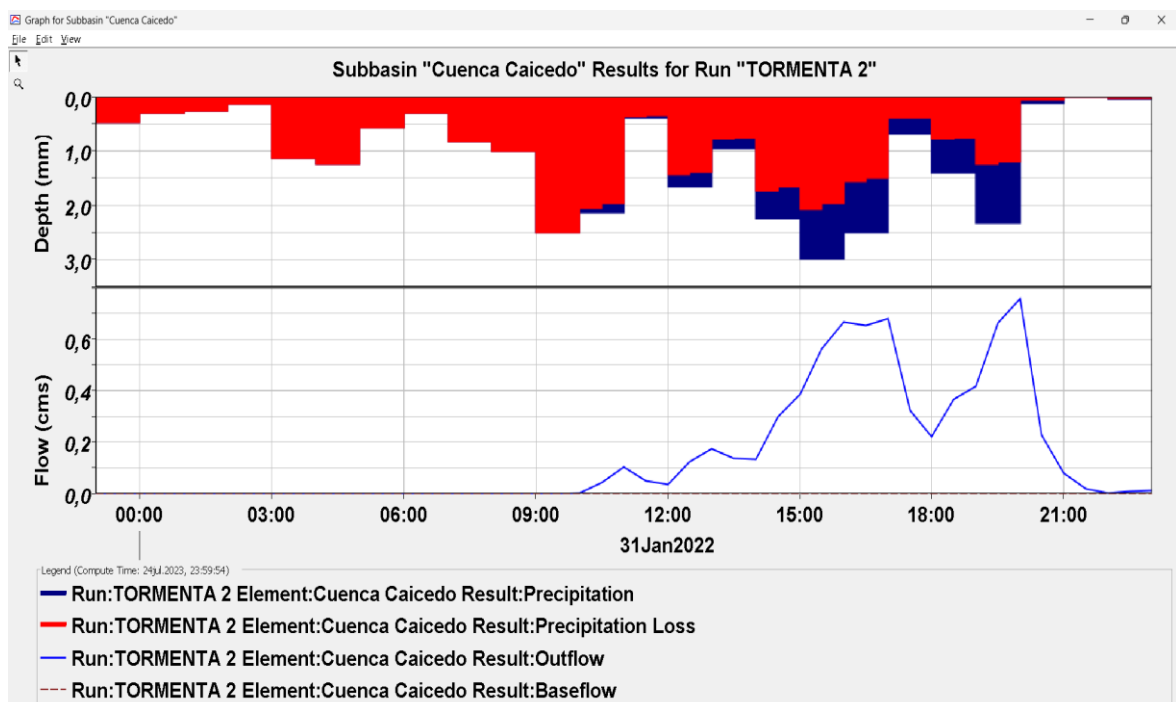
Figura 17 Resumen general del modelo hidrológico de la cuenca de la quebrada Caicedo para la tormenta correspondiente al 13 de diciembre del 2021



5.4.8 Segunda tormenta en HEC-HMS: 31/01/2022

En la figura 18 se presentan los resultados del modelo hidrológico para la cuenca de la quebrada Caicedo con los datos de precipitación de la tormenta 2 correspondiente al 31 de enero del 2022. Se pueden apreciar las barras de color rojo que representan las "Precipitation Loss" indicando las pérdidas de precipitación a lo largo del tiempo. Las barras de color azul corresponden a "Precipitation" mostrando la cantidad de lluvia que cae en la cuenca de la quebrada Caicedo y el "OutFlow" es la curva azul que refleja el caudal de salida a lo largo del tiempo."

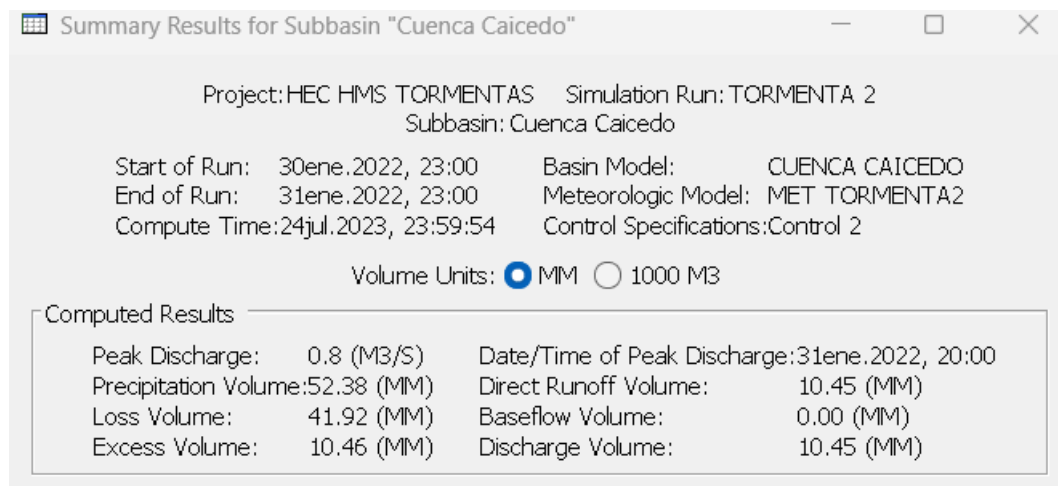
Figura 18 Resultados finales de precipitación, pérdidas y caudal de salida para la tormenta 2 correspondiente al 31/01/2022.



Los resultados del "Summary Result for Subbasin" para la tormenta 2, ocurrida el 31 de enero de 2022 como se observa en la figura 19, muestran el resumen general de la cuenca de la quebrada Caicedo para esa tormenta. El caudal máximo simulado, representado por "Peak Discharge," alcanza 0.8 m³/s en el punto de salida de la cuenca. La cantidad total de lluvia registrada, denominada "Precipitation Volume," es de 52.38 mm. De esta precipitación, 41.92 mm corresponde a las pérdidas de precipitación que ocurren antes de convertirse en escorrentía, llamado "Loss Volume." El volumen de agua directamente contribuido al escurrimiento, conocido como "Excess Volume," es de 10.46 mm.

Además, 10.45 mm de precipitación fluye directamente hacia el cauce de agua sin infiltrarse, identificado como "Direct Runoff Volume." No se observa flujo de agua proveniente del almacenamiento subterráneo, indicado en "Baseflow Volume." La suma del escurrimiento superficial y el flujo de salida subterráneo, denominado "Discharge Volume," también resulta en 10.45 mm. Estos datos proporcionan una visión integral de la hidrología de la cuenca y son fundamentales para comprender la respuesta hidrológica frente a eventos extremos de precipitación.

Figura 19 Resumen general del modelo hidrológico de la cuenca de la quebrada Caicedo para la tormenta correspondiente al 31 de enero del 2022. Elaboración propia



Los resultados de las dos tormentas muestran una respuesta hidrológica caracterizada por caudales relativamente bajos. Para la tormenta 1, el pico de caudal alcanzó 0,4 m³/s, mientras que para la tormenta 2, el pico fue de 0,8 m³/s. Esto indica que ambas tormentas generaron flujos de agua moderados en la cuenca de estudio. En cuanto al volumen de precipitación, la tormenta 2 registró una mayor cantidad de lluvia con un volumen de 52,38 mm, en comparación con los 37,71 mm de la tormenta 1.

Sin embargo, gran parte de esta precipitación fue perdida, lo que se refleja en los volúmenes de pérdida de 41,92 mm para la tormenta 2 y 33,61 mm para la tormenta 1. El volumen de escurrimiento directo generado por la tormenta 2 fue mayor, alcanzando 10,45 mm, en comparación con los 3,68 mm de la tormenta 1. Esta diferencia se debe a la mayor cantidad de lluvia en la tormenta 2 y a las condiciones de drenaje y saturación del suelo.

En resumen, con estos resultados, si consideramos las características del suelo, la cuenca indica una susceptibilidad alta a riesgo de deslizamiento como indica la figura 8 y una alta permeabilidad que indica una capacidad significativa para permitir la infiltración del agua como se muestra en la figura 9, los caudales pico obtenidos de las dos tormentas con el software HEC - HMS iguales a 0,4 m³/s y 0,8 m³/s, respectivamente, son relativamente bajos y al interactuar con una susceptibilidad alta y permeabilidad alta el riesgo de un deslizamiento disminuye, por ese motivo se considera que la respuesta hidrológica de la cuenca es de moderada a baja.

6 DISCUSIÓN

Los resultados del trabajo de integración curricular revelan los caudales pico obtenidos de la modelación con el software HEC-HMS para dos tormentas extremas registradas en la cuenca de la quebrada Caicedo, cuya área de estudio es de 1,2 Km². Durante estas tormentas, se obtuvieron caudales pico de 0,4 m³/s y 0,8 m³/s, respectivamente. En contraste, en la cuenca del río Machángara, cuya área de estudio es de 227,4 Km² según el trabajo de Aguilar (2010), se realizaron simulaciones de dos escenarios, arrojando caudales pico de 287,6 m³/s y 264 m³/s, respectivamente. La comparación entre ambas cuencas se puede explicar a través del análisis de los caudales específicos expresado en mm/día. En el caso de las tormentas registradas en la cuenca de la quebrada Caicedo, los caudales específicos fueron de 28,1 mm/día y 56,2 mm/día respectivamente. Estos valores indican que, en promedio, se generaron flujos de agua equivalentes a 28,1 mm y 56,2 mm de altura de agua sobre toda la cuenca en un solo día. En contraste, en la cuenca del río Machángara, con un área considerablemente mayor, los caudales específicos para los dos escenarios simulados fueron de 109,3 mm/día y 100,3 mm/día respectivamente. Esta comparación resalta que, aunque ambas cuencas enfrentaron eventos extremos, la cuenca del río Machángara experimentó caudales específicos más altos, lo que indica una mayor cantidad de agua fluyendo por unidad de área en comparación con la quebrada Caicedo.

Según Peltre (1986), el caudal decenal de la quebrada Caicedo se obtiene a partir de los datos históricos de precipitación y escurrimiento en la cuenca hidrográfica, mediante el uso de modelos matemáticos y estadísticos. Peltre reporta que el valor del caudal decenal para la quebrada Caicedo es de 5,7 m³/s, lo cual indica que es el caudal máximo que se espera que ocurra una vez cada diez años. En comparación, con mi análisis, los caudales pico obtenidos para las dos tormentas ocurridas en la quebrada Caicedo fueron de 0,4 m³/s y 0,8 m³/s. La razón del por qué los caudales pico son menores que el caudal decenal es porque las tormentas extremas no tienen la misma intensidad, duración y frecuencia que el evento que genera el caudal decenal. El caudal decenal se calcula a partir de los datos históricos de precipitación y escurrimiento en la cuenca hidrográfica, mientras que los caudales pico se estiman a partir de los datos de precipitación e intensidad de una tormenta específica.

De acuerdo con el trabajo realizado por Inga (2023), los caudales pico obtenidos mediante el software HEC - HMS en la quebrada Guanga Huaycu para cuatro escenarios diferentes fueron de 5,2 m³/s, 4,6 m³/s, 4,1 m³/s y 3,7 m³/s,

respectivamente. Inga utilizó diferentes métodos para cada escenario. En comparación, los resultados de las dos tormentas de mi trabajo fueron de 0.4 m³/s y 0.8 m³/s, respectivamente. Esta diferencia puede deberse a la variabilidad en las condiciones climáticas e hidrológicas, así como a diferencias en la metodología utilizada para calcular los caudales pico. De la misma manera, las mediciones de precipitación diaria del 31 de enero de 2022 reflejan claramente la naturaleza de las tormentas extremas en las quebradas Guanga Huaycu y Caicedo. En la quebrada Guanga Huaycu, se registraron valores notables de precipitación, alcanzando 75,1 mm en dos estaciones cercanas. Mientras tanto, en la quebrada Caicedo, las mediciones fueron 55,30 mm en una de las estaciones. Estas diferencias destacan la variabilidad espacial de las tormentas extremas en las diferentes zonas, donde las condiciones geográficas y climáticas pueden influir en la distribución de la precipitación.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

7.1.1 Conclusiones respecto al objetivo general

Con base a evaluar la generación de caudales y la respuesta hidrológica ante eventos de precipitación extremos en la quebrada Caicedo, ubicada en la parte occidental de la ciudad de Quito, se procedió a analizar las características hidrológicas de dos tormentas significativas de fechas 13 de diciembre del 2021 y 31 de enero del 2022.

Durante la tormenta 1, se alcanzó un pico de caudal de 0,4 m³/s, mientras que para la tormenta 2, el pico fue de 0,8 m³/s. Estos valores indican la respuesta hidrológica y la capacidad adecuada de escurrimiento en la quebrada Caicedo.

7.1.2 Conclusiones respecto al primer objetivo específico

Luego de realizar el análisis de frecuencias utilizando los datos históricos de precipitación máxima anual en 24 horas entre el periodo del 2001 y 2021 en las dos estaciones pluviométricas seleccionadas, se obtuvieron resultados para entender la probabilidad de eventos de lluvia intensa en la región de estudio y así evaluar las tormentas extremas ocurridas el 13 de diciembre del 2021 y 31 de enero del 2022.

Los resultados muestran que para la estación P11 Antenas, los periodos de retorno para eventos de precipitación extrema con recurrencia de 10, 20 y 50 años fueron de 41,4 mm, 44,7 mm y 48,5 mm, respectivamente. Por otro lado, en la estación P70 El Bosque, los periodos de retorno para los mismos eventos de recurrencia fueron de 52,0 mm, 58,3 mm y 71,5 mm, respectivamente.

7.1.3 Conclusiones respecto al segundo objetivo específico

El proceso de modelación involucró varias etapas clave, incluyendo la interpolación mediante el método de IDW para obtener datos de precipitación en puntos no medidos, la estimación de la escorrentía superficial mediante el número de curva, el cálculo del tiempo de concentración para saber el tiempo que demora el agua en llegar desde el punto más lejano hasta el punto de salida de la cuenca, el cálculo del tiempo de retardo para medir el tiempo de respuesta de la cuenca ante una lluvia y la determinación del umbral de escorrentía para saber la cantidad mínima de precipitación necesaria para generar escurrimiento superficial.

En términos de volumen de precipitación, la segunda tormenta registró una cantidad mayor con un volumen de 52,38 mm, en comparación con los 37,71 mm de la primera tormenta. Sin embargo, se observó que gran parte de esta precipitación se perdió

debido a factores como la infiltración y la evaporación, lo que se refleja en los volúmenes de pérdida de 41,92 mm para la tormenta 2 y 33,61 mm para la tormenta 1.

7.1.4 Conclusión respecto al tercer objetivo específico

Al evaluar la respuesta hidrológica de la quebrada Caicedo frente a los dos eventos extremos ocurridos en la ciudad de Quito con las características del suelo mediante la aplicación del modelo hidrológico en HEC-HMS, se obtuvieron resultados que indican que la cuenca de la quebrada Caicedo tiene una respuesta hidrológica moderada a baja para hacer frente a precipitaciones extremas.

7.2 Recomendaciones

Ante la respuesta hidrológica en la cuenca, se requiere establecer un sistema de monitoreo y alerta temprana que permita prevenir los posibles riesgos relacionados con eventos hidrometeorológicos extremos, así como asistir a las autoridades en la toma de decisiones para la gestión integral de los recursos hídricos.

Considerando la alta susceptibilidad del suelo, se recomienda promover prácticas de manejo sostenible de cuencas.

Implementar de prácticas de conservación de suelos que ayuden a reducir la erosión y los riesgos de deslizamientos, además de contribuir a la regulación del caudal en épocas de lluvias intensas.

Para una evaluación más precisa de la respuesta hidrológica ante eventos extremos, se sugiere la actualización periódica de los modelos hidrológicos utilizando datos climáticos y de precipitación actualizados.

Para mejorar la precisión y representatividad de la interpolación, se recomienda interpolar con un número mayor de estaciones pluviométricas. Cuantas más estaciones se utilicen, más datos se tendrán disponibles para el análisis espacial y temporal de las precipitaciones, lo que permitirá una interpolación más precisa y confiable.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Barajas, I. A., Mahlkecht, J., Kaledin, J., Kjellén, M., & Mejía-Betancourt, A. (Eds.). (2018). Agua y ciudades en América Latina: Retos para el desarrollo sostenible. Inter-American Development Bank.
- [2]. Krávchenko, R. (2013). Influencia de los sedimentos de las quebradas en el desarrollo de las formas de erosión. *Enfoque UTE*, 4(2), 35-44.
- [3]. Bitrán, D. (1995). Impacto económico de los desastres naturales en la infraestructura de salud: rentabilidad de las medidas de mitigación; versión revisada.
- [4]. Posner, A., & Georgakakos, K. (2016). An early warning system for landslide danger. *Eos*. <https://doi.org/10.1029/2016eo062323>
- [5]. Sepúlveda, S. A., & Petley, D. N. (2015). Regional trends and controlling factors of fatal landslides in Latin America and the Caribbean. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(8), 1821–1833. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-1821-2015>
- [6]. De Noni, G., Fernández, M., & Peltre, P. (1986). Accidentes climáticos y gestión de las quebradas de Quito. *Paisajes geográficos*, 1-44.
- [7]. Peltre, P. (1989). Quebradas y riesgos naturales en Quito, período 1900-1988. *Estudios de geografía*, 2, 45-91.
- [8]. Olcina, J., Gómez, I., Molina-Palacios, S., Galiana-Merino, J. J., & Soler Llorens, J. L. (2021). Interpretación del grado de incertidumbre asociado a las predicciones meteorológicas actuales de viento y precipitación entre el alumnado de la Universidad de Alicante.
- [9]. Murillo Zambrano, J. F. (2021). Importancia del estudio de la Geografía Física, para la prevención de desastres naturales en la ciudad de Quito (Bachelor's thesis, Quito: UCE).
- [10]. Bermeo S., Crisanto J., Herrera E. (2022). Aluviones en Quito: ¿Un fenómeno o un error recurrente? Universidad Central del Ecuador. Quito. Ecuador.
- [11]. Fernández M. (1996). Degradación ambiental, riesgos urbanos, y desastres en América latina. Agencia de los Estados Unidos de Norteamérica para el desarrollo internacional. Perú.
- [12]. Zevallos, O. (2002). Ocupación de laderas e incremento del riesgo de desastres en el Distrito Metropolitano de Quito. *Gestión de riesgos y prevención de desastres*, 106-117.
- [13]. Vidal, X., Burgos, L., & Zevallos, O. (2018). 11 Protección y recuperación ambiental de las laderas del Pichincha en Quito, Ecuador. *Agua y Ciudades en América Latina*, 173.

- [14]. Saavedra, J. G. V., Sánchez, M. C., Martínez, O., Pingel, H., & De Francesco, C. (2022). Recording of multiple lake-marsh paleoenvironments during the middle Holocene in the Quebrada del Toro, NW Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 79(1), 30-46.
- [15]. Aguilar Alegría, A. G. (2010). Modelación hidrológica de crecidas en la Cuenca del río Machángara en la ciudad de Quito (Bachelor's thesis, QUITO/EPN/2010).
- [16]. Orellana León, C. X. (2015). Escenarios Hidrológicos en la cuenca del río Guayllabamba: Modelación de caudales mínimos (Bachelor's thesis, Quito, 2015.).
- [17]. Revelo Mera, V. E., & Tualombo Anacleto, R. M. (2016). Escenarios hidrológicos en la cuenca del río Guayllabamba: Modelación de crecidas (Bachelor's thesis, Quito, 2016.).
- [18]. Córdova Gutierrez, D., Paredes Méndez, D., & Alulema del Salto, R. A. (2017). Determinación del parámetro hidrológico número de curva en la cuenca de la quebrada El Batán, usando sistemas de información geográfica y percepción remota. *FIGEMPA: Investigación y desarrollo*, 3(1), 31-41.
- [19]. d'Ercole, R., & Metzger, P. (2004). Vulnerabilidad del Distrito Metropolitano de Quito (Vol. 23, pp. 496-p). AH/Editorial.
- [20]. Peña Garrido, M. (2016). Análisis de Vulnerabilidad y Mitigación de Riesgos Estructurales en las Infraestructuras de Abastecimiento de Agua, en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), en caso de erupción del Volcán Cotopaxi (Ecuador). (Bachelor's thesis, Quito: UCE)
- [21]. Ureña, B., & Del Cisne, G. (2017). Modelo multi-objetivo para la rehabilitación de un sistema de drenaje urbano. área de estudio subcuenca del colector Mirador Sur, Quito-Ecuador (Bachelor's thesis, Quito: UCE).
- [22]. Correa Lagla, O. V., & García Bustamante, A. L. (2019). Diseño a nivel de factibilidad de un sistema de almacenamiento temporal de aguas de drenaje urbano ubicado en el complejo deportivo Fundeporte de la parroquia Quitumbe (Bachelor's thesis, Quito: UCE).
- [23]. Rondal Viscaíno, N. A. (2022). Caracterización del depósito del flujo de lodo de la quebrada El Tejado, Quito, 31 de enero del 2022 (Bachelor's thesis, Quito: UCE).
- [24]. Troncoso, L. P., Córdoba Guerrero, G., Vallejo Morillo, J., Rondal, N., Pilatasig, L., Ibadango, E., ... & Pinto, G. (2022). Análisis geológico y numérico del flujo de lodo de la quebrada El Tejado del 31 de enero de 2022, Quito–Ecuador.

- [25]. Pablo Ramirez, K. K. (2020). Sistema de Alerta Temprana de Inundaciones Aplicando un Modelamiento Hidrológico con HEC-HMS en el Río Culebras.
- [26]. Montoya Zúñiga, J. E. (2018). Sistema de monitoreo y alerta temprana ante aluviones (Doctoral dissertation, Universidad Andrés Bello (Chile)).
- [27]. Zimmermann, G., Vanderheiden, G., Ma, M., Gandy, M., Trewin, S., Laskowski, S., & Walker, M. (2004). Universal remote console standard: toward natural user interaction in ambient intelligence. In CHI'04 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (pp. 1608-1609).
- [28]. Chasquero Martinez, J. C. (2021). Capacidad de Uso Actual del Suelo en la Microcuenca Tumbillán, Provincia de Jaén, 2019.
- [29]. Breña Puyol A. F., Jacobo Villa M. A. (2006). Principios y fundamentos de la hidrología superficial. Universidad autónoma metropolitana.
- [30]. Cardona Londoño, C. M. (2001). Importancia ecológica e hidráulica del Régimen pulsátil del río Sinú-departamento de Córdoba.
- [31]. Cabrera, J. (2012). Calibración de modelos hidrológicos. Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Niño, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Perú.
- [32]. Alvarez Neyra, C. E. (2021). Drenaje en carreteras de la Sierra Central del Perú tramo Huánuco-La Unión-Huallanca, sector: Huánuco-Punto Unión.
- [33]. González Moreno, M. Á. (2011). Simulación de los episodios de avenida en el río Arga a su paso por Pamplona mediante HEC-HMS.
- [34]. Ortega Narváez, V. M. & Benjumea Serna, S. (2018). Diseño de una herramienta didáctica sobre algunos componentes del ciclo hidrológico como apoyo a la asignatura de hidrología y climatología y el semillero de gestión integral del patrimonio hídrico-GIPH.
- [35]. Fleming M. & Brauer T. (2016). Hydrologic Modeling System HEC HMS Quick Start Guide.
- [36]. López Rodríguez, J. J., Delgado, O., & Campo, M. Á. (2018). Determinación de las curvas IDF en Igueldo-San Sebastián. Comparación de diferentes métodos. Ingeniería del agua, 22(4), 209-223.
- [37]. Chetyrina, A. (2017). Análisis y determinación de las curvas IDF en Navarra.
- [38]. Ochoa-Tocachi, B. F., Buytaert, W., De Bievre, B., Céleri, R., Crespo, P., Villacís, M., ... & Arias, S. (2016). Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments. Hydrological Processes, 30(22), 4074-4089.

- [39]. Inga, E. (2023). Influencia de los métodos de cálculo de hidrogramas en la incertidumbre de las crecidas simuladas: caso de estudio de la quebrada Guanga Huaycu, sector la Gasca.

ANEXO I

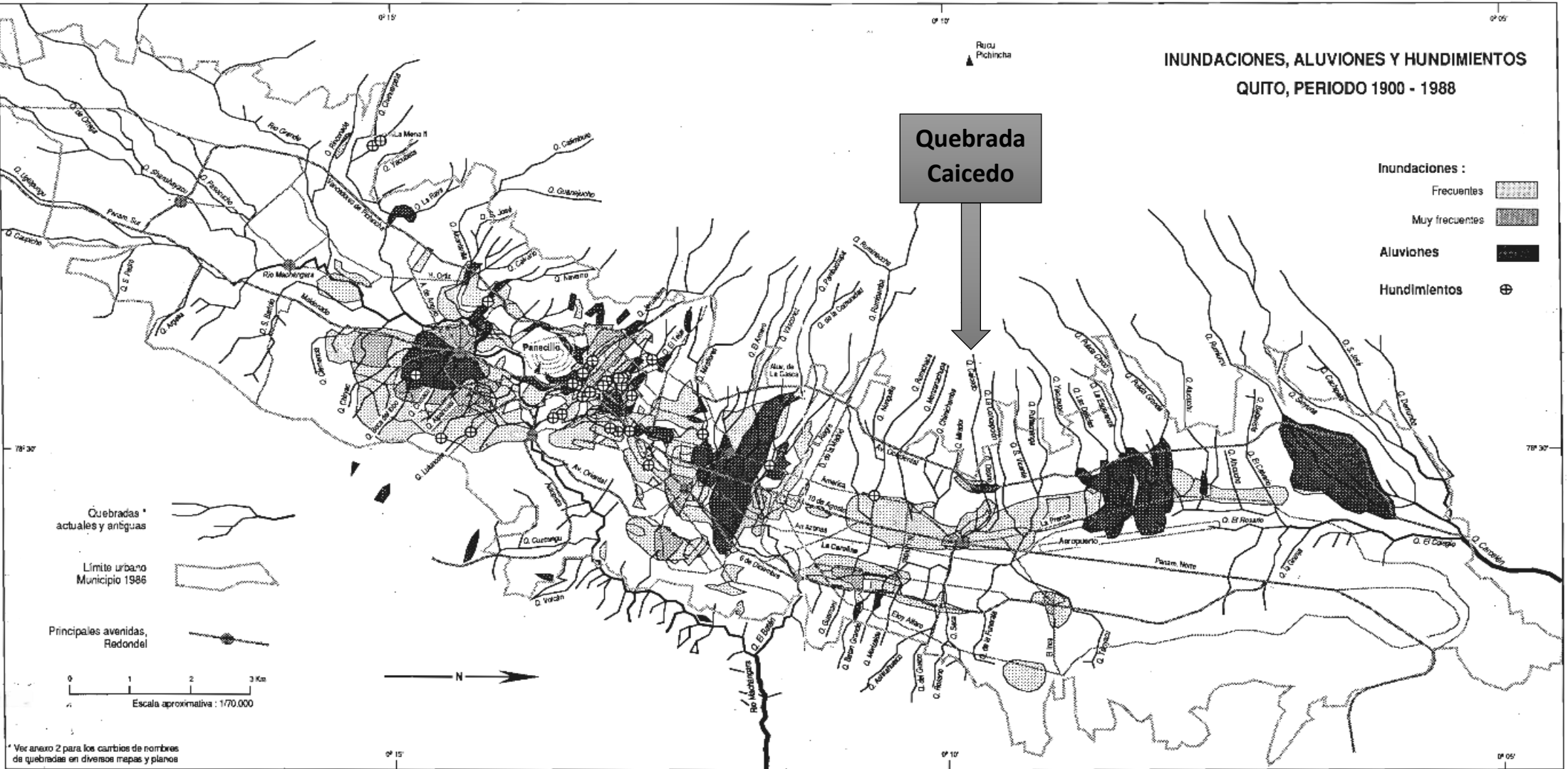
Quebradas de Quito, OSROM (1989).

Figura 1

INUNDACIONES, ALUVIONES Y HUNDIMIENTOS QUITO, PERIODO 1900 - 1988

Quebrada
Caicedo

- Inundaciones :
- Frecuentes
 - Muy frecuentes
- Aluviones
- Hundimientos



Quebradas *
actuales y antiguas

Límite urbano
Municipio 1986

Principales avenidas,
Redondel

0 1 2 3 Km
Escala aproximativa : 1/70.000

* Ver anexo 2 para los cambios de nombres
de quebradas en diversos mapas y planos