

**MODELO DE SEQUÍA EN LA QUEBRADA AGUAS CLARAS EN EL MUNICIPIO
DE SAN BERNARDO CUNDINAMARCA A TRAVÉS DEL PROGRAMA
HIDROLÓGICO SWAT MEDIANTE APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS
DIGITALES UAVS**

**DARLEY STIVEN GUTIERREZ GONZALEZ
COD: 2158720
LAURA HELENA OSORIO ALARCÓN
COD: 2158725**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
INGENIERIA AMBIENTAL
BOGOTA D.C., COLOMBIA
2018**

**MODELO DE SEQUÍA EN LA QUEBRADA AGUAS CLARAS EN EL MUNICIPIO
DE SAN BERNARDO CUNDINAMARCA A TRAVÉS DEL PROGRAMA
HIDROLÓGICO SWAT MEDIANTE APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS
DIGITALES UAVS**

AUTORES:

DARLEY STIVEN GUTIERREZ GONZALEZ

COD: 2158720

LAURA HELENA OSORIO ALARCÓN

COD: 2158725

**PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO(A) AMBIENTAL**

DIRECTOR:

MIGUEL CAÑON RAMOS

INGENIERO AMBIENTAL

MSC(C) EN HIDROSISTEMAS

CO-DIRECTOR:

DARWIN MENA RENTERÍA

INGENIERO AMBIENTAL Y SANITARIO

ESPECIALISTA EN GESTIÓN AMBIENTAL

MAGISTER EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

CO-DIRECTOR EXTERNO:

JOSE JAVIER OLIVEROS ACOSTA

INGENIERO AMBIENTAL

MAGISTER INGENIERIA CIVIL Y RECURSOS HIDRAULICOS

DOCTORADO (C) INGENIERIA

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS

INGENIERIA AMBIENTAL

BOGOTA D.C., COLOMBIA

2018

PÁGINA DE ACEPTACIÓN

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Ciudad y fecha de presentación

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Dedicado a Dios y a nuestros padres, quienes han sido indiscutiblemente la pieza clave de nuestro estudio y nuestro desarrollo como ingenieros.

Agradecidos con nuestro director y amigo Miguel Ángel Cañón Ramos, quien orientó su tiempo y conocimiento para el desarrollo de este proyecto y quien aportó brillantes erudiciones tanto académicas como laborales a nuestro ser, agradecemos de igual manera a José Javier Oliveros Acosta por su acompañamiento en todo este proceso y a los estudiantes quienes aportaron tiempo para el acompañamiento a nuestro proyecto.

Tabla de contenido

RESUMEN.....	11
ABSTRAC.....	12
INTRODUCCIÓN.....	13
1 OBJETIVOS	16
1.1 OBJETIVO GENERAL	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
2 MARCO TEORICO	17
2.1 DATOS METEOROLÓGICOS.	17
2.2 MODELO HIDROLÓGICO.....	18
2.3 ÍNDICE DE SEQUÍA.....	18
2.4 SWAT (SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL).....	19
2.5 TECNOLOGÍAS UAVs	21
2.6 FOTOGRAMETRÍA.....	22
2.7 SENSORES REMOTOS.....	23
2.8 NIVELACIÓN GEOMÉTRICA	24
2.9 SISTEMA DE NAVEGACIÓN GLOBAL POR SATÉLITE (GNSS).....	25
2.10 GPS DOBLE FRECUENCIA	26
2.11 DATOS DE PROCESAMIENTO.....	26
2.11.1 Python.....	26
2.11.2 Método de distancia inversa ponderada (IDW)	27
2.11.3 Pix4D.....	27
2.11.4 Calibración de un modelo hidrológico	28
2.12 HERRAMIENTAS DE CAMPO.....	30
Nivel.....	31
3 METODOLOGÍA.....	32
3.1 FASE 1	34
3.1.1 Recolección y tratamiento de datos climatológicos:.....	34
3.1.2 Recolección de datos topográficos	37
3.1.3 Recolección de datos de uso de suelo.....	41
3.1.4 Recolección de datos de tipo de suelo.....	42
3.2 FASE 2.	42
3.2.1 Procesamiento de imágenes aéreas	42
3.2.2 Delimitación de las sub-cuencas y pre-proceso SWAT.....	45
3.3 FASE 3.	45
3.3.1 Calibración y validación del modelo.....	46
3.3.2 Simulación con un periodo de 5 años	48
3.3.3 Índice de sequia.....	48
4 RESULTADOS.....	49
4.1 FASE 1	49
4.1.1 Recolección y tratamiento de datos climatológicos:.....	49
4.1.2 Recolección de datos topográficos	54
4.1.3 Recolección de datos de uso de suelo.....	60

4.1.4	<i>Recolección de datos de tipo de suelo.....</i>	62
4.2	FASE 2.	64
4.2.1	<i>Procesamiento de imágenes aéreas.....</i>	64
4.2.2	<i>Discretización de la cuenca y pre-proceso SWAT.....</i>	68
4.3	FASE 3.....	71
4.3.1	<i>Calibración y validación del modelo.....</i>	71
4.3.2	<i>Simulación con un periodo de 5 años</i>	74
4.3.3	<i>Índice de sequía.....</i>	75
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	77
5.1	COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE LA OBTENCIÓN DE DATOS TOPOGRÁFICOS	77
5.2	CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS.....	79
5.3	SIMULACIÓN EN UN PERIODO DE 5 AÑOS	81
5.4	ÍNDICE DE SEQUÍA.....	83
5.5	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE HERRAMIENTAS UAVs.....	84
6	IMPACTO SOCIAL	86
7	CONCLUSIONES	87
8	RECOMENDACIONES.....	89
9	BIBLIOGRAFÍA.....	91

Contenido de figuras

Figura 1 Ubicación área de estudio.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 2 Ejemplo Modelos Hidrológicos.....	18
Figura 3. Representación esquemática del ciclo hidrológico SWAT.....	21
Figura 4 Características de diseño del RTK topcon Híper V.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 5 Drone Phantom 3 professional	30
Figura 6 RTK Topcon Híper V.....	30
Figura 7 Mira topográfica.....	30
Figura 8 Nivel Topcon.....	31
Figura 9. Esquema metodológico.	33
Figura 10. Fase 1 metodología.	34
Figura 11. Área estaciones.	35
Figura 12. Esquema de entradas y salidas Estadística Zonal.	36
Figura 13. Esquema para recolección de información topográfica con UAVs.	37
Figura 14. Ejemplo parámetros de vuelo.	39
Figura 15. Punto de control (Pendón).	40
Figura 16 Nivelación Compuesta.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 17. Fase 2, metodología.	42
Figura 18 Ejemplo DSM.....	45
Figura 19. Fase 3, metodología.	46
Figura 20. Mapa estaciones preseleccionadas en la zona de influencia.	50
Figura 21. Número de estaciones consistentes y no consistentes en el análisis de consistencia.	50
Figura 22. Número de estaciones y su porcentaje de datos faltantes para PT_2.	51
Figura 23. Número de estaciones y su porcentaje de datos faltantes para TS_2.	51
Figura 24. Número de estaciones y su porcentaje de datos faltantes para TS_8.	52
Figura 25. Número de estaciones aceptadas en el análisis de completitud	52
Figura 26 Distribución espacial de las estaciones resultantes.....	53
Figura 27. Imagen satelital del área de estudio.	54
Figura 28. Buffer en archivo KML.	55
Figura 29. Definición de misiones de vuelo.	57
Figura 30. Puntos de control.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 31. Ejemplos toma de punto con RTK e información generada y almacenada.....	58
Figura 32. Fotos toma de datos topográficos con UAV en campo.	59
Figura 33. Levantamiento topográfico convencional.	60
Figura 34. (A) Uso de suelo modelo convencional. (B) Uso de suelo modelo UAVs.	61
Figura 35. (A) Tipo de suelo modelo convencional. (B) Tipo de suelo modelo UAVs.	62
Figura 36. Vegetación parte baja de la cuenca de estudio.	63
Figura 37. Imágenes proyecto 1.	65
Figura 38. Ubicación GPS / GCP en las imágenes.....	65
Figura 39. Nube de puntos proyecto 3.....	66
Figura 40. Modelo Digital de Superficie Quebrada Aguas Claras.	67

Figura 41. Mosaico Quebrada Aguas Claras.....	68
Figura 42. A) Subcuencas modelo convencional. B) Subcuencas modelo UAVs.	69
Figura 43. Evolución caudal mensual observado y simulado en el periodo validado modelo USVs.	73
Figura 44. Evolución caudal mensual observado y simulado en el periodo validado, modelo convencional.	74
Figura 45. Simulación modelo convencional y UAVS a un periodo de 5 años.....	74
Figura 46. Índice de sequía modelo convencional.....	76
Figura 47. Índice de sequía modelo UAVs.	76
Figura 48. A) Drenajes modelo convencional. B) Drenajes modelo UAVs.	77
Figura 49. A) Pendientes modelo convencional. B) Pendientes modelo UAVs.	79
Figura 50. Resultados calibración modelo convencional.	80
Figura 51. Resultados calibración modelo UAVs.....	81
Figura 52. Caudales validados y simulados modelo convencional.	81
Figura 53. Caudales validados y simulados modelo UAVs.	82
Figura 54. Índice de sequía modelo convencional y modelo UAVs.	83

Contenido de tablas

Tabla 1. Equipos utilizados en campo.....	31
Tabla 2. Libreta topográfica de campo.....	41
Tabla 3 Parámetros seleccionados para la calibración del modelo	47
Tabla 4. Características imágenes satelitales.	55
Tabla 5. Parámetros plan de vuelo.....	56
Tabla 6. Datos topográficos registrados en la libreta de campo.....	60
Tabla 7. Número de imágenes tomadas por proyecto.....	64
<i>Tabla 8. Principales parámetros modelo convencional.</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 9. Principales parámetros modelo UAVs.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 10. Parámetros más sensibles que afectan los valores del modelo SWAT</i>	<i>71</i>
Tabla 11. Ajuste final parámetros del modelo convencional y UAVs.	72
Tabla 12. Rangos índices de sequía SFFI.....	75
Tabla 13. Tipo de pendientes.....	78

Contenido de ecuaciones

Ecuación 1 Índice normalizado de los caudales fluviales.....	19
Ecuación 2 Equilibrio de agua.....	20
Ecuación 3 Interpolación IDW.....	27
Ecuación 4 Pesos asignados a cada punto vecino.....	27
Ecuación 5 Métrica ME.....	29
Ecuación 6 Métrica RMSE	29
Ecuación 7 Métrica MAE	29

RESUMEN.

En el presente proyecto se realizó una modelación y simulación de sequías mediante la herramienta de evaluación del suelo y agua en una cuenca hidrográfica (SWAT), para la quebrada Aguas Claras ubicada en el municipio de San Bernardo, Cundinamarca, teniendo en cuenta que esta quebrada ha presentado disminuciones en sus caudales, produciendo sequías en esta zona, provocando serias afectaciones a la población de este municipio.

Para la elaboración de dicho modelo se realizó una recolección de datos de carácter climático, topográfico y otras características complementarias de la zona. La información topográfica se elaboró con sistemas Aéreos No Tripulados más conocidos como drones y también por el método convencional. Luego de la obtención de estos datos se realizó una verificación de la información y se aplicó tratamientos necesarios con el fin de realizar el modelo, a su vez, este fue calibrado con datos reales tomados en campo, con el fin de realizar una simulación del comportamiento de la sequía para esta zona en un periodo de 5 años.

Esta investigación también se realizó un análisis detallado de la implementación de un modelo de sequía a partir de dos diferentes metodologías de levantamiento de información topográfica, lo cual permitió hacer un análisis del comportamiento de la quebrada, con las cuales se pretende brindar una fuente de información valiosa para la toma de decisiones acertadas y oportunas, evitando impactos socioeconómicos y ambientales en este Municipio.

Con los resultados obtenidos se determinó que se pueden presentar sequias en el área de estudio que, aunque no sean severas son de importancia analizar y monitorear, como también, se pudo observar que el modelo de sequía implementando vehículos aéreos no tripulados (UAVs) arrojó un buen desempeño tanto en calibración como en validación, por tanto, la implementación de este tipo de herramientas en modelos hidrológicos puede ayudar a mejorar las simulaciones, así, este modelo puede contribuir al estudio de sequias en la región del Sumapaz aportando una nueva herramienta de planificación y gestión del recurso hídrico.

ABSTRAC

The following project is indeed to make a modeling and simulation was carried out using the water and soil evaluation tool in a watershed (SWAT), of the Aguas Claras brook located in the municipality of San Bernardo, Cundinamarca, due to a notorious decrease in its flows, leading to droughts in the area inducing serious affectations to the people who live in this municipality.

The process to elaborate the model implies the collection of data including climatic, topographic and another characteristics of the area. The topographic information was obtained through non aerial manned systems better known as drones and using the conventional methods too. After obtaining all data, is necessary to verify the information and, if it's the case, to debug information prior to make the modeling, which is calibrated with real data in order to simulate the behavior of droughts in this area over a period of five years.

In This investigation also carried a detailed analysis of the implementation of a drought model from two different methods for study topographic information, which allowed an analysis of the behavior of the brook, with which it is intended to provide a source of information valuable for making the right and timely decisions, avoiding socio-economic and environmental issues in this Municipality.

With the results it is determined that the drought that can be presented in the study area, although there is no severity, they are important to analyze and monitor, as well as, you can see that the drought modelling of the unmanned vehicles (UAV) I show a good performance both in the calibration and in the validation, therefore, the implementation of this type of tools in the hydrological models can help to get better the simulations, so, this model can contribute out a study of the droughts in the Sumapaz region providing a new tool for planning and management of water resources.

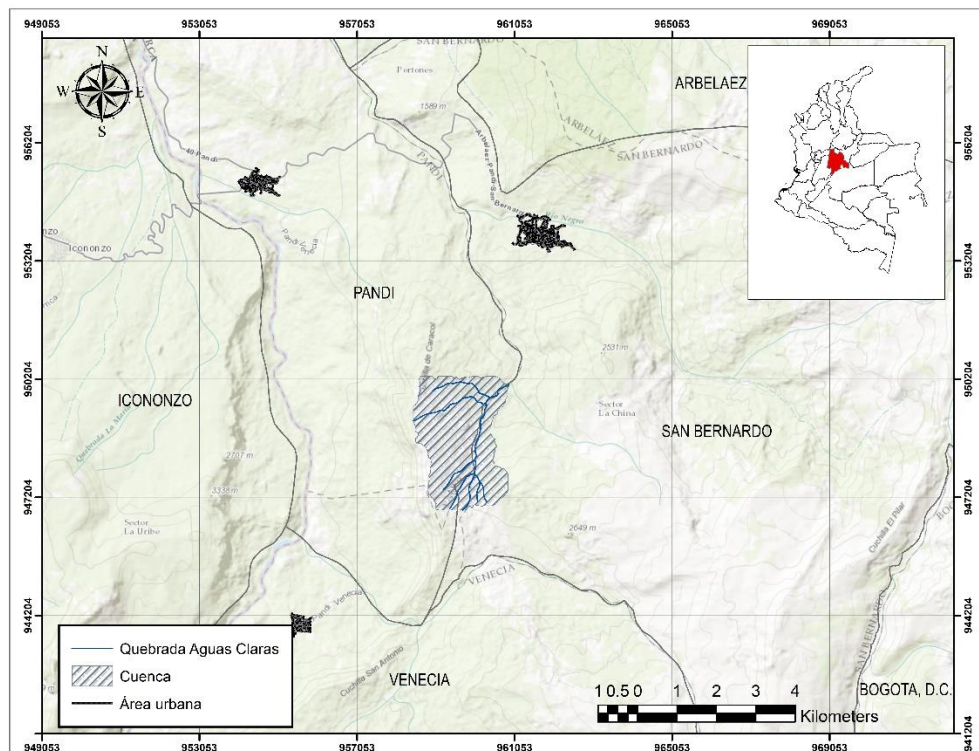
INTRODUCCIÓN

A nivel mundial se han realizado diferentes modelos para caracterizar las sequías, puesto que son un riesgo climático que se puede presentar en cualquier sitio, cuya intensidad y frecuencia de ocurrencia depende de cada región, en Europa se ha utilizado el índice de precipitación estandarizado (SPI) el cual es calculado con base a la precipitación y a partir de la acumulación registrada de cada valor obtenido para cada mes y normalizados a una distribución se ha determinado el tipo de sequía [1]. En los llanos de Venezuela se ha empleado un modelo para predicción de sequías meteorológicas empleando el índice SPI caracterizando las sequías en normal, seco y muy seco [2], en Colombia este fenómeno ha sido determinado para las diferentes regiones del país por el instituto de meteorología y estudios ambientales (IDEAM) a través de índice de sequía SPI.

Sin embargo, estos índices de sequía estandarizados se han utilizado debido a su simplicidad y flexibilidad para comparar la desviación de las condiciones normales en una escala de tiempo, pero no están adecuados para analizarlos bajo condiciones de cambio climático ya que asumen una estacionalidad para ciertos parámetros climáticos.

Por esta razón en esta investigación se propone un modelo desarrollado a partir del programa SWAT (Soil and Water Assesment Tool), modelo continuo, semidistribuido, el cual funciona en un intervalo de tiempo diario y con simulaciones continuas durante períodos de tiempo largos a escala de cuenca hidrográfica, donde se permite conocer la dinámica hídrica de las diferentes cuencas bajo escenarios actuales y futuros, puesto que permite realizar diferentes análisis necesarios en la planificación referente al cambio de uso del suelo y dinámica poblacional.

Este estudio se situó en el municipio de San Bernardo, Cundinamarca, (Figura 1), ubicado al Sur - oriente del Departamento de Cundinamarca en la Provincia del Sumapaz a una altitud de 1600 msnm, limitando por el Norte con el Municipio de Arbeláez, por el Oriente con Bogotá D. C., por el Sur con el Municipio de Venecia y el municipio de Cabrera, y por el Occidente con el Municipio de Pandi. Su temperatura promedio es de 20°C, donde el 99.79% del área total del municipio es área rural con el 73% del total de la población ubicado en estas zonas, su economía está conformado por las actividades agrícolas, ganaderas, pecuarias y producción forestal [3].



*Figura 1. Ubicación área de estudio
Fuente. Autores.*

La investigación se centró en la quebrada Aguas Claras, una de las fuentes hídricas más importante para el municipio, pues de esta surge parte del abastecimiento para la PTAP (Planta de Tratamiento de Agua Potable) de la cabecera municipal y fuente de abastecimiento de los diferentes cultivos que se ubican en su área de influencia.

Sin embargo, esta quebrada al pasar del tiempo ha presentado disminuciones en sus caudales, generando momentos de estiaje y con ello problemáticas para el desarrollo de sus actividades agroeconómicas sin dar tiempo a una posible adaptación frente a este tipo de eventos, provocando impactos económicos en el sector agrícola como; disminución de los ingresos, reducción de la productividad, mayor propagación e incidencia de las plagas sobre los cultivos y aumento del riesgo de incendios, como también problemas de abastecimiento de agua; disminución de la capacidad para abastecer a toda la población, generando posibles racionamientos e impactos sociales significativos en la población [4].

Es así y dado la necesidad de sus recursos hídricos se generó mecanismos e instrumentos dentro de la gestión de la cuenca que ayudara con la conservación de sus fuentes hídricas. Pensando que el sistema hídrico es la interacción total entre el medio humano y el medio ambiente, el municipio ha planteado y concertado

zonas protectoras boscosas, jurisdicciones de riego y conductos regionales a fin de prometer el aprovechamiento óptimo de sus fuentes hídricas [5].

Sin embargo, a fin de evaluar el comportamiento de la quebrada y el porqué de las disminuciones desmesuradas de su caudal, se propone un modelo de sequía que no solo permita deducir su escasez sino, que a su vez pueda predecir sequias futuras para la prevención y alerta temprana hacia la población, donde se integren datos obtenidos a partir de información con tecnologías UAV'S (Unmanned Aerial Vehicle) o también conocidos como drones e información convencional, el cual no solo pueda determinar las variaciones de sus caudales sino permita comparar la aplicabilidad entre métodos de recolección de información, con el fin de obtener la mayor precisión posible para el modelo y así las autoridades competentes puedan tomar decisiones oportunas puesto que, hasta la fecha la empresa ADUSAP (asociación de usuarios de servicios de agua potable), no maneja planificación de la corriente, antecedentes de regulación de caudales o estudio de la Quebrada debido a la falta de recurso invertido para estudios de la naturaleza, especialmente en la gestión del recurso hídrico.

1 Objetivos

1.1 Objetivo general

- Proponer un modelo de sequía para la Quebrada Aguas Claras con levantamiento de información a partir de herramientas UAVS

1.2 Objetivos específicos

- Determinar datos topográficos de la Quebrada Aguas Claras a través de herramientas UAVs.
- Analizar la correlación existente entre datos topográficos aplicando herramientas UAVs y levantamiento de información tradicional.
- Simular el comportamiento de sequía mediante la aplicación del modelo hidrológico SWAT en la Quebrada Aguas Claras para un periodo de 5 años.

2 MARCO TEORICO

En diferentes partes del mundo el área de tierra clasificada como muy seca se ha duplicado probablemente desde los años setenta, previendo un aumento en interiores continentales, sub-trópicos, latitudes bajas y medias en años posteriores [6]. En Colombia, la región andina ha sido más azotada por deficiencias de lluvias que por sus excesos y en promedio una vez de cada 5 años es posible esperar una sequía que cubra más del 50% del territorio [7]. A su vez, esta región representa el 23,21% de las zonas secas del país, con un área de 379 km² con desertificación y un nivel de afectación de 5,1 %, sin embargo, San Bernardo, Cundinamarca, siendo el área de estudio, cuenta con tan solo 2 km² de área con desertificación, representando el 0,7% del área total del municipio, siendo el tercer municipio con el menor nivel de desertificación del departamento [8].

Sin embargo, este municipio perteneciente a la Provincia de Sumapaz tiene ciertas particularidades en cuanto a temas hídricos, debido a sus largas temporadas de lluvias las cuales son generadas gracias a que este municipio se encuentra en zona de Paramo. Así pues, su agricultura se ve altamente beneficiada y sus pobladores cercanos han generado un desarrollo y sustento basados en dicha actividad agrícola, pero las fuentes hídricas de este lugar se están viendo amenazadas por el cambio climático [9] y hasta por los mismos propietarios de los predios aledaños, por su falta de conciencia hacia la actividad agrícola desmesurada provocando así diversos contaminantes e impactos al recurso hídrico [10].

La quebrada Aguas Claras ubicada entre las veredas Santa Rita, Buenos Aires, Pirineos es una de las fuentes hídricas que más afecciones ha presentado, no solo al recurso hídrico si no, a la población como tal, [11]. San Bernardo, en medida ante dicho problema ha buscado soluciones con su EOT (Esquema de Ordenamiento Territorial) donde establece en el artículo 9- “- De las parcelaciones Rurales con fines de construcción de vivienda campestre” – haciendo alusión que no se deben construir más de 10 casas por hectárea, todo esto en pro a la potencialidad de los recursos naturales y especialmente en el recurso hídrico [12]; Así mismo; en el Acuerdo No. 017 del 2000 donde adopta dicho esquema y ratifica las decisiones frente a la construcción de viviendas, sin embargo, no se han elaborado modelos hidrológicos de ninguna índole ni estudios pertinentes respecto al comportamiento hídrico bajo escenarios actuales o futuros.

2.1 Datos meteorológicos.

Los datos meteorológicos para Colombia son otorgados por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales quienes cuentan con un catálogo

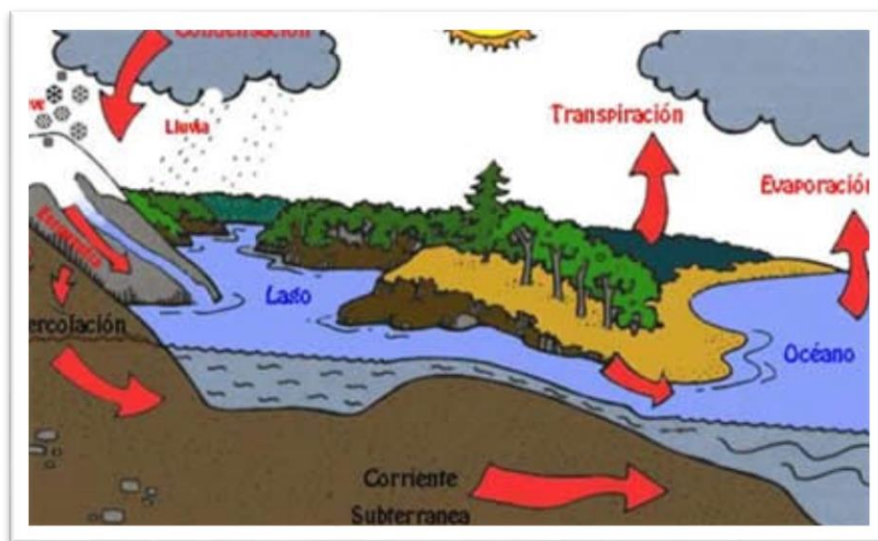
de todas las estaciones meteorológicas encontradas [13], dichas estaciones presentan información sobre radiación solar, temperatura, precipitación, humedad, velocidad del viento y algunas tienen datos de caudales. Estas estaciones también operan en red y pueden otorgar datos de hora y fecha de la medición [14].

Muchas estaciones en diferentes lugares no se encuentran operando debido a fallas técnicas en sus equipos o falta de mantenimiento a toda la estación en general.

2.2 Modelo Hidrológico.

Los modelos hidrológicos son apropiados para estimar el estado del agua y con estos se pueden desarrollar predicciones para futuras inundaciones o sequías, todo esto basado en los cambios naturales que podría presentar un cauce o cambios del recurso hídrico [15], permitiendo entender la respuesta hidrológica que puede presentar una determinada cuenca [16].

Así, pues el IDEAM delimita el modelo hidrológico como un reflejo sencillo y entendible basado en un sistema real y complejo, ya sea en forma física o matemática. La salida de los modelos hidrológicos depende en gran medida de lo requerido o del alcance del modelo y el resultado más frecuente es el hidrograma de escurrimiento [17]



*Figura 2 Ejemplo Modelos Hidrológicos
Fuente. [17]*

2.3 Índice de sequía

La sequía como una condición de insuficiencia de la cantidad de recursos hídricos, causados por un déficit de precipitaciones e insuficiencia de agua en el suelo en un determinado periodo de tiempo, sin lugar a duda es uno de los factores determinantes del desarrollo humano, por tanto, una baja disponibilidad del recurso hídrico no solo afecta hábitats naturales y ecosistemas sino muchos sectores económicos y sociales en una determinada región. [18]

Como consecuencia de esta preocupación la ONU preparó y adoptó en junio 17 de 1994, la Convención de las Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación en Países Afectados por Sequía Grave o Desertificación y aunque Colombia ocupa el cuarto lugar en el mundo en riqueza hídrica, después de Rusia, Canadá y Brasil, no es extraño hablar de sequía, tema por desarrollarse a falta de información e investigación relacionada con este fenómeno. [19] [20]

Por esta razón es importante implementar una estrategia para la detección y seguimiento de las sequías hidrológicas, anticipando los riesgos que se pueden derivar de este fenómeno con el fin de desarrollar estrategias de planificación y mitigación de sus efectos.

De esta mera hay métodos que presentan o permiten realizar una evaluación de la sequía y estos se les conoce como índices, los cuales tiene diferentes características para ser evaluados o toman diferentes datos; tales como la precipitación, la aridez, la escorrentía o el caudal. De estos métodos el más común y usado en cuanto a parámetros de entrada de caudal es:

Índice normalizado de los caudales fluviales (SSFI); este puede ser desarrollado a partir de datos diarios o mensuales de caudales y se puede calcular ya sea con datos observados o con datos de predicciones [21]

$$SSFI_t = \frac{F_{vt} - \bar{F}_t}{\sigma_t}$$

Ecuación 1 índice normalizado de los caudales fluviales
Fuente [22]

Donde F es el caudal en el intervalo de tiempo i , $\bar{F}$ es la media de la serie y σ es la desviación estándar de las series.

2.4 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)

SWAT es una herramienta de evaluación del suelo y agua para una cuenca hidrográfica; este modelo fue desarrollado para cuantificar y predecir los impactos de las prácticas de manejo de la tierra en el agua, los sedimentos y los rendimientos químicos agrícolas en grandes cuencas hidrográficas complejas con suelos, usos del suelo y condiciones de manejo variables durante largos períodos de tiempo; fue Desarrollado por Dr. Jeff Arnold para el Servicio Agrícola de investigación de los Estado Unidos (USDA) [23].

La simulación del programa se realiza a nivel de cuenca que a su vez es dividida en dos partes: Fase terrestre donde se determina la cantidad de cargas (agua, sedimentos y nutrientes) y una fase de enrutamiento donde se simula el modelo [24]. Los principales componentes del modelo incluyen clima (precipitación, temperatura, velocidad del viento, humedad relativa y radiación solar), hidrología (Caudales), propiedades del suelo, crecimiento de la planta y manejo de la tierra [25].

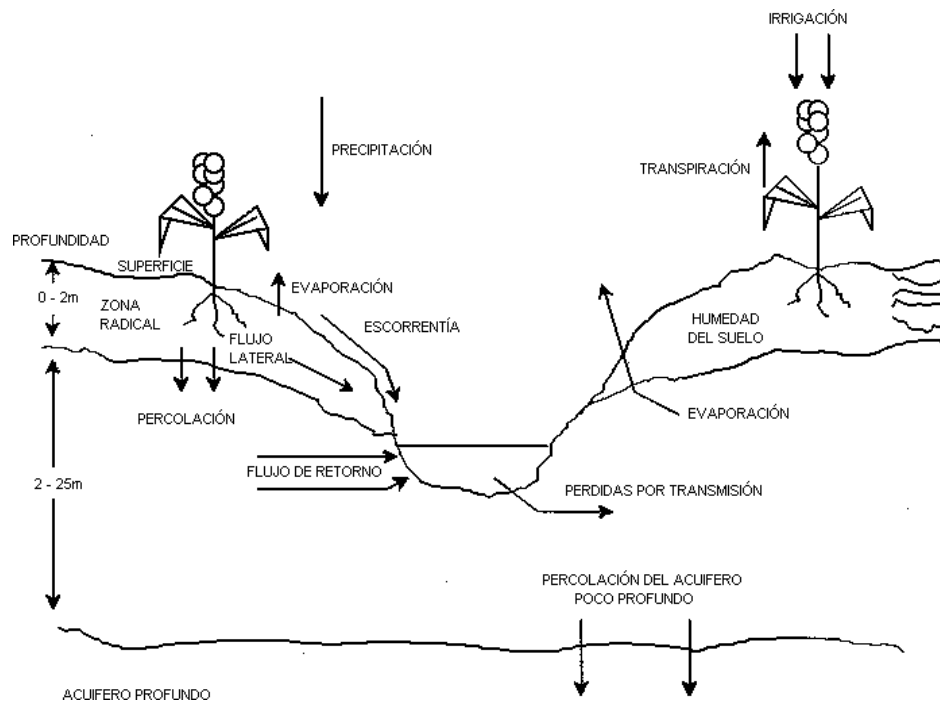
El ciclo hidrológico es simulado por SWAT como se muestra en la Figura 3 y se basa en la ecuación del equilibrio de agua:

$$SW_t = SW_0 + \Sigma(R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

Ecuación 2 Equilibrio de agua

Fuente: [26]

Dónde SW_t es el contenido final de agua en el suelo (mm H₂O), SW_0 es el contenido inicial de agua del suelo en un día i (mm H₂O), t es el tiempo (días), R_{day} es la cantidad de precipitación en un día i (mm H₂O), Q_{surf} es la cantidad de escorrentía de la superficie en un día i (mm H₂O), E_a es la cantidad de evapotranspiración en día i (mm H₂O), W_{seep} es la cantidad de agua que percola en el perfil del suelo en un día i (mm H₂O), y Q_{gw} es la cantidad de flujo de retorno en un día i (mm H₂O).



*Figura 3. Representación esquemática del ciclo hidrológico SWAT.
Fuente [26]*

En esta investigación se realizó con la interfaz ArcSWAT con la versión 2012.10_3.19 que se incorpora como una extensión al software ArcGIS, ya que este permite un mejor nivel de detalle espacial, en cuanto a la capacidad de simular distintos escenarios de crecimiento de cultivos y manejo de la tierra, así como su capacidad de simular largos periodos que permiten ver el impacto de diferentes procesos (por ejemplo sequías) sobre la cuenca [27].

2.5 Tecnologías UAVs

La Tecnologías UAVs se entiende como vehículos motorizados deshabitados y reutilizables, pueden ser semiautónomos, autónomos o simplemente una combinación de estos, los semiautónomos son controlados remotamente, definiendo tareas específicas a realizar dependiendo de su capacidad; [28] Dicha definición permite clasificarlos de acuerdo con sus características de rendimiento; peso, ala, carga de ala, rango, altitud máxima, velocidad, resistencia y costos de producción [29], sin embargo, los tipos de sensores que emplean para realizar la toma de ortofotos pueden variar, ya que, se pueden encontrar sistemas de imágenes hiper-espectrales, LIDARs, cámaras térmicas y multiespectrales así como cámaras comerciales RGB, siendo las imágenes multiespectrales las más utilizadas en el campo de la investigación científica por su economía y por la cantidad de

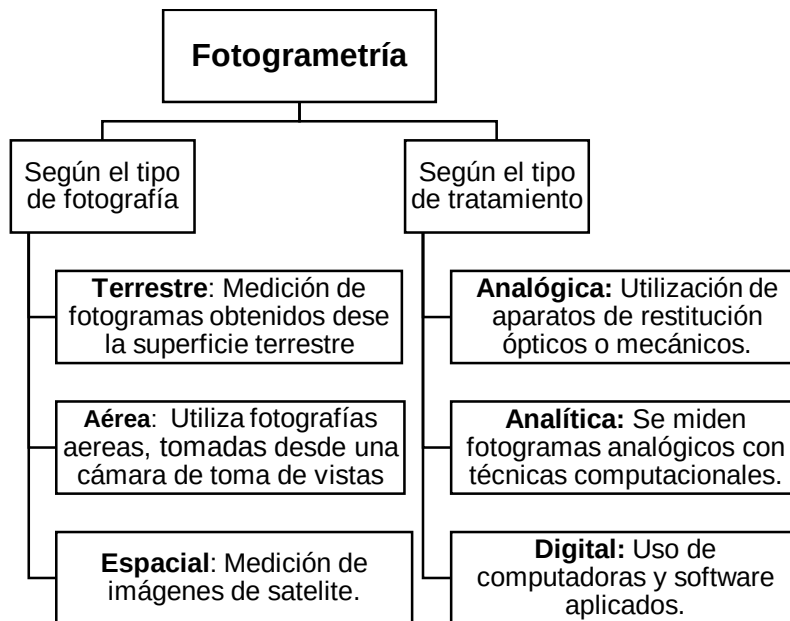
atributos que se pueden recolectar, puesto que, permite medir la irradiancia en varias bandas espectrales [30].

En esta investigación se empleó un dron Phantom 3 profesional el cual cuenta con motores sin escobilla los cuales permiten un mayor recorrido en menor distancia por su velocidad [31], baterías inteligentes de 15,2 voltios, lo que permite una duración aproximadamente de 25 minutos, esto dependiendo el zona de estudio, cámara de 12,6 pixeles totales y un peso de 1280 gramos incluyendo baterías [32]. Dichas características permiten obtener imágenes con una resolución adecuada para desarrollar fotogrametría.

2.6 Fotogrametría

La fotogrametría es la técnica que tiene como objetivo estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera utilizando esencialmente medidas hechas sobre una o varias fotografías, por ende, formula modelos 3D a partir de fotografías 2D. Esta es una técnica de medición indirecta, puesto que las mediciones no se realizan sobre el objeto, sino sobre imágenes del mismo, lo cual la convierte en una forma de análisis muy económica y efectiva [33].

Este método se basa en la obtención de dos fotografías áreas verticales sucesivas, las cuales toman un punto común del terreno y a partir de la restitución de lo haces de proyección es posible obtener las coordenadas del punto en ambas fotografías a partir de un eje de referencia relativo y de esta manera obtener semejanzas geométricas entre las dos imágenes, para esto las imágenes digitales son ingresadas a la computadora y el operador puede identificar con buena precisión los puntos homólogos o bien la computadora realiza estas operaciones por comparación de imágenes; finalmente el resultado es una imagen en formato raster o vectorial [34].



*Figura 4. Clasificación de la fotogrametría.
Fuente: Autores.*

Como ventajas básicas de la fotogrametría sobre otros sistemas de captura de información se pueden señalar los siguientes [35]:

- Se obtienen representaciones completas de los objetos (información objetiva).
- El registro es instantáneo.
- Se utilizan materiales relativamente económicos y de fácil manipulación y conservación.
- Existe la posibilidad de tratar objetos en movimiento.
- El proceso de captura de la información y el posterior de medida no perturba el objeto a estudiar.
- Proporciona grandes rendimientos.

2.7 SENSORES REMOTOS

Sistemas de detección y medida a distancia, generalmente empleados desde aeronaves o satélites, capaces de observar, medir o detectar un cambio de las propiedades físicas de la superficie terrestre sin estar en contacto directo con la misma, por ende, miden la energía del sol reflejada y la energía emitida con los que se obtiene información meteorológica, oceanográfica, sobre la cubierta vegetal, etc. [36]

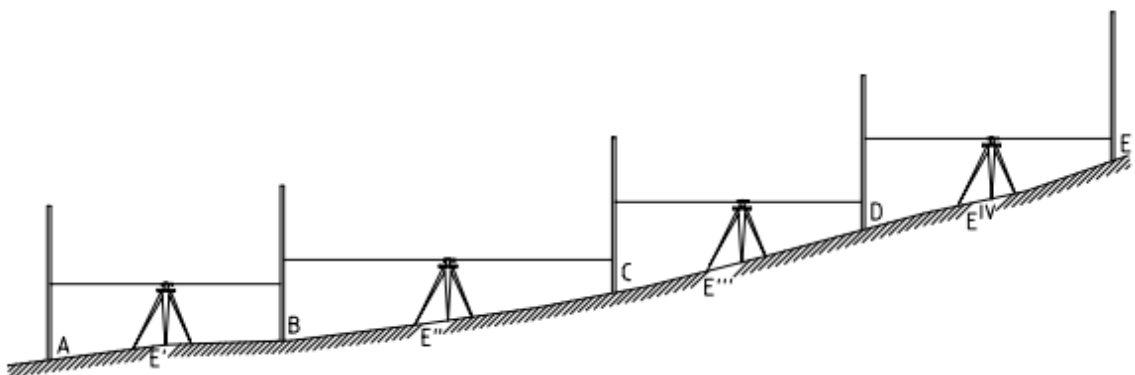
Estos sensores se clasifican de acuerdo con la forma de recibir la energía procedente de las cubiertas. En este sentido se cuenta con dos tipos de sensores [37]:

- **Activos:** Este sensor es capaz de emitir su propio haz de energía, que posteriormente recoge tras su reflexión sobre la superficie que pretende observar. El equipo más común es el radar, éste trabaja en la región de las microondas y su importancia radica en que no es afectado por las condiciones climáticas.
- **Pasivos:** Estos se limitan a recoger la energía electromagnética procedente de las cubiertas terrestres ya sea ésta reflejada de los rayos solares, o emitida en virtud de su propia temperatura.

2.8 Nivelación geométrica

Procedimiento mediante el cual se determinan las diferencias de nivel entre puntos, por medio de la medición o lectura de distancias verticales de forma directa, su objetivo es determinar las cotas o alturas de cada uno de los puntos referenciados como base, o necesarios, para el desarrollo de un proyecto [38]. Las clases de nivelación geométrica son:

- **Nivelación simple:** En este tipo de nivelación se utiliza una sola posición del nivel desde donde se debe observar la mira ubicada en cada punto a nivelar, por ende, este método es aplicable para terrenos pequeños con una topografía suave.
- **Nivelación compuesta:** Método por el que se obtiene el desnivel entre dos puntos encadenando el método de nivelación simple de punto medio como se evidencia en la Figura 5.



*Figura 5. Nivelación Compuesta.
Fuente. [39]*

2.9 Sistema de navegación global por satélite (GNSS)

Se refiere a una constelación de satélites que proporcionan señales desde el espacio que transmiten datos de posicionamiento y temporización a los receptores GNSS. Los receptores luego usan estos datos para determinar la ubicación. Estos a su vez se dividen en tres segmentos distintos [40]:

- Segmento espacial: Compuesto por los satélites que forman el sistema, tanto de navegación como de comunicación. Mientras que los primeros orbitan alrededor de la Tierra, repartidos en distintos planos orbitales, los segundos son los que forman los llamados sistemas de aumento que sirven para la corrección de errores de posicionamiento
- Segmento de control: Formado por el conjunto de estaciones en tierra que recogen los datos de los satélites, donde su función es aplicar correcciones de posición orbital y temporal a los satélites.
- Segmento de usuarios: Formado por los equipos GNSS que reciben las señales que proceden del segmento espacial. Este segmento ha evolucionado desde sus principios, donde un receptor era capaz de captar la señal de cuatro o cinco satélites, hasta la actualidad que tienen hasta doce o veinte canales, lo que permite un mejor posicionamiento.

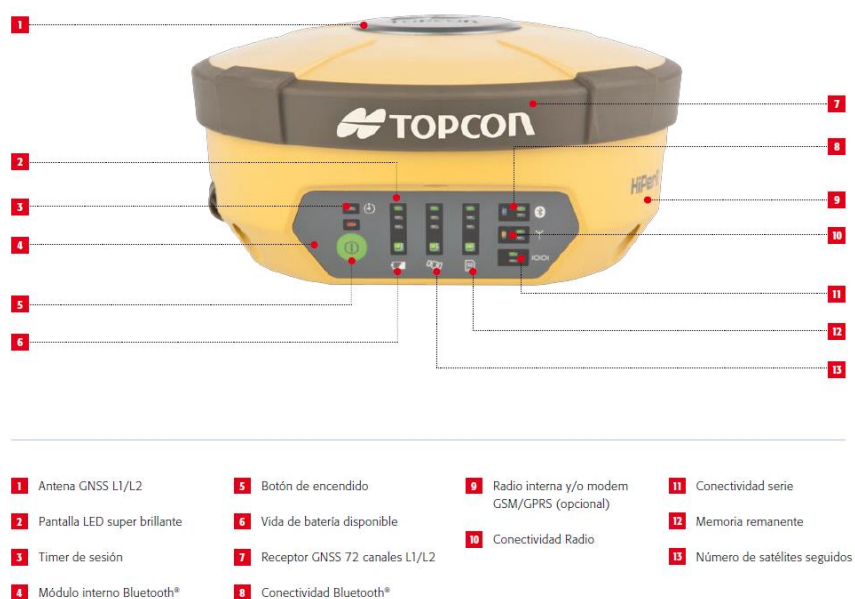


Figura 6. Funcionamiento de un GNSS.
Fuente. [40]

2.10 GPS Doble frecuencia

En la actualidad se ha venido incrementando el uso de redes RTK o redes HNSS, el uso de estas se ha hecho visible en diferentes áreas de estudio y con dichas herramientas se logra obtener una información de alta precisión sin necesidad de tener una estación base. Estas redes son una agrupación de receptores GPS que se encuentran distribuidos por un área amplia, donde la señal que es recibida se combina y así realiza las correcciones diferenciales [41]. El RTK presenta ciertas características que permiten operar con él a diferentes temperaturas, en diferentes lugares y la variación de su precisión se encuentra en la cantidad de satélites encontrados en la zona, también presenta interferencias, tiempo de ocupación, efecto multipath, procedimiento realizado y condiciones atmosféricas [42]

El RTK Topcon Hiper V empleado en la presente investigación está diseñado como se evidencia en la Figura 7.



*Figura 7. Características de diseño del RTK topcon Hiper V.
Fuente [42]*

2.11 Datos de procesamiento.

2.11.1 Python

El programa Python, se entiende como un lenguaje de programación que permite el desarrollo de actividades en menor tiempo y la integración de varios sistemas de manera efectiva, además de esto alberga gran diversidad de módulos de programas terceros, lo cual lo permite trabajar de manera conjunta con diferentes programas como ArcGIS. [43].

2.11.2 Método de distancia inversa ponderada (IDW)

Este es un método matemático de interpolación que usa una función inversa de la distancia, parte del supuesto que las cosas que están más cerca son más parecidas, por lo tanto, tienen más peso e influencia sobre el punto a estimar. Matemáticamente se expresa como:

$$Z(S_o) = \sum_{i=1}^n \lambda_i * Z(S_i)$$

*Ecuación 3. Interpolación IDW.
Fuente: notas de clase*

En el cual $Z(S_o)$ es el valor a predecir, N es el número de muestras alrededor del punto a predecir, λ_i son los pesos asignados a cada punto vecino y $Z(S_i)$ son los valores medidos. Los pesos de los puntos vecinos están dados por:

$$\lambda_i = \frac{d_{io}^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_{io}^{-p}}$$

*Ecuación 4. Pesos asignados a cada punto vecino.
Fuente: notas de clase*

En el cual d es la distancia entre el lugar de predicción (S_o) y el lugar muestral (S_i); P es un factor de reducción de peso, cuyo valor se encuentra minimizando el error cuadrático medio o error de predicción.

2.11.3 Pix4D.

Pix4D es un programa desarrollado en el 2011 para la creación de modelos y mapas digitales en 2D y 3D a partir de imágenes de vehículos aéreos no tripulados, presentando una georreferenciación adecuada y alta precisión [44]. Este software permite ajustar las fotos obtenidas con el dron u otro prototipo de aeronave y

transformarlas a mapas [45], permitiendo desarrollar diferentes procesos y adecuaciones tales como:

Modelos digitales de superficie y terreno: los cuales permiten determinar la elevación de cada píxel.

Ortomosaicos: los ortomosaicos cuentan con puntos de control en la tierra, los cuales son datos otorgados por el RTK o GPS de doble frecuencia para así, aumentar la precisión de los trabajos. También georreferencia los mapas digitales a partir de las imágenes obtenidas.

Nubes de puntos 3D: restauración digital de manera precisa en los puntos de control.

Cálculo de áreas: Desempeña mediciones de superficie teniendo en cuenta los valores de las coordenadas de cada uno de los vértices de la zona de provecho.

Termografías: Le otorga valores de temperatura precisas a cada píxel [46].

2.11.4 Calibración de un modelo hidrológico

En este procedimiento se les asignan valores a los diferentes parámetros evaluados en un modelo para alcanzar la mejor congruencia entre la herramienta a usar y el objetivo trazado. El método busca encontrar valores en los parámetros que disminuyan alguna función objetivo, dependiendo la orientación de la investigación [47].

Para alcanzar una mejor credibilidad del modelo es necesario calibrar el programa, de tal manera que lo simulado y lo observado sean lo más asemejados posibles mediante la metodología parametrización paso a paso la cual hace referencia a la recolección de datos mediante mediciones de campo existentes o adicionalmente programadas [48] es decir, variando cada parámetro y dejando el resto constante, con la finalidad de determinar cuáles parámetros son más sensibles a la hora de estimar la simulación y así seleccionarlos en el proceso de calibración.

Para evaluar si la calibración y encontrar el rango óptimo de cada uno de los parámetros existe una variedad de métricas las cuales son aplicadas usualmente en la hidrología y suministradas por el sitio HydroTest entre las cuales se destacan:

Error Medio (ME): determina el nivel de acuerdo entre los datos observados y los simulados, el resultado perfecto es cero, sin embargo, un resultado bajo no quiere decir que es un buen modelo, ya que los errores positivos tenderán a cancelarse entre sí, por esta razón se prefiere el MAE.

$$ME = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (Qobs_i - Qsim_i)$$

Ecuación 5 Métrica ME

Fuente: [49]

- ✓ **Error Cuadrático Medio (RMSE):** Esta métrica registra en unidades reales el nivel de acuerdo general entre los conjuntos de datos observados y modelados. Es una métrica no negativa que no tiene un límite superior y, para un modelo perfecto, el resultado sería cero.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Qobs_i - Qsim_i)^2}{n}}$$

Ecuación 6 Métrica RMSE

Fuente: [49]

Estas fueron empleadas en el modelo por ser una de la más representativas según este estudio, basándose en las cargas de componentes y comprensión de su popularidad dentro la literatura [50] y porque cada una de ellas representa un componente del rendimiento del modelo, siendo RMSE fuertemente correlacionada con la precisión del modelo en cada punto de datos y ME evidenciando el error del volumen total del modelo. Ahora bien, se empleó la métrica MAE, con el fin de determinar o corroborar si la métrica ME representaba un buen modelo.

- ✓ **Error Absoluto Medio (MAE):** evalúa todas las desviaciones de los valores observados de los simulados, 0 es el modelo perfecto. Métrica no negativa, no tiene límite superior.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Qobs_i - Qsim_i|$$

Ecuación 7 Métrica MAE

Fuente: Autores

2.12 Herramientas de campo

Para el desarrollo de la investigación fue necesario disponer de algunos equipos que permitieran un mejor resultado y una mayor precisión como se muestra en la Tabla 1.

EQUIPO	DESCRIPCIÓN
Drone Phantom 3 professional  <i>Figura 8 Drone Phantom 3 professional</i> Fuente. [51]	Con este Vehículo Aéreo no Tripulado se logró recoger información visual detallada del terreno en el formato de imagen (fotografías) para la construcción del DSM (Modelo Digital de Superficie) y mosaicos necesarios para la digitalización del uso del suelo actual de la zona de estudio.
RTK (Real Time Kinematik)  <i>Figura 9 RTK Topcon Híper V</i> Fuente [51]	Este GPS de doble frecuencia fue empleado para establecer las coordenadas geográficas de los puntos de control necesarios para la georreferenciación y calibración del DEM (Modelo Digital de Elevación), esto con el fin de mejorar la precisión del modelo.
Mira Topográfica  <i>Figura 10 Mira topográfica</i> Fuente [51]	La mira es una regla graduada en metros y decímetros, esta se empleó en el proceso de nivelación con el fin de medir diferencias de alturas del terreno.

Nivel  <i>Figura 11 Nivel Topcon</i> <i>Fuente [51]</i>	Instrumento utilizado con el fin de realizar levantamientos de datos topográficos convencionales que permite medir desniveles del terreno con puntos de diferentes alturas.
---	--

Tabla 1. Equipos utilizados en campo.
Fuente: Autores.

3 METODOLOGÍA

Para el desarrollo de esta investigación es necesario realizar algunas definiciones y delimitaciones que permitan la ejecución del modelo de sequía que se desea obtener, de esta manera la metodología se establece en 3 fases (Figura 12) las cuales definen inicialmente la obtención de los datos necesarios, el modelo SWAT y finalmente los resultados que se pueden llegar a obtener.

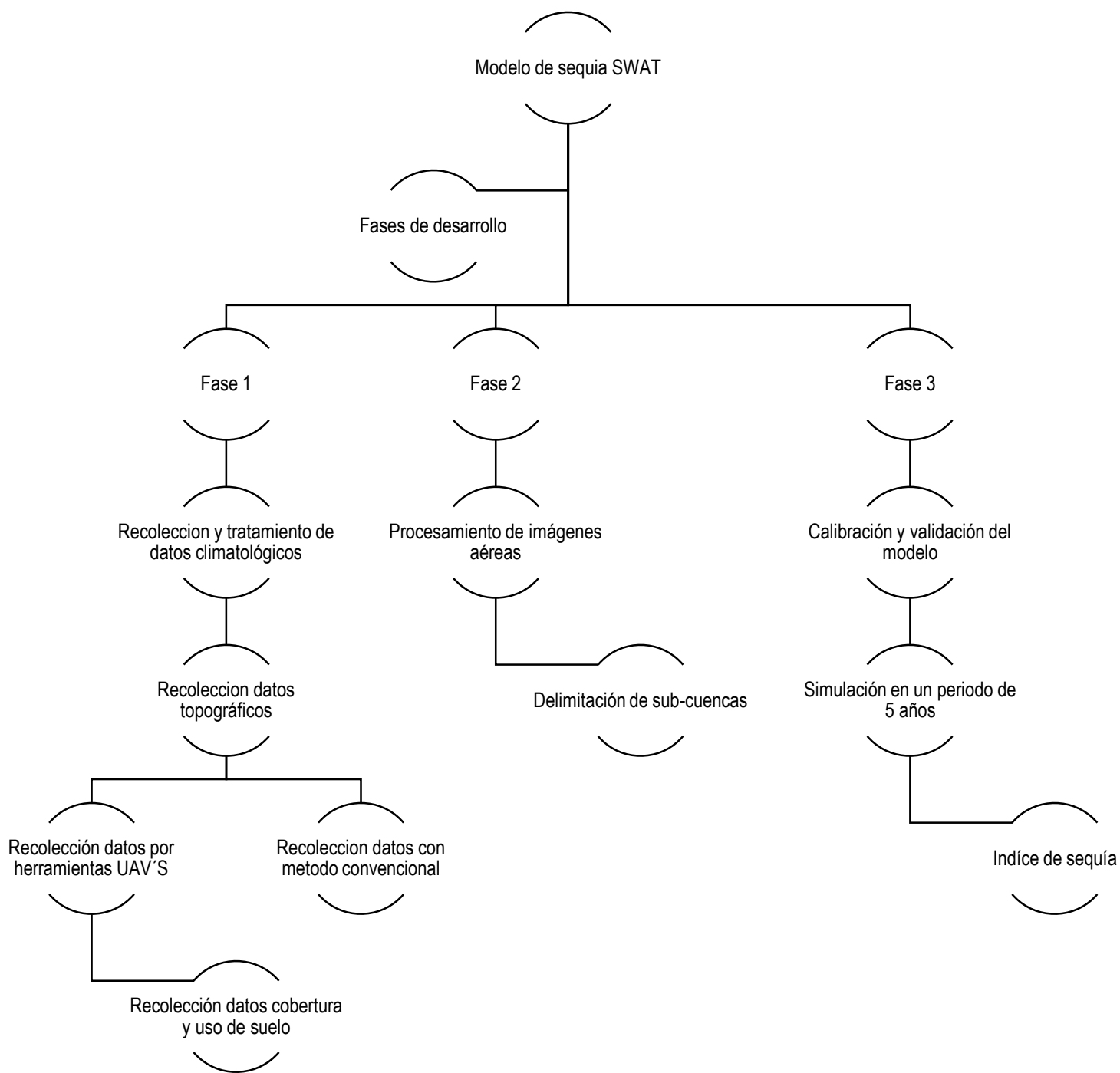


Figura 12. Esquema metodológico.
Fuente: Autores.

3.1 Fase 1

En la primera fase (Figura 13) se tiene en cuenta toda la recolección de datos, especialmente los datos topográficos en campo, los cuales son obtenidos a partir de vehículos aéreos no tripulados y por el método convencional, que para este estudio se entiende como el levantamiento de información a partir de la mira, el teodolito y un nivel.

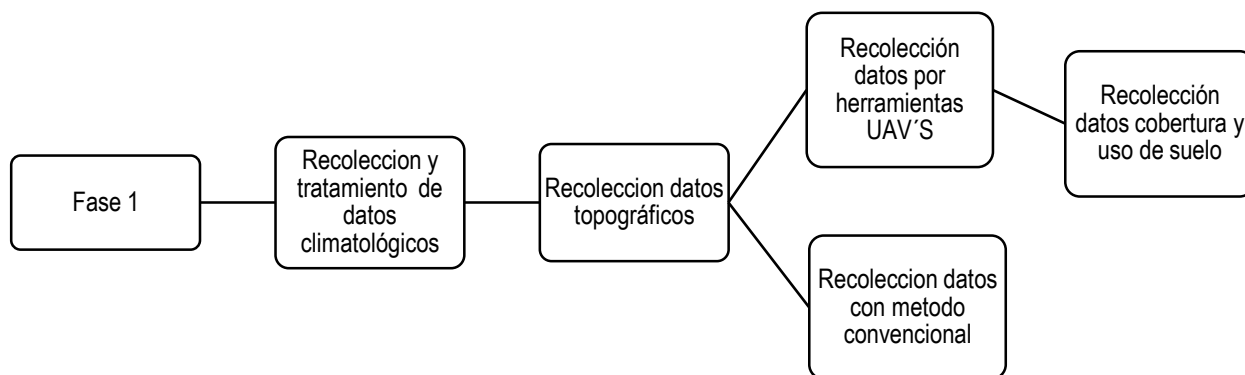


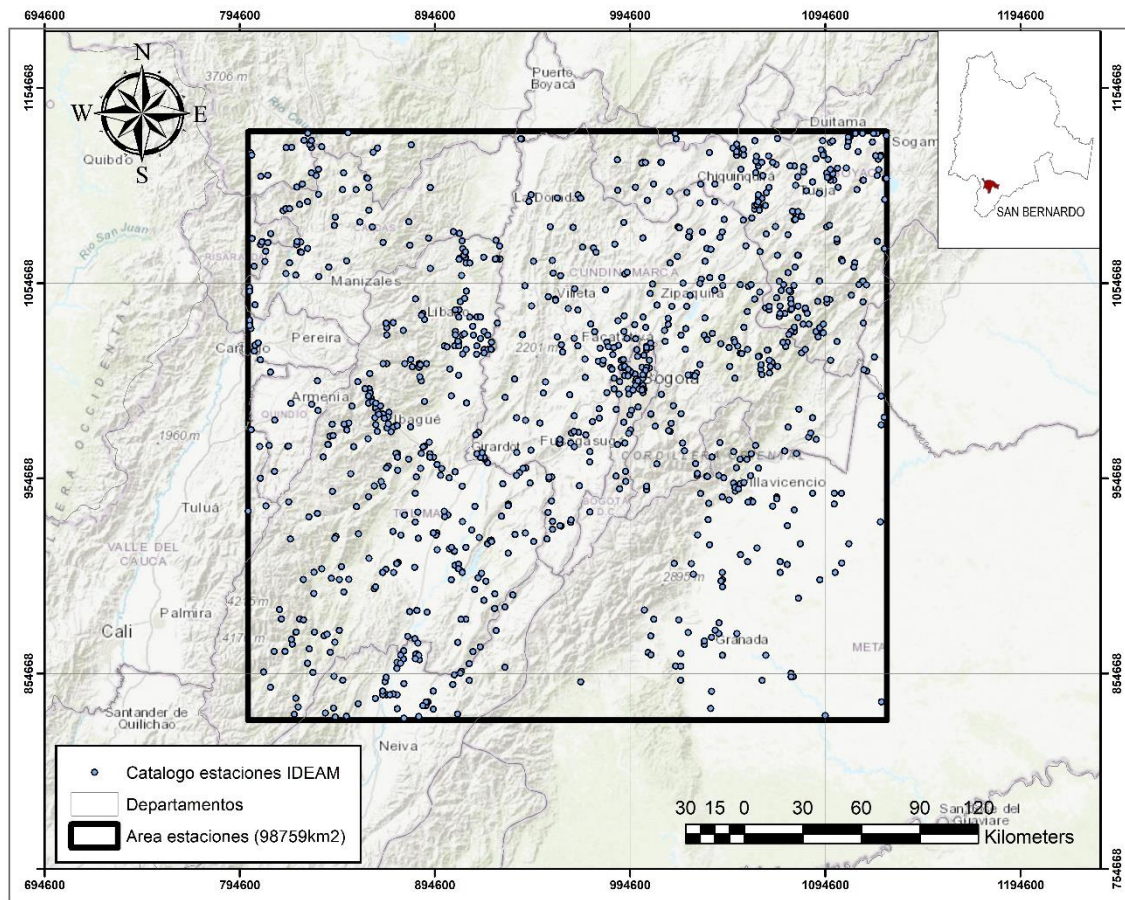
Figura 13. Fase 1 metodología.

Fuente: Autores.

3.1.1 Recolección y tratamiento de datos climatológicos:

En la realización del modelo de sequía inicialmente es necesario recolectar información de datos climatológicos como lo son: precipitación, temperatura, radiación solar, velocidad del viento, dirección del viento, nubosidad y caudal a partir de las estaciones meteorológicas e hidrológicas circundantes al área de estudio.

La información es solicitada al IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), las estaciones que se solicitan son sacadas del programa ArcGIS donde se realiza un buffer para la zona de influencia y este permite determinar las estaciones allí presentes. Para la elección de las estaciones se verifica que tenga información diaria por lo menos de 30 años y que estuvieran funcionando.



*Figura 14. Área estaciones.
Fuente: Autores.*

La Figura 14 muestra el área establecida para la selección de estaciones y las estaciones disponibles. Dicha área se determinó teniendo en cuenta condiciones orográficas similares y los regímenes climatológicos.

Una vez obtenida la información de las estaciones se sometieron a un análisis de series de tiempo climatológico a una resolución diaria, esto para determinar datos faltantes en las series y poder realizar un llenado de datos, así pues, el tratamiento y llenado de los datos se realizó a partir de unos códigos generados en Python. Dicho llenado de datos consta de 10 códigos los cuales se encuentran en el siguiente orden:

1. series a grupos
2. consistencia
3. retiro anómalo
4. grupos a series y recorte
5. análisis de completitud

6. filtrado datos por completitud y catálogo
7. series a grupos y rellenado para aleatoriedad
8. prueba de aleatoriedad
9. archivos sin rellenar
10. tendencias sin rellenar

Todos estos códigos se desarrollan con el fin de obtener la mejor calidad de los datos reduciendo así, la incertidumbre posterior en el modelo hidrológico y realizar el llenado de datos faltantes. En la consistencia, se aplicó una prueba de completitud de datos, donde se pretendía obtener dos cosas importantes: la primera que el periodo efectivo sea mayor a 30 años para analizar bajos escenarios de cambio climático, por lo cual es importante tener mínimo dicho periodo y la segunda que el porcentaje de datos faltantes en dicho periodo sea inferior al 20%, el cual se entiende como porcentaje apropiado para completar series temporales. Del análisis de completitud se determinó las estaciones que realmente demostraban tener la información constante y suficiente. Por último, en aleatoriedad se analizó los datos que tienen una secuencia o una organización la cual pudo ser introducida por algún otro mecanismo que no fuera el de la estación.

Seguidamente se realizó una interpolación, para este caso del método de distancia inversa ponderada (IDW). Dicha interpolación se generó para trasladar algunas estaciones que permitieran estimar el valor de los puntos del dominio en donde no se contaba con información.

Luego de contar con las interpolaciones en archivo ráster, se procedió a construir las series para cada una de las subcuencas delimitadas, para esto se empleó la herramienta ArcGIS de estadística zonal (Figura 15).

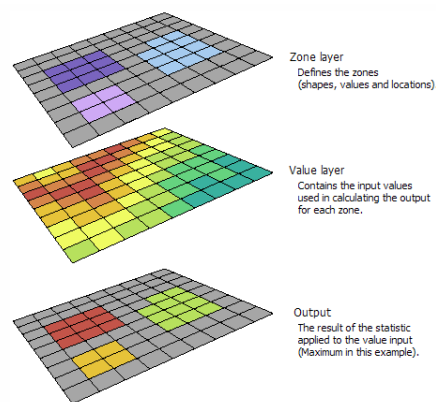


Figura 15. Esquema de entradas y salidas Estadística Zonal.
Fuente: [52]

3.1.2 Recolección de datos topográficos

Para realizar el modelo, el programa SWAT requiere datos topográficos como datos de entrada, los cuales se obtienen a partir de sensores remotos que presentan diferencias en las resoluciones espaciales.

3.1.2.1 Recolección de información con UAVS

Para la elaboración de modelo digital de superficie (DSM) con el uso de herramientas UAVs, se plantearon 3 fases fundamentales como se observa en la Figura 16

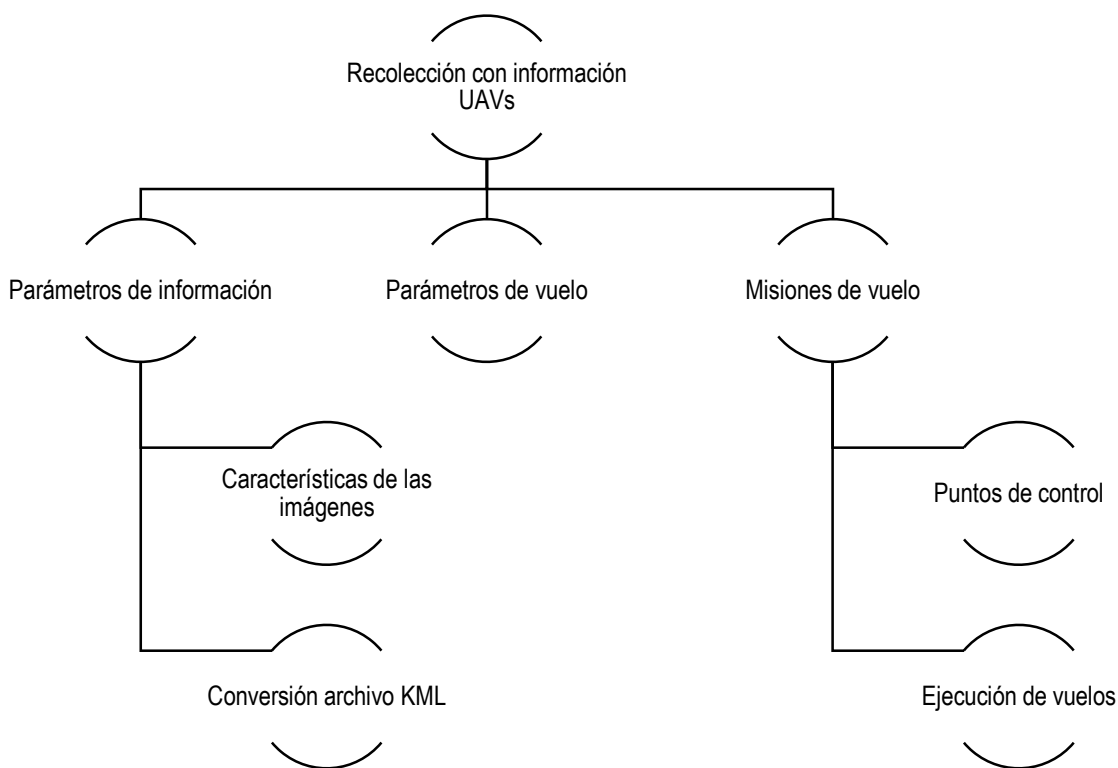


Figura 16. Esquema para recolección de información topográfica con UAVs.
Fuente: Autores.

✓ **Preparación de información**

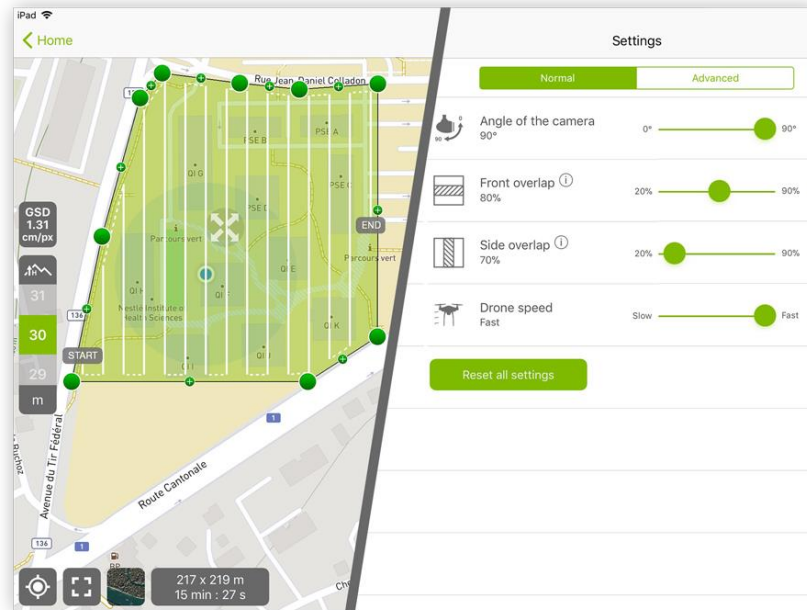
Para realizar el recorrido del Dron de forma autónoma, se realizó una zona de influencia (Buffer) de 300 metros del cauce principal en el programa ArcGIS, para esto se descargaron imágenes satelitales de la zona a través de Planet donde se pueden obtener mosaicos consistentes a cualquier tipo de escala, equilibrado de color, sin fisuras, con datos espacialmente precisos y en dado caso con poca presencia de nubosidad [53].

Después de obtener el Buffer, se descargó en archivo KML (formato habitual para compartir datos geográficos) debido a que, por condiciones climáticas de la zona de estudio, es complicado visualizar completamente el terreno. con el fin de importarlo en la aplicación Pix4DCapture y proceder a planificar los vuelos del dron y así recorrer la cuenca de interés, disminuyendo errores, tiempo y haciendo un buen barrido a la misma.

✓ **Parámetros de vuelo**

Es necesario realizar un plan de vuelos antes de hacer la recolección de información en campo, esto con el fin de disminuir tiempo en vuelos perdidos y tener una mayor precisión en los resultados, es necesario realizar un Traslape de líneas de vuelo entre una misión y otra a una distancia considerable (15% del vuelo, esto con el fin de obtener un mejor emparejamiento de los puntos comunes entre las imágenes de cada vuelo o misión y establecer puntos de control para tener una mejor fotogrametría.

Para planear el vuelo, se debe seleccionar el tipo de misión o recorrido a realizar y se definen los parámetros de vuelo como el ángulo de la cámara y la superposición frontal como lateral para tener una correlación entre imágenes, cuanto mayor sea el traslape mayor precisión se obtiene en modelo. Para esta investigación no se empleó un traslape del 100%, porque se emplea más tiempo de vuelo y un traslape de este tipo no asegura una buena precisión en la foto, ya que, los centros de cada foto al quedar muy juntos, se pierde la visión estereoscópica a la hora de la restitución, por ende, no vale la pena aumentar el trabajo de maquina sin mejorar la calidad del modelo.



*Figura 17. Ejemplo parámetros de vuelo.
Fuente: [54].*

Los vuelos realizados se planearon con una grilla tipo polígono, cabe aclarar que se recomienda realizar los vuelos con una grilla doble, esto con el fin de mejorar la precisión del modelo, sin embargo, por cuestiones de tiempo y adquisición de equipos, se ejecutaron con el tipo de grilla ya mencionada para cada uno de los vuelos planeados, desde el nacimiento a la desembocadura de la Quebrada Aguas Claras. Ahora bien, los vuelos se hicieron a una altura de 100 metros, a consecuencia de la altura de la copa de los árboles presentes en el área de estudio y las zonas con alta pendiente, a fin de evitar un daño en el equipo. Para el tiempo de vuelo del dron se estimó en un tiempo máximo de 14 minutos, esto con el fin de dar tiempo de regreso de este y no tener inconvenientes con la descarga de la batería y por ende tener que abordar la misión.

✓ Misiones de vuelos

Las misiones de vuelo se crean en un sistema operativo IOS, la desventaja de este sistema es que no acepta archivos tipo KML, por lo tanto se debe hacer una aproximación del área general de vuelo en el aplicativo de PIX4D Capture ejecutado en el sistema operativo IOS, creando las misiones de

vuelo en base de la información visual que genera el aplicativo en el sistema operativo Android.

Para ejecutar los vuelos planeados se estableció el punto de partida del Dron, procurando que este estuviera en el centro de la grilla, esto con el fin de que el UAVs no perdiera señal y por ende no hiciera el recorrido completo. minimizando el tiempo de vuelo del dron. También se realizan vuelos de prueba donde se verifico el cumplimiento de los parámetros, conexión del equipo y que la elevación del dron fuera la suficiente para evitar obstrucciones que pudieran ocasionar un choque de este.

Antes de realizar el vuelo se colocaron pendones elaborados anteriormente y ajustados al terreno como se muestra en la Figura 18 para que así no se desubicaran al momento del recorrido del dron. Estos se ubicaron a un lado de la grilla de vuelo, en el centro y en el traslape de la siguiente misión, con el fin de contar con diferentes puntos de control y mejorar la precisión del modelo. Después de esto se tomaron las coordenadas de cada pendón con el RTK, caracterizándolos con el número del proyecto y la misión, a fin de ubicarlos fácilmente al momento de realizar la calibración en el programa Pix4Dmapper para corregir el error medio del GPS que está integrado en los drones, tanto en la dirección X y Y, como en la altura del terreno (Z).



*Figura 18. Punto de control (Pendón).
Fuente: Autores.*

3.1.2.2 Recolección de información topográfica con método convencional

Para esta investigación y con el fin de realizar la comparación topográfica con el método convencional y con UAVs, la nivelación se realizó al noroeste de la cuenca, a fin de nivelar el terreno en un tramo de 217 metros, desarrollando una libreta de campo como se muestra en la Tabla 2.

Estación	V. Atrás	V. Intermedia	V. Adelante	Altura Instrumental	Cota	Coordenada X	Coordenada Y
BM							

*Tabla 2. Libreta topográfica de campo.
Fuente: Autores.*

Inicialmente es necesario tener un punto de parida cuya altura era conocida, este es conocido como Banco de Nivel o Banco de Marca (BM), la cota se tomó con el GPS RTK Hiper V, después de esto se seleccionó el punto de ubicación del nivel donde este ofreciera la mayor visibilidad hacia el BM y los puntos a nivelar. De allí parte el resto del proceso en cual se realizan las vistas atrás e intermedias necesarias, midiendo su altura para obtener la cota de cada punto y finalmente las vistas adelante para realizar cotas de cambio y poder mover el equipo hacia un lugar donde se puedan nivelar puntos a los cuales no se tenía visibilidad con la posición inicial del equipo.

3.1.3 Recolección de datos de uso de suelo

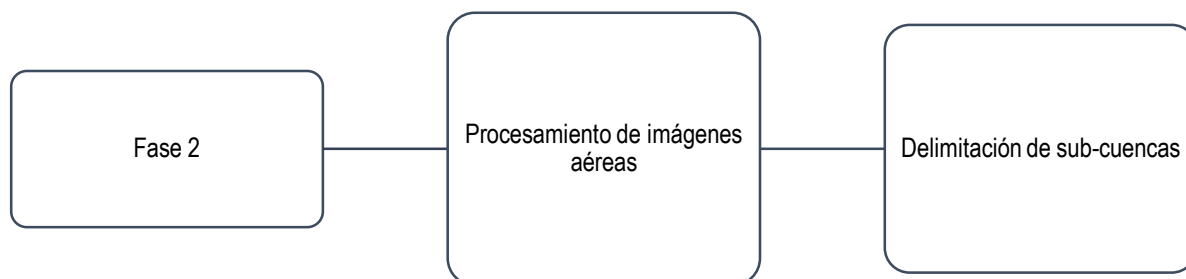
Esta actividad se realizó en el software ArcGIS a partir de las diferentes ortofotomosaicos obtenidas con el Dron, para esto se digitalizó la información de cada uno de los proyectos que se realizó. Dicha digitalización se hizo observando los mosaicos obtenidos y conociendo previamente la zona, de esta manera se tenía conocimiento de cuales lugares eran destinados a cultivos, bosques, pastizales, área urbana y vías. Ya digitalizadas las zonas se convierten a ráster para la unión de todos los proyectos dando como resultado la información conjunta de cada uno. De modo que se categorizara los diferentes usos de suelo con el fin de que el programa interpretara la capacidad de campo, volumen de agua drenable de cada tipo de suelo y el movimiento del agua dentro de la zona de estudio.

3.1.4 Recolección de datos de tipo de suelo

Para esta actividad se descargó el tipo de suelo de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación (FAO), ya que, SWAT permite utilizar la base de datos de esta organización, donde ya se tienen establecidos las diferentes características físicoquímicas del suelo, información necesaria para realizar el modelo; las propiedades físicas del suelo determinan el movimiento del agua a través del perfil y tienen un gran impacto sobre el ciclo del agua en cada Unidad de Respuesta Hidrológica (HRU). De esta forma, SWAT interpreta estas cualidades para determinar, el punto de marchitez permanente, la capacidad de campo, volumen de agua drenable, etc. de cada suelo, y así el movimiento del agua dentro del perfil.

3.2 Fase 2.

En esta fase (Figura 19) se realizó un pre-proceso del modelo SWAT, para ello, inicialmente se elaboró un procesamiento de las imágenes las cuales fueron obtenidas por el dron y con puntos de control tomados con GPS RTK, haciendo uso del programa Pix4Dmapper. Luego se realizó la calibración y validación del modelo. Todo esto con el fin de ejecutar de la mejor manera el modelo sequía.



*Figura 19. Fase 2, metodología.
Fuente: Autores.*

3.2.1 Procesamiento de imágenes aéreas

El procesamiento de las diferentes imágenes generadas a partir del Dron fue elaborado a través del programa Pix4d Cloud y Pix4Dmapper, en el que se generaron las nubes de puntos y el DSM y las ortofotomosaicos. Esto se logró a través de una corrección de las imágenes aéreas con respecto a la posición y la altura, puesto que la precisión del vehículo aéreo es baja, por ende, se integró los

puntos de control tomados con el RTK para cada uno de los vuelos y la ubicación de estos, con el fin de obtener el modelo digital de superficie (DSM) con sus atributos como pendiente, área de la cuenca de estudio y características de los cursos de agua.

Para esto se formaron proyectos por cada 1000 imágenes tomadas, con el fin de reducir tiempo computacional, además que el software tan solo permite procesar 2500 imágenes. El proceso realizado consta de tres pasos fundamentales:

3.2.1.1 Procesamiento inicial

Este procesamiento se realizó en el programa Pix4D Cloud, en este paso de adjuntan las imágenes tomadas con el Vehículo Aéreo no Tripulado y se ejecutan los siguientes procesos:

- ✓ Extracción de Puntos clave: Identifica características específicas como puntos clave en las imágenes.
- ✓ Puntos clave que coinciden: Encuentre qué imágenes tienen los mismos puntos clave y coincidan con ellas.
- ✓ Optimización del modelo de la cámara: Calibre la distancia interna (Distancia focal) y parámetros externos (Orientación) de la cámara
- ✓ Localización GPS / GCP: Localice el modelo si se proporciona información de geolocalización.

Se crean puntos de enlace automáticos durante este paso, el cual son la base para los próximos pasos de procesamiento.

Esta etapa también se conoce como el procesamiento inicial en Pix4D Mapper, la desventaja de generar el proceso en el programa de escritorio es que los tiempos computacionales son muy extensos, además usa muchos recursos computacionales y es necesario usar una maquina con una capacidad de procesamiento elevada, además que Pix4D Cloud no tiene limitaciones en cuanto al número de imágenes que se procesarán en la nube o en el escritorio. Sin embargo, la política de uso justo de la nube estipula que son 2500 imágenes por proyecto.

3.2.1.2 Re-optimización de la superficie del terreno

Después de agregados los GPS / GCP, se realizó una re-optimización de los puntos para volver a sobre escribir sobre los puntos ya seleccionados, esto con el fin de corregir el error medio que trae el equipo por defecto. Esto hace referencia a que se

ubica los datos de elevación y posición con respecto a los puntos base GPS / GCP haciendo que al momento de crear la nube de puntos sea más precisa.

3.2.1.3 Nube de puntos y malla

Una vez reclasificada la nube de puntos generada en el Pix4D Cloud se generó una nube de puntos con los datos corregidos a partir de los puntos de control, adicionalmente se creó la malla de textura que servirá para crear el DSM. Este paso se basa en los puntos de empate automáticos con:

- **Densificación de puntos:** Se crean puntos de empate adicionales basados en los puntos de empate automáticos que resultan en una nube de puntos densificados.
- **Malla con textura 3D:** basada en la nube de puntos densos, se puede crear una malla con textura 3D.

3.2.1.4 Modelo digital de superficie (DSM), Ortomosaico e índices

Este es el último paso en el cual se generó uno de los datos de entrada al modelo, correspondiente a la representación digital de la superficie, en esta fase el programa hace uso de la nube de puntos creada en el paso anterior (Nube de puntos y malla), para generar los archivos DSM a partir de los valores de cota de cada punto generado. Este paso permite la creación de:

- **Modelo de superficie digital (DSM):** La creación del DSM permitirá el cálculo de volúmenes, ortomosaicos y mapas de reflectancia.
- **Ortomosaico:** La creación del ortomosaico se basa en orto rectificación. Este método elimina las distorsiones de perspectiva de las imágenes.
- **Mapa de reflectancia:** El objetivo es producir un mapa en el que el valor de cada píxel indique fielmente la reflectancia del objeto.
- **Mapa de índices:** genera un mapa de índices donde se calcula el color de cada píxel utilizando una fórmula que combina diferentes bandas de los mapas de reflexión.

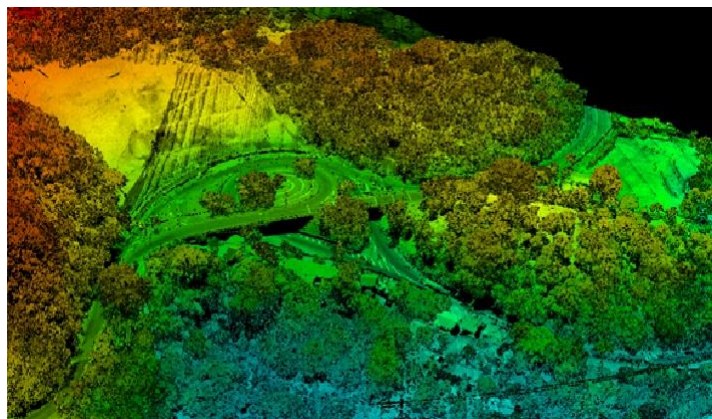


Figura 20 Ejemplo DSM
Fuente. [55]

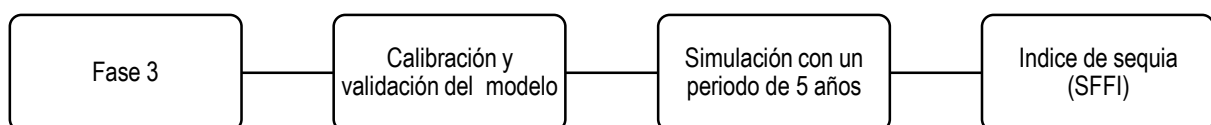
3.2.2 Delimitación de las sub-cuencas y pre-proceso SWAT

En esta actividad se realizará una división de la cuenca a partir de características semejantes en las líneas de flujo del río, con el fin de determinar el comportamiento de la cuenca a una menor escala y así obtener una mejor exactitud en la simulación, en esta investigación se empleó la discretización por subcuenca, la cual preserva los cauces y la trayectoria natural del flujo.

Para la discretización se definen las Unidades de Respuesta Hidrológicas (HRU) y a partir de ellas se generan las subcuencas, una vez definido el curso del agua se ingresó al programa el tipo de suelo y uso de suelos previamente generados para la cuenca. Así ya es posible introducir la información climatológica que se haya logrado obtener.

3.3 Fase 3.

En esta fase (Figura 21) se analizan los datos de salida del modelo luego de calibrar este, para esto se varió el uso de suelo en un periodo de 5 años, esto dependiendo del porcentaje de espacio agrícola y la dinámica poblacional del área de estudio, después de esto se extrajeron los valores de caudales simulados y se determinó el índice de sequía Índice normalizado de los caudales fluviales (SFFI) con el fin de determinar los momentos de déficit y excesos en la cuenca.



*Figura 21. Fase 3, metodología.
Fuente: Autores.*

3.3.1 Calibración y validación del modelo

Para la calibración del modelo se tuvo en cuenta el caudal mensual medio de la sub-cuenca 2, debido a que en dicha sub-cuenca es donde se encuentra el caudal de salida. De dicho modo la calibración se desarrolló en un periodo de 7 años, el cual está comprendido en las fechas de enero de 1999 a diciembre de 2006.

En otra instancia se realizó una validación la cual se encarga de corroborar que la información obtenida en la calibración sea la mejor. La validación se realizó en el periodo de enero 2009 hasta julio 2014 comprendiendo así 4 años y 7 meses. Dichos procedimientos tanto el de calibración como el de validación se realizaron mensualmente, donde fueron variados algunos parámetros físicos tales como: Uso de suelo, pendiente, textura de suelo, entre otros.

VARIABLE	DESCRIPCIÓN
Evapotranspiración potencial y actual	
ESCO	Factor de compensación para la evaporación del suelo (fracción).
EPCO	Factor de compensación para la cantidad de agua captada por las plantas (fracción).
GW_REVAP	Coefficiente de revaporización del agua subterránea (días).
REVAPMN	Umbral de la profundidad de agua en el acuífero superficial para revaporizar o percolar (mm).
Volumen de escorrentía superficial y tiempo de concentración	
CNCOEF	Coefficiente para la CN diaria cuando su cálculo depende de la evapotranspiración de las plantas (n/a).

SURLAG	Coeficiente de retardo de la escorrentía superficial, relacionado al tiempo de concentración (n/a)
CN2	Número de Curva inicial para la condición de humedad II (n/a)
SLSUBBSN	Longitud de la pendiente media (m).
OV_N	Coeficiente de Manning's n de la superficie terrestre (n/a).
Transmisión de las pérdidas de la escorrentía superficial	
CH_K (1)	Conductividad hidráulica efectiva de los canales tributarios aluviales (mm/h).
Contenido de agua en el suelo	
SOL_BD	Densidad aparente del suelo (gr/cm3).
SOL_AWC	Disponibilidad de agua en el suelo (mm H2O /mm).
SOL_K	Conductividad hidráulica saturada en el suelo (mm/h).
FFCB	Contenido inicial de agua almacenada en el suelo expresada como fracción de la capacidad de campo del suelo (fracción).
Flujo lateral	
LAT_TTIME	Tiempo de viaje del flujo lateral (días).
Agua subterránea y flujo base (* parámetros incluidos en este proceso)	
GW_DELAY	Tiempo de retardo del flujo subterráneo (días).
ALPHA_BF	Factor alfa de recesión del flujo base (días).
GWQMN	Umbral de profundidad de agua en el acuífero superficial para que ocurra flujo de retorno (mm).
RCHRG_DP	Coeficiente de percolación al acuífero profundo (fracción).
Ruteo del volumen de agua en canal (** parámetros incluidos en este proceso)	
TRNSRCH	Fracción de la transmisión de pérdidas desde el canal al acuífero profundo (fracción).
EVERCH	Factor de ajuste en la evaporación de los cauces (n/a).
CH_N (1)	Coeficiente de Manning's para canales tributarios (n/a).
CH_N (2)	Coeficiente de Manning's para canales principales (n/a).
CH_K (2)	Conductividad hidráulica efectiva para canales principales (mm/h).
ALPHA_BNK	Factor de recesión del flujo base en los bancos de almacenamiento (días).

Tabla 3 Parámetros seleccionados para la calibración del modelo

Fuente: [56]

Los parámetros analizados en la anterior tabla se seleccionaron a partir de estudios previamente realizados y de los parámetros más sensibles para los diferentes modelos hidrológicos [57,58,59].

3.3.2 Simulación con un periodo de 5 años

La simulación será realizada para un periodo que abarca desde el julio de 2008 hasta julio de 2014, exponiendo dicho periodo a las mismas condiciones de valores de entrada a excepción del terreno. Lo cual presentaría los cambios en el uso de suelo y con esto se observaría la variación en la infiltración y la escorrentía del suelo. Para este caso no se alteran los datos climatológicos debido a que el periodo el cual se está evaluando es corto y dichos cambios no afectarían de mayor manera el modelo final.

3.3.3 Índice de sequia

Una vez obtenidos los modelos y observando el mejor, se procede al hallazgo del índice de sequía SSFI, este índice se determinó para los dos modelos en el periodo de tiempo simulado, esto con el fin de comprobar la veracidad de los modelos y brindar información pertinente para establecer estrategias de planificación y uso de la cuenca.

4 RESULTADOS.

4.1 Fase 1

4.1.1 Recolección y tratamiento de datos climatológicos:

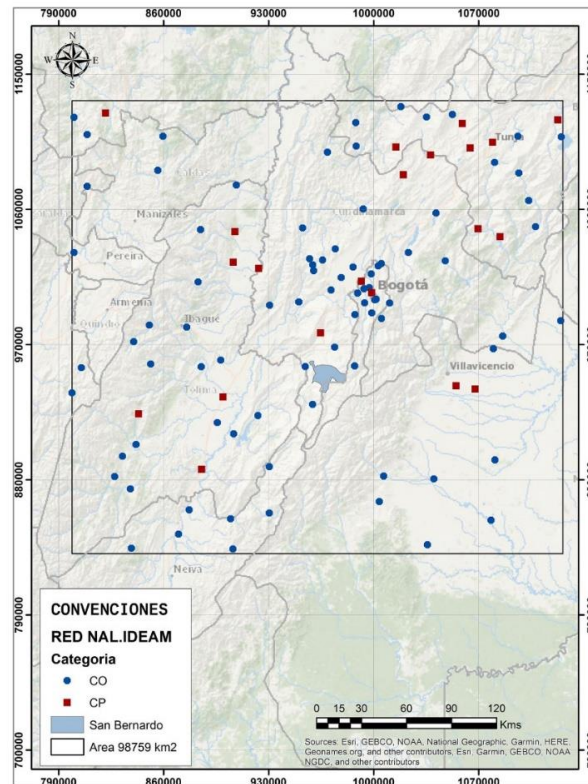
Se tuvieron en cuenta todas las estaciones cercanas al área de estudio para poder establecer las entradas y salidas de los modelos y se obtuvo que para dicha área (98759 km^2) existían:

# estaciones	Parámetro climatológico
218	Precipitación
35	Humedad Relativa
85	Temperatura mínima
85	Temperatura máxima
16	Brillo solar

Tabla 4. Estaciones climatológicas área de recolección de información.

Fuente: Autores.

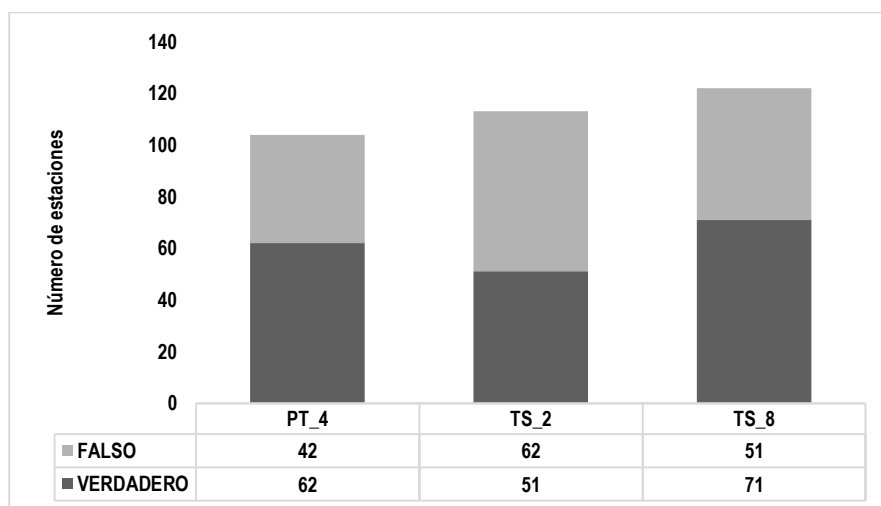
Del resultado anterior tan solo se seleccionaron las estaciones climatológicas ordinarias (CO) y estaciones climatológicas principales (CP) como se muestra en la Figura 22.



*Figura 22. Mapa estaciones preseleccionadas en la zona de influencia.
Fuente: Autores.*

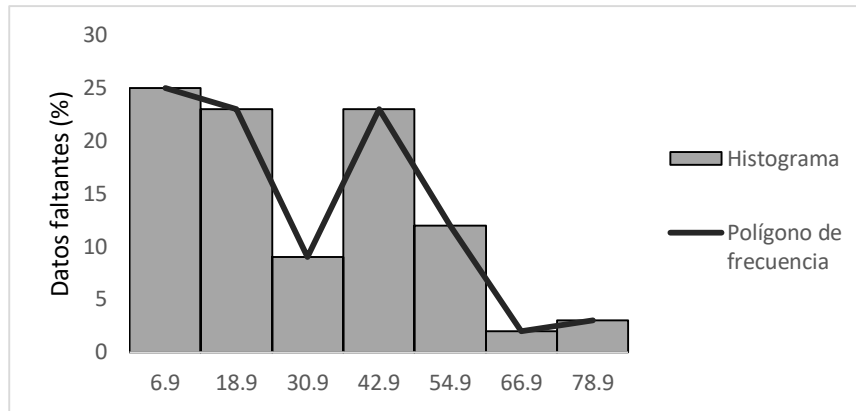
Luego de la obtención de los datos climatológicos y la información presentada por el IDEAM se realizó un análisis de consistencia de la información a series a una resolución diaria para las variables de precipitación (PT_4), temperatura máxima (TS_2) y temperatura mínima (TS_8), ya que las demás variables meteorológicas no se contaban con información relevante para el estudio. Este procedimiento implica obtener la mejor calidad de información, con el fin de disminuir la incertidumbre en la caracterización climatológica.

En la siguiente figura se presenta el número de estaciones que fueron consistentes o no, en el análisis realizado, donde el falso o verdadero hace referencia a las estaciones que cumplen o no con un porcentaje (%) de datos verdaderos y consistentes en una longitud determinada.



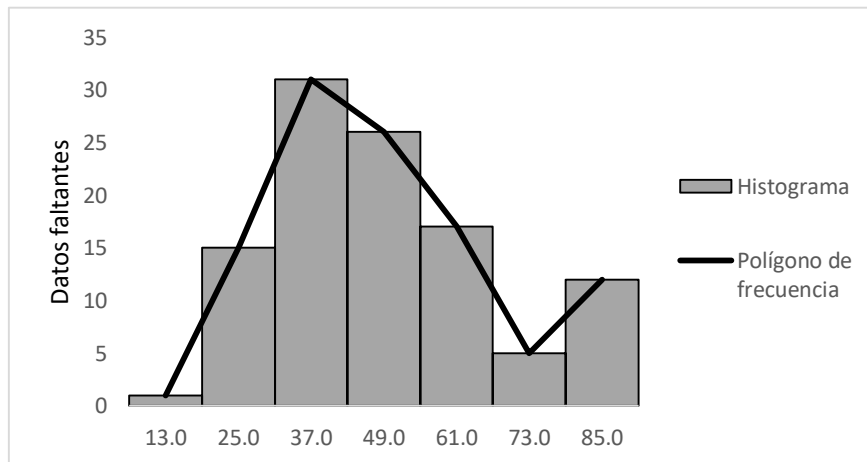
*Figura 23. Número de estaciones consistentes y no consistentes en el análisis de consistencia.
Fuente: Autores.*

Se cuenta con análisis de completitud para los parámetros climatológicos precipitación y temperatura, en el cual es necesario observar la cantidad de datos faltantes en las series; de ese modo resulta:



*Figura 24. Número de estaciones y su porcentaje de datos faltantes para PT_2.
Fuente: Autores.*

Para los datos de precipitación media se denota que aproximadamente 69 estaciones presentan un porcentaje mayor al 20 por ciento de datos faltantes, las cuales las hacen inadecuadas para el estudio, lo contrario de las otras 231 estaciones que presentan un porcentaje de datos óptimos para el uso de dicha información.



*Figura 25. Número de estaciones y su porcentaje de datos faltantes para TS_2.
Fuente: Autores.*

La figura 25 muestra que 66 estaciones de temperatura superficial máxima no cumplen con el requisito del porcentaje, sobrepasando así el 20 por ciento. Dichas estaciones se eliminan y solo se tienen en cuenta las 257 estaciones restantes.

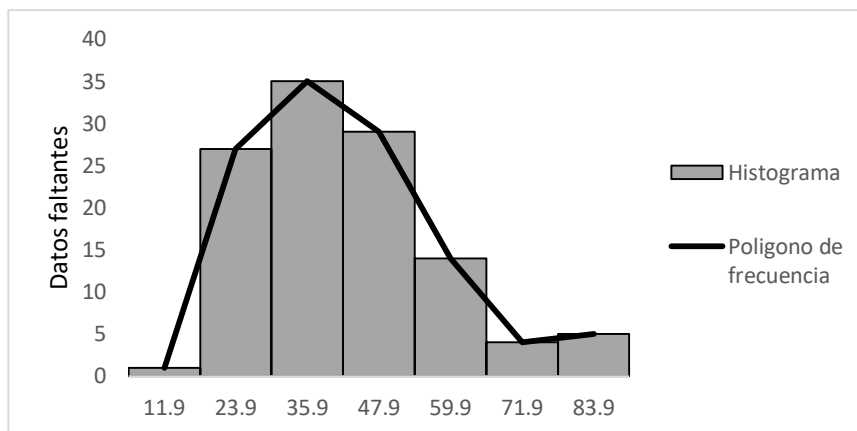


Figura 26. Número de estaciones y su porcentaje de datos faltantes para TS_8.
Fuente: Autores.

Finalmente se tienen datos para la temperatura superficial mínima la cual presenta 229 estaciones con porcentajes aceptables para ser analizadas y utilizadas en procesos subsecuentes.

para ser aprobados las series deben cumplir con tanto con el criterio de porcentaje de datos faltantes (20%) y el criterio del tiempo (30 años) y. En la siguiente figura se presenta el número de estaciones aceptadas y rechazadas por el anterior análisis y gráficos. Las estaciones aceptadas son las que se tendrán en cuenta en los análisis posteriores.

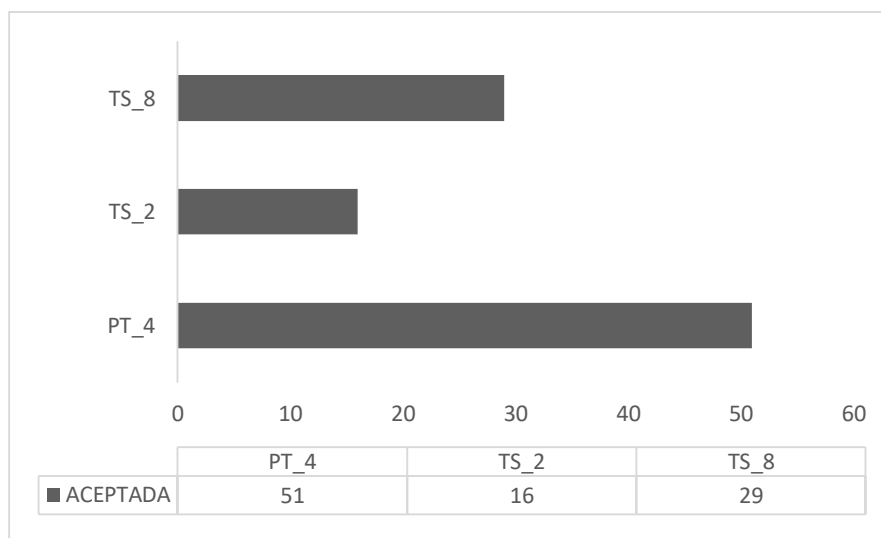


Figura 27. Número de estaciones aceptadas en el análisis de completitud
Fuente: Autores

Como no se contó con información relevante de los parámetros: humedad relativa, brillo solar y velocidad del viento, cumplimiento a las necesidades del modelo se solicitaron en la página GlobalWeather, la cual otorga valores globales climatológicos para SWAT, los cuales se pueden emplear cuando no se cuenta con información de algún dato climático de la zona de estudio.

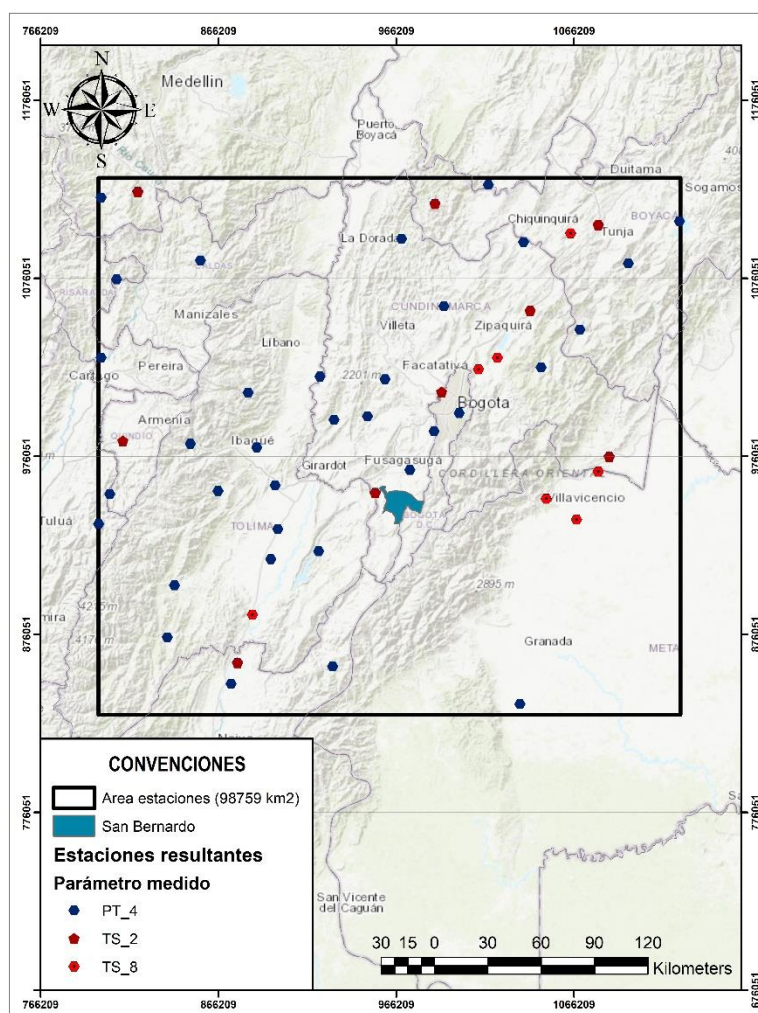


Figura 28 Distribución espacial de las estaciones resultantes
Fuente. Autores

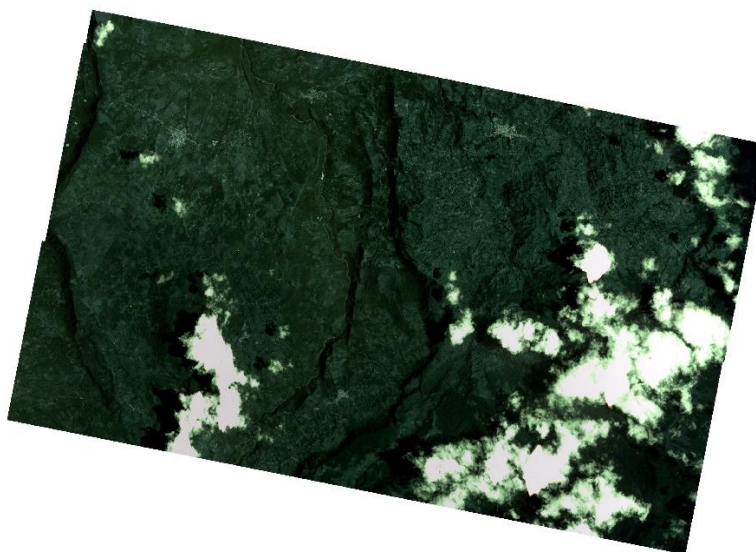
Teniendo en cuenta lo anterior se obtuvo información de velocidad del viento, humedad relativa y radiación solar en 6 estaciones, en una resolución diaria. Para el traslado de información a la zona de estudio el programa SWAT la hace automáticamente, tomando como referencia la información climatológica de las estaciones circundantes más cercanas a cada una de las subcuencas.

4.1.2 Recolección de datos topográficos

4.1.2.1 Recolección de información con UAVS

- Características de las imágenes

Para esta investigación se emplearon imágenes del día 2 de octubre de 2018 de PlanetScope (Figura 29) con las características evidenciadas en la tabla 5, puesto que, en el registro de Planet la mayoría de las imágenes que se encontraban de otros días para la zona de estudio tenían una pequeña obstrucción de visibilidad debido a una nube que quedaba sobre la parte alta de la quebrada haciendo imposible la creación de las misiones de vuelo del dron.



*Figura 29. Imagen satelital del área de estudio.
Fuente: Autores.*

Estas imágenes por el contrario presentaban la mayor claridad y cercanía a la actualidad (Tabla 5), lo cual la convierte en la mejor opción de descarga para general el archivo KML, que es el que se usará finalmente en el programa Pix4DCapture para la generación del plan de vuelo.

Fuente	Escena PlanetScope de 4 Bandas
Cubierto de nubes	3%
Distancia de muestra de la tierra	3.6 m
ID Satelital	1052
Ángulo fuera del nadir	0.1°
Elevación del sol	66.4°
Azimet del sol	108.9°
Control de tierra	cierto
Categoría de calidad	Prueba

*Tabla 5. Características imágenes satelitales.
Fuente: [60]*

- Conversión archivo KML

Una vez descargadas las imágenes, se generó una zona de influencia (Buffer) de 300 metros sobre este, distancia máxima que se pudo abarcar de acuerdo con la disponibilidad de tiempo de préstamo de los equipos. Así, en la generación de DTM no fue elaborado a un 100% del total del área de la cuenca. Seguidamente se descargó en archivo KML, esto con el fin de importarlo en la aplicación Pix4DCapture como se muestra en la Figura 30 y proceder a planificar los vuelos del dron.

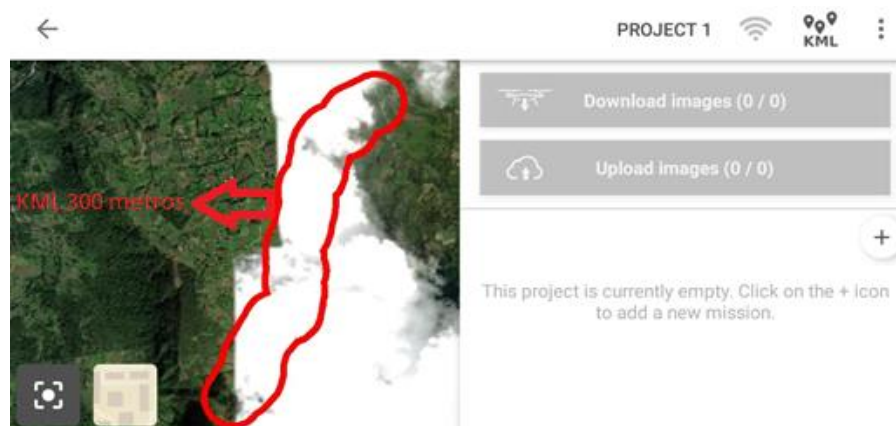


Figura 30. Buffer en archivo KML.

Fuente: Autores.

4.1.2.1.1 Definición de parámetros de vuelo.

Para realizar el plan de vuelos se seleccionó el tipo de misión de polígono, ajustado con los parámetros especificados en la Tabla 6, esto con el fin de mejorar la precisión de las imágenes a través de un correcto emparejamiento de los puntos comunes de las fotografías.

Ángulo de la cámara	90°
Superposición frontal	80°
Superposición lateral	80°
Velocidad del dron	Rápido

*Tabla 6. Parámetros plan de vuelo.
Fuente: Autores.*

La elevación a la cual se planeó el vuelo fue de 100 metros, altura en que se obtiene mayor número de imágenes en menor tiempo y con buena visibilidad del terreno, sin embargo, a una menor elevación mejor es la calidad de la imagen, pero por condiciones de la zona no se pudo realizar a una menor elevación.

4.1.2.1.2 Definición misiones de vuelo

Se crearon 17 misiones con un tiempo de vuelo máximo de 14 minutos, con el fin de evitar descarga de la batería y abortar el vuelo. Las misiones se generan como se muestra en la figura 31.



Figura 31. Definición de misiones de vuelo.
Fuente: Autores.

- **Toma puntos de control con la metodología RTK**

Mientras el dron realizaba el recorrido se surgió a tomar las coordenada X, Y y Z de cada uno de los pendones con ayuda de la metodología de georreferenciación RTK (GPS de doble frecuencia) como se evidencia en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, para la obtención de los datos se generó una placa con una coordenada conocida y a partir de esta se amarro la base del RTK y a partir de esta base, se relacionaron todos los puntos generados.

Todos los valores obtenidos se almacenaron en la memoria de la base del RTK, la cual después de terminado cada día de trabajo por seguridad se extrajo la información de cada punto en formato shapefile y txt.

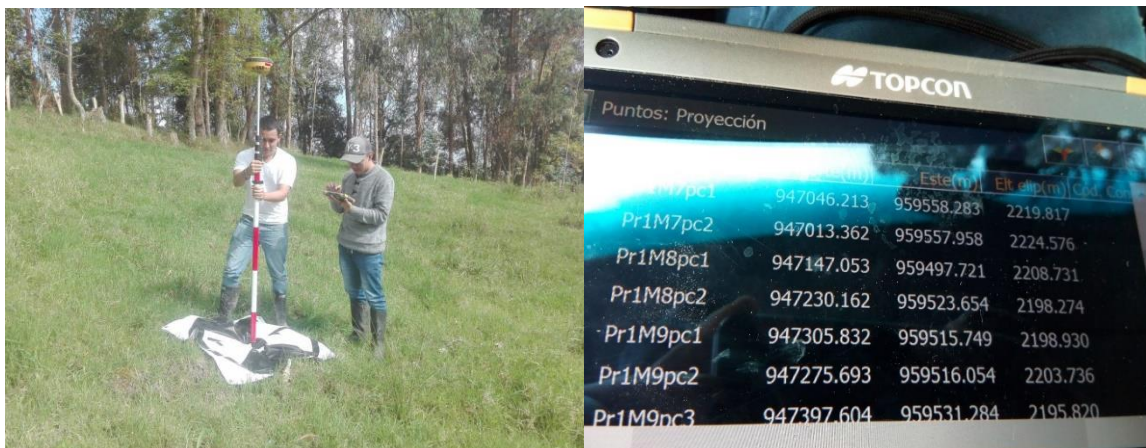


Figura 32. Ejemplos toma de punto con RTK e información generada y almacenada.

Fuente: Autores.

Se crearon proyectos cada 1000 imágenes, con el fin de hacer más rápido el procesamiento de estas. Los proyectos se guardaron de la siguiente manera:

Ejemplo. PR1M1pc1 lo cual hace relevancia a Proyecto 1, Misión 1 y Punto de Control 1.

- **Ejecución de vuelos.**

Se ejecutaron 19 vuelos de manera autónoma a través del programa Pix4Dcapture con un Dron Phantom 3 Professional.

Al comenzar cada misión se supervisó la vista de mapa (Mapview), la cual proporciona la telemetría en vivo que incluye información como la altitud de vuelo y la velocidad de vuelo, como también la vista de cámara, esta proporciona la transmisión en vivo desde la cámara, esto con el fin de verificar la trayectoria del vuelo



*Figura 33. Fotos toma de datos topográficos con UAV en campo.
Fuente. Autores*

4.1.2.2 Recolección de información topográfica con método convencional

El levantamiento topográfico convencional que se aplicó en este caso fue nivelación geométrica compuesta, su nombre se debe a que se realizan dos o más cambios de estación (cambio de la posición del nivel), lo cual fue necesaria para cubrir los 217 metros realizados en campo.

La cota establecida y confiable fue el BM con un valor de 1929, de allí se partió a tomar los puntos, esta cota se tomó con la metodología RTK, ya que no se contaba con la cota real del terreno y con el fin de establecer la cota asumida con mayor precisión se empleó esta metodología. Se realizaron dos cambios y 9 puntos en total. Estos datos fueron registrados en la libreta de campo y quedaron se evidencia en la Tabla 7.

<i>Estación</i>	<i>Vista atrás</i>	<i>Vista intermedia</i>	<i>Vista adelante</i>	<i>Altura instantánea</i>	<i>Norte</i>	<i>Este</i>	<i>Elevación</i>	<i>Cota</i>
<i>BM</i>	-1,892			1930,892	950106,77	960987,586	1927,752	1929
<i>1</i>		0,668			950088,54	960971,747	1928,697	1930,224
<i>PC</i>	-2,11		0,125	1932,877	950069,49	960957,389	1930,060	1930,767
<i>3</i>		1,34			950056,47	960950,561	1930,426	1931,537
<i>4</i>		0,86			950037,66	960937,046	1931,396	
<i>PC2</i>	2,149		0,2	1934,826	950031,15	960931,919	1931,965	1932,677
<i>5</i>		-2,981			950021,45	960911,67	1930,568	1931,845
<i>6</i>		-3,148			950012,35	960893,53	1930,549	1931,678
<i>7</i>		2,025			950007,32	960880,627	1931,499	1932,801

8		1,662			950002,78	960857,117	1931,868	1933,164
9		0,963			949992,60	960816,17	1932,444	1933,861
<i>n</i>								

Tabla 7. Datos topográficos registrados en la libreta de campo.

Fuente. Autores.

La nivelación de terreno realizada en esta investigación tomo un tiempo aproximadamente de 2 horas, tiempo que depende de la experiencia del nivelador, sin embargo, el tiempo empleado es mucho mayor al tiempo empleado con el UAVs, ya que en tan solo 10 minutos con 33 segundos se pueden recorrer un área de 789 x 339 metros, independientemente de la orografía, mientras que el tiempo destinado en esta nivelación fue para 217 metros pero haciendo está en un lugar plano como se muestra en la Figura 34, lo que no implica tantos cambios, facilitando la nivelación. Cabe aclarar que La nivelación en esta investigación se realizó con el fin de establecer ventajas y desventajas de realizar el levantamiento topográfico con el modelo convencional (nivel y mira) y con UAVs.

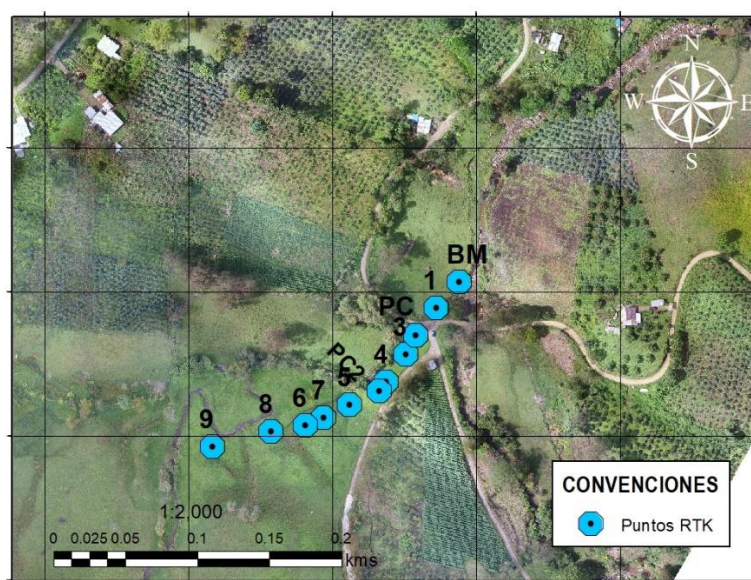


Figura 34. Levantamiento topográfico convencional.

Fuente: Autores.

4.1.3 Recolección de datos de uso de suelo

Para determinar el uso de suelo del área de estudio para el modelo convencional, (simulación realizada con el modelo de elevación digital (DEM) obtenido a una precisión de 12.5 metros), se descargó el mapa de uso de suelo de la página Earthdata Search, el cual permite buscar, descubrir, visualizar, refinar y acceder a

los datos de la NASA Earth Observation, para esta investigación se utilizó el Tipo de cubierta terrestre Anual L3 Global 500 m SIN Grid, producto MODIS Land Cover Type, el cual proporciona datos que caracterizan cinco sistemas globales de clasificación de cobertura terrestre. Además, proporciona una evaluación del tipo de cobertura terrestre e información de control de calidad.

En el caso del modelo con UAVs el uso del suelo se determinó a través de una supervisión clasificada de campo, es decir, digitalizando los mosaicos obtenidos a partir del levantamiento y procesamiento topográfico con vehículos aéreos no tripulados.

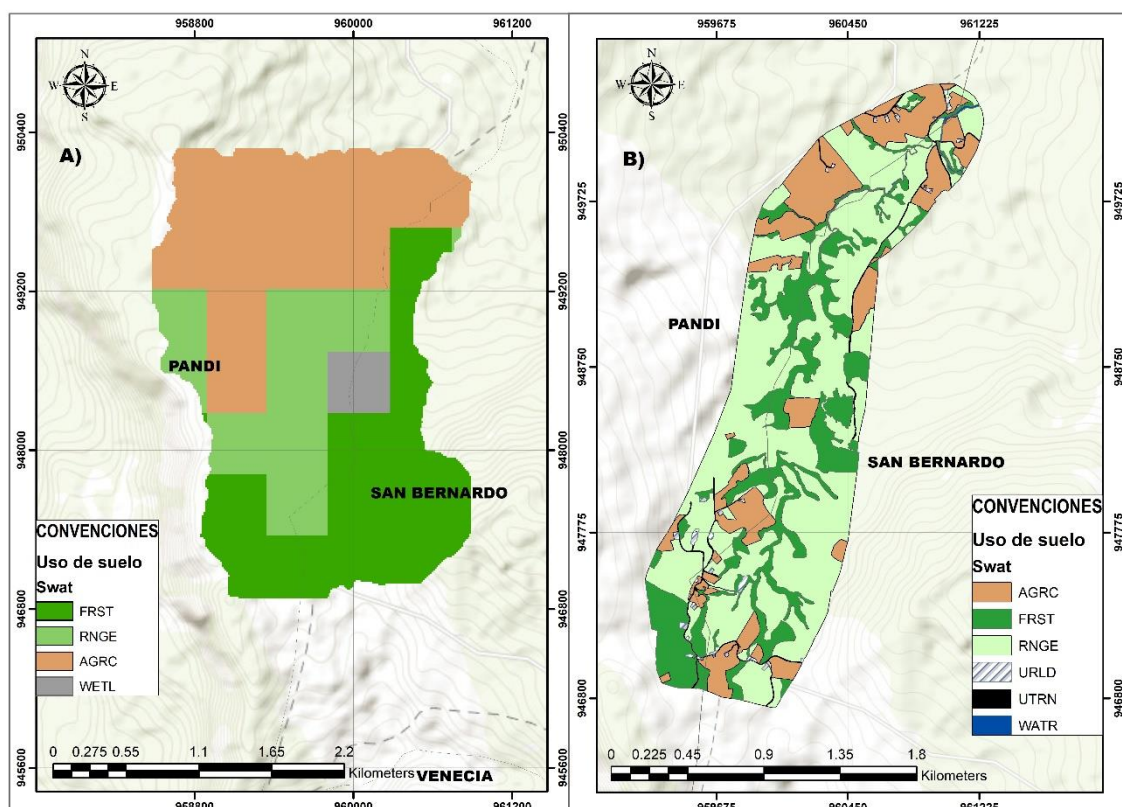


Figura 35. (A) Uso de suelo modelo convencional. (B) Uso de suelo modelo UAVs. Fuente: Autores.

Los usos del suelo se categorizaron dentro de los establecidos en la base de datos del programa SWAT y como se muestra en la Figura 35, se determinaron tanto para el modelo convencional (A), como para el modelo con UAVs (B), dentro de estos se establecieron los siguientes usos de suelo:

- FRST: mezcla de bosques.
- AGRC: tierra agrícola cultivada.
- RNGE: pastizales.

- WETL: humedales mezclados.
- WATR: agua.
- URLD: zona urbana de baja densidad.
- UTRN: Vías

4.1.4 Recolección de datos de tipo de suelo

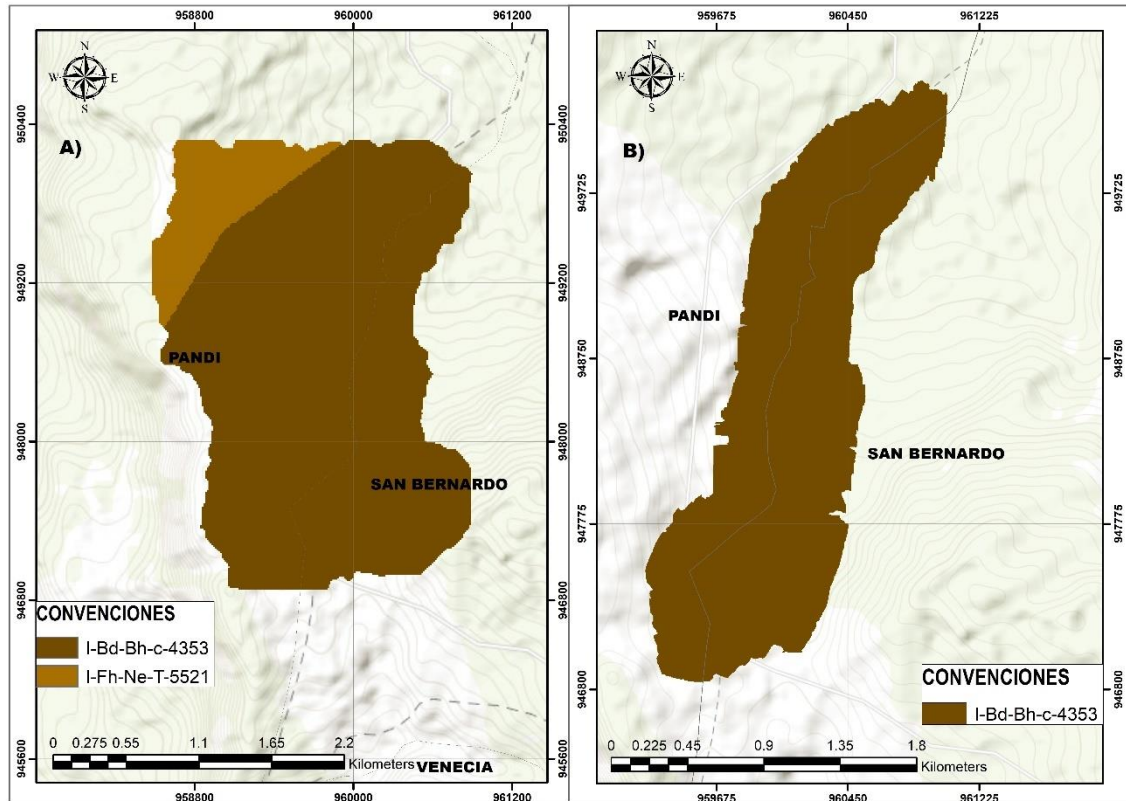


Figura 36. (A) Tipo de suelo modelo convencional. (B) Tipo de suelo modelo UAVs.
Fuente: Autores.

El tipo de suelo resultante (Figura 36) tienen unas características obtenidas en los códigos I-Bd-Bh-c-4353 e I-Fh-Ne-T-5521 de los cuales se tienen información debido a una compilación de una variedad de mapas de suelo del Instituto Geográfico de Colombia Agustín Codazzi y de la FAO. Los cuales llevan como significado; Bosque montano superior, paramo, tundra alpina para el primer código y bosque montañoso para el segundo código, de dicho modo se tiene dos tipos de suelo los cuales se refieren a:

Una parte de la cuenca, la parte alta, donde se encuentra el bosque montano el cual contiene variedad de biodiversidad y lo hace esencial para diferentes servicios ecosistémicos, especialmente en la parte hídrica. Debido a esto y en efecto cuenta con algunas especies de árboles medianos y pequeños a medida que su altitud disminuye. En esta zona de la cuenca también se encuentra la parte de paramo y tundra alpina las cuales presentan características muy similares las cuales se ven influenciadas al paramo de Sumapaz. De este modo se encuentra entre montañas a altitudes altas (Zona de nacimiento de la quebrada), donde la temperatura en la noche puede alcanzar valores por debajo de cero y su suelo usualmente es seco.

La siguiente parte, la parte baja de la cuenca por el contrario cuenta con un bosque montañoso el cual puede tener diferentes características en distancias muy cortas, debido a sus pendientes y su sensibilidad hacia la erosión del suelo. En esta zona el desarrollo de los bosques suele ser menos rápido en la parte montañosa que en la parte baja de la cuenca debido a que sus suelos son menos profundos, el tiempo vegetativo de allí es mucho más corto en comparación a las otras zonas y adicional por sus zonas montañosas presenta una diversificación climática dura.

Para tener en cuenta estos tipos de suelo se observó el informe de los mapas de uso de suelo del mundo volumen IV otorgado por la FAO –NESCO. Donde adicional se observó que todos los códigos que iniciaran con la letra “I” hacen referencia a los litosoles, donde se confirma la información de los códigos haciendo referencia a tipos de suelo erosionados o que presentan acumulaciones hídricas debido a constantes precipitaciones para las cuales el suelo no está preparado.

Gracias a la salida de campo se pudo verificar la información obtenida, a continuación, se presentan unas fotografías de la parte baja de la cuenca, donde se presenta diversidad de vegetación y algunos árboles medianos.



*Figura 37. Vegetación parte baja de la cuenca de estudio.
Fuente: Autores.*

4.2 Fase 2.

4.2.1 *Procesamiento de imágenes aéreas.*

El tratamiento de la información con topografía con UAVs se llevó a cabo con el paquete de programas de Pix4D (Pix4D Cloud y Pix4D Mapper), generando los DTM y las ortofotografías de los 4 proyectos generados.

4.2.1.1 *Procesamiento inicial*

En este se realizó el primer procesamiento de las diferentes imágenes obtenidas (Tabla 8) a través de UAVs, este se pasó se ejecutó en la nube Pix4D, donde se adjuntaron con el fin de iniciar el proceso de creación de los DTM y Ortomosaicos.

Proyecto.	Numero de fotos tomadas.
1	999
2	896
3	1036
4	600

Tabla 8. Número de imágenes tomadas por proyecto.
Fuente: Autores.

Cabe resaltar que este proceso se puede llevar a cabo en el programa Pix4D Mapper, pero los tiempos de computo generarían retrasos en la generación de resultados, sin embargo, este proceso tardo aproximadamente 4 horas por proyecto, dependiendo de la cantidad de imágenes obtenidas. Por último, se descargó los resultados de la nube en un grupo de carpetas (por proyectos), para posterior proceso, ya que, estos archivos no pueden llegar a ser utilizados por el error con el que cuentan; corresponde al error del instrumento en este caso el GPS y el barómetro del Drone.

En la Figura 38 se puede observar algunas de las imágenes que fueron usadas para la ejecución del programa Pix4D Cloud.



Figura 38. Imágenes proyecto 1.
Fuente: Autores.

4.2.1.2 Re-optimización de la superficie del terreno

En este paso se hizo uso de los puntos de control con el fin de calibrar y corregir el error medio con el que cuenta el equipo para la recolección de la información. Para esto se ajustaron los valores del UAVs con los puntos de control establecidos a través del pendón como se muestra en la Figura 39.



Figura 39. Ubicación GPS / GCP en las imágenes
Fuente. Autores

4.2.1.3 Nube de puntos y malla

La nube de puntos y la malla fue nuevamente creada en base de la información re-optimizada, en este paso se obtiene un archivo Shape que puede llegar a ser utilizado en la generación de la información de la topografía del área de estudio, pero debido a que se generan una gran cantidad de puntos, el programa ArcGIS genera fallos de sistema por lo tanto se debe crear el archivo DSM, teniendo en cuenta que la malla y la nube de puntos son la base para la generación de este

archivo tipo ráster, a continuación, se puede observar el resultado de la generación de la nueva nube de puntos para el proyecto 3 (Figura 40).

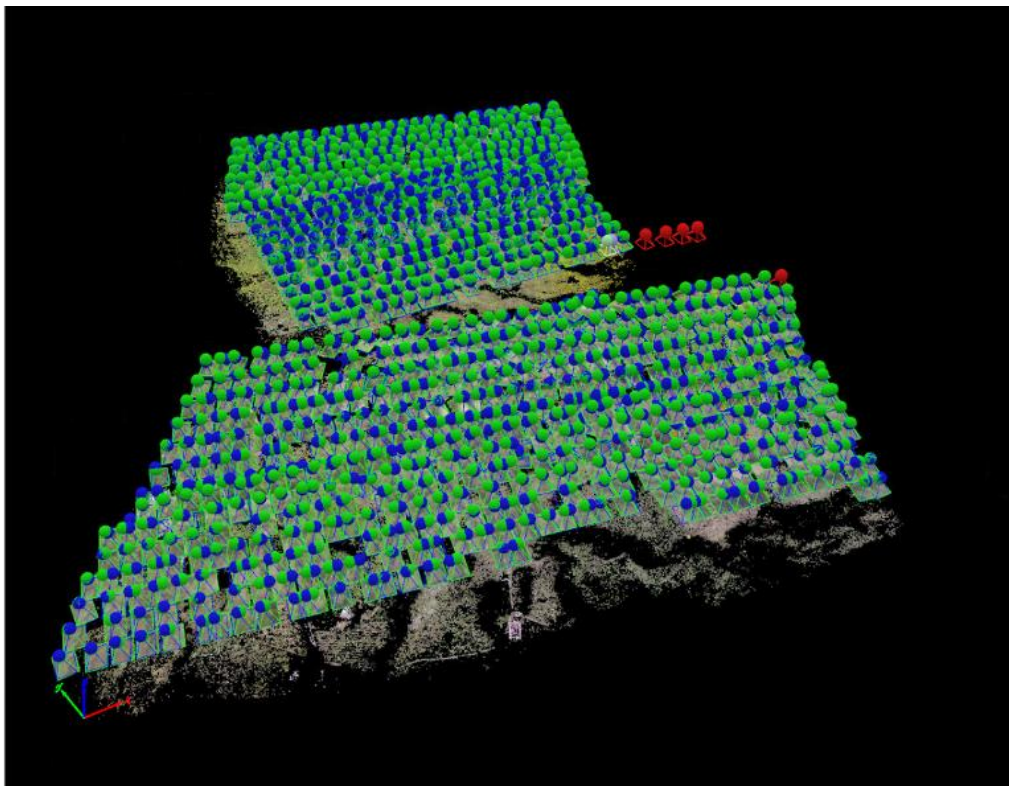


Figura 40. Nube de puntos proyecto 3.
Fuente: Autores.

4.2.1.4 Modelo Digital de Terreno (DTM), Ortomosaico e índices

Después de generar el DSM Los DTM generados (Figura 42) en este proceso tiene un tamaño de Píxel de 0,0499 metros x 0,0499 metros lo que permite tener una información más detallada del terreno, por lo tanto, se puede llegar a obtener una información de mayor credibilidad con respecto a los modelos generados en comparación con la información de la topografía convencional. Además, se crearon ortomosaicos del terreno como se muestra en la Figura 42, y se generaron de los índices de calidad del proceso, estos índices muestran el error medio con el que ha quedado la nueva información de la superficie del terreno.

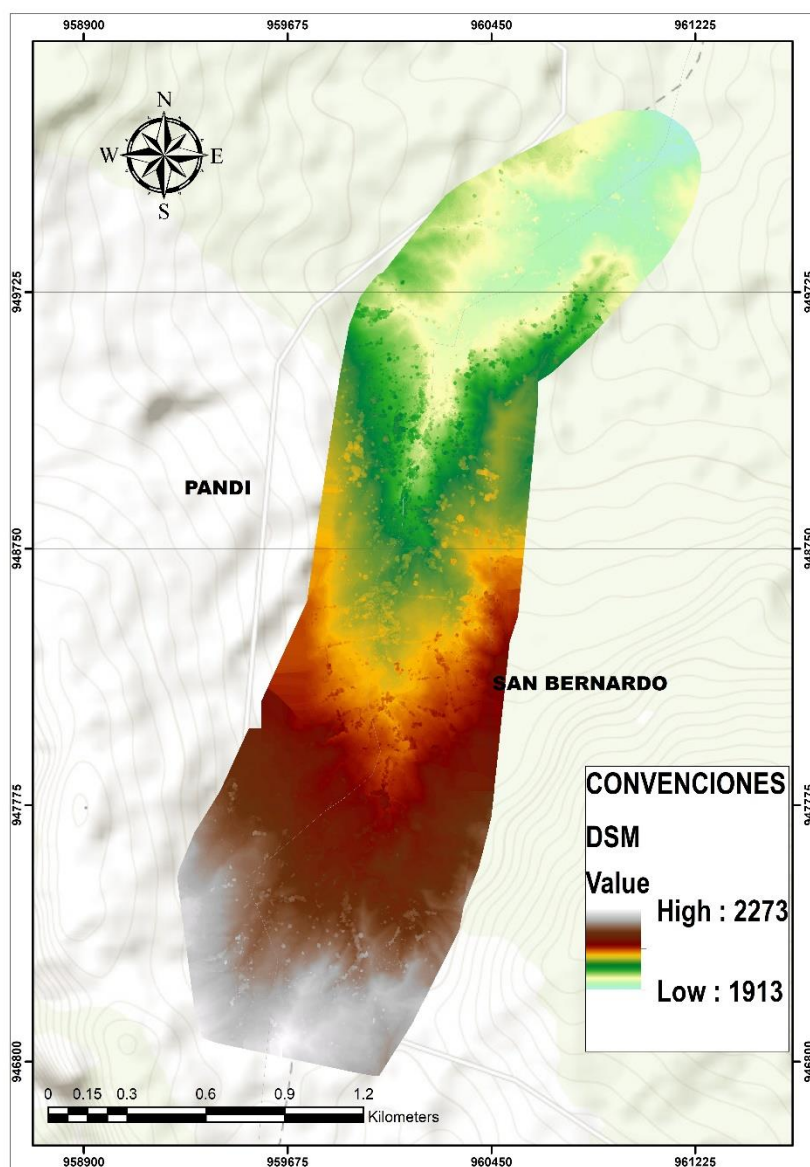


Figura 41. Modelo Digital de Superficie Quebrada Aguas Claras.
Fuente: Autores.

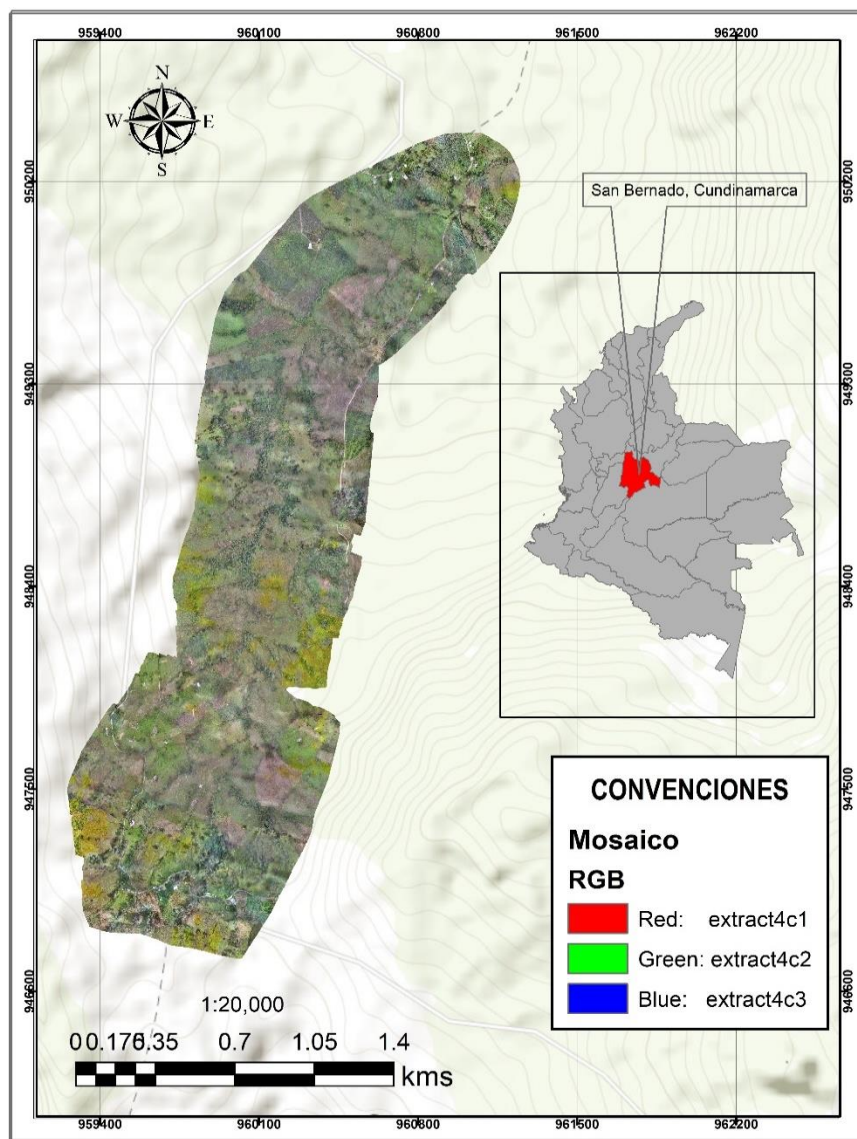


Figura 42. Mosaico Quebrada Aguas Claras
Fuente. Autores

4.2.2 Discretización de la cuenca y pre-proceso SWAT

La discretización de la cuenca se realizó por subcuenca, teniendo como punto de salida la estación Bocatoma pirineos. En este proceso se obtuvieron 19 subcuencas para el modelo convencional (A) y 31 subcuencas para el modelo con UAVs (B) como se muestra en la Figura 43, mostrándose sus parámetros principales en la Tabla 9 y 10. Las superficies de las subcuencas del modelo convencional varían entre 1.5 ha (subcuenca 17) y 108.6 ha (subcuenca 4), a su vez la subcuenca 2 coincide con la salida de la cuenca, donde se presenta la elevación más baja

(2080.3 msnm) y el número de HRUs que caracterizó a la cuenca completa fue de 172.

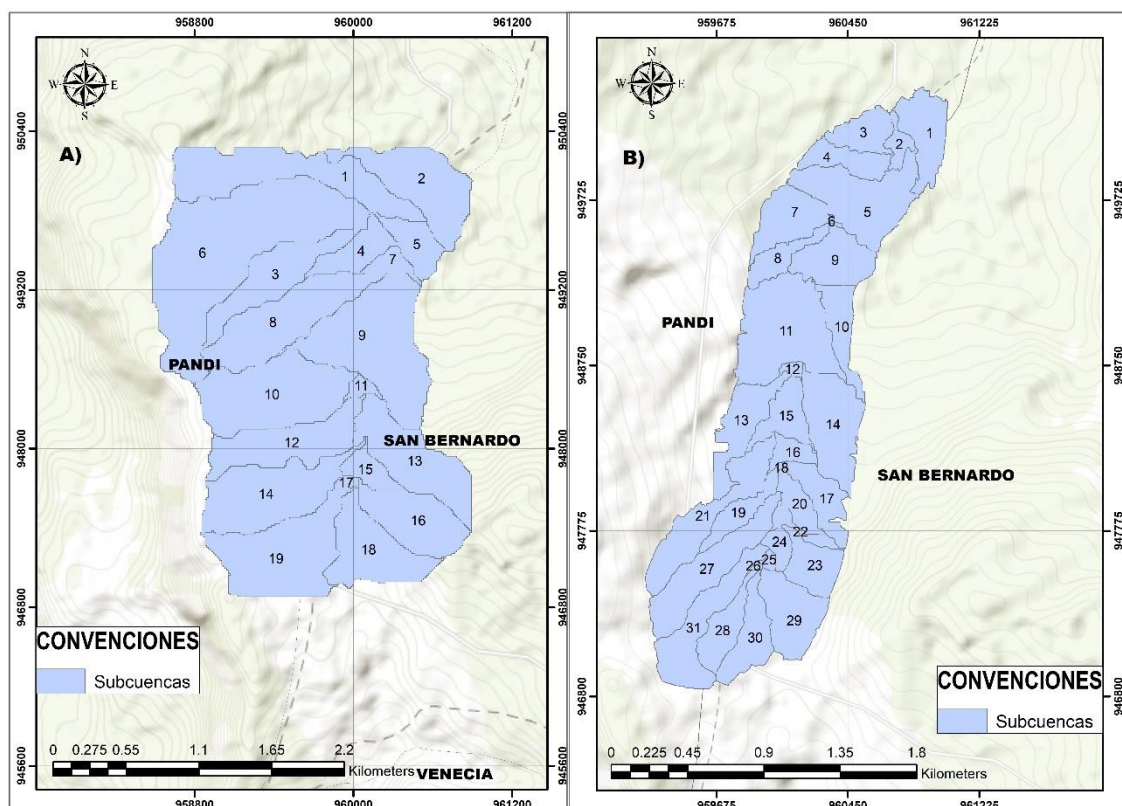


Figura 43. A) Subcuencas modelo convencional. B) Subcuencas modelo UAVs.
Fuente. Autores

Subcuenca	Área (ha)	Elevación (msnm)	HRUs
1	49.5	2080.3	9
2	37.0	1963.9	17
3	28.7	2108.7	6
4	13.5	1996.4	5
5	12.4	1970.8	8
6	108.6	2133.9	15
7	5.2	1972.6	9
8	43.2	2126.4	8
9	62.9	2043.0	18
10	52.4	2170.2	18
11	2.8	2043.8	3
12	33.3	2168.9	12
13	36.9	2171.3	9

14	43.7	2216.3	9
15	8.0	2110.7	4
16	28.5	2249.9	5
17	1.5	2117.1	3
18	31.4	2209.9	5
19	49.9	2224.0	9

Tabla 9. Principales parámetros modelo convencional.

Fuente: Autores.

En la discretización realizada para el modelo del dron se encontró que sus superficies varían entre 0,17 ha (subcuenca 18) y 22 ha (subcuenca 5), a diferencia del modelo convencional la subcuenca 1 coincide en con la salida de la cuenca, donde se presenta la elevación más baja (1942.41 msnm) y el número de HRUs que caracterizó a la cuenca completa fue de 572.

Subcuenca	Área (ha)	Elevación (msnm)	HRUs
1	11.49	1942.41	30
2	2.83	1943.61	27
3	7.23	1959.82	25
4	7.22	1959.83	19
5	22.19	1962.14	29
6	0.28	1953.77	10
7	11.56	1980.21	15
8	5.82	1997.71	15
9	12.06	1988.69	20
10	8.02	2034.83	20
11	29.28	2022.06	14
12	0.97	2019.68	10
13	12.15	2077.69	20
14	18.02	2079.56	20
15	7.96	2050.14	15
16	3.51	2069.44	10
17	8.38	2120.83	15
18	0.17	2071.08	10
19	6.06	2125.31	25
20	5.11	2106.65	10
21	17.69	2150.33	25
22	2.85	2128.37	15
23	8.74	2157.88	15

24	2.80	2128.20	10
25	0.81	2133.35	10
26	0.29	2137.66	13
27	17.87	2177.28	25
28	7.96	2204.96	25
29	13.68	2184.44	25
30	9.78	2210.35	25
31	16.46	2203.65	25

*Tabla 10. Principales parámetros modelo UAVs.
Fuente: Autores.*

4.3 FASE 3

4.3.1 Calibración y validación del modelo

Para la calibración del modelo, se realizó un ajuste de parámetros ya establecidos en la metodología, a partir de esto se pudo identificar que parámetros de entrada afectaban las salidas del modelo. Para esto se realizaron ejecuciones de este con variaciones pequeñas no mayores al 10%, como resultado, se pudo establecer que de estos tan solo seis eran sensibles para los dos modelos realizados y tan solo uno de ellos (SOL_AWC) representaba un grado de sensibilidad alto como se muestra en la *Tabla 11*.

Parámetro modificado	Grado de sensibilidad
SOL_AWC	ALTA
CN2	MEDIA
SOL_BD	MEDIA
Sol k	BAJA
OV_N	BAJA
SLSUBBSN	BAJA
ALPHA_BF	BAJA

*Tabla 11. Parámetros más sensibles que afectan los valores del modelo SWAT
Fuente: Autores.*

El grado de sensibilidad de los parámetros se determinaron a partir de las métricas establecidas, es decir, cuanto mayor era la variación en las métricas de desempeño, mayor era su sensibilidad.

Para la calibración de los parámetros ya identificados se ajustaron los parámetros a paso mensual hasta llegar al mejor resultado. Para el modelo convencional, inicialmente dio como resultado una diferencia importante entre el caudal mensual observado y simulado, determinando valores de MAE (0.0645), MRE (-0.5351), RMSE (0.173) y ME (0.0645), parámetros no muy buenos. Para llegar a la optimización final de los parámetros se necesitaron aproximadamente 100 simulaciones, obteniendo como resultado final valores de MAE (0.0287), RMSE (0.173) y ME (0.02812).

Para el modelo UAVs, contrario al modelo convencional dio una diferencia menor entre el caudal mensual observado y simulado, determinando valores de MAE (0.0568), RMSE (0.159) y ME (0.0568), parámetros que se pueden mejorar. Para llegar a la optimización final de los parámetros se necesitaron aproximadamente 200 simulaciones, un número mayor que el modelo convencional, debido a la cantidad de subcuencas de este modelo. De esto se obtuvo como resultado final valores de MAE (0.021), RMSE (0.1601) y ME (0.021).

Para los dos modelos se obtuvieron valores similares para los diferentes parámetros sensibles, cambiando en algunas subcuencas como se evidencia en la Tabla 12.

Modelo convencional		Modelo convencional	
Parámetro modificado	Valor ajustado	Parámetro modificado	Valor ajustado
SOL_AWC	0 todas las subcuencas	SOL_AWC	0 todas las subcuencas
CN2	95 todas las subcuencas	CN2	95 todas las subcuencas
SOL_BD	0.9 Subcuenca 1 y 2.5 en el resto	SOL_BD	2.5 Todas las subcuencas
Sol k	800 subcuenca 1 y 2, 500 para 3	Sol k	800 subcuenca 2 y 3, 500 para 1
OV_N	1.8 Subcuenca 1	OV_N	1.8 Subcuenca 1
SLSUBBSN	10 excepto subcuencas 13, 16 y 18	SLSUBBSN	10 excepto subcuencas 9-11, 20-25 y 28-31
ALPHA_BF	1 subcuenca 1	ALPHA_BF	1 subcuenca 1

Tabla 12. Ajuste final parámetros del modelo convencional y UAVs.

Fuente: Autores.

- **Validación**

La validación del modelo se realizó a paso mensual entre los periodos de enero del 2009 y julio del 2014, dio como resultados valores de MAE (0.017), RMSE (0.062) y ME (-0.017), para el modelo UAVs. Estos valores muestran que, en estos años, el modelo a paso mensual (Figura 44), al igual que en la calibración se ajusta apropiadamente al sistema físico planteado, teniendo en cuenta que las métricas para este periodo mejoraron significativamente.

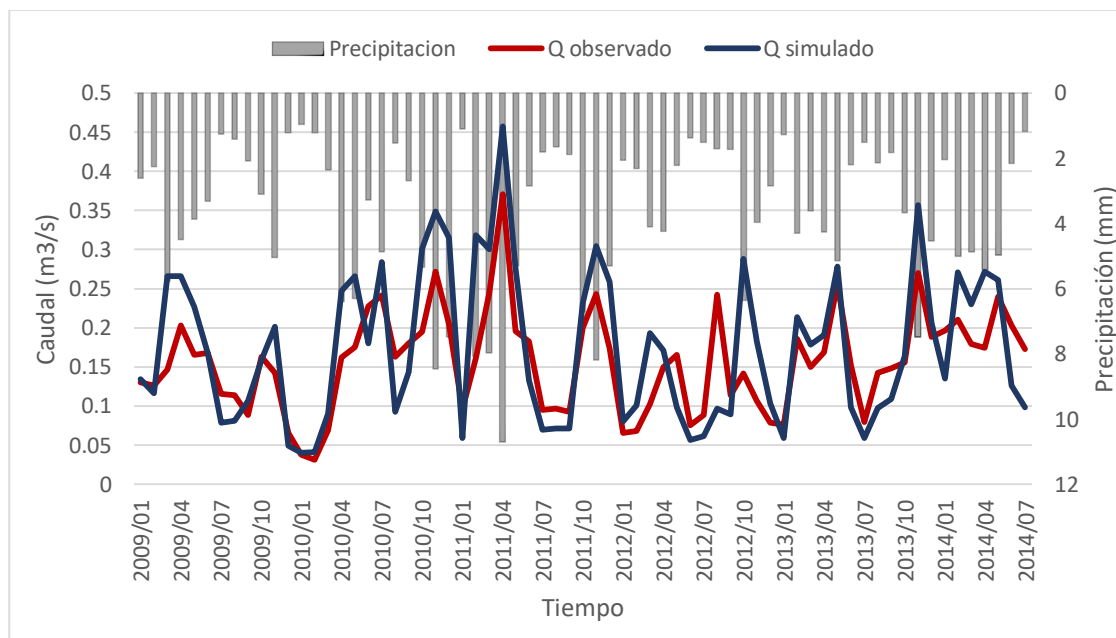


Figura 44. Evolución caudal mensual observado y simulado en el periodo validado modelo UAVs.

Fuente. Autores

En el caso del modelo convencional (Figura 45) se obtuvieron resultados de MAE (0.025), RMSE (0.080) y ME (-0.025). Al igual en el modelo UAVs estos valores muestran que, en estos años, el modelo a paso mensual, al igual que en la calibración se ajusta apropiadamente al sistema físico planteado, teniendo en cuenta que las métricas para este periodo mejoraron significativamente, cabe aclarar que la métrica ME dio un resultado negativo, ya que, para este periodo de tiempo el modelo hace una sobrestimación de caudales que como se muestra en la figura 39 no es tan elevada.

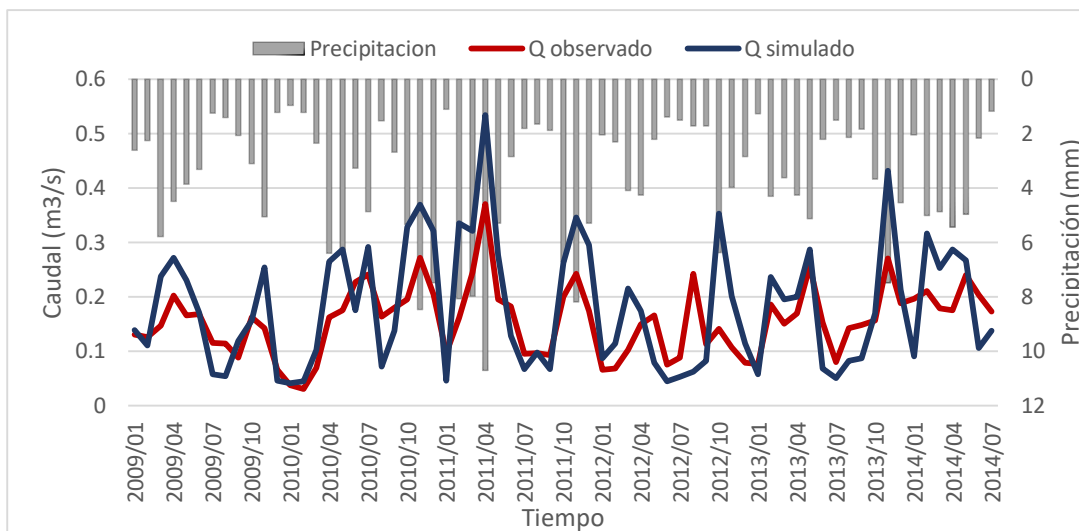


Figura 45. Evolución caudal mensual observado y simulado en el periodo validado, modelo convencional.
Fuente. Autores

4.3.2 Simulación con un periodo de 5 años

La simulación (Figura 46) se realizó para el mismo periodo en que se evaluó el índice de sequía esto con el fin de poder detallar el comportamiento de los caudales resultantes luego de introducirse una variación en su uso de suelo. Dicha variación fue dada en el orden de alterar áreas que se encontraban en pastizales y remplazarlos por agricultura, toda vez que se realizó dicho procedimiento se procede a ejecutar nuevamente los modelos y se comparan.

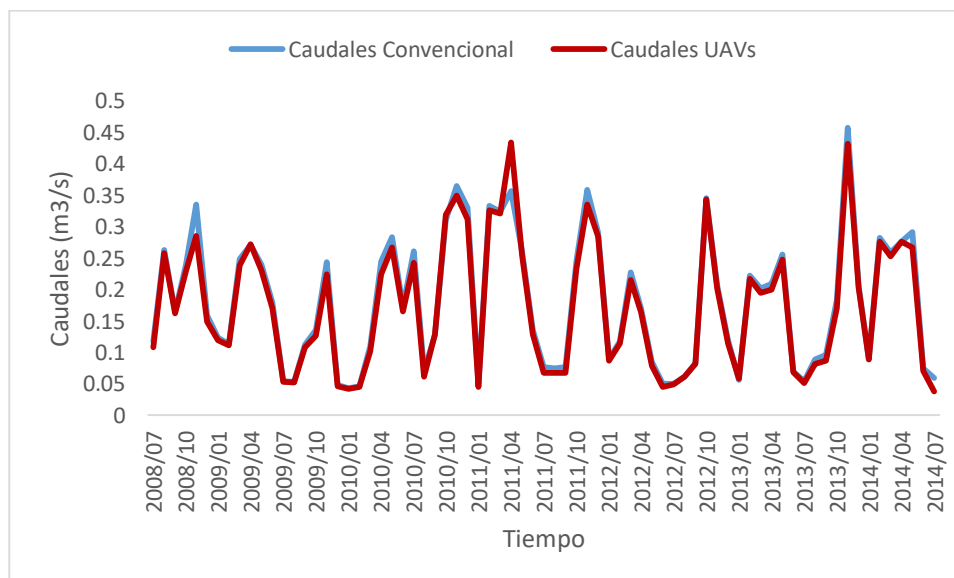


Figura 46. Simulación modelo convencional y UAVS a un periodo de 5 años

Fuente: Autores.

De tal manera, la Figura 47 permite observar:

1. La evidencia de que los modelos no varían en gran medida se denota que el modelo realizado con herramientas UAVs para el año 2011 presenta un pico en sus resultados, pero el resto de los años su semejanza es tal que casi no se logra diferenciar sus comportamientos.
2. Que la cuenca para esos años ha tenido tanto épocas de sequía como épocas en que sus caudales son suficientes para los diferentes abastecimientos requeridos.

4.3.3 Índice de sequia

El índice normalizado de los caudales fluviales (SFFI) es calculado para las simulaciones generadas en los modelos (convencional y herramientas UAV'S) en un periodo integrado de 5 años. Dicho periodo se evalúa mensualmente, de esta manera se puede determinar qué meses presentan un alto índice de sequía como se muestra en las (Figuras 48 y 49) color rojo. No se evalúa anualmente debido a que al momento de agrupar los resultados mensuales ningún año presente sequia contrastando casos observados anteriormente en la quebrada.

La evaluación de los índices se hace basada en la siguiente tabla:

Índice de sequía	
SFFI	Descripción
rangos	
-0,3 a -0,9	Normalmente seco
-0,9 a -1,5	Moderadamente seco
$\leq -1,5$	Severamente seco

Tabla 13. Rangos índices de sequía SFFI

Fuente: Autores.

La Tabla 13 muestra los rangos para los valores del índice normalizado de los caudales fluviales y la gravedad de la sequía que cada uno de esos valores representa para la zona.

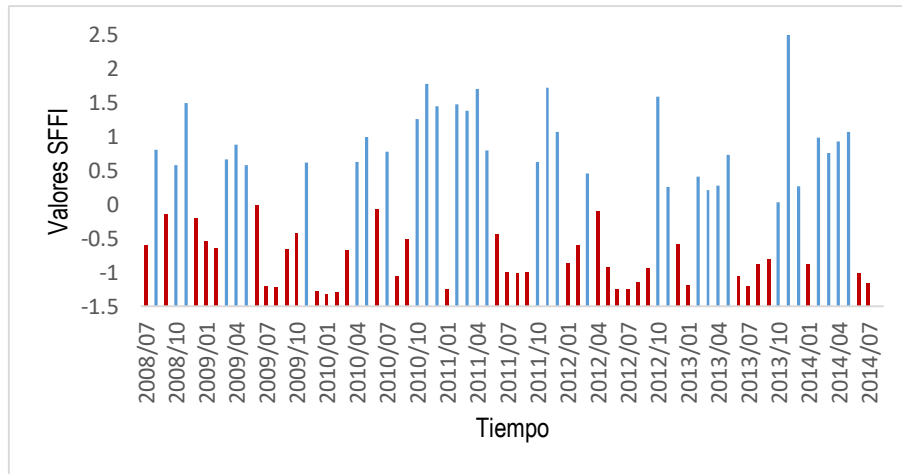


Figura 47. Índice de sequía modelo convencional.
Fuente: Autores.

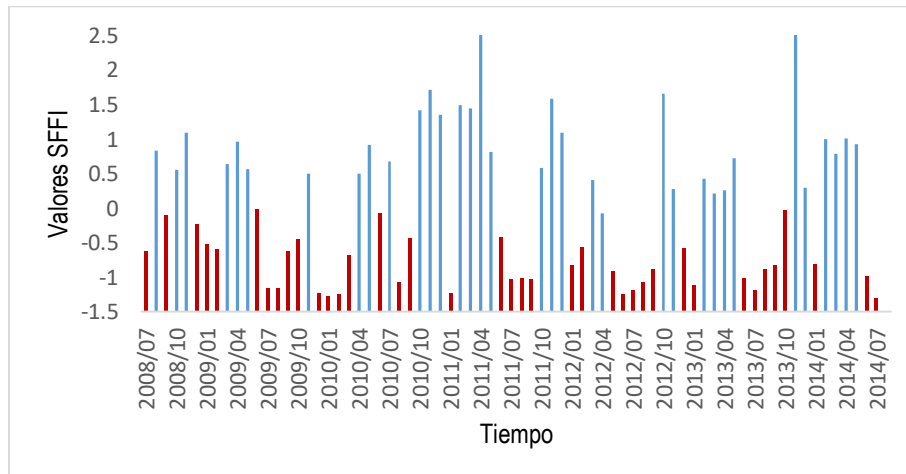


Figura 48. Índice de sequía modelo UAVs.
Fuente: Autores.

Estas figuras representan los valores calculados para el índice normalizado de los caudales fluviales, donde se denotan con un color rojo los caudales que obtuvieron valores negativos y que representan de una u otra manera sequías para dichos periodos.

5 Análisis de resultados

5.1 Comparación y análisis de la obtención de datos topográficos

A partir de la de los resultados generados, se tienen dos modelos hidrológicos los cuales se diferencian por la resolución en la toma de datos topográficos. De este modo se evidencia en la Figura 50 imagen B la información con UAV's, es la mejor representación de las características de la quebrada y es la permite observar los meandros que se encuentran en la parte baja de la cuenca y la cantidad de ramificaciones en el nacimiento de esta.

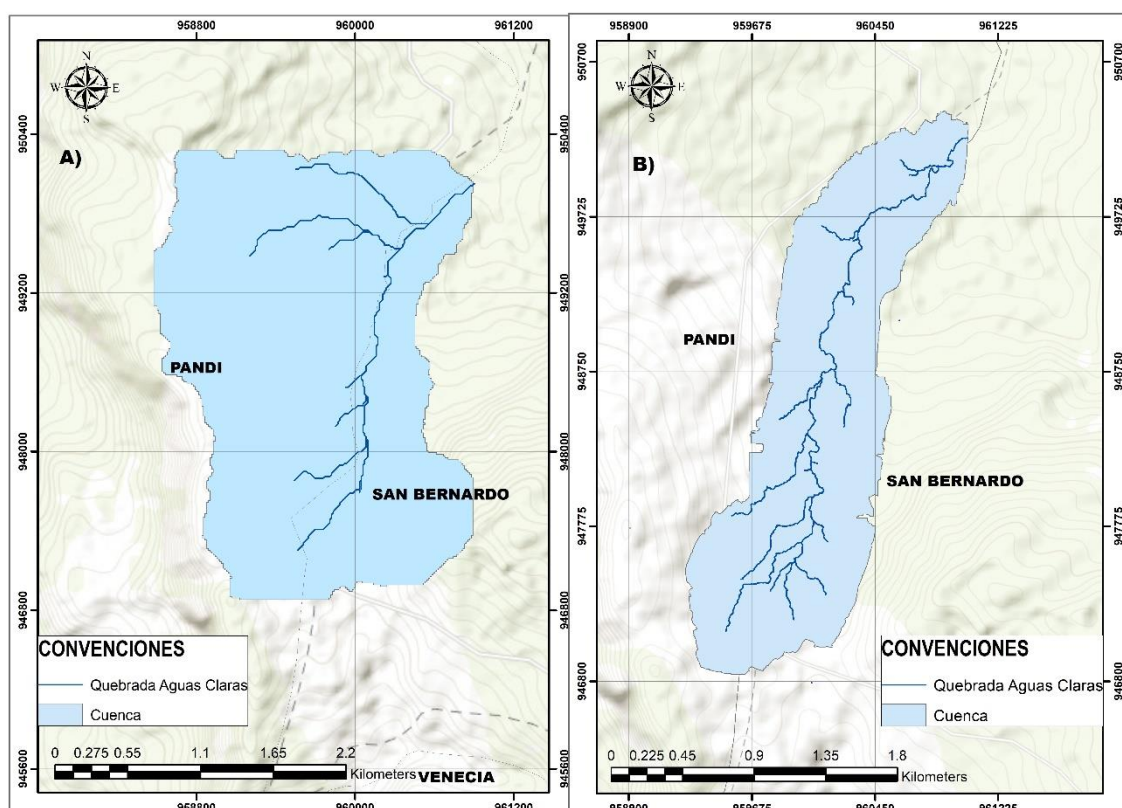


Figura 49. A) Drenajes modelo convencional. B) Drenajes modelo UAVs.
Fuente: Autores.

Otra característica importante de los modelos analizados es la morfometría de las cuencas, mientras en el modelo A, encontramos una cuenca achatada y en el modelo B, se evidencia una cuenca alargada, esto, debido a que los buffers fueron generados de dos maneras; La delimitación de la cuenca del modelo A se realizó para toda la zona de estudio, debido a que se contó con el DEM de toda la quebrada y para el modelo B se realizó el tamaño del buffer basados en la disponibilidad de

equipos. Por ende, en el modelo convencional debido a su forma de la cuenca puede estar generando perdidas de suelo en la parte alta y traer consecuencias en la morfología del terreno aguas abajo y estos resultados en conjunto con los demás parámetros de relieve permiten considerar que las características físicas y el comportamiento hidrológico de la cuenca se encuentran influenciados por la topografía y con esto el cambio en los resultados de los modelos.

Por lo cual se es necesario analizar las pendientes de los dos modelos. Para la determinación de estas, se categorizaron en 5 rangos (Tabla 14) dentro del proceso de discretización de la cuenca.

Pendiente (%)	Tipo de pendiente
0 – 9	Ondulada
9 – 16	Quebrada
16 - 30	Fuertemente ondulada
30 - 45	Colgada
>45	Muy colgada

Tabla 14. Tipo de pendientes
Fuente [58]

En la categorización se pudo establecer que para el modelo convencional (Figura 50) (A), las pendientes más representativas se encuentran desde (0-16%), es decir pendientes onduladas y quebradas, mientras en el modelo UAVs (B), las pendientes más representativas son (9-16%), es decir pendientes quebradas, sin embargo, en este modelo se puede evidenciar un aumento significativo en el porcentaje de terreno con pendientes colgadas a comparación del modelo convencional, pues en este tan solo se evidencian en la parte alta de la cuenca, debido a la resolución de los modelos, mientras en el modelo digital de superficie (modelo USVs) se alcanzó una resolución de 0,049 metros, el modelo digital de elevación (modelo convencional) está realizado a una resolución en 12,5 metros, lo cual influye a que no se alcance a establecer estas zonas de alta pendiente en toda la cuenca.

La variabilidad topográfica influye mucho en la respuesta hidrológica de las cuencas y muchos fenómenos como depósitos de retención temporales, o caídas bruscas de agua por pendientes, estas características hacen de la cuenca, una zona de aportación que permite respuestas muy cambiantes en el tiempo [61], por ende, los resultados de los dos modelos analizados varían en su datos de salida (caudales), ya que sus pendientes no están distribuidas de la misma forma en los modelos realizados.

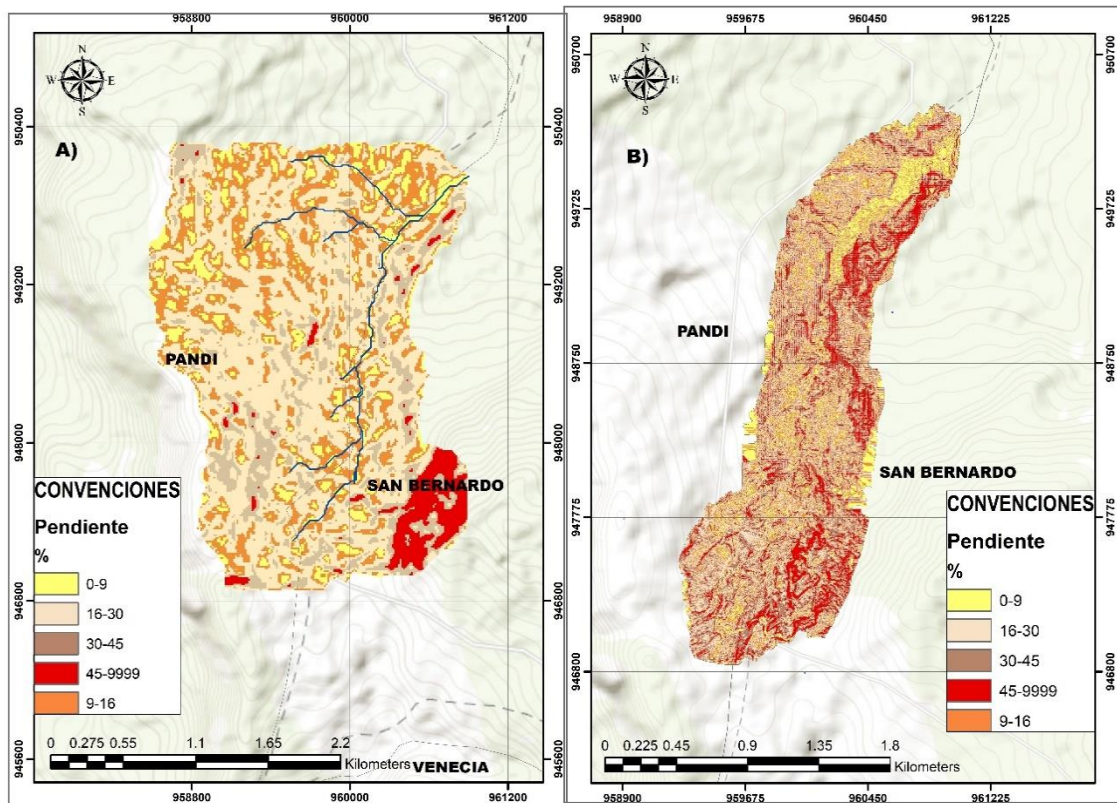
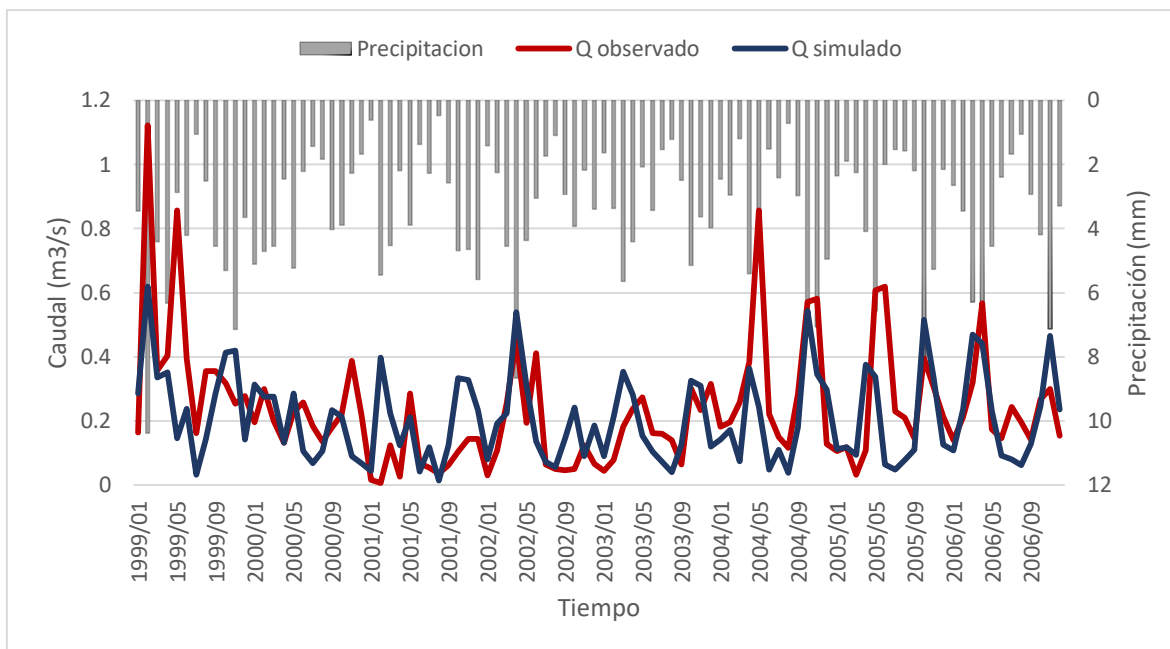


Figura 50. A) Pendientes modelo convencional. B) Pendientes modelo UAVs.
Fuente: Autores.

5.2 Calibración de los modelos

A continuación, se mostrará los resultados de la calibración de los dos modelos evaluados en esta investigación.

Los resultados del modelo convencional como se muestra en la Figura 52 subestimo los caudales pico en época de crecidas, mientras que, en época de estiaje, represento una congruencia aceptable entre la magnitud de los caudales observados y simulados. La diferencia del promedio de los caudales observados y simulados para este modelo fue de 2,871 m³/s, siendo este el mejor resultado al cual se llegó en la calibración de este.



*Figura 51. Resultados calibración modelo convencional.
Fuente: Autores.*

En cuanto al modelo UAVs (Figura 53) en general represento un buen ajuste entre las curvas de caudales observados y simulados, ya que, las mayores desviaciones estuvieron asociadas a las altas crecidas en los caudales observados puesto que el modelo no sobrestimo estos. La diferencia del promedio de los caudales observados y simulados para este modelo fue de $2,1 \text{ m}^3/\text{s}$, que a comparación del modelo convencional represento $0,76 \text{ m}^3/\text{s}$ de más, observándose que el caudal simulado era más cercano al observado. Además de esto las métricas de calibración mostraron un mejor resultado en cuanto a su desempeño, indicando que este modelo a pesar de no contar con información topográfica de toda la cuenca, simulo mejor el comportamiento de los caudales que el modelo convencional.

Es importante mencionar que una de las limitantes es la falta de información precisa, en cuanto a datos climatológicos y tipo de suelo, en este sentido habría que contar con mejores datos en términos de calidad y cantidad para optimizar la fiabilidad de las simulaciones. Otra limitante observada fue que la calibración se realizó para un solo punto (Bocatoma pirineos), el cual corresponde a la salida de la cuenca, lo cual podría forzar el ajuste de los parámetros a calibrar sacrificando el rango de los parámetros físicos de algunos parámetros, lo cual podría conducir a errores en los cálculos de los diferentes procesos hidrológicos en las demás subcuencas [62], sin embargo, a pesar de estas limitantes se considera que los resultados obtenidos fueron satisfactorios teniendo en cuenta la información disponible del área de estudio.

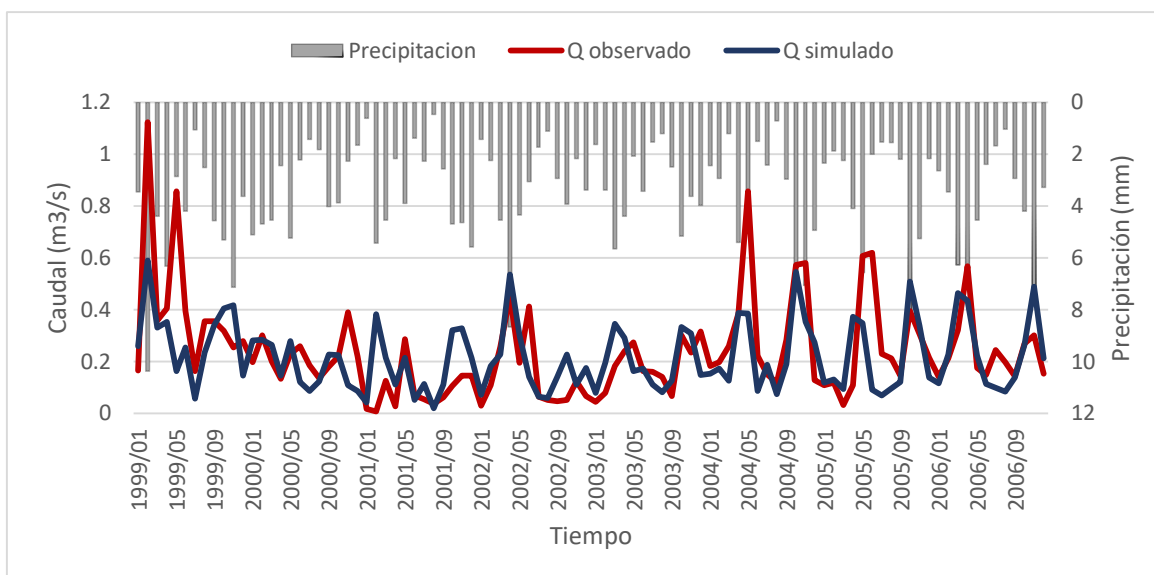


Figura 52. Resultados calibración modelo UAVs.
Fuente: Autores.

5.3 Simulación en un periodo de 5 años

La simulación realizada en esta investigación parte con el fin de determinar el fenómeno de sequía de la zona de estudio a través del índice SFFI, simulando una expansión significativa de las áreas destinadas agricultura, siendo esta una dinámica acelerada en el municipio de San Bernardo, Cundinamarca (despensa agrícola del Sumapaz).

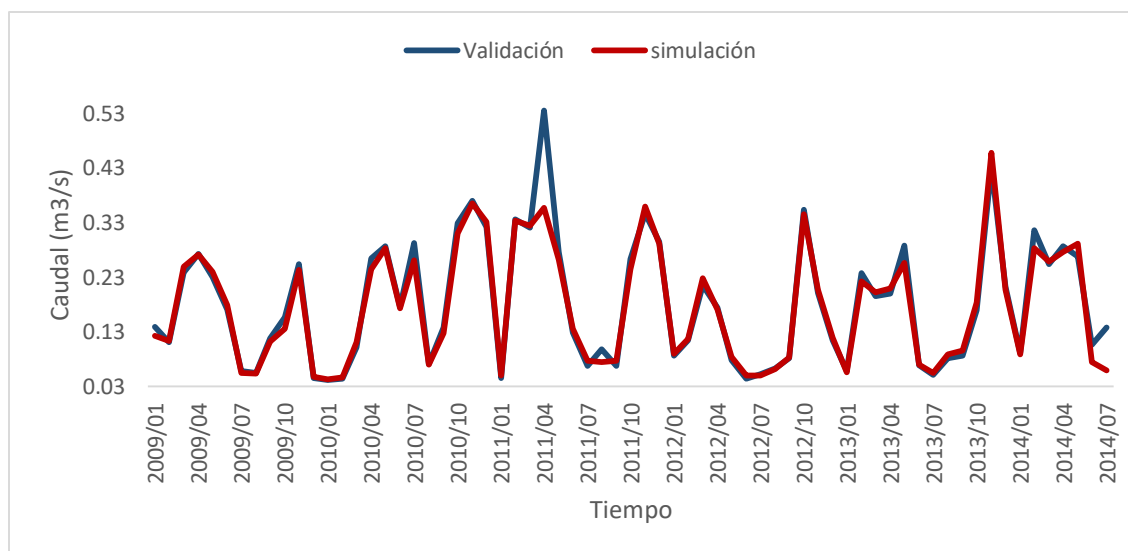
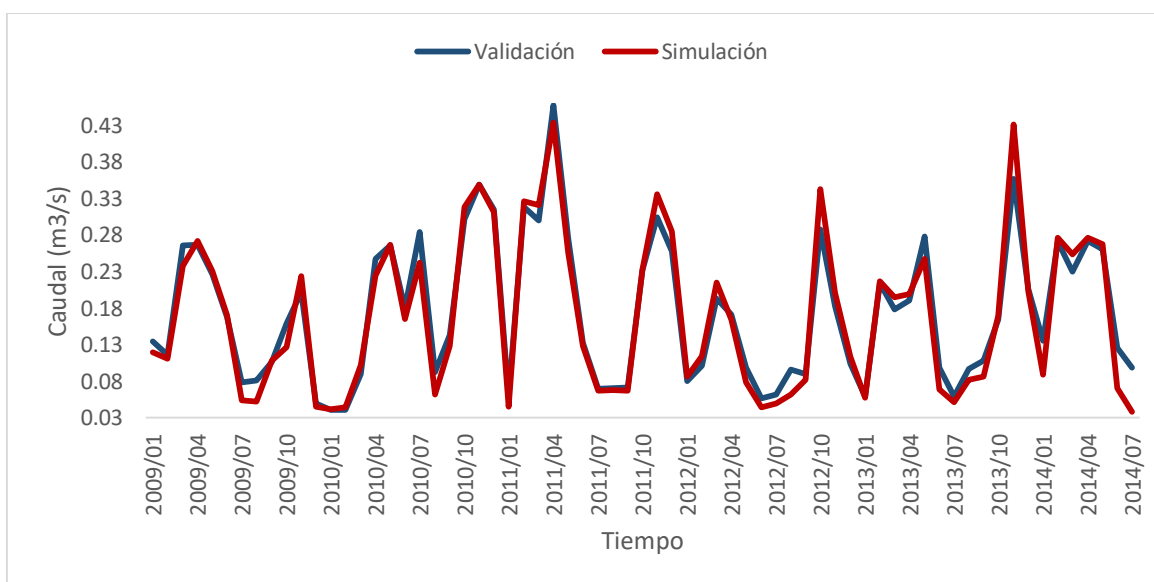


Figura 53. Caudales validados y simulados modelo convencional.
Fuente: Autores.

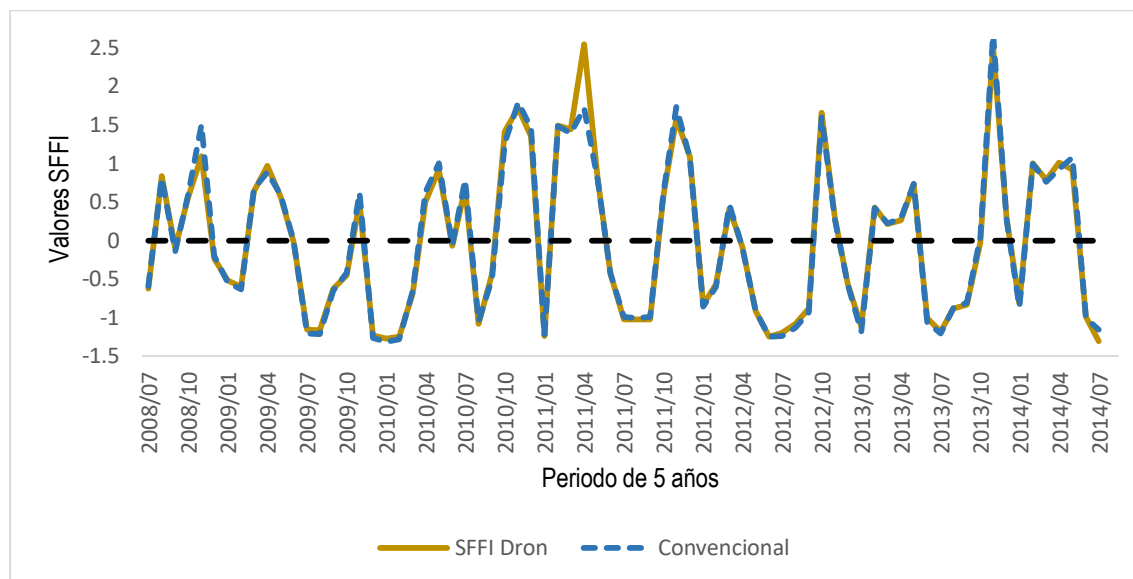
Comparando los caudales validados con los simulados en el mismo periodo de tiempo, se puede evidenciar que al expandir las zonas agrícolas en la zona de estudio se produce una disminución de caudal promedio de $0,54 \text{ m}^3/\text{s}$, es decir, que esta actividad si generaría posibles afectaciones en cuanto oferta del recurso hídrico, sin embargo como se puede observar en la (Figura 53), se puede inducir que esta posible disminución se vea representada por la disminución significativa del caudal en el periodo de tiempo de marzo de 2011 a mayo del mismo año. Quizás el modelo no es capaz de representar este pico, lo que lo hace inestable en este periodo de tiempo.



*Figura 54. Caudales validados y simulados modelo UAVs.
Fuente: Autores.*

En el caso del modelo UAVs, al igual que en el modelo convencional se produce una disminución de caudal a causa del desplazamiento de pastizales, sin embargo, en este caso fue $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$, representando una mayor disminución de caudal, con la diferencia que este modelo y como se muestra en la Figura 54 es más estable a comparación del anterior modelo, por ende, en las temporadas de estiaje simulo una disminución de los caudales de salida, lo que nos conlleva a comprender que el aumento de las áreas de agricultura en la zona de estudio puede llegar afectar significativamente la oferta hídrica en las temporadas de estiaje, lo cual puede llegar generar impactos económicos y ambientales, si se permite el aumento no controlado de esta actividad y no se realiza una planificación efectiva de la cuenca.

5.4 Índice de sequía



*Figura 55. Índice de sequía modelo convencional y modelo UAVs.
Fuente: Autores.*

La Figura 55 muestra los valores para el Índice normalizado de los caudales fluviales (SFFI) y la comparación existente entre los dos modelos, en esta gráfica se observan las características de sequía teniendo en cuenta la gravedad que se puede tener en cada mes evaluado. Se visualiza que ambos modelos tienen comportamientos similares y que en los meses del año 2008 (julio-diciembre) no se presenta una sequía severa, solo el 50% de los meses muestra una sequía normal. El 2009 presenta una sequía moderada para el mes de diciembre la cual es la única grave para dicho año, el resto de los meses o no presenta sequia o simplemente tiene una sequía normal, a su vez el año 2010 presenta una tercera parte de sequía moderada al igual que el año 2011 con un porcentaje del 33.3% de meses que representan un periodo de sequía. Finalmente, el periodo evaluado comprende hasta el año 2012 y 2013 presentan un 25% de sequía moderada las cuales se repiten para los meses de junio y julio en ambos años.

De este modo se entiende que los primeros 2 años (2008 y 2009) fueron los que menos sequia presentaron, aun así es necesario tener en cuenta que para el año 2008 solo se tienen en cuenta los últimos 6 meses del año, los siguientes dos años (2010 y 2011) son los más críticos y al finalizar para los últimos años (2012 y 2013) disminuye la sequía en tan solo un mes, aun así el 2013 puede ser crítico teniendo en cuenta que este año solo se evalúa en los primeros 6 meses del año y teniendo en cuenta esto su porcentaje podría subir a un 50%. Para el tiempo evaluado se denota que no hay sequías severas debido a que no se encuentran valores $\geq -1,5$.

Al momento de observar datos negativos demostrando así que en efecto hay meses que presentan sequías, que, aunque no sean severas son de importancia y pueden representar afecciones a la población aledaña a la quebrada y a la empresa ADUSAP, debido a que afectaría la oferta hídrica del lugar.

5.5 Ventajas y desventajas del uso de herramientas UAVs

A continuación, se describen algunas ventajas y desventajas que se encontraron en cuanto al uso de drones durante el desarrollo del trabajo

Parámetros	Topografía convencional	Topografía con UAV's
Tiempo	El tiempo empleado para generar la topografía convencional fue de un día para esta área de estudio. Teniendo en cuenta que no fue abarcada en su totalidad las áreas establecidas en la limitación del proyecto.	El tiempo empleado para obtener la topografía con UAV's fue de 3 días, abarcando casi en la totalidad el aérea de estudio y contando que se presentaron días de lluvia durante la toma de datos.
Área	El área abarcada con esta metodología fue aproximadamente de 8,53% del área total.	El área abarcada con esta metodología fue aproximadamente de 68.3% del área total.
Personal	En esta metodología se emplearon ocho personas para llevar a cabo la obtención de los datos.	En esta metodología se emplearon 3 personas, los cuales correspondían al piloto del Drone, una persona responsable de la ubicación de los pendones y una persona encargada de tomar los datos con el RTK.
Equipos	Para la recolección de datos por esta metodología se emplearon, dos niveles, dos miras y dos GPS. Además, fue necesaria la obtención del Banco de Nivel o Banco de Marca (BM) con el RTK.	En esta metodología se hizo uso de dos Drones, ocho pendones y un RTK.
Ventajas	- Los equipos en esta metodología están expuestos a menos riesgos de daño. - Los equipos son de más fácil acceso y son más económicos. - La obtención de datos se puede llevar a cabo cualquier hora del día. Esta metodología no está limitada a las condiciones climáticas de la zona.	- El tiempo empleado con respecto a las áreas tomadas fue más corto. - No es necesario emplear mucho personal (mínimo 1 persona, el operador del Drone). - En esta metodología se puede obtener información topográfica de zonas de difícil acceso. - Aportan información gráfica. - La información es mucho más completa en cuanto a color de las fotografías, lo que consigue una mayor resolución y realismo del terreno. - Se obtiene información mucho más rápida y completa, lo que ocasiona en este caso se tenga altos niveles de respuesta de los riesgos de inundación. El Drone es relativamente económico para la cantidad de trabajo que puede llegar a efectuar en varios proyectos.

Desventajas	▪ Los tiempos de obtención de datos son mayores. ▪ El costo de las operaciones de los equipos es elevado debido al personal necesario. ▪ La obtención de los datos está limitada a las condiciones del terreno, las cuales pueden significar grandes riesgos para los operadores, como en este caso de estudio algunas áreas de puerto salgar presentaban fuertes pendientes, lo cual fue imposible obtener los datos con esta metodología. ▪ La obtención de los datos es subjetiva y depende del operador del nivel. ▪ Cada vez que se necesitan hacer cambios es necesario tomar la vista atrás y la vista adelante, lo cual genera mayor tiempo a la obtención de datos.	▪ Depende de las condiciones horarias de la zona, ya que se toman las fotografías con iluminación solar. ▪ Esta limitado a las condiciones climáticas de la zona, ya que estos equipos no pueden operar bajo condiciones de lluvia. ▪ Existe el riesgo de pérdida de equipo. ▪ Se necesita de equipos de alto potencial computacional.
Imprevisto	▪ Pérdida de los equipos. ▪ Ausencia del personal. ▪ Daños del equipo durante el transporte. ▪ Zonas de difícil acceso.	▪ Pérdida de los equipos. ▪ Ausencia del personal. ▪ Daños del equipo durante el transporte. ▪ Precipitaciones durante la toma de datos. ▪ Descalibración del equipo.
Resultados	▪ Los resultados obtenidos con esta metodología es un DEM que contiene la información de la elevación digital del terreno y este no considera las elevaciones de las estructuras que hacen parte del área de estudio, el error está enfocado en la subjetividad de la toma de datos, y los tiempos de obtención de resultados son más largos.	▪ Con esta metodología el error está determinado por el error medio del RTK, por lo tanto, se obtienen resultados con mayor precisión, se genera un Modelo Digital de Terreno (DTM), en el que se tienen en cuenta todas las condiciones topográficas tanto del terreno como otros elementos geográficos y características naturales como ríos, líneas de crestas, etc., lo cual es importante para la obtención de modelos de sequía. Los resultados son obtenidos en un menor tiempo.

Tabla 15. Ventajas y desventajas del uso de herramientas UAVs
Fuente: Autores.

6 IMPACTO SOCIAL

Este estudio es una de las primeras investigaciones que involucra una modelación hidrológica para la quebrada de Aguas Claras con un enfoque en la determinación y simulación de sequías agrícolas que se puedan presentar; de tal forma que los resultados de esta investigación puedan permitir información suficiente con el fin de crear planes de contingencia hacia la población aledaña y poder disminuir los impactos negativos que estas disminuciones de caudales pueden provocar.

Cabe resaltar que hasta la fecha la empresa ADUSAP (asociación de usuarios de servicios de agua potable), encargada de velar por el cuidado aguas arriba de la captación que surte agua al casco urbano de San Bernardo, no maneja planificación de la corriente, antecedentes de regulación de caudales o estudio de la Quebrada debido a la falta de recurso invertido para estudios de la naturaleza, especialmente en la gestión del recurso hídrico, por ende, esta investigación pretende ser fuente de información valiosa para la toma de decisiones acertadas y oportunas por parte de la asociación, evitando impactos socioeconómicos y ambientales en este Municipio.

De igual modo se procura realizar sugerencias pertinentes en cuanto al manejo del modelo SWAT para sequías y su método de calibración, como información suficiente de los Sistemas Aéreos No tripulados UAV's, con el fin de poder tener una mejor eficiencia y resultados provechosos en la implementación de estas herramientas en posteriores estudios.

7 CONCLUSIONES

El presente trabajo abre puertas en la aplicación el modelo SWAT con implementación de levantamiento topográfico a través de vehículos aéreos no tripulados. De esta manera los modelos adquieren una mayor resolución y mejor detalle de todo lo que se encuentra en la cuenca. El resultado de la calibración y validación indicó un buen desempeño del modelo UAVs, por tanto, la implementación de este tipo de herramientas en modelos hidrológicos ayuda a mejorar las simulaciones, comprendiendo mejor el comportamiento de la zona de estudio y generando resultados más acertados en procesos de planificación y conservación territorial.

SWAT al ser una herramienta integradora que incluye y tiene en cuenta los diferentes componentes naturales del ciclo hidrológico, el uso y el manejo del suelo, se puede pensar que este tipo de modelos de simulación de sequías son una buena aproximación a la realidad del área de estudio y podría ser considerado como una base de la cuantificación de los recursos hídricos en el área, apoyando la toma de decisiones en el territorio en cuanto al manejo del recurso hídrico.

En la zona de estudio existen limitantes en cuanto a la información climática y para obtener un buen desempeño en un modelo hidrológico, es necesario contar con datos de entrada en cantidad y calidad. Sin embargo, un correcto tratamiento de información climatológica y un buen conocimiento de los procesos de modelación y control de calidad de datos disponibles puede mejorar los resultados del mismo.

La herramienta de modelación hidrológica, bajo el concepto del balance hídrico, permite evaluar los aspectos principales de una unidad hidrológica de forma detallada, lo cual genera una aproximación de la afectación que genera la expansión de la frontera agropecuaria y urbana en las zonas con alto nivel de conservación, dado esto la expansión de áreas agrícolas en el área de estudio disminuye la oferta hídrica de la Quebrada Aguas Claras, representando un riesgo para la población aledaña y el abastecimiento de agua a la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAB) del municipio.

La implementación del modelo SWAT, en la detección y caracterización de sequías mediante su asociación con el Índice normalizado de los caudales fluviales (SFFI), mostró que, para el periodo de tiempo simulado, se pueden presentar sequías en el área de estudio que, aunque no sean severas son de importancia analizar y monitorear, por ende, este modelo puede contribuir al estudio de sequías en la región del Sumapaz aportando una nueva herramienta de planificación y gestión del recurso hídrico.

La simulación, permite observar los periodos de sequía a una escala mensual, de este modo es posible predecir en base a datos de uso de suelo y tipo de suelo las posibles sequias que pueden presentarse en una determinada cuenca con el fin de prevenir y mitigar los impactos que dichas sequias puedan significar. Esta simulación no debe comprender un periodo muy extenso de años, pues si es así, se debe entrar a mirar las variaciones en los parámetros climatológicos y esto podría complicar la veracidad de la simulación.

8 RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar un levantamiento topográfico completo de la Quebrada Aguas Claras con el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAVs), para así obtener una mejor calibración del modelo y una mejor simulación del comportamiento de las sequias en esta zona de estudio.

Para la disminución de la incertidumbre de los datos obtenidos en futuras simulaciones se recomienda instalación de nuevas estaciones climáticas en la zona de estudio, como también un mantenimiento de las estaciones ya existentes con el fin de generar series históricas a una mayor precisión.

Se recomienda generar estudios de suelos detallados de la zona, donde se puedan establecer las características fisicoquímicas de los mismos y así mejorar la precisión del modelo.

En el levantamiento de información topográfica con herramientas UAVs, se recomienda no sobrevolar en áreas restringidas como lo son bases aéreas, cárceles, aeropuertos, bases militares, entre otros, como también se debe considerar la reglamentación que establece la Aeronáutica Civil de Colombia, en la *Circular Reglamentaria N° 002*, en la cual se establece que el vuelo no puede superar los 152 m de altura sobre el terreno o sobre el agua.

ANEXOS

Anexo 1: Valores caudales de calibración.

Periodo	Convencional	UAVs	Periodo	Convencional	UAVs	Periodo	Convencional	UAVs
1999/01	0.285	0.2572	2002/01	0.08027	0.06991	2005/01	0.1126	0.1174
1999/02	0.6194	0.5888	2002/02	0.1927	0.1823	2005/02	0.1182	0.12966
1999/03	0.3358	0.3292	2002/03	0.2229	0.2258	2005/03	0.09364	0.09225
1999/04	0.3512	0.351	2002/04	0.5382	0.5345	2005/04	0.3751	0.372
1999/05	0.146	0.1621	2002/05	0.3089	0.2993	2005/05	0.3376	0.348
1999/06	0.2383	0.2523	2002/06	0.1351	0.1406	2005/06	0.06407	0.09117
1999/07	0.03241	0.05531	2002/07	0.07212	0.06278	2005/07	0.04745	0.06851
1999/08	0.1439	0.2331	2002/08	0.05658	0.05734	2005/08	0.07778	0.09612
1999/09	0.2849	0.3388	2002/09	0.1433	0.13936	2005/09	0.1106	0.12079
1999/10	0.4136	0.4043	2002/10	0.2424	0.2268	2005/10	0.5161	0.5073
1999/11	0.4197	0.4162	2002/11	0.08988	0.11072	2005/11	0.3352	0.3366
1999/12	0.1414	0.1449	2002/12	0.1859	0.17385	2005/12	0.1252	0.1377
2000/01	0.3127	0.2813	2003/01	0.08989	0.07913	2006/01	0.1076	0.11614
2000/02	0.2764	0.2824	2003/02	0.2126	0.195	2006/02	0.2358	0.226
2000/03	0.2759	0.2632	2003/03	0.353	0.3439	2006/03	0.4698	0.4641
2000/04	0.1315	0.14566	2003/04	0.2812	0.2905	2006/04	0.4411	0.4331
2000/05	0.2854	0.2789	2003/05	0.1534	0.1631	2006/05	0.2315	0.2204
2000/06	0.1059	0.11881	2003/06	0.1034	0.17142	2006/06	0.09162	0.1116
2000/07	0.06775	0.08645	2003/07	0.073	0.11106	2006/07	0.08072	0.09688
2000/08	0.1061	0.12201	2003/08	0.03962	0.0803	2006/08	0.06203	0.08314
2000/09	0.2335	0.2263	2003/09	0.1264	0.12555	2006/09	0.1282	0.13772
2000/10	0.2131	0.2227	2003/10	0.3266	0.3318	2006/10	0.2464	0.2635
2000/11	0.08923	0.10784	2003/11	0.3089	0.3066	2006/11	0.4651	0.4875
2000/12	0.06822	0.08651	2003/12	0.1195	0.1474	2006/12	0.2363	0.2121
2001/01	0.04354	0.03999	2004/01	0.1423	0.152			
2001/02	0.3969	0.3825	2004/02	0.1712	0.1721			
2001/03	0.223	0.2139	2004/03	0.0747	0.12565			
2001/04	0.124	0.11035	2004/04	0.3639	0.387			
2001/05	0.2124	0.2132	2004/05	0.243	0.3834			
2001/06	0.04197	0.0496	2004/06	0.04769	0.0865			
2001/07	0.1185	0.11259	2004/07	0.1108	0.18616			
2001/08	0.01387	0.019743	2004/08	0.03833	0.07413			
2001/09	0.1248	0.10927	2004/09	0.179	0.188			
2001/10	0.3335	0.32	2004/10	0.5436	0.5459			
2001/11	0.3269	0.3263	2004/11	0.3465	0.3523			
2001/12	0.2337	0.2133	2004/12	0.2975	0.2726			

9 Bibliografía

- [1 J. H. Stagge, «Journal of Hydrology, vol. 530,,» de *Modeling drought impact occurrence based on meteorological drought indices in Europe*, 37-50, Supplement C, 2015, pp. 37-50.
- [2 F. P. E. Guevara, « Bioagro vol. 22,» de *Desarrollo y evaluación de un modelo para predecir sequías meteorológicas en Los Llanos de Venezuela*, 2010.
- [3 Y. P. P. Herrera, «CARACTERIZACIÓN EDAFOCLIMATICA DEL MUNICIPIO DE SAN BERNARDO, CUNDINAMARCA PARA LA SIEMBRA DE AGUACATE HASS,» Arbelaez, 2013.
- [4 Minvivienda , «<http://www.minvivienda.gov.co/sala-de-prensa/noticias>,» Septiembre 2015. [En línea].
- [5 A. M. e. S. B. Cundinamarca, «Visita y conoce San Bernardo, despensa agrícola de Cundinamarca,» 2 Agosto 2018. [En línea]. Available: <http://www.sanbernardo-cundinamarca.gov.co/noticias/visita-y-conoce-san-bernardo-despensa-agricola-de-cundinamarca>.
- [6 S. W. a. J. P. Z.W Kundzewicz, «Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC,» 2008.
- [7 G. Moreno Hurtado, Instituto De Hidrológica, Meteorología Y Estudios Ambientales , «"Estadísticas de sequías y heladas meteorológicas en Colombia",» 1996. [En línea].
- [8 V. y. D. T. Ministerio de Ambiente, «Plan de acción nacional lucha contra la desertificación y la sequía en Colombia,» 2005.
- [9 M. C. M. Parra, «Las rutas del agua: Un estudio sobre los territorios hidrosociales de El Carmen y Aguanegra (San Bernardo, Sumapaz),» 2017.
- [1 CAR- Corporacion Autónoma Regional, «Proteccion zona de ronda en quebrada Aguas Claras,» 0] 2018. [En línea]. Available: <http://oaica.car.gov.co/vercaso2.php?id=14>.
- [1 GOOGLE MAPS , «Mapa de quebrada Aguas Claras, Cundinamarca, San Bernardo,» 2018. [En 1] línea]. Available: <https://mapasamerica.dices.net/colombia/mapa.php?nombre=Quebrada-Aguas-Claras&id=25543>.
- [1 C. m. U. y. C. d. p. Alcaldía municipal, «Esquema de Ordenamiento Territorial,» 2006. 2]

- [1 IDEAM, «Catálogo estaciones IDEAM,» Gobierno digital Colombia , 15 Octubre 2018. [En línea]. Available: <https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Catalogo-Estaciones-IDEAM/n6vw-vkfe>.
- [1 Gestion del Riesgo - Manizales , «Estaciones meteorológicas,» UNAL, 2018. [En línea].
4] Available:
http://www.gestiondelriesgomanizales.com/index.php?option=com_content&view=article&id=32%3Aestaciones-meteorologicas&catid=39%3Aidentificacion-del-riesgo&Itemid=196.
- [1 Gidahatri, «Modelamiento hidrológico,» 23 Septiembre 2013. [En línea]. Available:
5] <http://gidahatri.com/ih-es/modelamiento-hidrologico>.
- [1 J. Cabrera, «Modelos Hidrológicos,» p. 8.
6]
- [1 IDEAM, «AGUA,» MINAMBIENTE, 2014. [En línea]. Available:
7] <http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrologica>.
- [1 S. W. a. J. P. C. C. a. W. T. P. o. t. I. P. o. C. C. I. S. G. Z.W. Kundzewicz, «Climate Change and
8] Water,» 2008. [En línea]. Available: <https://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/ccw/frontmatter.pdf>.
- [1 G. M. Hurtado, «IDEAM,» 2015. [En línea]. Available:
9] <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/009375/009375.pdf>.
- [2 V. y. D. T. Ministerio de Ambiente, «Plan de acción nacional lucha contra la desertificación y la
0] sequía en Colombia,» 2005.
- [2 Asociacion Mundial para el Agua, «Manual de indicadores e índice de sequías,» 2016. [En
1] línea]. Available: http://www.droughtmanagement.info/literature/WMO-GWP_Manual-de-indicadores_2016.
- [2 R. Modarres, «Streamflow drought time series forecasting,» 1 Julio 2006. [En línea]. Available:
2] https://rezamodarres.iut.ac.ir/sites/rezamodarres.iut.ac.ir/files/u129/2007-streamflow_drought_time_series_forecasting.pdf.
- [2 J. A. J. K. y. J. W. S.L. Neitsch, «Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation,»
3] Texas, 2009.
- [2 S. B. Havrylenko et al, "Assessment of the soil water content in the Pampas region using
4] SWAT," Catena, vol. 137, pp. 298-309, 2016. Available:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816215301260>. DOI:
<http://doi.org/10.1016/j.catena.2015.10.001>.

- [2 J. G. Arnold et al, "SWAT: Model use, calibration, and validation," Transactions of
5] the ASABE, vol. 55, (4), pp. 1491-1508, 2012.
- [2 «SWAT español,» [En línea].
6]
- [2 B. Narasimhan, «Development of indices for agricultural drought monitoring using a spatially
7] distributed hydrologic model,» 2018.
- [2 R. L. Finn and D. Wright, "Unmanned aircraft systems: Surveillance, ethics and privacy in civil
8] applications," Computer Law & Security Review, vol. 28, (2), pp. 184-194, 2012. Available:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0267364912000234>
- [2 M. Hassanalian and A. Abdelkefi, "Classifications, applications, and design challenges of
9] drones: A review," Progress in Aerospace Sciences, vol. 91, pp. 99-131, 2017.
- [3 Hua, Minh-Duc, et al. "Un enfoque de control para vehículos no propulsados propulsados por
0] empuje y su aplicación a drones VTOL". 54.8 (2009): 1837-1853.
- [3 DJI, «PHANTOM 3 PROFESSIONAL,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.dji.com/phantom-3-pro>.
1]
- [3 dji, «Phantom 3 professional specs,» [En línea]. Available: <https://www.dji.com/phantom-3-pro/info>.
2]
- [3 E. Q. Rosado, Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil,
3] Cáceres (España): Universidad de Extremadura, 2014.
- [3 U. N. d. N. (UNNE), Principios de fotogrametría, Corrientes, Argentina, 2011.
4]
- [3 A. E. R. R.-S. L. M. y. I. B. I. Otero, FOTOGRAMETRÍA, Ingeniería cartográfica geodésica y
5] fotogrametría, vol. XI..
- [3 H. A. A. B. Oscar Eduardo Rodriguez Chavez, Manual para el manejo y procesamiento de
6] imágenes satelitales obtenidas del sensor remoto MODIS de la Nasa, aplicando en estudios de
ingeniería civil, Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana, 2005.
- [3 L. G. Seffino, Algunas Preguntas y Respuestas Básicas sobre, GDSIG - GRUPO PARA EL
7] DESARROLLO DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA, 2002.
- [3 W. E. V. V. M. A. R. V. Clara Judyth Botia Flechas, Altimetría, Bogotá D.C.: Universidad Distrital
8] Francisco José de Caldas , 2011.
- [3 M. farjas, «Nivelación geométrica».
9]

- [4 D. A. G. Álvarez, Sistema GNSS (GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM), Madrid : Escuela
0] Politécnica Superior, UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID , 2008.
- [4 V. Constantino, «Avarices en las tecnologías GPS,».
1]
- [4 TOPCON, «RECEPTOR GNSS DE DOBLE FRECUENCIA».
2]
- [4 esri, «ArcMap - Que es python,» 2018. [En línea]. Available:
3] <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/analyze/python/what-is-python-.htm>.
- [4 Pix4D Support , «Manual,» Pix4D, 2011-2018. [En línea]. Available:
4] <https://support.pix4d.com/hc/en-us/sections/200591059-Manual>.
- [4 T. A. Sara, «Análisis de imágenes multiespectrales aéreas de vegetacion,» 2017.
5]
- [4 G. A. Costales, «Análisis comparativo entre los software de prueba Agisoft Photoscan y Pix4D
6] para el procesamiento de datos obtenidos con fotogrametría de vehículo aéreo no tripulados
(UAV) de bajo costo aplicado a proyectos de medio ambiente,» Quito, 2018.
- [4 A. Bateman, «Hidrología Básica y aplicada,» 2007. [En línea]. Available:
7] <https://www.upct.es/~minaees/hidrologia.pdf>.
- [4 L. M. P. Y. O. R. Y. M. H. CARLOS MENA FRAU, «GENERALIZACIÓN DE MODELO DIGITAL DE
8] ELEVACIÓN,» Julio 2011. [En línea]. Available:
<https://www.redalyc.org/pdf/3939/393937721007.pdf>.
- [4 E. Domínguez, «THE SEARCH FOR ORTHOGONAL HYDROLOGICAL MODELLING METRICS: A
9] CASE STUDY OF,» 2010.
- [5 J. Y. R. S. K. B. J. M. J. Z. R. S. Karim C. Abbaspour, «Modelling hydrology and water quality in
0] the,» 13 Septiembre 2006. [En línea]. Available:
<https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/siam/software/swat/thur.pdf>.
- [5 Topoequipos, «TPCON,» 2018. [En línea]. Available:
1] <http://www.topoequipos.com/dem/topcon/topcon>.
- [5 ESRI, «Cómo funciona estadísticas zonales,» [En línea]. Available:
2] <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/h-how-zonal-statistics-works.htm>.
- [5 Planet, «Planet Imagery product Specifications,» Santa Marta, 2018.
3]

- [5 pix4d, «pix4d,» [En línea]. Available: <https://www.pix4d.com/>.
4]
- [5 R. D. D. I. C. Espinoza, «ICADEL,» [En línea]. Available:
5] <http://www.icadelingenieria.com/modelos-digitales-de-superficie.html>.
- [5 S. B. Havrylenko, «CARACTERIZACIÓN DE SEQUÍAS EN CUENCAS AGRÍCOLAS DE LA REGIÓN
6] PAMPEANA MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SWAT,» 2013.
- [5 J. S. a. K. C. Abbaspour, «Calibration and uncertainty issues of a hydrological model (SWAT)
7] applied to West Africa,» *Advances in Geosciences*, p. 7, 2006.
- [5 A. G. B. y. L. A. Urribarri, «Aplicación del modelo swaT en los Andes venezolanos: Cuenca alta
8] del río Chama,» *Revista Geográfica Venezolana*, 2009.
- [5 1. K. C. A. R. S. a. H. Y. Monireh Faramarzi, «Modelling blue and green water resources
9] availability in Iran,» *Wiley InterScience*, nº 23, p. 16, 2008.
- [6 Planet, «Planet Explorer,» 2018. [En línea]. Available:
0] [https://www.planet.com/explorer/?fbclid=IwAR05WWhnH-XViiYpu1Oz8lh3yP8Wg6j4uqNujbMbtPy5Lplks_Fv1mRSEgY#/mosaic/global_monthly_2018_10_mosaic/center/-74.443,4.128/zoom/15/geometry/POLYGON\(\(-74.44+4.1131,-74.4407+4.1131,-74.4408+4.1132,-74.441+4.1132,-74.441](https://www.planet.com/explorer/?fbclid=IwAR05WWhnH-XViiYpu1Oz8lh3yP8Wg6j4uqNujbMbtPy5Lplks_Fv1mRSEgY#/mosaic/global_monthly_2018_10_mosaic/center/-74.443,4.128/zoom/15/geometry/POLYGON((-74.44+4.1131,-74.4407+4.1131,-74.4408+4.1132,-74.441+4.1132,-74.441).
- [6 C. A. C. Camargo, «Modelización del ciclo hidrológico de una cuenca, en base a un esquema de
1] volúmenes finitos,» Junio 2011. [En línea]. Available:
https://www.researchgate.net/publication/260095746_Modelizacion_del_ciclo_hidrologico_de_una_cuenca_en_base_a_un_esquema_de_volumenes_finitos.
- [6 J. Prieto y A. González, «Método numérico para la calibración de un modelo,» *Desarrollo y
2] Sociedad*, 2011.

