



Diseño de un modelo de Flujos de Agua Superficial en Microcuencas del Páramo de
Berlín Usando MDE para Evaluación Hidrológica en 2025

Modalidad: Proyecto de investigación

Maira Alejandra Buelvas Orozco
CC. 1007900843

Omar Fernando Diaz Rincón
CC. 1102391418

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
Facultad de ciencias naturales e ingenierías
Ingeniería en Topografía
Bucaramanga (25-09-2025)



Diseño de un modelo de Flujos de Agua Superficial en Microcuencas del Páramo de
Berlín Usando MDE para Evaluación Hidrológica en 2025.

Proyecto de Investigación

Maira Alejandra Buelvas Orozco

CC. 1007900843

Omar Fernando Diaz Rincón

CC. 1102391418

Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Topógrafo

DIRECTOR

M.SC Clara Inés Torres Vásquez

GRIMAT

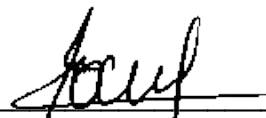
UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
Facultad de Ciencias Naturales e Ingenierías
ingeniería en Topografía
Bucaramanga 25-09-2025

Nota de Aceptación

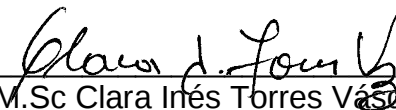
Aprobado en cumplimiento de los requisitos exigidos por
Las Unidades Tecnológicas de Santander para optar al título
de Ingeniero Topógrafo
Según acta #26 del Comité de Proyectos de Grado
Del 03-10-2025

Docente evaluador: M.Sc Héctor Alfonso Correa Rangel

Docente directora: M.Sc Clara Inés Torres Vásquez



M.Sc Héctor Alfonso Correa Rangel
Firma del Evaluador



M.Sc Clara Inés Torres Vásquez
Firma del Director

DEDICATORIA

Dedicamos este proyecto a nuestras familias, que con amor, paciencia y esfuerzo nos acompañaron en cada paso de este camino académico. A nuestros padres, que con su ejemplo nos enseñaron a perseverar, a trabajar con disciplina y a creer que todo esfuerzo tiene su recompensa; este logro también es suyo, pues refleja el apoyo incondicional que siempre nos brindaron. Extendemos esta dedicatoria a la comunidad de la vereda Ucatá, quienes nos recibieron con generosidad y nos recordaron que detrás de cada dato y cada mapa existe una realidad que depende del agua para vivir. Finalmente, agradecemos a los docentes que nos guiaron y motivaron, sembrando en nosotros no solo conocimiento, sino también un compromiso profundo con la conservación de los ecosistemas de alta montaña.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN EJECUTIVO	8
INTRODUCCIÓN.....	9
1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....	10
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
1.2. JUSTIFICACIÓN	12
1.3. OBJETIVOS	13
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	13
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.4. ESTADO DEL ARTE	14
2. MARCO REFERENCIAL	24
2.1. MARCO TEÓRICO	24
2.2. MARCO CONCEPTUAL	27
2.3. MARCO AMBIENTAL	29
2.4. MARCO LEGAL	30
3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	32
4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO.....	34
5. RESULTADOS.....	54
6. CONCLUSIONES.....	74
7. RECOMENDACIONES	76
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tabla de Fases.....	33
Figura 2. Mapa de Localización.....	34
Figura 3. Mapa de Sombras	35
Figura 4. Mapa de Pendientes	36
Figura 5. Clasificación de Coberturas.....	37
Figura 6. Mapa de climas sobre Zona de Estudio.....	38
Figura 7. Mapa de Zona de Estudio con red Hidrográfica.....	39
Figura 8. Recorrido Completo, Pr Inicial, Punto De Encuentro, Puntos De Vuelos	41
Figura 9. Localizaciones De Vuelos	42
Figura 10. Punto De Control Del Vuelo #1.....	43
Figura 11. Evidencia Fotográfica del Recorrido	44
Figura 12. PR de vuelo inicial	45
Figura 13. Punto De Control Del Vuelo #2.....	46
Figura 14. Punto de Control pc.....	47
Figura 15. Localización Del Vuelo #2	48
Figura 16. Mojón #1	49
Figura 17. Mojón #2	49
Figura 18. Base meteorológica del IDEAM registrada en el vuelo numero 2	50
Figura 19. Punto De Control Del Vuelo #3.....	52
Figura 20. Localización del vuelo #3	53
Figura 21. Puntos de localización del vuelo #1.....	59
Figura 22. Ortofoto Del Vuelo #1	60
Figura 23. Puntos de localización del vuelo #2.....	62
Figura 24. Ortofoto Del Vuelo #2	64
Figura 25. Ortofoto Del Vuelo #3	65
Figura 26. Mapa de pendientes	67
Figura 27. Modelo De Flujos De Agua Superficial A Través De Un Dem.....	69
Figura 28. DEM de Alos Palsar a 12,5 m de resolución espacial	69
Figura 29. Toma de Gota de Aguan en el Terreno	70
Figura 30. Modelo Ráster a Vectorial	71
Figura 31. Salida Grafica composición Final	72

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 <i>Información de Cuencas o Microcuencas</i>	14
Tabla 2 <i>Régimen mensual de precipitación y heladas (promedios históricos).</i>	56
Tabla 3 <i>Coordenadas Tomadas en Campo</i>	58

RESUMEN EJECUTIVO

El presente proyecto de investigación tuvo como propósito la generación de modelos de flujo de agua superficial del río Jordán en la vereda Ucatá, Páramo de Berlín, Santander, con el fin de comprender la dinámica hídrica y los factores que inciden en su regulación. Para ello se plantearon objetivos orientados a identificar coberturas del suelo, analizar las condiciones climáticas y evaluar la influencia de la topografía sobre el comportamiento de la escorrentía.

La metodología se fundamentó en un enfoque mixto que combinó trabajo de campo y análisis cartográfico. Se realizaron vuelos fotogramétricos con dron y levantamientos GNSS de alta precisión, lo que permitió generar ortofotos y modelos digitales de elevación con un alto nivel de detalle. Adicionalmente, se recopilieron registros climatológicos de la estación Berlín del IDEAM y se integraron en un sistema de información geográfica (SIG) para la elaboración de mapas temáticos de clima, pendientes y coberturas. Estas herramientas facilitaron un análisis comparativo entre las condiciones naturales y las zonas de intervención antrópica.

Los resultados evidenciaron la existencia de áreas con alta capacidad de recarga hídrica, ubicadas principalmente en sectores de pendientes suaves y con coberturas de frailejones y humedales. Por el contrario, las zonas con pendientes pronunciadas y presencia de cultivos mostraron mayor susceptibilidad a la escorrentía y procesos erosivos. La integración de ortofotos, datos GNSS y registros del IDEAM permitió validar los modelos generados, garantizando su confiabilidad.

La investigación confirma que el páramo de Berlín es un ecosistema estratégico en la regulación del agua, no solo por su capacidad de almacenamiento, sino también por el papel fundamental de la vegetación en la sostenibilidad hídrica. Se destaca la necesidad de implementar medidas de conservación, mejorar la planificación de vuelos con dron en condiciones climáticas adversas y fortalecer el monitoreo hidrológico mediante la articulación de instituciones, comunidad y academia.

PALABRAS CLAVE. SIG (Sistemas de Información geográfica), Hidrología, Páramo, Flujo Superficial.

INTRODUCCIÓN

El páramo de Berlín, ubicado en el oriente colombiano, representa un ecosistema estratégico para la regulación del recurso hídrico en los departamentos de Santander y Norte de Santander. Su compleja topografía y variabilidad climática influyen directamente en la dinámica de los flujos de agua superficial, cuya comprensión resulta esencial para garantizar una gestión ambiental adecuada y sostenible. Sin embargo, la escasa aplicación de herramientas tecnológicas avanzadas, como los Modelos Digitales de Elevación (MDE) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG), ha limitado el desarrollo de estudios detallados sobre las microcuencas que componen este ecosistema.

En este contexto, el presente proyecto de investigación propone el diseño de un modelo hidrológico que permita analizar y simular los flujos de agua superficial en las microcuencas del páramo de Berlín. A partir del procesamiento de datos topográficos y el uso de herramientas digitales, se busca evaluar la relación entre la morfometría del terreno y la escorrentía, con el fin de generar información clave que contribuya a la planificación territorial, la conservación del ecosistema y la mitigación de riesgos asociados al cambio climático. Esta propuesta, además de aportar al conocimiento técnico y científico sobre el comportamiento hidrológico del páramo, pretende convertirse en una herramienta de apoyo para la toma de decisiones en la gestión del recurso hídrico en zonas de alta montaña.

1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El páramo de Berlín es un ecosistema clave en la regulación del recurso hídrico, pero su dinámica de flujo superficial aún no ha sido plenamente comprendida; debido a la complejidad de sus características topográficas y climáticas la variabilidad en la escurrimiento influenciada por la morfometría del terreno y los cambios en la cobertura vegetal dificulta la evaluación de los patrones hídricos lo que es puede afectar la planificación y gestión del agua en la región (Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga[CDMB]2016).

Si bien los modelos digitales (MDE), representan una herramienta clave para el análisis hidrológico, su aplicación en la modelación de flujos de agua en microcuencas de páramo ha sido limitada esta carencia limita la capacidad de interpretar y predecir la respuesta hidrológica ante variaciones ambientales y climáticas lo que impide el desarrollo de estrategias eficaces para la conservación del ecosistema y el uso sostenible del agua (Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental[Corponor]2008).

Es necesario diseñar y evaluar un modelo que permita analizar y sintetizar la relación entre la morfometría del terreno y la dinámica del flujo de agua superficial en microcuencas del páramo de Berlín. Este estudio busca generar conocimiento aplicado fundamentado en herramientas de modelación hidrológica que contribuya a la toma de decisiones en la gestión del recurso hídrico y la conservación de estos ecosistemas estratégicos como aporte a la gestión territorial.

¿Cómo se puede modelar los flujos de agua superficial en las microcuencas del páramo de Berlín utilizando Modelos Digitales de Elevación (MDE), y herramientas de SIG para analizar su dinámica hidrológica y su relación con la geomorfología del terreno?

1.2. JUSTIFICACIÓN

El páramo de Berlín es una fuente importante de agua para Santander y Norte de Santander, pero enfrenta amenazas como el cambio climático, la expansión agropecuaria y la degradación ambiental. Estos factores afectan la dinámica hidrológica de sus microcuencas, poniendo en riesgo la disponibilidad del recurso hídrico (Corponor, 2008, IDEAM, 2019).

La modelación de flujos de agua superficial mediante Modelos Digitales de Elevación (MDE) permite analizar la distribución y el comportamiento del agua en el territorio, facilitando la delimitación de cuencas, la identificación de redes de drenaje y la evaluación de la escorrentía. Este enfoque, apoyado en Sistemas de Información Geográfica (SIG), ofrece una alternativa eficiente y de bajo costo para el estudio hidrológico en zonas de alta montaña (Álvarez, 2021)

Este estudio contribuyó al conocimiento sobre la hidrología del páramo de Berlín y proporcionará información clave para la gestión del recurso hídrico. Además, permitirá identificar áreas críticas y formular estrategias de conservación y manejo sostenible, ayudando a garantizar la seguridad hídrica de las comunidades que dependen de este ecosistema y como aporte a la gestión territorial y a la gestión del riesgo de este municipio, especialmente en cuanto a cambio climático se refiere.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar un modelo de flujos de agua superficial en microcuencas del páramo de Berlín mediante el uso de un modelo digital de elevación (MDE), para el análisis del comportamiento hidrológico y su relación con la topografía del terreno.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Analizar la topografía de las microcuencas del páramo de Berlín a partir del procesamiento del modelo digital de elevación sintetizando sus principales parámetros hidrológicos y geomorfológicos para su aplicación en la modelación de flujos superficiales.

Generar el modelo de las microcuencas del páramo de Berlín, identificando, las principales fuentes hídricas como aporte a la gestión ambiental y del territorio mediante el uso de software Gis.

Comprobar si el modelo de flujos de agua funciona de manera adecuada, comparándolo con información real del campo, para ver si puede ayudar en la toma de decisiones sobre el uso y cuidado del agua en las microcuencas del páramo de Berlín.

1.4. ESTADO DEL ARTE

Tabla

1

Información de Cuencas o Microcuencas

TÍTULO	AUTOR	BIBLIOGRAFÍA	RELACIÓN
Modelación hídrica de una cuenca para el establecimiento de un sistema de alerta temprana ante inundaciones usando fuentes de información local y sensores remotos. Caso de estudio Salima, provincia Esmeraldas	Díaz Yaguachi, Nelly Gisella Borbor Cordova, Mercy, directora	Díaz Yaguachi, N. G., & Borbor Cordova, M. (2020). <i>Modelación hídrica de una cuenca para el establecimiento de un sistema de alerta temprana ante inundaciones usando fuentes de información local y sensores remotos. Caso de estudio Salima, provincia Esmeraldas</i> (Doctoral dissertation, ESPOL. FIMCM).	Esta investigación busca generar escenarios de inundación en el río Salima, en Muisne, Esmeraldas, mediante simulaciones numéricas para evaluar áreas vulnerables y el riesgo de inundación en periodos de retorno de hasta 25 años. Forma parte de un Sistema de Alerta Temprana y se desarrolló en tres fases: recopilación y procesamiento de datos, y modelización hidrológica con el software Iber. Se utilizaron un modelo de elevación digital y una imagen satelital para caracterizar el área y definir condiciones hidrodinámicas. Los resultados permitieron elaborar mapas de inundación e identificar zonas de riesgo por desbordamiento del río.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DEL MANEJO DE LAS AGUAS PLUVIALES URBANAS EN LA PARTE ALTA DE LA SUBCUENCA DEL RÍO SAN JUAN DE DIOS, GUADALAJARA, JALISCO	MENDOZA GONZÁLEZ, ESMERALDA BERENICE; ALDANA ALONSO, SERGIO ESTEBAN; CASTOLO RAMÍREZ, CARLOS	González, E. B. M., Alonso, S. E. A., & Ramírez, C. C. (2017). Modelación hidrológica e hidráulica del manejo de las aguas pluviales urbanas en la parte alta de la subcuenca del río San Juan de Dios, Guadalajara, Jalisco. Vivienda y Comunidades Sustentables, (2), 83-104.	Este estudio compara el comportamiento de las aguas pluviales en la parte alta de la subcuenca del río San Juan de Dios bajo condiciones urbanas actuales y de restauración hidrológica. Utilizando el software SWMM 5.1, se modeló el impacto de una precipitación de 72 mm en cuatro horas, evaluando el efecto de tecnologías LID y la optimización de la infraestructura hidráulica. Los resultados indican que, en las condiciones actuales, el vaso regulador El Deán sufre desbordamientos significativos, mientras que en un escenario de restauración hidrológica se mantiene estable.
ANÁLISIS DEL FACTOR-LS EN DIFERENTES MODELOS DE PREDICCIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA DEL SUELO.	Tatiana Geler Roffe1 , Alvaro Penteado Crósta2 , Archimedes Perez Filho2	Roffe, T. G., Crósta, A. P., & Perez Filho, A. ANÁLISIS DEL FACTOR-LS EN DIFERENTES MODELOS DE PREDICCIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA DEL SUELO. LS-FACTOR ANALYSIS	El modelado de la erosión es clave para predecir la pérdida de suelo y planificar medidas de control. Para ello, es fundamental entender la relación entre la erosión y el manejo de cultivos, considerando

		IN DIFFERENT PREDICTION MODELS OF WATER SOIL EROSION.	factores como el relieve y la cobertura vegetal. En este estudio, se analiza la evolución de los modelos de erosión, con énfasis en el factor LS, que representa el impacto de la topografía en el proceso. También se examina el uso de geo tecnologías, como los SIG y la teledetección, en la aplicación de estos modelos. Los resultados destacan la transición de modelos empíricos a modelos de base física más avanzados gracias al geo tecnologías.
Verificación de aplicabilidad del método de curvas numéricas para estimar escorrentía superficial en la microcuenca Zoquiapan, Estado de México.	Morales Salazar, Sergio	Morales Salazar, S. (2020). Verificación de aplicabilidad del método de curvas numéricas para estimar escorrentía superficial en la microcuenca Zoquiapan, Estado de México (Master's thesis).	Este estudio evalúa los escurrimientos superficiales en la microcuenca Zoquiapan, Estado de México, utilizando el método de curvas numéricas (CN) del Servicio de Conservación de Suelos para predecir el volumen de escurrimiento por lluvia. Se identificaron cinco Unidades Hidrológicas (UH) en función del suelo y la vegetación, instalando lotes de

Modelación hidrológica del río Torres, San José, Costa Rica su variación con respecto al cambio climático.	Alvarado García, Virginia	Alvarado García, V. (2020). Modelación hidrológica del río Torres, San José, Costa Rica su variación con respecto al cambio climático.	escurrimiento para calibrar las CN. Los resultados mostraron un escurrimiento de 34,831 m³ con un R² de 0.63 y una sobrestimación del 1.7 %. En la desembocadura, la comparación entre el método CN y mediciones en un canal Parshall modificado arrojó un R² de 0.71. Se determinó que el 18 % de la precipitación se convierte en escurrimiento superficial. Esta investigación analiza cómo los sistemas hidrológicos de una microcuenca urbana en Costa Rica responden a eventos extremos y su variación ante el cambio climático. Para ello, se dividió la microcuenca en tres áreas de drenaje (AD1, AD2 y AD3) y se evaluaron aspectos como morfometría, relieve, red de drenaje, suelo y clima. El estudio empleó datos históricos de precipitación (1987-
--	----------------------------------	---	--

Diseño hidrológico - hidráulico para pequeñas presas en cuencas no aforadas, usando el modelo de precipitación - escurrimiento de Témez, mediante geoprocésamiento SIG y modelamiento numérico. Un enfoque hacia la realidad peruana:	Hidalgo Ravelo, Andréé Gustavo	Hidalgo Ravelo, A. G. (2019). Diseño hidrológico-hidráulico para pequeñas presas en cuencas no aforadas, usando el modelo de precipitación-escurrimiento de Témez, mediante geoprocésamiento SIG y modelamiento numérico. Un enfoque hacia la realidad peruana:	2019) y proyecciones futuras RCP8.5 (2006-2050) para estimar caudales extremos con periodos de retorno de 25, 50 y 100 años. Se usaron registros de seis estaciones meteorológicas del IMN y el ICE, corrigiendo datos incompletos mediante el método de promedios y la curva de doble masa. Finalmente, los análisis hidrológicos se realizaron con los hietogramas de las estaciones Sabana y San Luis, seleccionadas por su representatividad en la distribución de lluvias. El estudio desarrolla los aspectos hidrológicos e hidráulicos necesarios para diseñar una pequeña presa de materiales sueltos en Vilcanchos, Ayacucho. Dado que no hay información hidrométrica en la zona, se prioriza la selección de un modelo de transformación
---	---------------------------------------	--	--

Caso Vilcanchos, Ayacucho	Caso Vilcanchos, Ayacucho.	hidrológica adecuado.
		Se analizan las bases teóricas, incluyendo el modelo precipitación-escorrimento de Témez, el balance hídrico y la erosión en embalses. Luego, se caracteriza la cuenca Champaccocha, se procesan datos meteorológicos y se modela la presa en BIM y SEEP/W de Geostudio. También se evalúa el impacto del represamiento en la demanda agrícola y la vulnerabilidad al cambio climático con proyecciones al 2030.
Generación de mapa de amenaza para disminuir el impacto de daños ocasionados por flujos hiperconcentrados en la quebrada del Diablo, distrito Alto de la Alianza, haciendo uso de FLO-2D	Talledo Walde, Roberto Alejandro, Cardoso Cusihualpa, Sergio Ignacio	Talledo Walde, R. A., & Cardoso Cusihualpa, S. I. (2021). Generación de mapa de amenaza para disminuir el impacto de daños ocasionados por flujos hiperconcentrados en la quebrada del Diablo, distrito Alto de la Alianza, haciendo uso de FLO-2D.
		El estudio realiza un modelamiento hidrológico e hidráulico de la quebrada del Diablo en Alto de la Alianza, Tacna, con el objetivo de generar un mapa de amenaza que ayude a reducir el impacto de flujos hiperconcentrados y mejorar la planificación urbana.
		Se caracterizó la zona con informes e

Evaluación de riesgos a inundaciones en la Cuenca Cárdenas-Comalcalco, Tabasco, México

González Mancillas, Rigoberto

González Mancillas, R. (2010). Evaluación de riesgos a inundaciones en la Cuenca Cárdenas-Comalcalco, Tabasco, México.

imágenes satelitales, además de analizar las precipitaciones en la cabecera de la quebrada. Luego, se utilizó HEC-HMS para estimar caudales máximos en distintos periodos de retorno. Con FLO-2D, se modelaron los flujos considerando parámetros reológicos específicos del área. Finalmente, se evaluó el nivel de amenaza con mapas de FLO-2D Mapper y se analizó el impacto de estructuras de mitigación en la reducción del riesgo. La investigación se llevó a cabo en la Cuenca Cárdenas-Comalcalco, una región de 274,255.32 ha que abarca varios municipios y es afectada constantemente por inundaciones. Su objetivo fue evaluar la vulnerabilidad percibida en zonas de riesgo mediante el análisis de precipitaciones extremas y el Modelo Digital de Elevación (MDE).

			Se aplicaron funciones de distribución de probabilidades (FDP) a valores extremos de precipitación, se generaron curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) y mapas de isoyetas con ArcGIS, y se calculó el escurrimiento superficial con modelos de Treviño. Además, se identificaron zonas de riesgo mediante la detección de depresiones en el MDE y se encuestó a la población mayor de 18 años.
Diagnóstico de información requerida para el modelamiento hidrológico de la microcuenca Río Blanco, por medio del SWAT	Giraldo Duque, Manuela López Arcila, María Camila	Giraldo Duque, M., & López Arcila, M. C. (2018). Diagnóstico de información requerida para el modelamiento hidrológico de la microcuenca Río Blanco, por medio del SWAT.	Este estudio analiza la Microcuenca Río Blanco para garantizar el abastecimiento de agua en Manizales, evaluando procesos hidrológicos mediante el software SWAT. Se desarrolló en tres fases: revisión bibliográfica sobre SWAT, recopilación y adecuación de datos climáticos y geológicos de fuentes oficiales, y evaluación de la calidad de la

Modelo de Inundación para las Microcuencas Hidrológicas La Negreña y La Naranjera en el Municipio del Playón, Santander.

Alvarado García, Virginia

Alvarado García, V. (2020). Modelación hidrológica del río Torres, San José, Costa Rica su variación con respecto al cambio climático.

información con SIG y Excel. Los modelos hidrológicos ayudan en la gestión del recurso hídrico al predecir factores clave que afectan la cuenca.

Esta investigación analiza cómo los sistemas hidrológicos de una microcuenca urbana en Costa Rica responden a eventos extremos y su variación ante el cambio climático. Para ello, se dividió la microcuenca en tres áreas de drenaje (AD1, AD2 y AD3) y se evaluaron aspectos como morfometría, relieve, red de drenaje, suelo y clima.

El estudio empleó datos históricos de precipitación (1987-2019) y proyecciones futuras RCP8.5 (2006-2050) para estimar caudales extremos con periodos de retorno de 25, 50 y 100 años. Se usaron registros de seis estaciones meteorológicas del IMN y el ICE, corrigiendo datos

incompletos mediante el método de promedios y la curva de doble masa. Finalmente, los análisis hidrológicos se realizaron con los hietogramas de las estaciones Sabana y San Luis, seleccionadas por su representatividad en la distribución de lluvias.

Fuente: Autores (2025).

2. MARCO REFERENCIAL

2.1. Marco Teórico

INTRODUCCIÓN AL ECOSISTEMA DE PÁRAMO

Los páramos son ecosistemas de alta montaña ubicados principalmente en los Andes tropicales (Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela), que se destacan por su papel en la regulación hídrica. Funcionan como “esponjas naturales”, al captar, almacenar y liberar agua de manera gradual hacia las cuencas hidrográficas (Buytaert et al., 2006). La vegetación del páramo, como los frailejones, pajonales y musgos, facilita la retención del agua de lluvia, lo cual es esencial para los flujos de agua superficial en las microcuencas que nacen en estos ecosistemas.

DINÁMICA DEL FLUJO DE AGUA SUPERFICIAL

El flujo de agua superficial hace referencia al movimiento del agua sobre la superficie terrestre, el cual se origina principalmente por la precipitación que no es infiltrada ni retenida por la vegetación o el suelo. En microcuencas de páramo, este flujo está condicionado por variables como:

- Topografía abrupta,
- Alta porosidad de los suelos orgánicos,
- Cobertura vegetal,
- Presencia de humedales y zonas saturadas.

Según estudios como los de Mosquera et al. (2015), en microcuencas del páramo ecuatoriano, la mayor parte del escurrimiento superficial ocurre en eventos de lluvia intensa, pero es modulada por la capacidad de almacenamiento del suelo. Esto

resalta la importancia de un análisis espacial detallado del terreno mediante Modelos Digitales de Elevación (MDE) para estimar trayectorias y acumulación de flujos.

ESTUDIOS PREVIOS SOBRE MICROCUENCAS EN PÁRAMOS

Varios estudios han analizado la hidrología de microcuencas en páramos andinos con diferentes enfoques:

- Buytaert et al. (2006) realizaron simulaciones hidrológicas en el páramo de Ecuador, utilizando modelos como el TOPMODEL, identificando que el flujo subsuperficial representa la mayor parte de la descarga, pero que el escurrimiento superficial se activa en suelos saturados.
- Célleri & Feyen (2009) estudiaron el papel del uso del suelo en el flujo superficial en microcuencas del páramo del Azuay (Ecuador), mostrando que la ganadería extensiva y el drenaje artificial modifican la respuesta hidrológica, generando mayor escorrentía superficial.
- Morales et al. (2013) analizaron los flujos superficiales en el páramo de Santurbán, Colombia, y concluyeron que las alteraciones antrópicas, como la minería, disminuyen la capacidad de regulación hídrica del ecosistema, aumentando el riesgo de escorrentías rápidas y erosión.
- Rodríguez & Sarmiento (2020) aplicaron herramientas SIG y MDE para mapear las microcuencas en el páramo de Chingaza, usando índices como el TWI (Topographic Wetness Index) para identificar zonas de acumulación de flujo.

APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES

El uso de Modelos Digitales de Elevación (MDE) permite simular rutas de escurrimiento superficial, determinar líneas de flujo, cuencas de drenaje, pendientes, acumulación de flujo y áreas propensas a inundación o erosión (Pérez et al., 2018). Programas como ArcGIS, QGIS y herramientas como TauDEM o HEC-HMS son ampliamente utilizados en estos estudios.

Según Vázquez et al. (2022), la modelación hidrológica en microcuencas de páramo debe integrar datos topográficos detallados con parámetros climáticos y de cobertura vegetal para lograr estimaciones precisas del comportamiento del flujo superficial.

IMPORTANCIA DE LOS ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN MICROCUENCAS DEL PÁRAMO

La gestión sostenible del agua depende en gran medida del conocimiento del comportamiento del flujo superficial en zonas estratégicas como los páramos. Estos estudios permiten:

- Identificar zonas críticas de escorrentía.
- Proponer estrategias de conservación.
- Evaluar el impacto del cambio climático.
- Diseñar intervenciones que restauren la funcionalidad hidrológica de las microcuencas.

En Colombia, el páramo de Berlín ha sido objeto de estudios por su importancia como fuente abastecedora de agua potable y su vulnerabilidad frente a presiones humanas como la agricultura intensiva y la expansión urbana (IDEAM, 2017).

2.2. Marco Conceptual

Hidrología Superficial

La hidrología superficial es una rama de la hidrología que se encarga del estudio del agua que se desplaza sobre la superficie terrestre, abarcando procesos como la precipitación, escorrentía, infiltración y evaporación. Este componente del ciclo hidrológico es de vital importancia para comprender cómo el agua fluye desde zonas altas hacia cuerpos de agua como ríos, lagos y embalses.

Geomorfología y Morfometría de Cuencas

La geomorfología estudia las formas del relieve terrestre y los procesos que las originan, mientras que la morfometría de cuencas se centra en la caracterización cuantitativa de estas formas mediante indicadores como el área de drenaje, la densidad de drenaje, la pendiente media, la elongación, entre otros. Estos parámetros influyen directamente en la generación de escorrentía, en el tiempo de concentración del agua y en la eficiencia del drenaje natural.

Modelos Digitales de Elevación (MDE)

Los Modelos Digitales de Elevación (MDE) son representaciones tridimensionales del terreno generadas a partir de datos satelitales, topográficos o LIDAR. En el ámbito hidrológico, los MDE son herramientas fundamentales para el análisis espacial del comportamiento del agua, permitiendo identificar la red de drenaje, delimitar cuencas hidrográficas, calcular pendientes, determinar direcciones y acumulación de flujo, y simular escenarios hidrológicos diversos.

Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Los Sistemas de Información Geográfica son herramientas informáticas que integran, analizan y representan datos geoespaciales. En hidrología, su aplicación se ha consolidado como una de las metodologías más efectivas para el análisis de

escorrentía, acumulación de flujos, delimitación de cuencas, simulación de lluvias y generación de mapas temáticos hidrológicos.

desarrollar modelos predictivos que asisten en la gestión de riesgos, la planificación urbana y la protección de recursos naturales.

Flujos de agua superficial

El flujo de agua superficial es el movimiento del agua sobre la superficie terrestre, que se genera cuando las precipitaciones exceden la capacidad de infiltración del suelo y la retención vegetal. Este proceso está condicionado por factores como la pendiente, el uso del suelo, la cobertura vegetal y las características del terreno (Chow et al., 1988). En zonas de páramo, este flujo puede ser regulado naturalmente por suelos orgánicos saturados y vegetación absorbente como los frailejones.

Ecosistema de páramo

El páramo es un ecosistema tropical de alta montaña (por encima de los 2.800 m s.n.m.) caracterizado por su alta humedad, temperaturas frías y nieblas frecuentes. En Colombia, estos ecosistemas proveen agua a más del 70% de la población. El páramo de Berlín, localizado en el departamento de Santander, es una fuente hídrica crítica por su función de regulación del ciclo del agua. Su alteración por actividades agrícolas, ganaderas o mineras puede afectar directamente los flujos de agua superficial (IDEAM, 2017).

2.3. Marco Ambiental

POMCA – Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas

El POMCA es un instrumento de planificación ambiental y territorial en Colombia, diseñado para ordenar y gestionar de forma integral los recursos naturales dentro de una cuenca hidrográfica. Su objetivo principal es garantizar la sostenibilidad ambiental, social y económica del territorio a través del uso racional del recurso hídrico, la conservación de ecosistemas y la prevención del riesgo.

Componentes del POMCA

- Diagnóstico Ambiental de la Cuenca: incluye caracterización climática, geológica, edáfica, hidrológica y ecológica.
- Delimitación y Zonificación Ambiental: identifica áreas de recarga, uso prioritario del suelo, zonas de riesgo o conservación.
- Modelo Hidrológico y Plan de Manejo del Recurso Hídrico: aquí se simulan los flujos de agua superficial y subterránea.
- Plan de Acción: define programas y proyectos para el manejo integral de la cuenca (reforestación, control de erosión, monitoreo, etc.).
- Participación Social: incluye a comunidades, autoridades locales y usuarios del agua en la toma de decisiones.

Plan de Ordenamiento de Microcuencas

El Plan de Ordenamiento de Microcuencas es una herramienta de planificación ambiental y territorial que busca conservar los recursos naturales, regular el uso del suelo y garantizar la disponibilidad del recurso hídrico en unidades hidrográficas pequeñas. Es fundamental en ecosistemas estratégicos como los páramos, donde se generan y regulan importantes flujos de agua superficial.

Este plan incluye el diagnóstico físico y ambiental de la microcuenca, el análisis de la cobertura vegetal y del uso del suelo, la evaluación hidrológica con apoyo de herramientas como los Modelos Digitales de Elevación (MDE) y la zonificación ambiental para definir áreas de conservación y manejo.

En el Páramo de Berlín, este tipo de planificación es crucial para proteger la estructura ecológica y el equilibrio hídrico, especialmente frente a amenazas como la deforestación, la agricultura intensiva o el cambio climático. Tu proyecto, al modelar flujos de agua superficial con base en MDE, aporta insumos valiosos para estos planes, facilitando la toma de decisiones técnicas y ambientales con enfoque sostenible.

2.4. Marco Legal

Ley 1930 de 2018 – Ley de Páramos

La Ley 1930 de 2018 establece los lineamientos para la gestión integral de los páramos en Colombia, reconociendo su importancia ecológica como ecosistemas estratégicos productores y reguladores de agua. Esta ley tiene como objetivo principal proteger las funciones ecológicas del páramo, conservar su biodiversidad y asegurar su uso sostenible mediante herramientas de planificación ambiental, científica y social.

Entre sus disposiciones más relevantes, la ley prohíbe expresamente las actividades mineras, de hidrocarburos y agroindustriales dentro de los páramos delimitados oficialmente. Asimismo, promueve la formulación de Planes de Manejo Ambiental para páramos, articulados con los instrumentos de ordenamiento territorial, los planes de desarrollo municipales y los planes de cuencas (POMCA).

En el contexto del Páramo de Berlín, esta ley respalda la necesidad de realizar estudios técnicos, como el diseño de modelos de flujos superficiales, para evaluar la funcionalidad hídrica del ecosistema, identificar zonas de recarga y aportar información científica para la toma de decisiones en conservación y restauración.

Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT) de Tona

El EOT de Tona es el instrumento que orienta el desarrollo físico, ambiental y socioeconómico del municipio, garantizando el uso adecuado del suelo, la protección de áreas ambientales estratégicas y la gestión sostenible de los recursos naturales.

Tona es uno de los municipios con mayor territorio dentro del Páramo de Berlín, por lo que el EOT incluye como áreas de especial protección las microcuencas hidrográficas, nacimientos de agua y zonas de recarga hídrica que abastecen acueductos locales y regionales. El EOT establece restricciones sobre el uso del suelo en zonas de páramo, prohíbe su transformación para actividades agrícolas intensivas y promueve la restauración ecológica y la conservación de fuentes hídricas.

Además, el EOT de Tona incorpora criterios de ordenamiento ambiental territorial que están alineados con la Ley 1930 de 2018 y el POMCA del río Lebríja. En este sentido, el desarrollo de modelos como el propuesto en este proyecto contribuye al fortalecimiento técnico del EOT, al delimitar con mayor precisión las microcuencas, identificar zonas vulnerables y priorizar acciones de manejo sostenible del agua.

3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

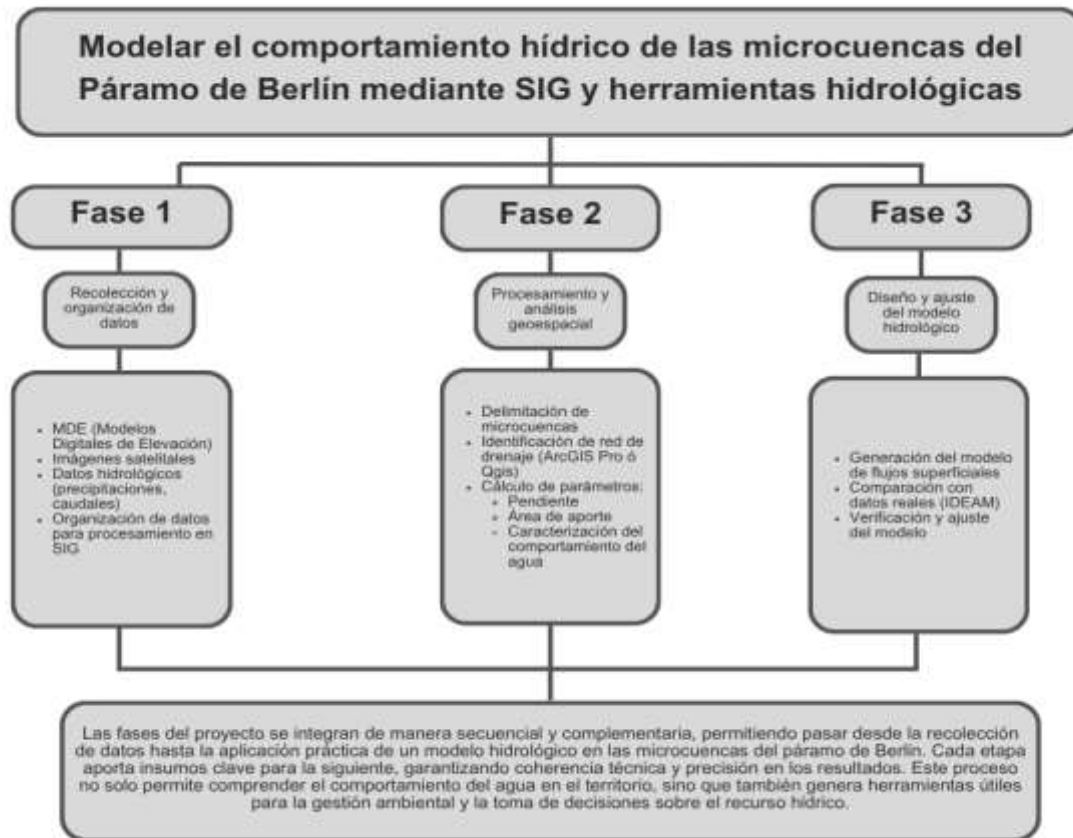
El desarrollo de este proyecto se basa en un enfoque cuantitativo, ya que se trabajará principalmente con información geoespacial y datos hidrológicos que permitirán analizar cómo se comportan los flujos de agua superficial en las microcuencas del páramo de Berlín. Además, la investigación es de tipo descriptivo y explicativo: por un lado, busca describir las características físicas y topográficas del terreno, y por otro, explicar la relación entre estas características y el comportamiento del agua en superficie.

En cuanto al método, se combinarán enfoques inductivos y deductivos. El inductivo permitirá analizar los datos que se obtengan y extraer conclusiones a partir de ellos, mientras que el deductivo servirá para validar los resultados del modelo, comparándolos con la información real de las microcuencas y sus redes de drenaje.

Para alcanzar los objetivos propuestos, se emplearán diversas herramientas y técnicas. Entre ellas, el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) mediante el software ArcGIS Pro, que facilitará el análisis de los Modelos Digitales de Elevación (MDE) obtenidos del IGAC y SRTM. Estos datos se complementarán con imágenes satelitales (de fuentes como el USGS) y registros hidrometeorológicos del IDEAM. Como valor agregado, el modelo de las microcuencas será impreso en 3D para contar con una representación física del relieve, lo que facilitará la comprensión y el análisis del territorio.

El proceso metodológico se llevará a cabo en varias fases:

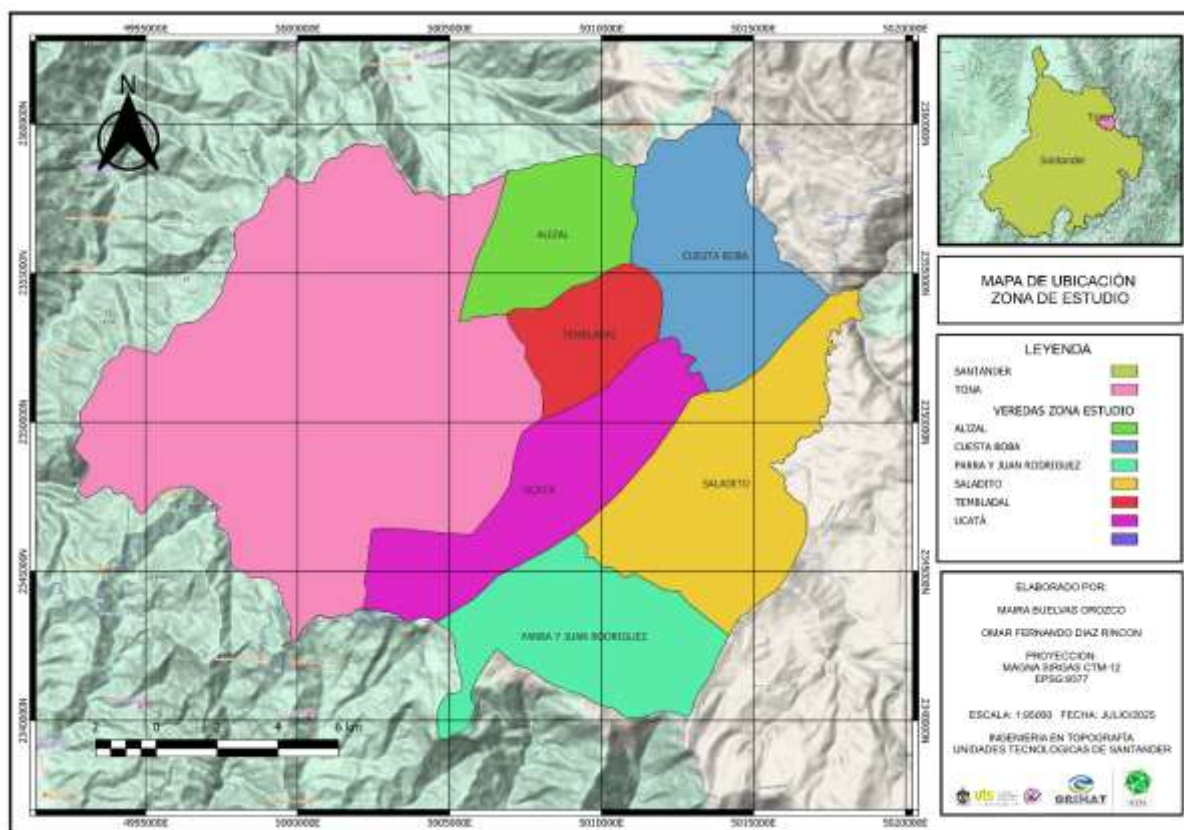
Figura 1. Tabla de Fases



Fuente: Autores (2025).

4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO

Figura 2. Mapa de Localización



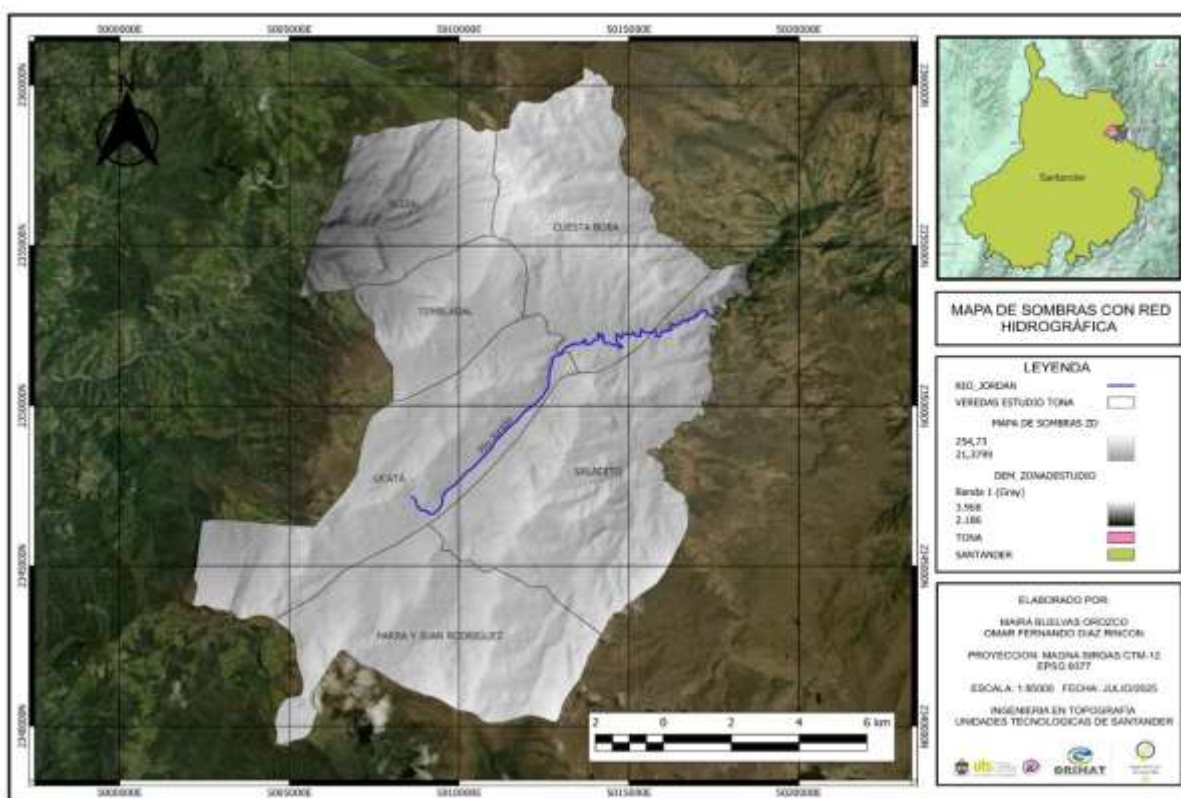
Fuente: Autores (2025).

La zona de estudio se localiza en el municipio de Tona, departamento de Santander, específicamente en el sector correspondiente al Páramo de Berlín. Esta región, de gran importancia ecológica e hídrica, forma parte del sistema andino colombiano y alberga microcuencas esenciales para la regulación del recurso hídrico regional.

El área se encuentra distribuida en seis veredas: Alizal, Cuesta Boba, Parra y Juan Rodríguez, Saladito, Tembladal y Ucatá, las cuales han sido delimitadas cartográficamente para el análisis.

No obstante, se recopiló información teórica, observada en el estado del arte la cual se contempla en la página 16 en la tabla N°1 en la cual se encuentra información clave y de apoyo el Diseño de un modelo de Flujos de Agua Superficial en Microcuencas del Páramo de Berlín Usando MDE para Evaluación Hidrológica en 2025.

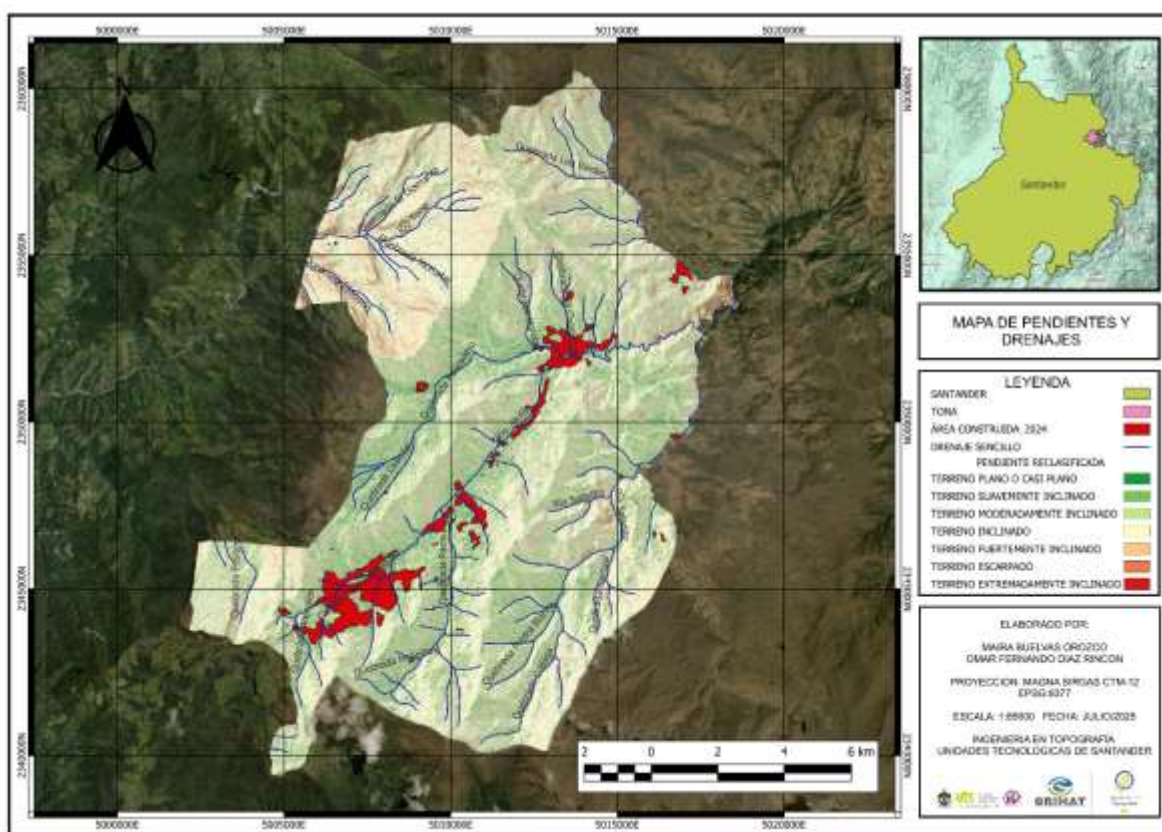
Figura 3. Mapa de Sombras



Fuente: Autores (2025).

Ahora bien, con el Modelo Digital de Elevación (MDE) se modela un mapa de pendientes, este nos permite identificar valles y crestas viendo la leve inclinación del terreno el cual también nos permite visualizar a criterio las Microcuencas del Páramo de Berlín y área de estudio justo a su hidrología.

Figura 4. Mapa de Pendientes

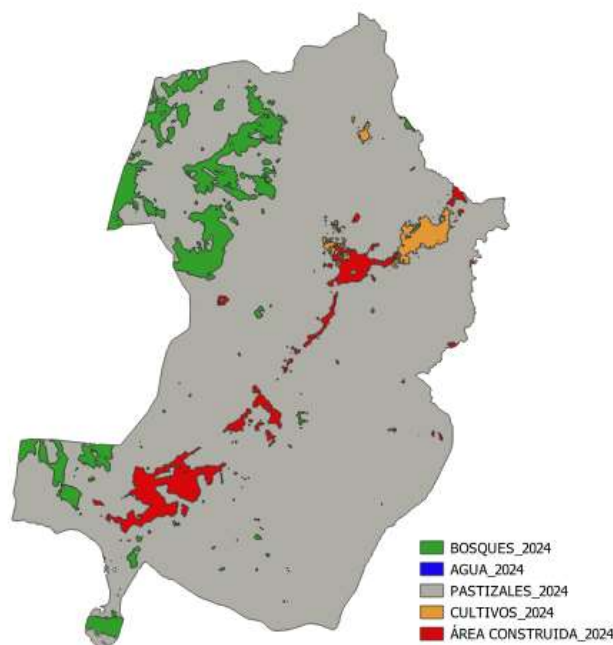


Fuente: Autores (2025).

Dentro del desarrollo del trabajo, se realizó una identificación y clasificación de coberturas terrestres predominantes, entre las cuales se destacan: cuerpos de agua, coberturas vegetales, áreas de cultivos, zonas construidas y pastizales. Esta caracterización es fundamental para establecer el grado de intervención antrópica

en la zona, evaluar el estado de conservación del ecosistema paramuno y determinar la relación entre el uso del suelo y la dinámica hídrica local.

Figura 5. Clasificación de Coberturas



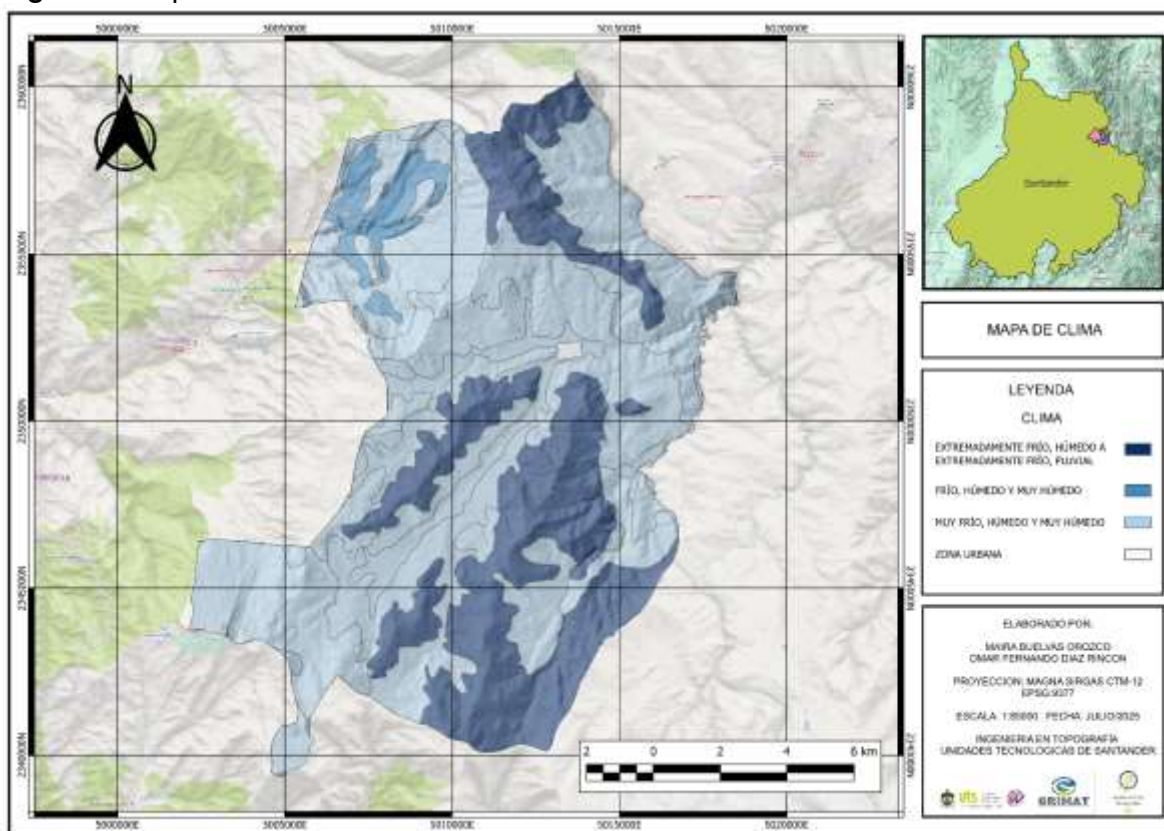
Fuente: Autores (2025).

El análisis espacial de estas coberturas, apoyado en Sistemas de Información Geográfica (SIG), permite identificar zonas críticas de transformación del paisaje, áreas prioritarias para conservación y sectores potencialmente vulnerables ante el cambio climático o el uso no planificado del territorio. Asimismo, se busca establecer un diagnóstico que oriente futuras estrategias de manejo sostenible del páramo, basadas en información cartográfica precisa y actualizada.

En este contexto, el proyecto no solo contribuye al conocimiento técnico del territorio, sino que también proporciona insumos fundamentales para la gestión

ambiental, la planificación del desarrollo rural y la toma de decisiones en torno a la protección del recurso hídrico.

Figura 6. Mapa de climas sobre Zona de Estudio

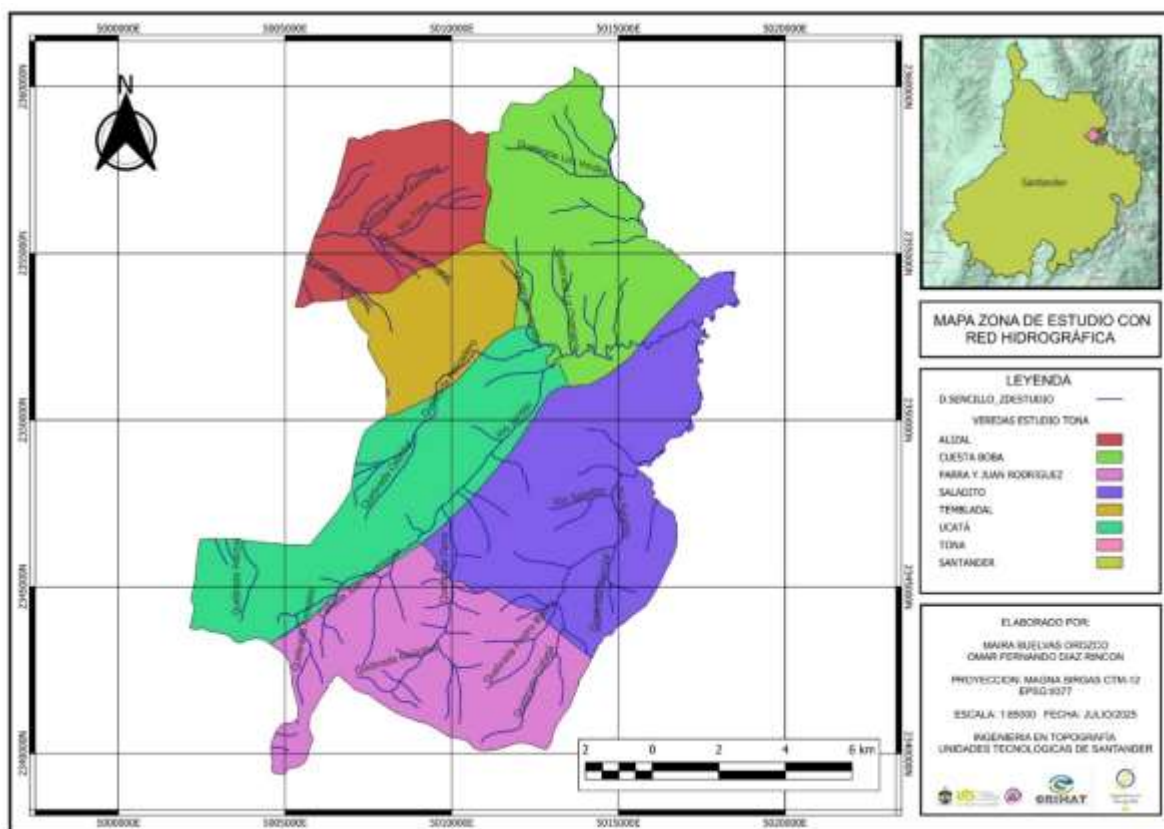


Fuente: Autores (2025).

El mapa refleja la predominancia de climas fríos y húmedos en el páramo de Berlín, con sectores que alcanzan condiciones extremas de frío y alta pluviosidad. Esta variabilidad climática favorece la formación de humedales y zonas de acumulación de agua, esenciales para el equilibrio hídrico de la microcuenca del río Jordán. Durante el trabajo de campo se evidenció cómo estos factores influyen en la vegetación y en la dinámica de los suelos, mostrando que las áreas con mayor humedad retienen mejor el recurso, mientras que en zonas intervenidas se generan procesos de escorrentía más marcados. En conjunto, este análisis confirma que el

clima es un componente determinante para entender y gestionar las microcuencas del páramo.

Figura 7. Mapa de Zona de Estudio con red Hidrográfica



Fuente: Autores (2025).

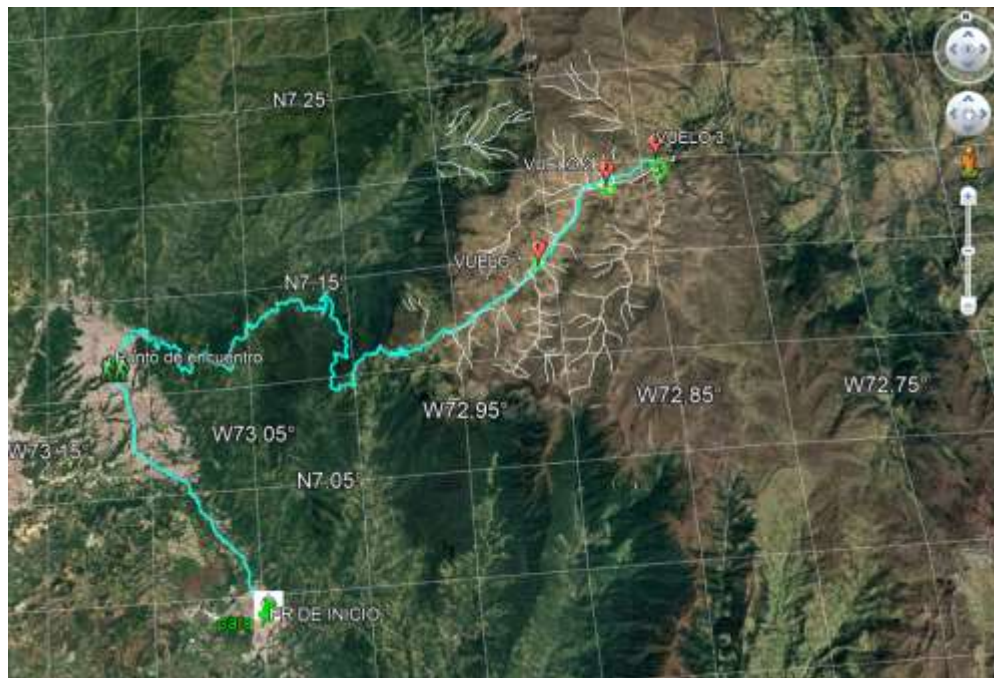
La zona de estudio está estructurada por una red hidrográfica compuesta por ríos y quebradas que drenan el territorio en distintas direcciones, configurando microcuencas claves para la evaluación hidrológica. Este sistema de drenaje tiene una alta dependencia de la topografía y del régimen climático de alta montaña propio del Páramo de Berlín.

Los principales cuerpos de agua identificados son:

- **Río Tona**, ubicado al norte de la zona, es un curso principal que recoge aguas de microcuencas adyacentes y tiene un papel fundamental en el abastecimiento de recursos hídricos para uso doméstico y agrícola (CAR, 2020).
- **Río Jordán**, de curso medio, actúa como drenaje colector entre varias quebradas menores y conecta flujos superficiales hacia zonas más bajas. Su presencia es clave en la conectividad de la red hídrica regional.
- **Río Salado y Río Salado 2**, presentes en la porción oriental y suroriental del área, conforman un sistema de drenaje de alto caudal, influenciado por precipitaciones orográficas y características morfológicas del terreno (IGAC, 2020).
- **Quebradas como El Diviso, Curití, La Lajita, Quince Letras y El Palmar** tienen un comportamiento de flujo intermitente o estacional, típico en zonas de páramo. Estas microcorrientes desempeñan un papel relevante en el almacenamiento y liberación progresiva del agua, funcionando como reguladores naturales del recurso hídrico (IDEAM, 2018).

Estas fuentes hídricas se interrelacionan entre sí, conformando una red densa y jerárquicamente estructurada, cuyo análisis espacial es esencial para la modelación de flujos de agua superficial a partir de Modelos Digitales de Elevación (MDE), especialmente bajo criterios de conservación ambiental y manejo de cuencas.

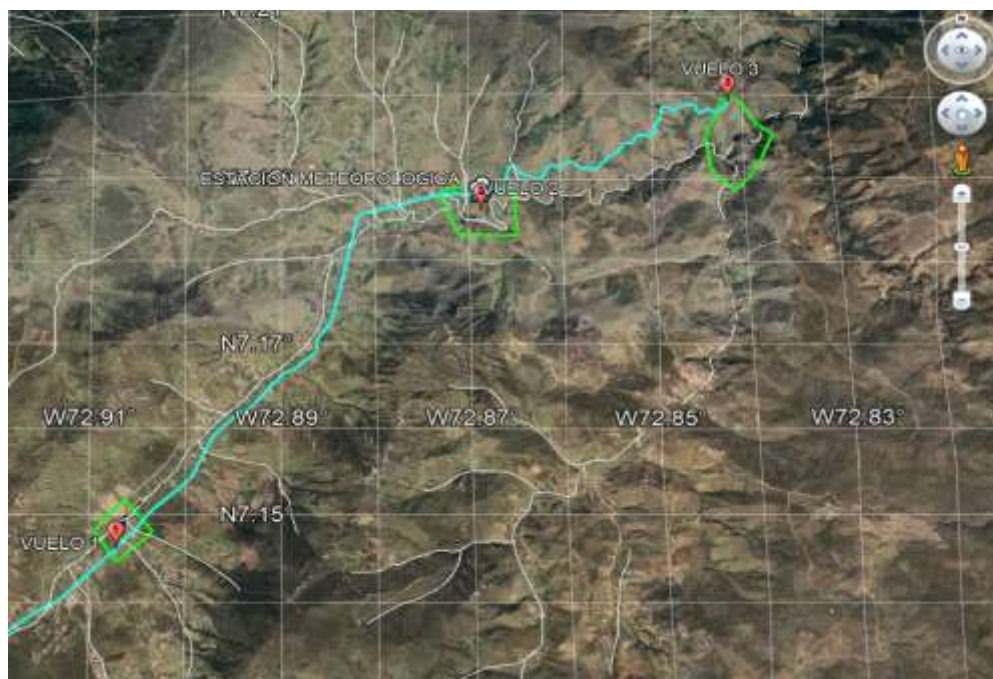
Figura 8. Recorrido Completo, Pr Inicial, Punto De Encuentro, Puntos De Vuelos



Fuente: Autores (2025).

En esta imagen se observa el recorrido completo que realizamos durante el trabajo de campo en la microcuenca del río Jordán, específicamente en la vereda Ucatá. Allí se definió el punto de inicio, el sitio de encuentro y los lugares en los que se desarrollaron los vuelos con dron. Este trazado fue fundamental porque nos permitió planear de manera organizada la cobertura del área de estudio, asegurando que cada tramo de la microcuenca quedara representado en la información recolectada. Al seguir esta ruta, pudimos registrar desde los sectores más altos, donde nacen las corrientes hídricas, hasta las zonas medias con mayor intervención antrópica. De esta forma, el recorrido no solo sirvió como guía para los vuelos, sino también como un apoyo clave para entender cómo se distribuyen el relieve, la vegetación y las primeras derivaciones de los flujos de agua dentro de la microcuenca.

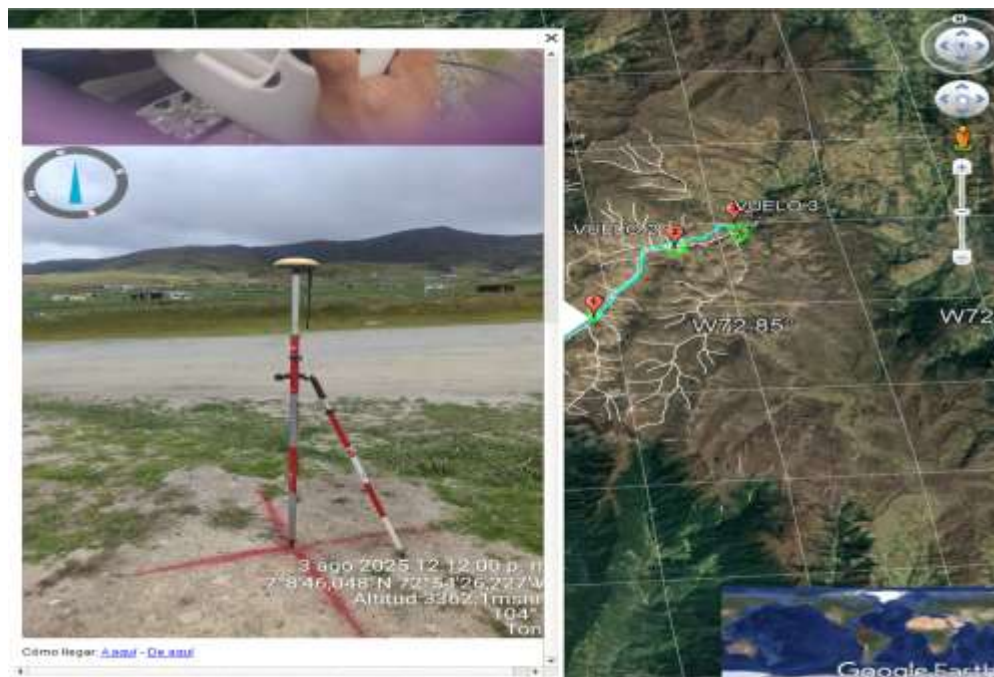
Figura 9. Localizaciones De Vuelos



Fuente: Autores (2025).

Esta imagen muestra los puntos estratégicos que seleccionamos para realizar los vuelos con dron a lo largo de la microcuenca. Estos sitios se escogieron de manera cuidadosa, teniendo en cuenta la necesidad de registrar diferentes coberturas como pastizales, áreas de uso agropecuario, vegetación natural y no obstante y más importante para esta investigación los cuerpos de agua que alimentan al río Jordán. La ubicación de estos puntos no fue al azar: se planearon para que la información recolectada tuviera la mayor representatividad posible.

Figura 10. Punto De Control Del Vuelo #1



Fuente: Autores (2025).

En esta imagen se documenta uno de los puntos de control GNSS levantados durante la primera jornada de campo. El equipo fue instalado sobre una mira vertical, justo en una intersección marcada con pintura roja, en un terreno de transición entre vía rural y vegetación dispersa. La lectura altimétrica alcanzó los 3362.1 m s.n.m., y la ubicación fue registrada con precisión gracias al uso de coordenadas geográficas y orientación de rumbo. Este punto no fue elegido al azar: su visibilidad, estabilidad y cercanía a elementos de referencia como mojones físicos lo convirtieron en una base confiable para la ortorrectificación del vuelo.

Figura 11. Evidencia Fotográfica del Recorrido



Fuente: Autores (2025).

Esta imagen registra el momento en que se supervisa en tiempo real el primer vuelo del dron, desde un punto ubicado en zona alta de la vereda Ucata, en el Páramo de Berlín. A la izquierda, se observa al operador concentrado en la interfaz del dispositivo móvil, mientras el dron transmite imágenes del relieve montañoso bajo un cielo cubierto. La presencia del vehículo y el equipo técnico en el lugar evidencia la logística desplegada para iniciar el proceso de levantamiento.

Figura 12. PR de vuelo inicial

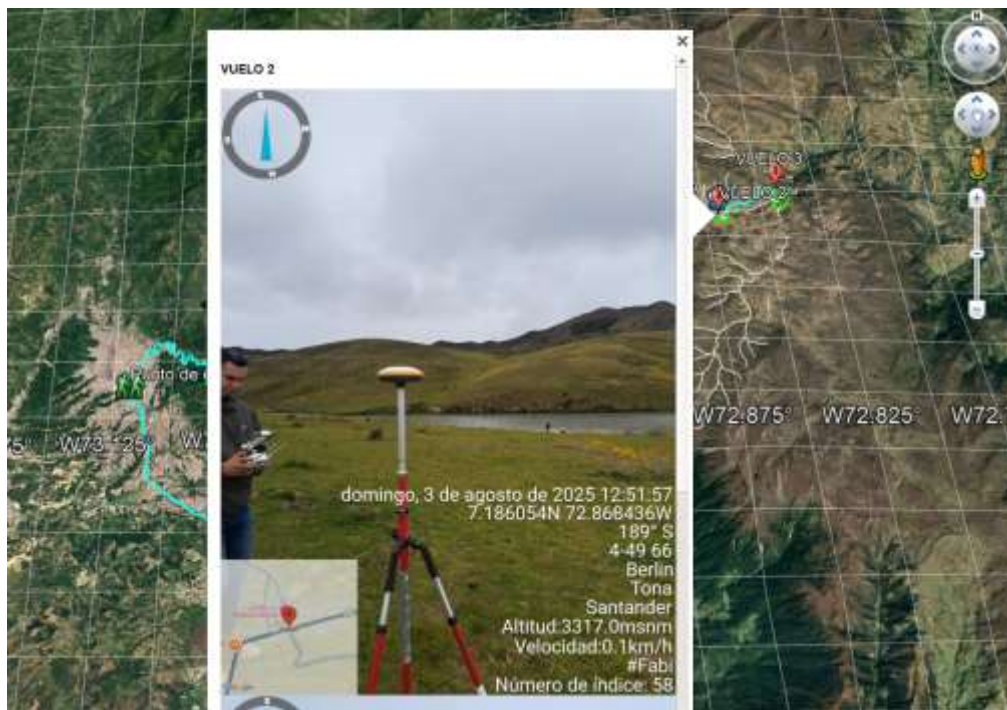


Fuente: Autores (2025).

En el primer vuelo se registraron las áreas iniciales de la microcuenca, donde predominan los usos agropecuarios y los primeros tramos de corrientes hídricas que descienden de la parte alta.

Las imágenes muestran con claridad las líneas de drenaje iniciales, acompañadas de cultivos y zonas de pastoreo, lo cual evidencia una fuerte presión antrópica sobre la recarga hídrica. Este vuelo permitió establecer el punto de transición entre las áreas intervenidas y el inicio de los ecosistemas de páramo, fundamentales para la toma y recopilación de los puntos de control y de la recopilación de los datos de vuelo .

Figura 13. Punto De Control Del Vuelo #2



Fuente: Autores (2025).

Punto de referencia geoespacial establecido durante el segundo vuelo de dron, ubicado en una zona de transición altitudinal del Páramo de Berlín. Con una altitud de 3317 metros, este punto contribuye a mejorar la ortorrectificación de imágenes y la continuidad del modelo fotogramétrico. Su ubicación fue seleccionada por su representatividad geomorfológica, al encontrarse en un área con pendientes suaves y vegetación típica del ecosistema de páramo, lo que facilita la interpretación de patrones de drenaje y acumulación superficial en la microcuenca.

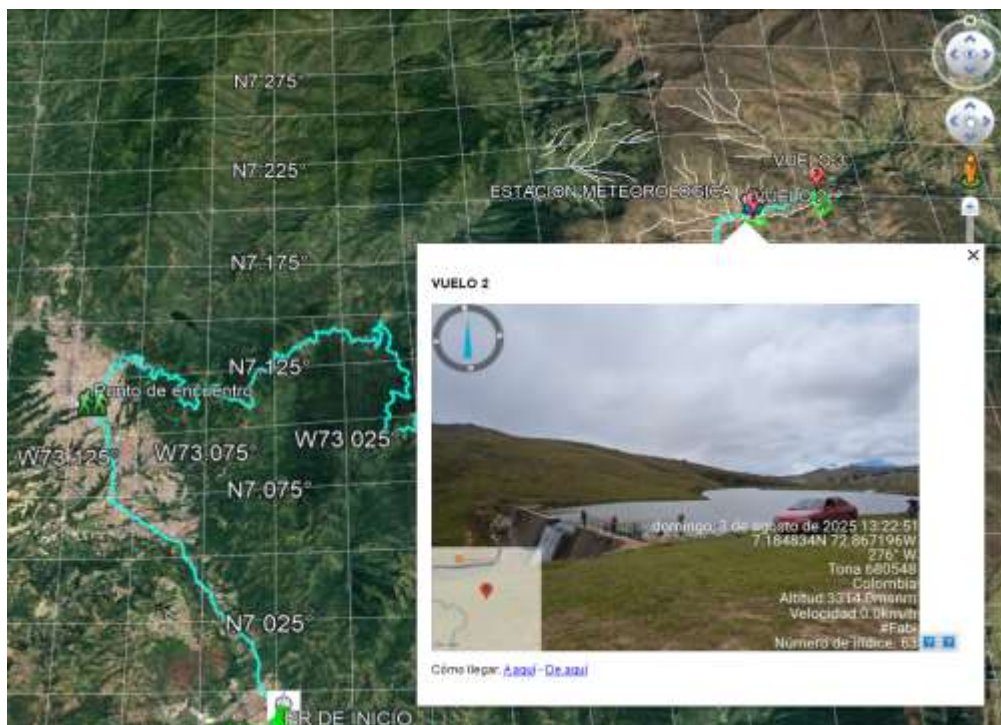
Figura 14. Punto de Control pc



Fuente: Autores (2025).

Este segundo punto de control fue tomado en proximidad al anterior, dentro del mismo vuelo, en una zona de descenso topográfico cercana a un cauce principal claramente visible. Con una altitud de 3316 metros, su ubicación permite validar la delimitación hidrológica y analizar la dinámica de concentración de flujo en la microcuenca. Durante el levantamiento, se registraron condiciones climáticas adversas, con ráfagas de viento intensas que provocaban movimientos bruscos en el dron, dificultando la estabilidad del vuelo y la captura precisa de imágenes. A pesar de ello, este punto aporta información clave para el análisis morfodinámico del canal y la evaluación de procesos erosivos activos.

Figura 15. Localización Del Vuelo #2



Fuente: Autores (2025).

Durante el segundo vuelo se capturó esta imagen en una zona de pendiente mínima, donde el terreno favorece la acumulación natural de agua entre las montañas del Páramo de Berlín. Lo que se observa es una estructura de retención artificial, ubicada estratégicamente en el relieve para contener el flujo superficial. Esta formación, aunque construida, se adapta al entorno y permite estudiar cómo el agua se concentra y se distribuye en función de la morfología del terreno.

En ese momento, las condiciones climáticas fueron exigentes: el viento constante obligó a realizar maniobras precisas para estabilizar el dron y asegurar la calidad del registro. Cerca de este punto se identificaron mojones físicos que sirvieron como referencia para pisar puntos GNSS, lo que permitió obtener una ubicación más precisa y confiable para la ortorrectificación de las imágenes.

Las coordenadas registradas en este punto fueron:

Figura 16. Mojón #1



Fuente: Autores (2025).

1025,1286513.4130,1133598.5540,3312.3780,mojon1

Figura 17. Mojón #2



ELABORADO POR:
Docencia

REVISADO POR:
Sistema Integrado de Gestión

APROBADO POR: Líder del Sistema Integrado de Gestión
FECHA APROBACIÓN: Octubre de 2023

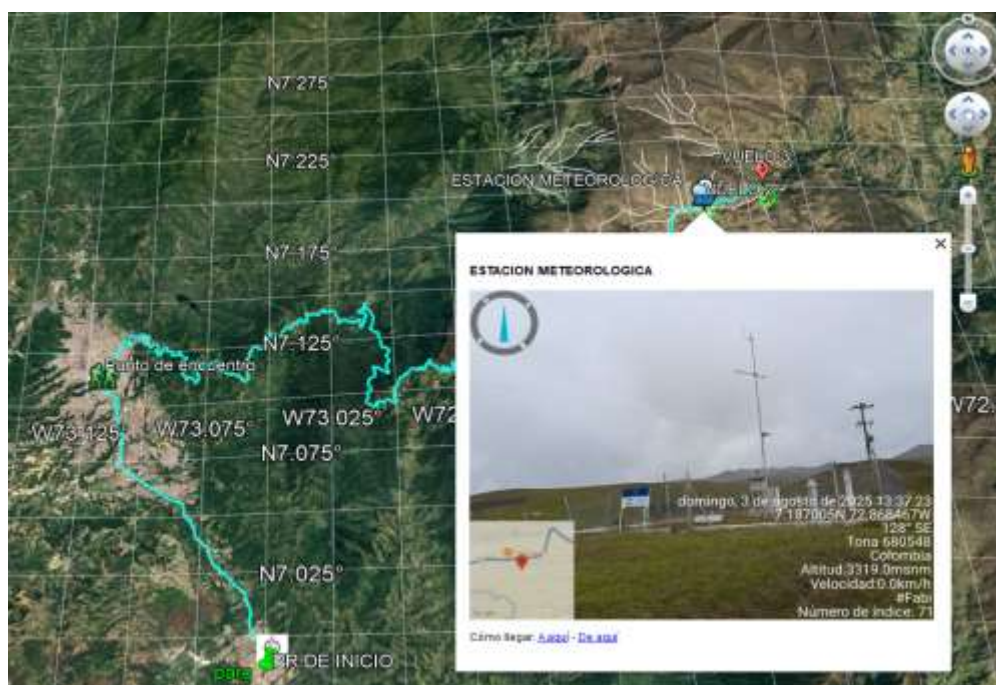
Fuente: Autores (2025).

1026,1286441.4480,1133697.3300,3310.5500,mojon2

Estas fueron las coordenadas y evidencia del vuelo número 2 de las cuales se evidenciaron las coordenadas anteriormente mencionadas

Estas coordenadas presentadas de cada mojón fueron tomadas y pisadas como anterior mente se mencionan, están tomadas con equipo RTK de alta precisión para mayor confiabilidad. Las coordenadas anterior mente mencionadas de dan en sistema de referencia UTM.

Figura 18. Base meteorológica del IDEAM registrada en el vuelo numero 2



Fuente: Autores (2025).

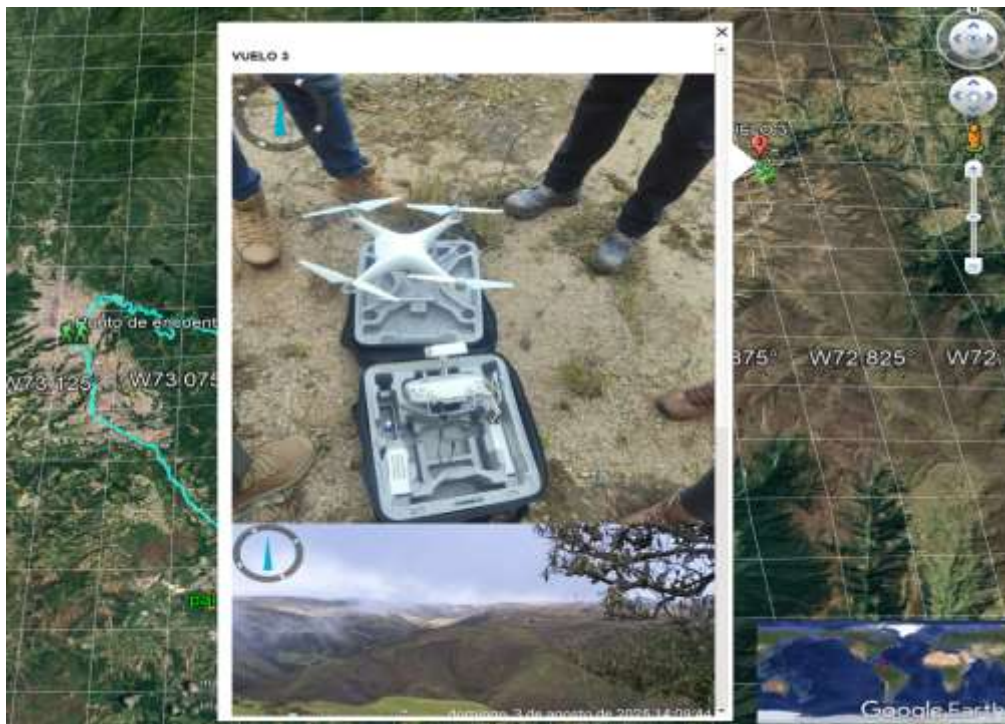
Esta imagen corresponde a la estación meteorológica ubicada en el sector del Páramo de Berlín, registrada durante el segundo vuelo del proyecto. Su presencia en el recorrido no fue casual: forma parte de los puntos clave que permiten entender

cómo las condiciones atmosféricas influyen directamente en la dinámica hídrica de la microcuenca. Según los objetivos del trabajo, buscamos integrar observación directa con datos técnicos para caracterizar el comportamiento del agua en zonas de alta montaña, y esta estación nos brinda información esencial para ese propósito.

El IDEAM, como entidad responsable del monitoreo climático en Colombia, recopila desde esta estación variables como temperatura, humedad, velocidad del viento y precipitación, que son fundamentales para validar los modelos de acumulación de flujo y escorrentía superficial que estamos construyendo. Además, durante el vuelo se evidenció la fuerza del viento en el sector: el dron se balanceaba con dificultad, lo que confirma en campo lo que los registros meteorológicos ya advierten.

Esta imagen no solo documenta un punto técnico, sino que representa la conexión entre el paisaje, el clima y los procesos naturales que estamos estudiando. Nos recuerda que cada dato tiene un contexto, y que entender el páramo requiere tanto de tecnología como de presencia en terreno.

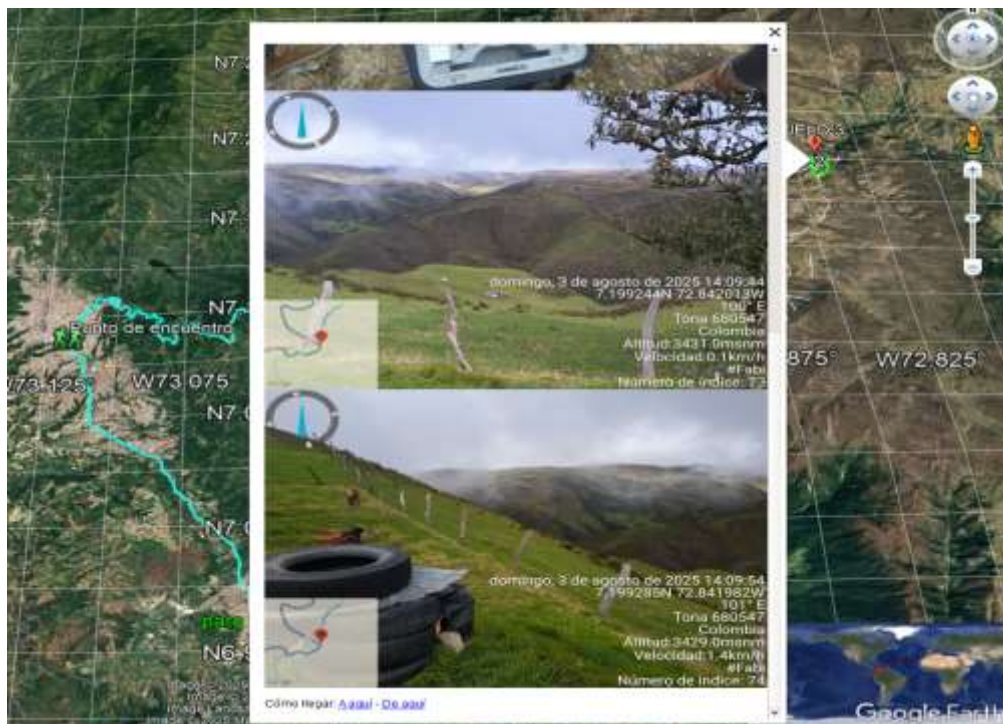
Figura 19. Punto De Control Del Vuelo #3



Fuente: Autores (2025).

Esta imagen registra el momento de preparación y despliegue del dron durante el tercer vuelo, en un punto de control ubicado en zona de acceso abierto y vegetación dispersa. El equipo se encuentra reunido en terreno, ajustando parámetros y verificando condiciones antes del despegue. Este punto marca el inicio de una nueva jornada de levantamiento, donde la coordinación entre operadores y la lectura del entorno son claves para garantizar la calidad del registro. La imagen refleja no solo el componente técnico del vuelo, sino también la dimensión humana del trabajo de campo: planificación, adaptación y presencia directa en el paisaje.

Figura 20. Localización del vuelo #3



Fuente: Autores (2025).

En esta imagen se observa el dron en pleno vuelo sobre una zona de montaña del Páramo de Berlín, durante el tercer recorrido de levantamiento. El paisaje, aunque parcialmente visible, está cubierto por una densa neblina que limitaba la visibilidad y dificultaba la lectura del relieve desde el aire. Las condiciones climáticas fueron especialmente exigentes: ráfagas de viento constantes golpeaban el equipo, generando movimientos bruscos que comprometían la estabilidad del dron y la calidad de las capturas.

A pesar de ello, se logró mantener la trayectoria planificada y registrar este punto de control, que resulta clave para validar la cobertura aérea y entender cómo el clima de alta montaña influye directamente en la dinámica hídrica y en la operatividad de los vuelos. Esta imagen no solo documenta el recorrido, sino que refleja el esfuerzo técnico y humano necesario para trabajar en condiciones

extremas, generando datos que luego serán interpretados para comprender con mayor profundidad la dinámica hídrica y geomorfológica de la microcuenca.

5. RESULTADOS

En el marco de este trabajo de grado, uno de los enfoques principales fue el análisis de la topografía de las microcuencas que conforman el territorio del Páramo de Berlín, con especial atención a la cuenca del río Jordán. Para ello, procesamos un Modelo Digital de Elevación (MDE), lo que nos permitió extraer información detallada del relieve y derivar parámetros fundamentales para comprender el comportamiento del flujo superficial.

A partir del MDE, obtuvimos variables como la altitud, la pendiente, la curvatura del terreno, la dirección y acumulación de flujo, así como la generación automática de la red de drenaje. Estos insumos nos ayudaron a delimitar con precisión las microcuencas presentes en el área de estudio y a identificar su dinámica morfohidrológica.

Uno de los hallazgos importantes fue el reconocimiento de gradientes altitudinales que influyen en la distribución de coberturas del suelo y en el comportamiento hídrico del paisaje. Notamos que las zonas más elevadas conservan aún parches de vegetación natural, mientras que las zonas con menor altitud tienden a estar más intervenidas por actividades agropecuarias. Las pendientes más marcadas se asocian con áreas de escorrentía rápida, donde el riesgo de erosión es mayor, especialmente si la cobertura vegetal ha sido reemplazada por cultivos o pastizales.

Gracias al análisis de acumulación de flujo, pudimos identificar rutas prioritarias por donde se concentra el escurrimiento superficial, así como zonas de posible recarga

hídrica. Esta información, relacionada con el uso actual del suelo, nos permitió detectar sectores donde la transformación del paisaje podría estar afectando negativamente el equilibrio natural del ecosistema.

Con base en estos resultados, logramos establecer una caracterización clara de las microcuencas desde una perspectiva geomorfológica e hidrológica, lo cual representa un insumo valioso para futuras simulaciones de flujos superficiales y para la planificación de estrategias de manejo sostenible del territorio.

Todo este proceso no solo fortaleció nuestra comprensión del relieve y su interacción con los procesos hídricos, sino que también nos permitió integrar de manera práctica herramientas de análisis espacial para generar propuestas que articulen la conservación del recurso hídrico con el ordenamiento territorial del páramo.

Con base en datos climatológicos históricos y reportes del IDEAM (2024) para la zona del Páramo de Berlín, se caracterizan las épocas de lluvia, sequía y heladas, así como sus impactos en la microcuenca del río Jordán, particularmente en la vereda Ucatá. Estos registros provienen de la estación climatológica Berlín y de series históricas complementarias de alta montaña (IDEAM, 2022; Poveda et al., 2019).

Tabla

2

Régimen mensual de precipitación y heladas (promedios históricos).

Mes	Precipitación promedio (mm)	Heladas (días promedio)	Observaciones
Enero	45	10	Época seca, riesgo de heladas altas
Febrero	50	8	Persisten heladas
Marzo	120	3	Inicio de temporada de lluvias.
Abril	180	0	Alta pluviosidad, recarga hídrica máxima.
Mayo	200	0	Mes más lluvioso del año
Junio	90	4	Disminuye la lluvia, algunas heladas.
Julio	60	7	Mes seco con heladas frecuentes.
Agosto	55	9	Alta probabilidad de heladas.
Septiembre	130	2	Inicio de segunda temporada de lluvias.
Octubre	170	0	Alta pluviosidad

Noviembre	190	0	Segundo pico lluvioso.
Diciembre	70	6	Disminuyen lluvias, aumentan heladas.

Fuente: Autores (2025).

Épocas de mayor lluvia

Se identifican dos picos máximos: mayo (200 mm) y noviembre (190 mm), seguidos de abril y octubre, con valores superiores a 170 mm (IDEAM, 2024).

Estas lluvias intensas favorecen la recarga de acuíferos y el incremento de caudales (Poveda et al., 2019), pero incrementan riesgos de erosión en laderas y afectaciones en vías terciarias (Rodríguez & Carvajal, 2021).

Épocas de menor lluvia

Enero, febrero, julio y agosto registran precipitaciones por debajo de 60 mm (IDEAM, 2022), correspondiendo a la temporada seca del altiplano santandereano.

Este déficit hídrico reduce los caudales del río Jordán y limita la disponibilidad de agua para riego y consumo (MADS, 2020).

Épocas de heladas

Las heladas se concentran principalmente en enero, julio y agosto, con promedios entre 8 y 10 días por mes (IDEAM, 2024).

Estas condiciones afectan cultivos de papa, cebolla y pastos (Rojas et al., 2018), ocasionando pérdidas económicas y afectando la regeneración de vegetación nativa (Morales, 2017).

Intervalo sin heladas

Entre abril y noviembre las heladas son mínimas o inexistentes (IDEAM, 2022), lo que beneficia el desarrollo agrícola y la cobertura vegetal. Sin embargo, coincide con suelos más saturados y un aumento en escorrentía y posibles deslizamientos (García et al., 2021).

Tabla 3

Coordenadas Tomadas en Campo

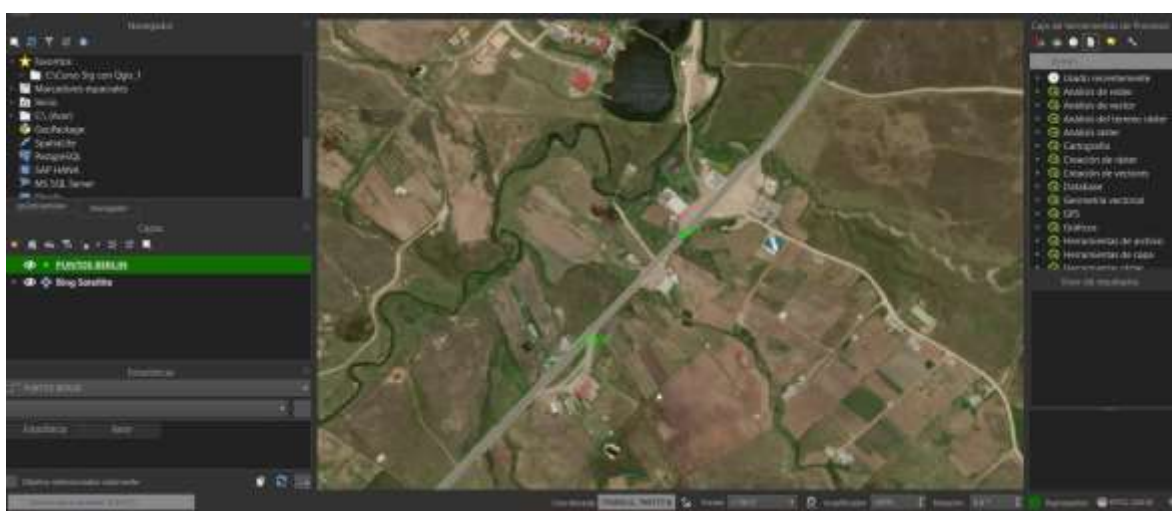
PUNTO EN EL MAPA		CURVA DE NIVEL (COTA)	PENDIENTE	DESCRIPCIÓN	CLIMA	ID
X	Y					
1129407.02	1282280.81	3343.917	0.48°	pc2	Extremadamente frío y húmedo	PIEDRA PARADA
1129283.18	1282145.48	3345.182	1.20°	BASE	Extremadamente frío y húmedo	PIEDRA PARADA
1133598.55	1286513.41	3312.378	0.58°	mojon1	Frío y húmedo	REPRESA
1133697.33	1286441.45	3310.55	0.56°	mojon2	Frío y húmedo	REPRESA
1133633.24	1286500.66	3310.027	0.48°	pc	Frío y húmedo	REPRESA
1133538.83	1286513.35	3308.191	1.17°	pc	Frío y húmedo	REPRESA
1133553.27	1286576.23	3311.641	0.89°	BASE	Frío y húmedo	REPRESA

Fuente: Autores (2025).

La tabla reúne los puntos de control levantados en el páramo, incluyendo sus coordenadas, altitud, pendiente, descripción de campo, clima asociado y sector de ubicación. Los resultados muestran que en Piedra Parada predominan pendientes entre 0.48° y 1.20°, bajo un clima extremadamente frío y húmedo. Estas condiciones generan suelos con alta capacidad de retención, donde se forman nacimientos y pequeños humedales. Por otro lado, los puntos de la zona de la represa se ubican

en un clima frío y húmedo, con pendientes entre 0.48° y 1.17° , lo que sugiere un relieve estable en general, pero con tendencia a escorrentías más rápidas en las áreas con mayor inclinación. Este cruce de información evidencia cómo la topografía, medida en grados de pendiente, junto con el clima, influye directamente en la dinámica hídrica de la microcuenca del río Jordán

Figura 21. Puntos de localización del vuelo #1



Fuente: Autores (2025).

En esta primera imagen se observan los puntos de control levantados en un sector agrícola atravesado por la vía principal que comunica la vereda. Esta localización fue fundamental para el registro de información, ya que se encuentra en la parte baja de la microcuenca, donde confluyen los primeros drenajes provenientes de las laderas y se combinan con las actividades agropecuarias que predominan en la zona. Durante el vuelo con dron en este sector, se logró obtener una ortofoto de alta resolución que permitió identificar con claridad la fragmentación del terreno por el uso agrícola y su cercanía a los cauces. Estos insumos fueron clave para analizar cómo las prácticas de cultivo inciden sobre la dinámica hídrica y el riesgo de afectación en la calidad del agua que circula hacia los tramos medios de la cuenca



Figura 22. Ortofoto Del Vuelo #1
Fuente: Autores (2025).

Esta ortofoto corresponde al primer vuelo realizado en la vereda Ucata, y fue posible gracias a una salida a campo bajo condiciones climáticas exigentes, en la que se recorrió el terreno para establecer puntos de control GNSS estratégicos. Cada uno

de estos puntos fue ubicado con rigor técnico, considerando la morfología del terreno, la visibilidad del dron y la necesidad de garantizar una ortorrectificación precisa.

En la imagen se observa el cauce principal de la microcuenca, cuerpos de agua dispersos y zonas de vegetación baja, lo que permite identificar patrones de escorrentía y acumulación superficial. La ortofoto no solo representa un producto técnico, sino también el resultado de una jornada de observación directa, donde cada coordenada levantada en campo se traduce en una imagen que ahora puede ser interpretada para comprender la dinámica hídrica y geomorfológica del sistema. Esta primera salida marcó el inicio del proceso de validación espacial, y la ortofoto generada a partir del Vuelo 1 se convierte en una base sólida para contrastar datos, delimitar áreas de interés y construir los modelos que darán sustento técnico al informe final.

Para la toma se tuvo en cuenta el levantamiento de dos puntos de control los cuales registraron las siguientes coordenadas:

- Pc 2 piedra parada 1129407.02 1282280.81 3343.917
- Base piedra parada 1129283.18 1282145.48 3345.182

Figura 23. Puntos de localización del vuelo #2



Fuente: Autores (2025).

En la segunda imagen se aprecia un sector estratégico de la microcuenca donde se encuentra una pequeña represa de almacenamiento, cuya función es regular el flujo superficial que desciende desde las zonas altas del páramo. Muy cerca se ubica la estación meteorológica del IDEAM, que juega un papel clave en el monitoreo climático, registrando variables como temperatura, precipitación, humedad y velocidad del viento, fundamentales para validar los modelos de escorrentía y acumulación de flujo.

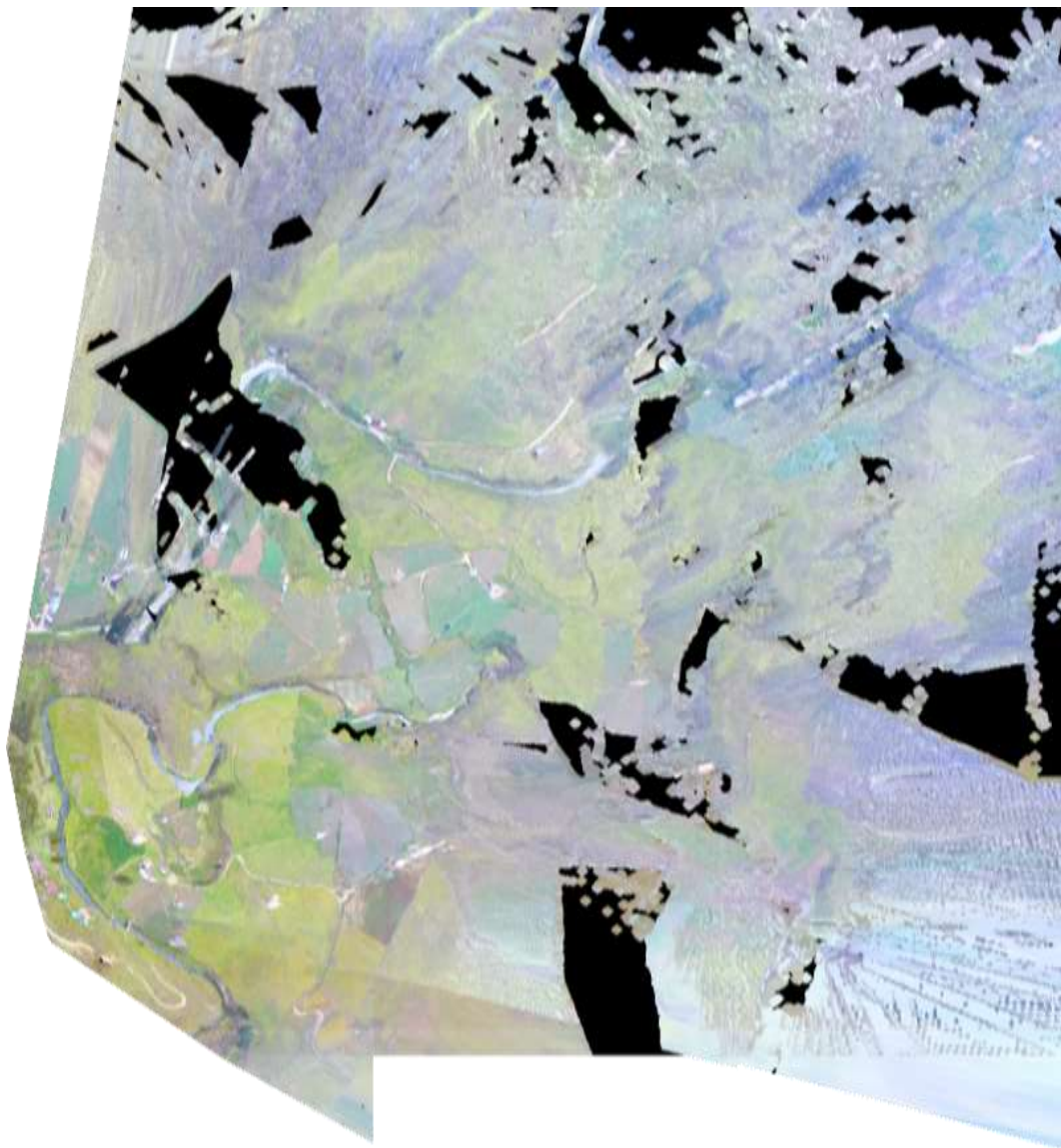
Durante este mismo recorrido se tomaron y pisaron coordenadas GNSS de dos mojones con equipo RTK, garantizando una alta precisión para el proceso de ortorrectificación de las imágenes. Las coordenadas levantadas fueron:

- Mojón 1: 1286513.4130 E, 1133598.5540 N, 3312.378 m s.n.m.
- Mojón 2: 1286441.4480 E, 1133697.3300 N, 3310.550 m s.n.m.

Estos puntos de referencia no solo aportaron exactitud técnica al levantamiento, sino que también fortalecen el análisis espacial al vincular la infraestructura

existente con los elementos naturales de la cuenca. El hecho de haber logrado estas mediciones en condiciones de alta montaña, con fuertes ráfagas de viento y densa neblina, demuestra la rigurosidad del trabajo de campo y el compromiso con la caracterización integral del sistema hídrico de la vereda Ucatá.

Figura 24. Ortofoto Del Vuelo #2

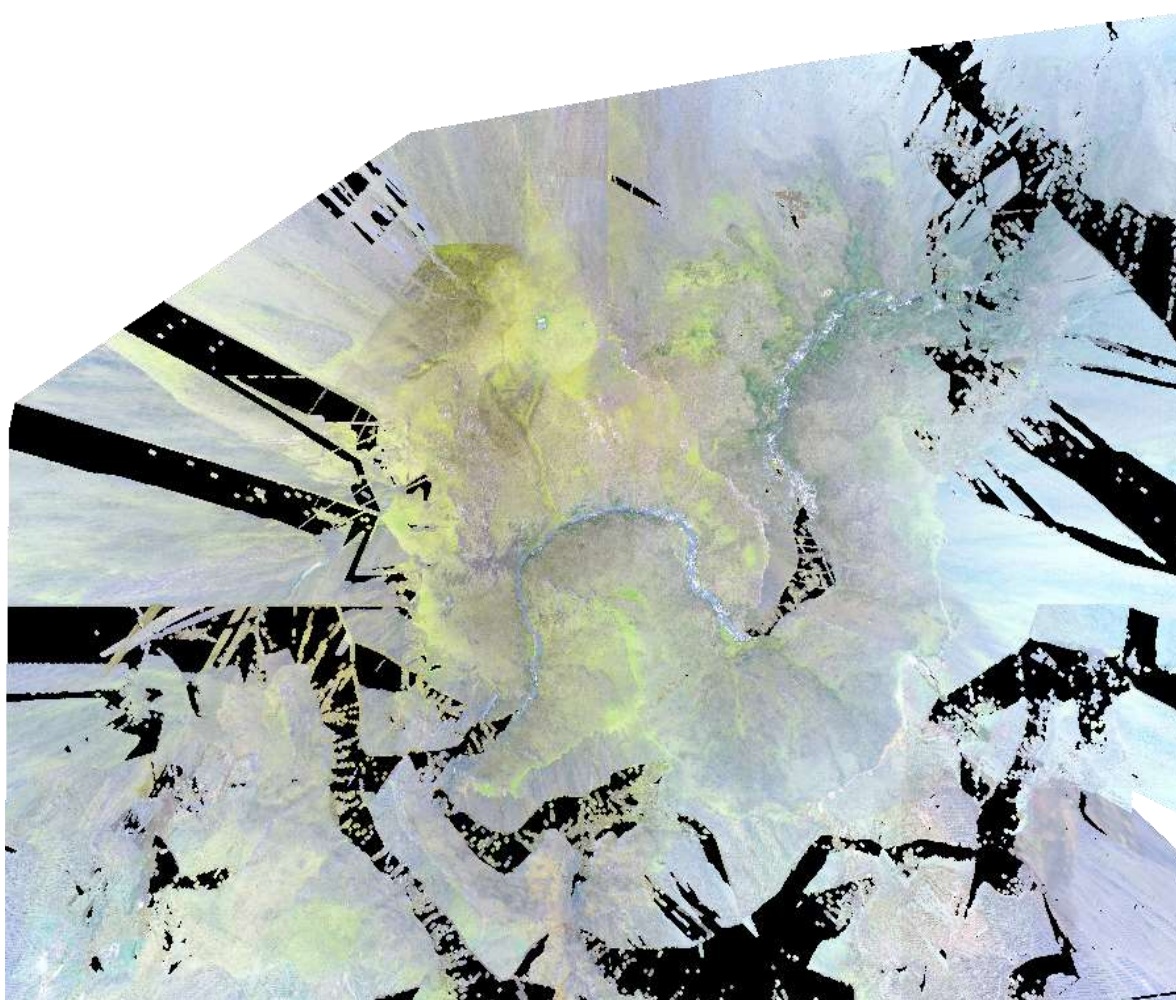


Fuente: Autores (2025).

Esta ortofoto no solo aporta información técnica para el análisis espacial, sino que también da cuenta de lo que implica trabajar en terreno: enfrentar ráfagas de viento que desafían la estabilidad del dron, tomar decisiones rápidas y mantener el

enfoque en medio de condiciones cambiantes. Cada imagen capturada en el Vuelo 2 es el resultado de ese esfuerzo, y ahora se convierte en una fuente de datos que permite interpretar con mayor profundidad la dinámica hídrica y geomorfológica de la microcuenca.

Figura 25. Ortofoto Del Vuelo #3



Fuente: Autores (2025).

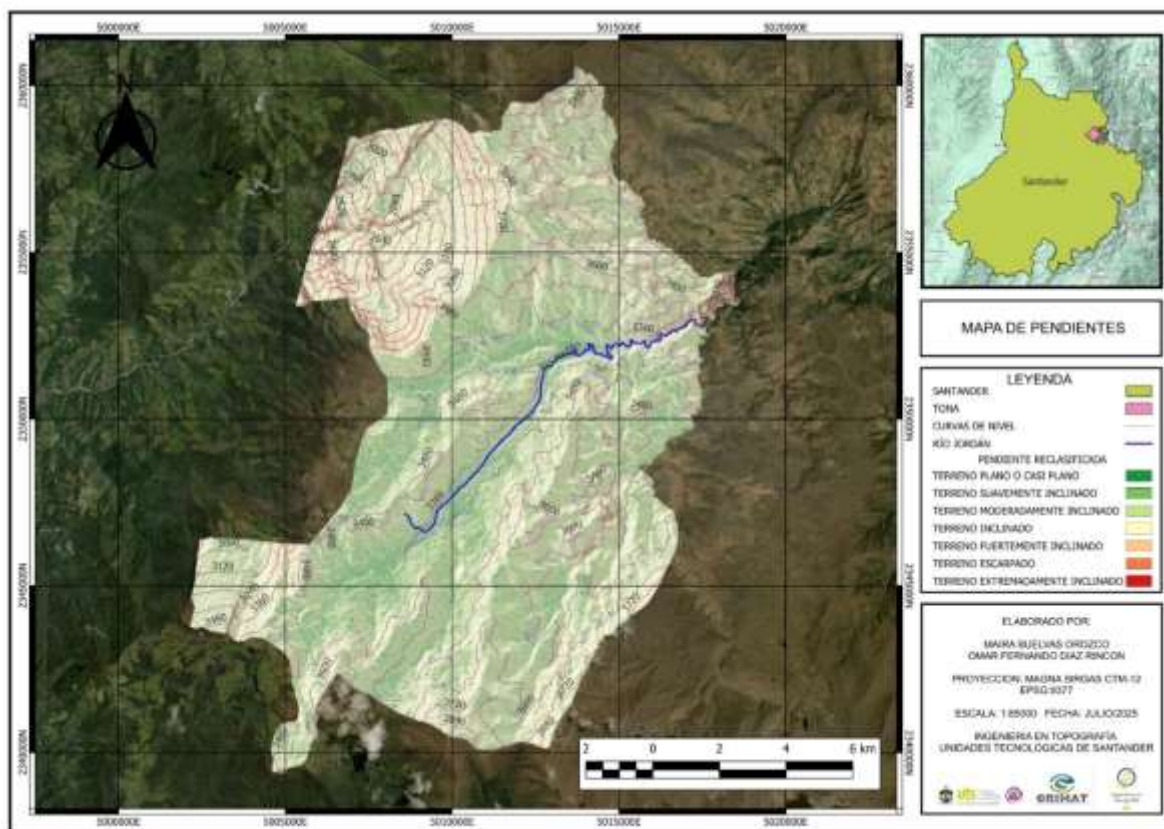
Con la ortofoto del Vuelo 3 se completa el recorrido aéreo planificado para la microcuenca en la vereda Ucata. Cada vuelo desde el primero, marcado por la

exploración inicial del cauce y los fuertes corrientes de aire que se pronunciaban a medida que ascendíamos los msnm, requerían fuertes exigencias para la precisión de ortofotos y la estabilidad del equipo. El segundo, enfrentando ráfagas de viento que exigieron precisión operativa; hasta el tercero, que consolidó la cobertura en zonas de transición topográfica aportó una mirada distinta del territorio.

Pero más allá de las imágenes, lo que se construyó fue una lectura profunda del paisaje, una forma de entender cómo el agua se mueve, se acumula y transforma el relieve en un ecosistema de alta montaña. Cada ortofoto fue posible gracias a la presencia directa en campo, al levantamiento de puntos GNSS bajo condiciones climáticas cambiantes, y a la capacidad de adaptar la tecnología a lo que el terreno exigía.

Este conjunto de vuelos no solo cumple una función técnica dentro del proyecto: representa el vínculo entre observación, experiencia y análisis. Es el insumo que ahora alimenta los modelos SIG, pero también el testimonio de un proceso que se vivió paso a paso, desde el suelo y desde el aire.

Figura 26. Mapa de pendientes



Fuente: Autores (2025).

Con base en la cartografía existente y en los drenajes simplificados proporcionados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), se construyó un modelo preliminar del flujo superficial en la microcuenca del río Jordán, ubicada en el páramo de Berlín. Para este análisis, los autores elaboraron un mapa de pendientes a partir de datos altimétricos, lo que permitió caracterizar la variabilidad topográfica de la zona y entender su influencia en la dinámica hídrica.

El análisis morfométrico evidenció una marcada heterogeneidad en el relieve, con predominancia de pendientes moderadas a fuertes, las cuales favorecen una

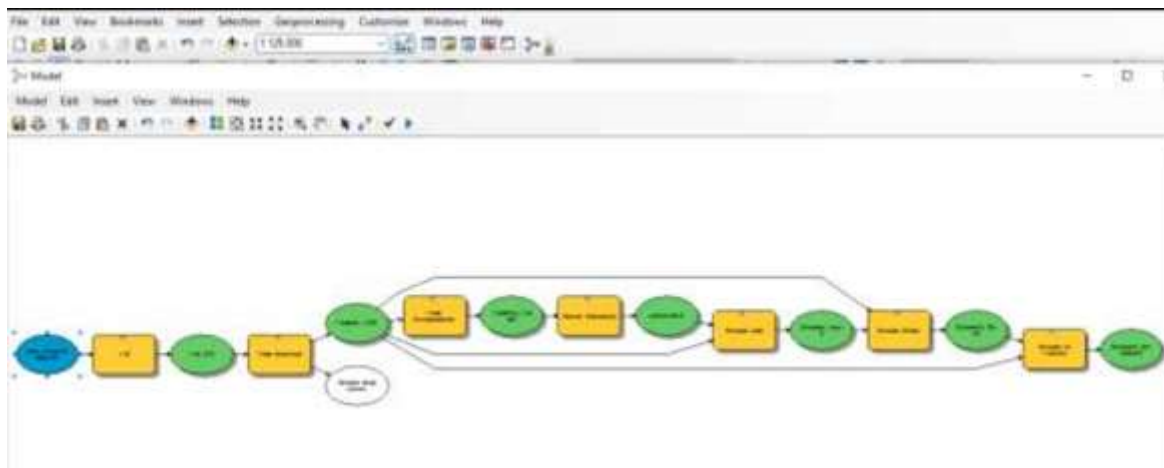
escorrentía superficial acelerada y reducen la capacidad de infiltración en muchas áreas. Estas condiciones intensifican los procesos erosivos y afectan la estabilidad de los suelos, especialmente en sectores intervenidos por actividades humanas o dominados por coberturas vegetales como los pastizales.

Por otro lado, las zonas de menor pendiente y topografía más suave se identificaron como áreas clave para la acumulación y recarga de agua, cumpliendo un rol fundamental en el equilibrio hídrico del sistema. En conjunto, los resultados obtenidos permiten confirmar que la pendiente es un factor determinante en la dinámica geomorfológica e hidrológica de la microcuenca. La combinación del modelo de flujo, los datos geoespaciales disponibles y los drenajes simplificados del IGAC ofrece una base sólida para la gestión integral de los recursos hídricos en este ecosistema de alta montaña.

MODELO DE FLUJOS DE AGUA SUPERFICIAL EN ZONA DE PÁRAMO DEL MUNICIPIO DE TONA- PÁRAMO DE BERLÍN A TRAVÉS DE UN DEM

El modelo se realiza a través de un DEM descargado de Alos Palsar a 12,5 m de resolución espacial y se extrae la zona de estudio que corresponde al área de páramo en el municipio de Tona, Santander. El modelo se obtiene a través de Arcmap 10.8, mediante la herramienta de Model Builder, dando el paso a paso, construyendo así un orden de programación usando Spatial Analyst Tools, Hydrology. Al finalizar la descripción de tareas en orden y enlazar dichas tareas se obtiene como resultado:

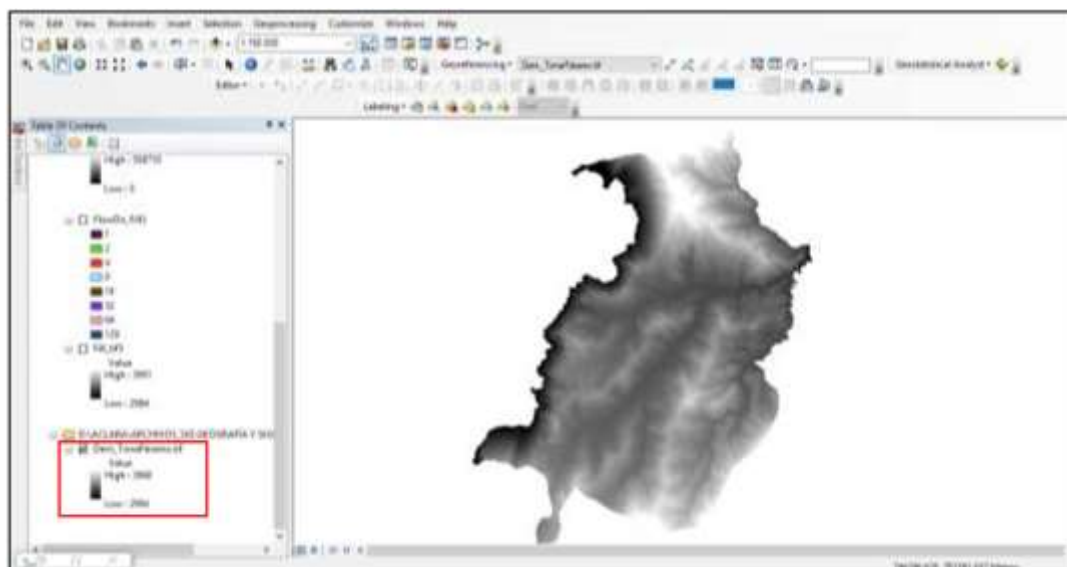
Figura 27. Modelo De Flujos De Agua Superficial A Través De Un Dem



Fuente: Autores (2025).

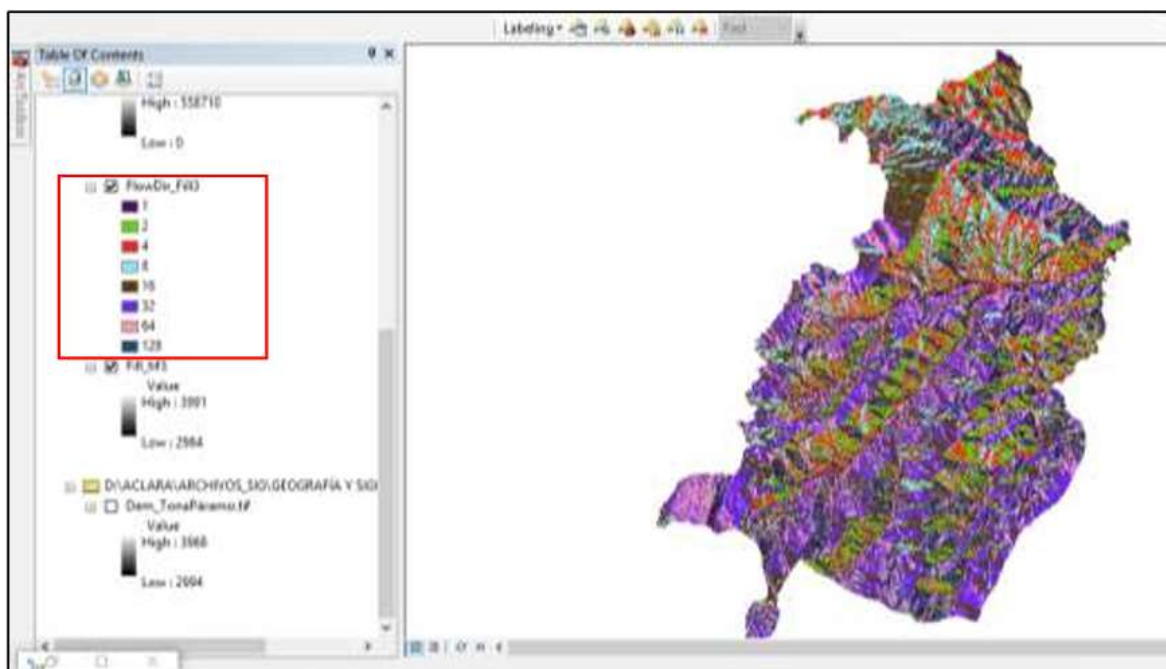
Este orden permite obtener diferentes capas ráster, al final se vectoriza, para poder generar el modelo final de flujos de agua. A continuación, se muestran los resultados de cada paso: En primer lugar, se carga el DEM, para el caso un DEM de Alos Palsar a 12,5 m de resolución espacial, este se extrajo para la zona de estudio: zona páramo del municipio de Tona, que corresponde en gran parte al Páramo de Berlín.

Figura 28. DEM de Alos Palsar a 12,5 m de resolución espacial



Fuente: Autores (2025).

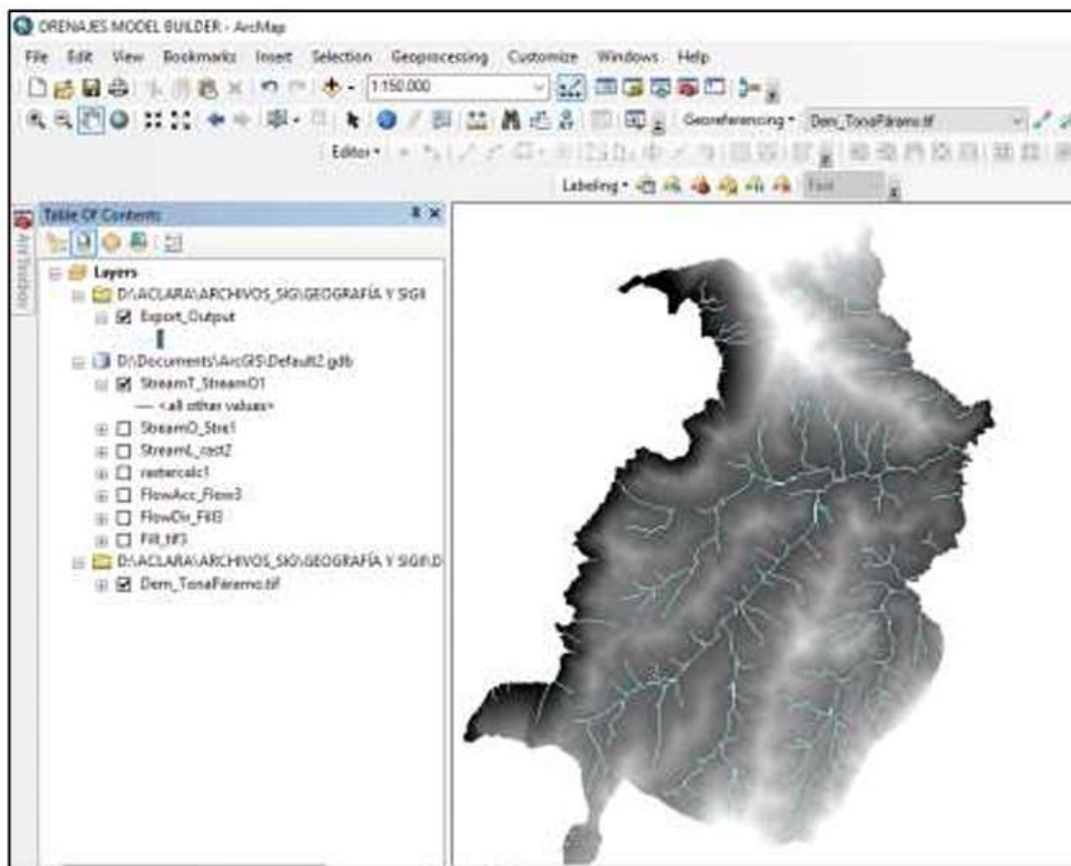
Figura 29. Toma de Gota de Aguan en el Terreno



Fuente: Autores (2025).

Ahora con las herramientas en Spatial Analyst Tools, Hidrology se va generando el paso a paso para la construcción del modelo. Una vez hecha la corrección anterior, se trabaja Flow direction, lo cual permitirá conocer la dirección de una gota de agua, donde se obtiene.

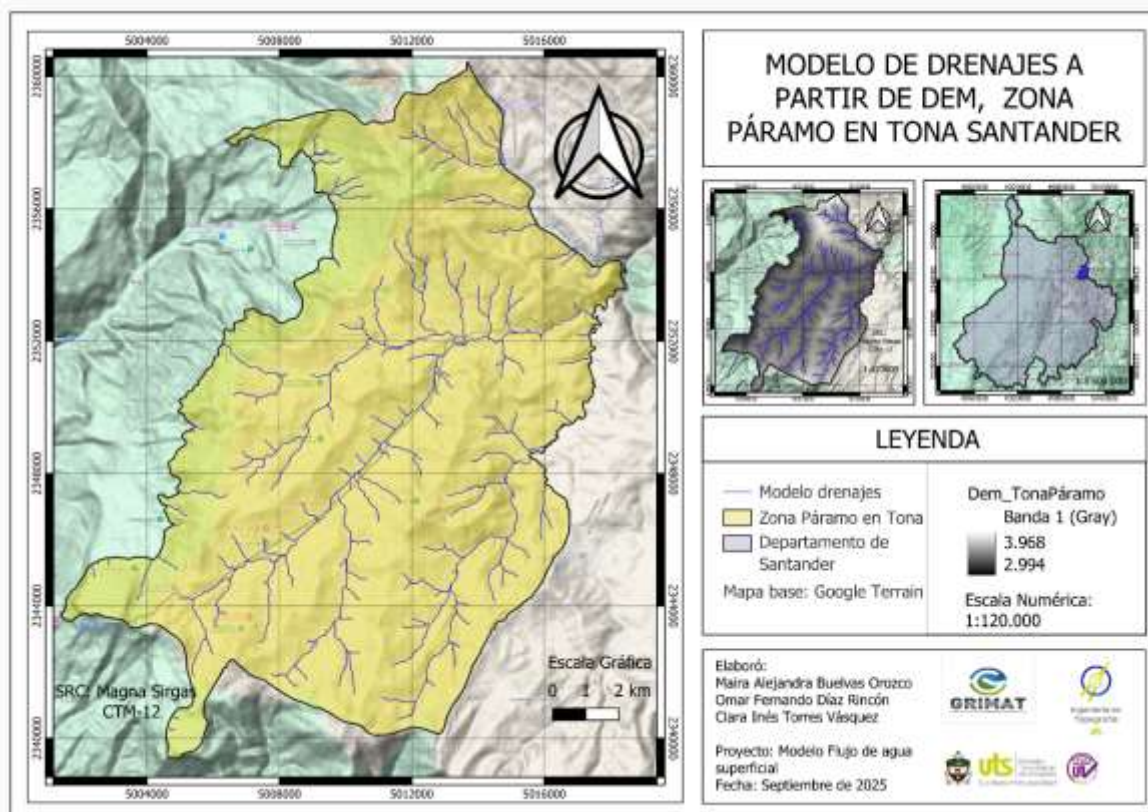
Figura 30. Modelo Ráster a Vectorial



Fuente: Autores (2025).

Finalmente, hay que convertir el formato ráster en vectorial para poder apreciar los drenajes como líneas y poder generar el modelo final. De esta manera se aprecian las sub zonas hidrográficas con todos los drenajes sencillos. Modelo a partir de un DEM con Model Builder en Arc Map 10.8.

Figura 31. Salida Grafica composición Final



Fuente: Autores (2025).

En el análisis del modelo de drenajes se integraron tres fuentes complementarias: el DEM ALOS PALSAR (resolución 12,5 m), el mapa de pendientes construido con información del IGAC y la ortofoto levantada en el vuelo 1. El DEM permitió extraer de forma continua la red de drenaje y las líneas de flujo sobre toda la extensión de la microcuenca, posibilitando una visión regional del comportamiento hidrológico. El mapa de pendientes (IGAC) aportó información morfométrica más generalizada, evidenciando la presencia de tramos con pendientes moderadas a fuertes en las cabeceras y laderas, zonas que favorecen escorrentía rápida y procesos erosivos; en contraste, las áreas de pendiente reducida se identifican claramente como sectores de acumulación y recarga hídrica. Esta relación pendiente–drenaje confirma la importancia de la topografía en la génesis y concentración de los cauces.

La ortofoto del Vuelo 1, producto de nuestro trabajo de campo y ortorrectificado con los puntos GNSS levantados, funcionó como validación a escala: en ella se observaron meandros abandonados, encharcamientos puntuales y trazos de cauce que no siempre son visibles en los productos satelitales de menor resolución. La ortofoto permitió corroborar desplazamientos recientes del cauce y detectar alteraciones antrópicas (áreas de cultivo y pastoreo) que modifican la dinámica superficial del agua.

Como ejemplo concreto de la interpretación integrada, en un tramo del cauce se registró una diferencia de altura de 3 m sobre una distancia horizontal de 652.84 m, lo que corresponde a una pendiente aproximada de 0,46 % ($\approx 0,26^\circ$). Este valor indica un canal de muy baja inclinación, condición típica de sectores de páramo donde la retención y saturación del suelo favorecen la formación de humedales y la existencia de meandros o zonas de encharcamiento; por tanto, la combinación DEM–ortofoto permite distinguir con certidumbre estos procesos.

En síntesis, la convergencia de los tres productos (DEM ALOS PALSAR, mapa de pendientes IGAC y ortofoto de vuelo) ofrece una caracterización robusta de la microcuenca: el DEM delimita y modela la red de drenaje; el mapa de pendientes explica los potenciales de escorrentía y erosión; y la ortofoto valida, a escala local, cambios morfológicos reales (meandros abandonados y modificaciones por uso del suelo). La integración de escalas y métodos (satélite, cartografía oficial y trabajo de campo) es por tanto indispensable para una interpretación fiel de la dinámica hídrica en la vereda Ucatá.

6. CONCLUSIONES

El desarrollo del presente trabajo permitió caracterizar de manera integral la microcuenca del río Jordán en la vereda Ucatá, páramo de Berlín, a partir de la integración de información de campo, vuelos fotogramétricos con dron, modelos digitales de elevación y registros climatológicos. Los resultados evidencian que la dinámica hídrica está fuertemente controlada por la topografía, la cobertura vegetal y la estacionalidad climática.

Se determinó que las áreas con pendientes suaves y climas extremadamente fríos y húmedos funcionan como zonas de recarga y acumulación, favoreciendo la presencia de nacimientos y humedales. Por el contrario, en sectores con pendientes moderadas a fuertes y con coberturas intervenidas, la escorrentía se intensifica, aumentando el riesgo de erosión y afectando la calidad del recurso hídrico.

La incorporación de infraestructura existente, como la represa y la estación meteorológica del IDEAM, junto con la medición de mojones con GNSS de alta precisión, fortaleció la validación de los productos cartográficos y mejoró la confiabilidad del análisis espacial. A su vez, los vuelos con dron generaron ortofotos de alta resolución que permitieron identificar coberturas, usos del suelo y condiciones de presión antrópica, aunque fue necesario reconocer las limitaciones impuestas por las condiciones de viento y neblina propias del páramo.

En conjunto, el trabajo confirma que el páramo de Berlín cumple una función esencial como regulador hídrico, gracias a la interacción entre clima, cobertura vegetal y morfometría. La integración metodológica empleada constituye una herramienta sólida para la gestión y conservación de las microcuencas de alta montaña.

En el desarrollo cartográfico de la zona de estudio, ubicada en la vereda de Ucatá sobre el río Jordán, se evidencia el modelo de drenajes obtenido a partir de un DEM con resolución espacial de 12.5 metros del sensor ALOS PALSAR. Este resultado

se comparó con el mapa de pendientes generado con información del IGAC y con la ortofoto obtenida en campo mediante el vuelo de dron en el primer levantamiento, lo que permitió contrastar tres niveles de detalle: el modelado digital, la cartografía oficial y la validación directa en terreno.

Al analizar el cauce principal, se identificó una diferencia de altura de 3 metros en un tramo con distancia horizontal de 652.84 metros, lo que representa una pendiente del 0,46 %. Este valor confirma que el río presenta un flujo con baja inclinación, propio de las condiciones de los páramos, donde la acumulación de agua favorece procesos de saturación y encharcamiento en zonas planas. La comparación entre la pendiente suavizada del DEM, el mayor nivel de detalle de la ortofoto y la cartografía del IGAC, permite establecer una visión integral de cómo la topografía condiciona el movimiento del agua en la microcuenca, resaltando la importancia de combinar fuentes de información satelital, oficial e in situ para una caracterización más precisa del territorio.

7. RECOMENDACIONES

- Mantener un monitoreo climático e hidrológico constante, aprovechando la estación del IDEAM y complementándolo con mediciones locales de precipitación y caudales.
- Establecer y conservar franjas de protección ribereña en las zonas agrícolas cercanas a los cauces, con el fin de reducir la erosión y proteger la calidad del agua.
- Implementar prácticas de manejo en las pendientes más críticas, como terrazas, zanjas de infiltración y revegetalización con especies nativas, para disminuir la escorrentía y los procesos erosivos.
- Mejorar la planificación de vuelos con dron considerando la estacionalidad climática del páramo: programar vuelos en horas de menor nubosidad, ajustar la altura para compensar la neblina y reforzar la estabilidad mediante patrones de vuelo más cerrados que aumenten el solape de imágenes.
- Incorporar sensores y equipos adecuados para condiciones de alta montaña, como cámaras multiespectrales con filtros de niebla y drones con mayor resistencia al viento, lo que garantizaría productos fotogramétricos de mejor calidad en escenarios de nubosidad y ráfagas.
- Establecer protocolos de seguridad y redundancia durante los vuelos: uso de estaciones base portátiles para mejorar la precisión GNSS, repetición de vuelos en sectores con fallas de cobertura por condiciones climáticas y almacenamiento de registros de cada sesión para asegurar trazabilidad.
- Utilizar los mojones levantados con GNSS como puntos de referencia permanentes para futuras campañas y procesos de ortorrectificación, fortaleciendo la calidad de los productos generados en nuevas misiones aéreas.

- Avanzar en la implementación de modelos hidrológicos de precipitación–escorrentía, calibrados con la información obtenida, para simular escenarios de variabilidad climática y de uso del suelo.
- Diseñar estrategias de conservación específicas para frailejones, pajonales y humedales, priorizando su protección frente a la expansión agrícola.
- Involucrar activamente a la comunidad de la vereda Ucatá en procesos de educación ambiental y gestión del recurso hídrico, fortaleciendo la apropiación social de la conservación del páramo.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcaldía Municipal de Tona. (2003). *Esquema de ordenamiento territorial del municipio de Tona (EOT)*. Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga – CDMB.

Álvarez, M. (2021). *Modelación del comportamiento hidrológico y de la oferta hídrica de la quebrada Santa Elena en el corregimiento de Santa Elena, Medellín* [Tesis de pregrado, Universidad de Antioquia]. Repositorio Institucional Universidad de Antioquia. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/18403>

Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (1998). *Principles of geographical information systems*. Oxford University Press.

Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., ... & Hofstede, R. (2006). *Human impact on the hydrology of the Andean páramos*. *Earth-Science Reviews*, 79(1–2), 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>

CAR – Corporación Autónoma Regional. (2020). *Informe de gestión hídrica regional*. CAR.

Célleri, R., & Feyen, J. (2009). *The hydrology of tropical Andean ecosystems: Importance, knowledge status, and perspectives*. *Mountain Research and Development*, 29(4), 350–355. <https://doi.org/10.1659/mrd.00007>

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.

Congreso de la República de Colombia. (2018). *Ley 1930 de 2018. Por la cual se establecen disposiciones para la gestión integral de los páramos en Colombia.*

Diario Oficial No. 50.666.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=88297>

Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental – Corponor. (2008). *Plan de manejo ambiental del Distrito de Manejo Integrado Páramo de Berlín.*
<https://corponor.gov.co>

García, M., López, J., & Suárez, P. (2021). *Procesos erosivos y escorrentía en ecosistemas de páramo.* Universidad Nacional de Colombia.

IDEAM. (2017). *Estudios hidrológicos en ecosistemas de páramo: Informe técnico nacional.* Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

IDEAM. (2018). *Caracterización hidrográfica de alta montaña.* Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

IDEAM. (2022). *Datos históricos de precipitación y temperatura – Estación Berlín.* Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

IDEAM. (2024). *Estudios climatológicos e hidrológicos de alta montaña en Santander.* Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

IDEAM, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, & Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2013). *Guía técnica para la formulación del plan de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas – POMCA.* IDEAM.

IGAC. (2020). *Cartografía básica y estudios territoriales: Región Andina*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Li, Z., Zhu, Q., & Gold, C. (2005). *Digital terrain modeling: Principles and methodology*. CRC Press.

Maidment, D. R. (2002). *Arc Hydro: GIS for water resources*. ESRI Press.

MADS – Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2020). *Política nacional para la gestión integral del recurso hídrico*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Mesa Sánchez, O. J. (2006). *Hidrología superficial*. Universidad Nacional de Colombia.

Morales, J. (2017). Impacto de las heladas en la vegetación altoandina. *Revista de Ecología Andina*, 12(3), 55–68.

Morales, Y., Cárdenas, A., & Suárez, M. (2013). *Análisis de flujos superficiales en el páramo de Santurbán*. Universidad Industrial de Santander.

Mosquera, G. M., Lazo, P. X., Célleri, R., Wilcox, B. P., & Crespo, P. (2015). *Runoff from tropical alpine grasslands increases with areal extent of wetlands*. *Catena*, 125, 120–128. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.010>

Poveda, G., Álvarez, D., & Rueda, O. (2019). *Variabilidad climática en ecosistemas de páramo de Colombia*. Universidad de Antioquia.

Rodríguez, A., & Carvajal, J. (2021). Erosión hídrica en zonas rurales de alta montaña. *Revista Geográfica Colombiana*, 28(2), 15–29.

Rodríguez, N., & Sarmiento, F. (2020). *Aplicación de SIG y MDE en la caracterización de microcuencas de páramo*. Universidad Nacional de Colombia.

Rojas, H., Pérez, L., & Duarte, F. (2018). *Evaluación de daños por heladas en cultivos andinos*. Corpoica.

Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions of the American Geophysical Union*, 38(6), 913–920. <https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913>

Vázquez, J., Ramírez, P., & Cárdenas, H. (2022). *Modelación hidrológica en microcuencas de páramo con integración de MDE y SIG*. *Revista Colombiana de Geografía*, 31(2), 1–18.

Ward, R. C., & Robinson, M. (2000). *Principles of hydrology* (4th ed.). McGraw-Hill.