

EVALUACIÓN DE LOS CAUDALES MÁXIMOS, MEDIOS Y MÍNIMOS DE LOS CAÑOS  
BUQUE, GRAMALOTE, LA CUERERA, MAIZARO Y PARRADO, MEDIANTE LA  
INTEGRACIÓN DE DATOS CLIMATOLÓGICOS Y EL BALANCE HÍDRICO A  
LARGO PLAZO



JUAN SEBASTIAN ROJAS SALAZAR  
MIGUEL ANGEL VALENCIA TORRES



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
VILLAVICENCIO

2024

EVALUACIÓN DE LOS CAUDALES MÁXIMOS, MEDIOS Y MÍNIMOS DE LOS CAÑOS  
BUQUE, GRAMALOTE, LA CUERERA, MAIZARO Y PARRADO, MEDIANTE LA  
INTEGRACIÓN DE DATOS CLIMATOLÓGICOS Y EL BALANCE HÍDRICO A  
LARGO PLAZO

JUAN SEBATHIAN ROJAS SALAZAR  
MIGUEL ANGEL VALENCIA TORRES

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título profesional de Ingeniero Civil

Asesor  
Mg. IVAN DARIO ACOSTA SABOGAL  
Magister Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
VILLAVICENCIO

2024

**Autoridades Académicas**

**P. Álvaro José ARANGO RESTREPO, O. P.**

Rector General

**P. Mauricio Antonio CORTÉS GALLEGO, O. P.**

Vicerrector Académico General

**P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O. P.**

Rector Sede Villavicencio

**P. Rodrigo GARCIA JARA, O. P.**

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

**Mg. Julieth Andrea SIERRA TOBÓN**

Secretaria de División Sede Villavicencio

**I.C. Luis Fernando DÍAZ CRUZ, Mg.**

Decano Facultad de Ingeniería Civil

## **Dedicatoria**

Este trabajo final en mi carrera de pregrado tiene un gran valor cualitativo, valor en el que no todas las personas cercanas tienen la misma capacidad de apreciación. Sin embargo, hay una persona en especial que ha sido mi gran escudo e impulso en cada batalla vivida, que ha valorado cada uno de mis sueños y mis esfuerzos por alcanzarlos. Por esto y más quiero agradecer a Dios por darme a esa persona tan especial como madre, para así poder honrarla en cada uno de mis logros.

*Juan Sebastian Rojas Salazar*

El presente proyecto de investigación es dedicado principalmente a nuestro creador, Dios. Por brindarme salud y vida para llegar a este momento de mi formación profesional y personal, igualmente por concederme fortaleza y sabiduría para continuar cuando a punto de caer he estado.

A mi padre amado, pese a nuestra distancia, siento que puedo contar contigo y aunque nos faltaron muchas cosas por vivir juntos, te tengo presente en mi vida por el amor incondicional que me brindas diariamente, guiándome y aconsejándome a ser una mejor persona cada día, a pesar de tus obstáculos presentados en el trayecto de tu vida.

A mi tía Nohora y a mi tía Marina, a quienes quiero y aprecio de manera gigantesca, por ser los pilares fundamentales para proseguir mi estudio de ingeniero civil por medio de sus esfuerzos y sacrificios. Sé que este momento es tan especial para ustedes como para mí, porque creyeron en mí incluso cuando dudaba de mí mismo. Sin su amor y apoyo, no estaría donde estoy hoy.

*Miguel Angel Valencia Torres*

## **Agradecimientos**

Quiero agradecer a todas las personas que hicieron parte en mi camino a ser profesional desde el día uno hasta el fin de este, a mis familiares, amigos, compañeros, planta docente de la facultad, funcionarios y empleados de la universidad que permiten la funcionalidad de esta. Agradecimiento especial a mi tía Rosita, mi tía Mafe, mis abuelas Leonor y Elisa quienes me apoyaron en todos los ámbitos necesarios, a mi amigo Miguel que ha sido imprescindible en todo mi recorrido universitario, a nuestro director Ing. Ivan Acosta por su excelencia profesional y calidad humana y a la Ing. Natalia García por su grato acompañamiento profesional y social.

*Juan Sebastian Rojas Salazar*

Dios, gracias por protegerme durante mi camino y darme fuerzas para superar las dificultades y obstáculos presentado durante mi carrera profesional.

A la Universidad Santo Tomás, por permitirme en ser un gran profesional en lo que tanto me apasiona. Gracias a la planta docente de la facultad de Ingeniería Civil, que con sus conocimientos hizo parte de este proceso integral de mi formación. A los empleados por mantener en óptimas condiciones la funcionalidad de la Universidad.

A mi padre, que ha estado presente en mi vida y que está muy orgulloso de la persona que soy ahora. A mi tía Nohora y mi tía Marina, que con su amor y comprensión estoy donde estoy ahora.

Agradezco al Ingeniero Iván Acosta, director de nuestra tesis. Por su valiosa y constante asesoramiento y guía para la elaboración de esta misma. Que ha hecho la formación educativa un arte y un regalo con sus conocimientos en su especialidad. Gracias a la Ingeniera Julieth Natalia, porque cada día, su clase es una oportunidad para crecer y mejorar gracias a sus consejos y enseñanzas. Son más que docentes, son mentores y guías de muchos estudiantes.

De igual manera, agradezco a mis amigos Juan Sebastián y Juan David, por su amistad altruista, por ese apoyo y esos impulsos para continuar cuando no quería seguir adelante. Gracias a ustedes por ser personas sinceras, positivas, optimistas y sencillas en nuestro trayecto universitario.

*Miguel Angel Valencia Torres*

## Contenido

|   | Pág. |
|---|------|
| Resumen .....                                       | 13   |
| Abstract.....                                       | 14   |
| Introducción.....                                   | 15   |
| 1. Planteamiento del Problema.....                  | 16   |
| 2. Objetivos .....                                  | 17   |
| 2.1. Objetivo Principal .....                       | 17   |
| 2.2. Objetivos Específicos.....                     | 17   |
| 3. Justificación.....                               | 18   |
| 4. Alcance.....                                     | 19   |
| 5. Estado del Arte .....                            | 21   |
| 5.1. Antecedentes .....                             | 21   |
| 6. Marco Conceptual .....                           | 23   |
| 6.1. Ciclo Hidrológico.....                         | 23   |
| 6.2. Balance Hídrico.....                           | 23   |
| 6.3. Precipitación.....                             | 24   |
| 6.4. Temperatura .....                              | 24   |
| 6.5. Evapotranspiración.....                        | 25   |
| 6.6. Evapotranspiración Potencial.....              | 25   |
| 6.7. Evapotranspiración Real .....                  | 26   |
| 6.8. Escorrentía.....                               | 27   |
| 6.9. Balance Hídrico de Largo Plazo.....            | 27   |
| 6.10. Oferta Hídrica .....                          | 27   |
| 6.10.1 Caudal .....                                 | 27   |
| 6.11. Geomorfología.....                            | 28   |
| 6.12. SIG en Información de ráster y vectorial..... | 28   |
| 7. Marco Normativo .....                            | 29   |
| 8. Metodología.....                                 | 30   |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 8.1.  | Fase Preliminar: Registro de Información .....  | 32 |
| 8.1.1 | Fuentes de Información.....   | 32 |
| 8.1.2 | Interpretación de Imágenes Satelitales en Plataforma .....  | 32 |
| 8.1.3 | Investigación de Datos Climatológicos y Modelos Digitales de Elevación .....  | 32 |
| 8.2.  | Fase de Desarrollo.....   | 33 |
| 8.2.1 | Caracterización de la Cuenca Hidrográfica Estudiada con la Implementación del Software de Sistema de Información Geográfica (QGIS)..... | 33 |
| 8.2.2 | Identificación de las Estaciones Meteorológicas y Estimación de Valores de Precipitación en las Cuencas Hidrográficas de Estudio. ....  | 37 |
| 8.2.3 | Temperatura Media.....  | 38 |
| 8.2.4 | Evapotranspiración Potencial.....   | 38 |
| 8.2.5 | Evapotranspiración Real .....   | 39 |
| 8.2.6 | Estimación de los Caudales Medios, Máximos y Mínimos de las cuencas hidrográficas   | 40 |
| 8.2.7 | Elaboración de Mapas.....   | 42 |
| 9.    | RESULTADOS Y ANÁLISIS .....   | 43 |
| 9.1.  | Propiedades Morfométricas de las Cuencas Hidrográficas de Estudio.....  | 43 |
| 9.1.1 | Análisis de los resultados de las propiedades morfométricas.....  | 45 |
| 9.2.  | Curva Hipsométrica.....   | 47 |
| 9.3.  | Elevación Media interpolada al 50% del Área de las Cuencas Hidrográficas de Estudios  | 53 |
| 9.4.  | Estimación de Precipitación por el método IDW y Temperatura Media.....  | 54 |
| 9.4.1 | Precipitación .....   | 54 |
| 9.4.2 | Temperatura Media.....  | 55 |
| 9.5.  | Evapotranspiración Potencial y Evapotranspiración Real .....  | 57 |
| 9.6.  | Cálculo de Caudales Medios, Mínimos y Máximos por Medio del Balance Hídrico de Largo Plazo .....  | 58 |
| 9.6.1 | Caudal Medio.....   | 58 |
| 9.6.2 | Caudal Mínimo .....   | 59 |
| 9.6.3 | Caudal Máximo.....  | 60 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 9.6.4 | Análisis General de las Evaluaciones de Caudales Medios, Mínimos y Máximos de las Cuencas Hidrográficas de Estudio. .... | 64 |
| 10.   | Conclusiones .....   | 69 |
| 11.   | Bibliografía .....   | 71 |
| 12.   | Anexos .....   | 75 |

### Lista de Tablas

|   | Pág. |
|---|------|
| Tabla 1. Propiedades Morfométricas de las Cuencas Hidrográficas de Estudio .....  | 19   |
| Tabla 2. Relación entre la temperatura media, máxima y mínima del aire, y la altitud para las grandes regiones de Colombia..... | 25   |
| Tabla 3. Normativa Legal Vigente para la evaluación de caudales.....  | 29   |
| Tabla 4. Clasificación de Evapotranspiraciones Potenciales.....   | 39   |
| Tabla 5. Clasificación de Evapotranspiraciones Reales. ....   | 40   |
| Tabla 6.. Nacimiento y Desembocadura de las Cuencas Hidrográficas de Estudio. ....  | 43   |
| Tabla 7. Parámetros físicos de las Cuencas Hidrográficas de Estudio. ....   | 43   |
| Tabla 8. Características del Relieve de las Cuencas Hidrográficas. ....   | 44   |
| Tabla 9. Parámetros de Forma de las Cuencas de Estudio. ....  | 44   |
| Tabla 10. Índice de compacidad para la evaluación de la forma. ....   | 45   |
| Tabla 11. Clasificación Factor Forma.....   | 45   |
| Tabla 12. Índice de Alargamiento.....   | 45   |
| Tabla 13. Clasificación de la cuenca según su pendiente .....   | 45   |
| Tabla 14. Datos de Altitud, Área y Área Acumulada de la Cuenca Caño Buque. ....   | 47   |
| Tabla 15. Datos de Altitud, Área y Área Acumulada de la Cuenca Hidrográfica Caño Gramalote.<br>.....                            | 49   |
| Tabla 16. Datos de Altitud, Área y Área Acumulada de la Cuenca Hidrográfica Caño La Cuerera.<br>.....                           | 50   |
| Tabla 17. Datos de Altitud, Área y Área Acumulada de la Cuenca Hidrográfica Caño Maizaro.                                       | 51   |
| Tabla 18. Datos de Altitud, Área y Área Acumulada de la Cuenca Hidrográfica Caño Parrado.                                       | 52   |
| Tabla 19. Interpolación Lineal de Elevación Media de la Cuenca Hidrográfica Caño Buque. ....                                    | 53   |
| Tabla 20. Elevaciones Medias y el 50 % del Área Acumulada de las Cuencas Hidrográficas de Estudio. ....                         | 54   |
| Tabla 21. IDW de las Cuencas Hidrográficas de Estudio.....  | 55   |
| Tabla 22. Temperatura Media.....  | 55   |
| Tabla 23. Regiones Climáticas según Temperatura y Precipitación.....  | 56   |

|   |    |
|---|----|
| Tabla 24. Temperatura Media y Precipitaciones Interpoladas en el Centroide de las Cuencas Hidrográficas de Estudio.....   | 56 |
| Tabla 25. Evapotranspiraciones Potenciales y Reales de las Cuencas Hidrográficas de Estudio.  | 57 |
| Tabla 26. Caudal Medio Anual de las Cuencas Hidrográficas de Estudio. ....  | 58 |
| Tabla 27. Valores de C, para el Caudal Mínimo Medio. ....   | 59 |
| Tabla 28. Caudal Mínimo Medio de las Cuencas Hidrográficas de Estudio. ....   | 60 |
| Tabla 29. Resumen de los Resultados Obtenidos por Subregiones por el Método del Multiescalamiento para la Estimación de los Caudales Máximos para Diferentes Periodos de Retorno..... | 61 |
| Tabla 30. Caudal Máximo por Método de Multiescalamiento de las Cuencas Hidrográficas de Estudio. ....   | 62 |
| Tabla 31. Valores Calculados de K para las diferentes subregiones consideradas en Colombia.   | 63 |
| Tabla 32. Caudal Máximo por Método Cuantil de las Cuencas Hidrográficas de Estudio. ....  | 64 |
| Tabla 33. Caudales Medios, Máximos y Mínimos de las Cuencas Hidrográficas de Estudio. ....  | 64 |

## Lista de Figuras

|  | Pág. |
|--|------|
| Figura 1. Ubicación de las Cuencas Hidrográficas de Estudio.....   | 20   |
| Figura 2. Metodología de la Evaluación de los Caudales Medio, Máximos y Mínimos de las Cuencas Hidrográficas de Estudio..... | 31   |
| Figura 3. DEM de Base de Estudio en Tamaño 12.5 x 12.5 pixel.....  | 33   |
| Figura 4. Curva Hipsométrica de la Cuenca Caño Buque.....  | 48   |
| Figura 5. Etapas de Vida de Cuencas Hidrográficas.....   | 48   |
| Figura 6. Curva Hipsométrica de la Cuenca Caño Gramalote.....  | 49   |
| Figura 7. Curva Hipsométrica de la cuenca Caño La Cuerera.....   | 50   |
| Figura 8. Curva Hipsométrica de la Cuenca Caño Maizaro.....  | 51   |
| Figura 9. Curva Hipsométrica de la Cuenca Caño Parrado.....  | 52   |
| Figura 10. Comparación de Caudales Medios de las Cuencas Hidrográficas de Estudio.....                                       | 65   |
| Figura 11. Comparación de Caudales Máximos de las Cuencas Hidrográficas de Estudio.....                                      | 67   |
| Figura 12. Comparación de Caudales Mínimos de las Cuencas Hidrográficas de Estudio.....                                      | 68   |

**Lista de Anexos**

|  | Pág. |
|--|------|
| Anexo 1. Caracterización gráfica de las cuencas hidrográficas de estudio. .... | 75   |

## Resumen

El presente proyecto se lleva a cabo para evaluar los caudales medios, máximos y mínimos de las cuencas hidrográficas de los caños Buque, Gramalote, La Cuerera, Maizaro y Parrado, que tienen intervención en el casco urbano del municipio de Villavicencio, capital del departamento del Meta. Por medio de la metodología de Balance Hídrico de largo plazo y la aplicación de la herramienta de Sistemas de Información Geográfica (SIG) QGIS, este estudio aporta una gran gama de datos informativos para la investigación y toma de decisiones municipales sobre los planes de gestión, prevención y mitigación de riesgos ante amenazas naturales, dado que permite identificar los caudales esperados para establecer niveles de alerta temprana. Donde, las cuencas de estudio por sus características hidrológicas, sedimentológicas e hidráulicas crean cauces trenzados que varían en dimensión y número, dependiendo de las condiciones climáticas, generando eventos hidrometeorológicos que, de manera periódica, han ocasionado inundaciones, deslizamientos y procesos de remoción en masa, dejando como consecuencias, daños estructurales, económicos y humanos.

El estudio se desarrolla a través del análisis informativo histórico inquirido de informes técnicos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y del servicio Geológico Colombiano, basándose la caracterización geomorfológica a través del software “QGIS”, el estudio de la variable precipitación anual media (PAM) de las estaciones meteorológicas que están parcialmente ubicadas en el área de estudio dentro del casco urbano del municipio. Los hallazgos del estudio de investigación indican que la diversidad de la oferta de caudales dentro de las cuencas analizadas oscila entre 0.242 m<sup>3</sup>/s y 1.703 m<sup>3</sup>/s, visibilizando que la cuenca Caño Maizaro exhibe una mayor susceptibilidad a los desbordamientos, lo que representa un riesgo significativo debido a su extensión en el municipio. Por otro lado, durante períodos de escasez hídrica prolongada, la cuenca de Caño La Cuerera es la más propensa a experimentar una disponibilidad de agua casi nula.

**Palabras Clave:** Geomorfolología, cuenca hidrográfica, precipitación, evapotranspiración, amenaza natural y SIG.

### Abstract

This project is carried out to evaluate the average, maximum and minimum flows of the hydrographic basins of the Buque, Gramalote, La Cuerera, Maizaro and Parrado channels, which intervene in the urban area of the municipality of Villavicencio, capital of the department of Goal. Through the long-term Water Balance methodology and the application of the QGIS Geographic Information Systems (GIS) tool, this study provides a wide range of informative data for municipal research and decision-making on management plans, prevention and mitigation of risks in the face of natural threats, since it allows the identification of expected flows to establish early warning levels. Where, the study basins, due to their hydrological, sedimentological and hydraulic characteristics, create braided channels that vary in size and number, depending on climatic conditions, generating hydrometeorological events that, periodically, have caused floods, landslides and mass removal processes. leaving as consequences structural, economic and human damage.

The study is developed through the historical informative analysis inquired of technical reports from the Agustin Codazzi Geographic Institute (IGAC), the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies (IDEAM) and the Colombian Geological Service, based on the geomorphological characterization through the software " QGIS", the study of the variable mean annual precipitation (PAM) of the meteorological stations that are partially located in the study area within the urban area of the municipality. The findings of the research study indicate that the diversity of the flow supply within the analyzed basins ranges between 0.242 m<sup>3</sup>/s and 1,703 m<sup>3</sup>/s, making visible that the Caño Maizaro basin exhibits a greater susceptibility to overflows, which represents a risk. significant due to its extension in the municipality. On the other hand, during periods of prolonged water scarcity, the Caño La Cuerera basin is the most likely to experience almost zero water availability.

**Keywords:** Geomorphology, hydrographic basin, precipitation, evapotranspiration, natural hazard and GIS.

## Introducción

Villavicencio se destaca por su importancia hidrográfica, en virtud de las cuencas que lo conforman dentro de su área metropolitana, que incluyen los ríos Ocoa y Guatiquia, dos afluentes significativos del río Meta, el cual representa una cuenca principal a nivel nacional. Los cauces de Caño Buque, Gramalote, La Cuerera, Maizaro y Parrado, atraviesan el área urbana del municipio y convergen en los ríos Ocoa y Guatiquia. Esto suscita el interés por estudiar los caudales en estas cuencas menores desde una perspectiva ingenieril.

El caudal puede verse alterado según las condiciones climatológicas que se presenten en el área de drenaje de la cuenca, esta alteración puede resultar en un incremento o decremento en el volumen de agua que fluye a través del sistema fluvial. Estos extremos se conocen como caudal máximo y caudal mínimo, respectivamente. Que son de gran importancia en la gestión y planificación de los recursos hídricos en el municipio; Como la evaluación del potencial de inundaciones, el diseño de infraestructuras hidráulicas y la disponibilidad del agua. Para el cálculo de caudales se empleará la metodología del balance hídrico de largo plazo que consiste en evaluar las ganancias y pérdidas de agua en el ciclo hidrológico respecto a un periodo de retorno, donde se requiere el desarrollo y análisis de la información climatológica que ofrece el IDEAM y de las propiedades geomorfológicas cuantificadas mediante el software QGIS, determinando la precipitación como la entrada de agua principal y la evapotranspiración como la salida de agua principal en cada una de las cuencas de estudio.

El objetivo principal de este estudio es obtener una comprensión detallada de la variabilidad de los caudales en estas cuencas menores. Al examinar los caudales máximos, medios y mínimo, se podrán identificar patrones estacionales y tendencias a largo plazo, así como determinar la influencia de las condiciones meteorológicas en el flujo de agua de estas cuencas.

## 1. Planteamiento del Problema

La capital del departamento del Meta está sujeta a la ocurrencia de fenómenos naturales por desbordamiento de los cauces que lo rodean, según la información proporcionada por el IDEAM en su boletín climatológico. En Villavicencio, durante el período comprendido entre enero y octubre de 2022, se registraron precipitaciones durante 219 días, con un promedio de 22 días de lluvia al mes (Trujillo, 2023). Además, de acuerdo con datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Villavicencio ostenta el título de la ciudad capital más lluviosa del país, con niveles superiores 4500 mm/año. (Jaimes, 2022). Así mismo, generando en el departamento del Meta en el período del 2010-2011, 4.554 hogares potencialmente damnificados, 970 hogares potencialmente afectados, 15.904 personas potencialmente damnificadas y 3.447 personas potencialmente afectadas (IDEAM, DANE, & IGAC, reporte final de áreas afectadas por inundaciones 2010-2011, 2011).

La información hidrológica y geomorfológica no actualizada en las cuencas principales, que transitan dentro del casco urbano y desembocan en las cuencas hidrográficas Guatiquía y Ocoa, constituye un obstáculo significativo para la realización de análisis precisos y la implementación de medidas adecuadas para abordar los desafíos relacionados con la gestión hídrica y la mitigación de impactos ambientales.

De manera que, ¿Es posible determinar las características hidrológicas y geomorfológicas; ampliar la gama informativa de las cuencas hidrográficas de estudio que intervienen en el casco urbano del municipio de Villavicencio, a partir de la integración de datos climatológicos y el balance hídrico de largo plazo?

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivo Principal**

Evaluar los caudales medios, máximos y mínimos de las cuencas hidrográficas de los caños Buque, Gramalote, La Cuerera, Maizaro y Parrado, por medio del análisis de información climatológica y del balance hídrico de largo plazo.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Determinar los caudales medios, mínimos y máximos de las diferentes cuencas hidrográficas incluidas dentro del estudio.
- Caracterizar la geomorfología de cada cuenca hidrográfica.
- Realizar un análisis del comportamiento hidro climatológico, comparando las características de las cuencas de estudio entre sí.

### 3. Justificación

El cambio climático que se ha presentado de manera exponencial en las últimas décadas ha generado una serie de impactos significativos en las amenazas naturales (inundaciones, deslizamientos, movimientos de masa, entre otros). Exacerbando los riesgos existentes como la intensificación de fenómenos meteorológicos extremos, cambio en los patrones de precipitación, desplazamiento de ecosistemas y especies e impactos socioeconómicos en las zonas cercanas a los cauces de estudio, complicando la gestión e implementación efectiva de planes dirigidos a la prevención y mitigación de los riesgos derivados de fenómenos naturales. Por lo tanto, el presente proyecto investigativo se enfoca en la caracterización geomorfológica e hidrológica de cada cuenca hidrográfica de estudio, lo que implica evaluar los caudales medios, máximos y mínimos para llevar un control de la fluencia de los cuerpos hídricos.

Las perturbaciones en el clima y el medio ambiente pueden afectar los componentes del ciclo hidrológico, lo que puede introducir complejidad adicional en la evaluación de caudales mediante el método de balance hídrico de largo plazo, debido a que los procesos hidrológicos pueden variar significativamente, donde se considera la variabilidad temporal de la precipitación y evapotranspiración en diferentes periodos de retorno. Por lo tanto, mediante la recolección y un análisis exhaustivo de los datos climatológicos recopilados durante al menos treinta (30) años de operación de estaciones meteorológicas cercanas a las cuencas de estudio, se procesan mediante el software “QGIS”, que es una plataforma de información geográfica para análisis y visualización de datos que arroja factores predominantes para una óptima caracterización geomorfológica del área de estudio y así evaluar los caudales de los cauces hidrológicos.

#### 4. Alcance

Villavicencio es la capital del Departamento del Meta, ciudad colombiana del Piedemonte de la Cordillera Oriental en la región de la Orinoquía y al sur de Bogotá, capital de la República de Colombia, conectando a 86 km por vía terrestre con la Autopista al Llano. La capital llanera alberga una población de 451.212 habitantes (Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), 2018) y presenta un clima cálido con temperaturas medias de 25.5 °C con una humedad relativa que varía entre el 67 y el 83% a lo largo del año, siendo mayor en los meses de junio y julio; y menor en el primer trimestre del año (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2019).

En Villavicencio se distinguen dos regiones; regiones montañosas que predominan en la parte Norte y Noroccidente del municipio, correspondientes al flanco oriental del Piedemonte de la Cordillera Oriental y la segunda región, es una llanura con una pendiente leve hacia el Oriente y Nororiente, donde delimita en el Norte con el río Guayuriba. Desde el término hidrológico, la ciudad de Villavicencio se caracteriza por tres afluentes principales denominados como los cauces Guatiquía, Ocoa y Negro, los cuales han sido identificados y delimitados como cuencas hidrográficas en planes de planificación y manejo (Ministerio de Ambiente, 2014).

El área de estudio del presente proyecto investigativo corresponde a las cuencas hidrográficas de estudio (Buque, Gramalote, La Cuerera, Maizaro y Parrado), se localizan en el casco urbano de la ciudad de Villavicencio y pertenecen a las cuencas hidrográficas del río Guatiquía y Ocoa. En la tabla 1, se evidencia las propiedades morfométricas de las cuencas hidrográficas mencionadas.

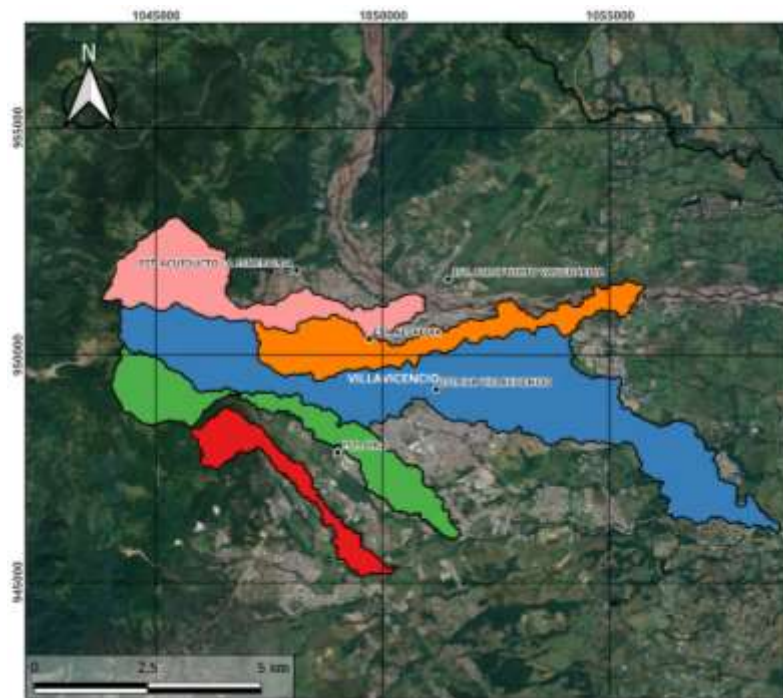
*Tabla 1. Propiedades Morfométricas de las Cuencas Hidrográficas de Estudio*

| <b>Cuencas<br/>Hidrográficas</b> | <b>Área<br/>(km<sup>2</sup>)</b> | <b>Longitud (km)</b> | <b>Ancho (km)</b> |
|----------------------------------|----------------------------------|----------------------|-------------------|
| Buque                            | 5.98                             | 8.56                 | 0.70              |
| Gramalote                        | 5.71                             | 8.03                 | 0.74              |
| La Cuerera                       | 2.80                             | 5.26                 | 0.53              |
| Maizaro                          | 19.91                            | 15.20                | 1.31              |
| Parrado                          | 6.27                             | 6,89                 | 0.91              |

La cabecera municipal de Villavicencio es propensa a diferentes amenazas naturales. Entre estas, las inundaciones y procesos de remoción en masa, quienes se desarrollan por diferentes variables como los altos niveles de precipitación actuales, propiedades geológicas, geomorfología y ubicación geográfica.

Así mismo, es de gran consideración la evaluación de los caudales de los caños del casco urbano de Villavicencio, a partir de la integración de datos climatológicos y el balance hídrico de largo plazo, coligado con la zona urbana y la población radicada en las comunas y veredas mencionadas anteriormente.

*Figura 1. Ubicación de las Cuencas Hidrográficas de Estudio.*



*Nota.* Mapa realizado por medio de Sistema Información Geográfica QGIS. Adaptado por Autores, 2024.

## 5. Estado del Arte

### 5.1. Antecedentes

La evaluación de caudales en cuencas hidrográficas urbanas es un tema de importancia creciente debido al crecimiento demográfico y urbanístico de muchas áreas en el mundo. La integración de datos climáticos y balance hídrico de largo plazo es una técnica comúnmente utilizada para la evaluación de caudales en cuenca. En cuanto a la situación específica del municipio Villavicencio, Meta, hay poca información disponible en la literatura científica sobre la evaluación de caudales en cuencas que intervienen dentro del casco urbano (Sierra , Peña, & Báez , 2019). Se han hecho estudios sobre la evaluación de caudales en cuencas de la región, y pueden ser útiles para informar el desarrollo de estudios futuros en el municipio de Villavicencio. Por ejemplo, un estudio realizado por (Rodríguez et al., 2018) evaluó la disponibilidad de agua en la cuenca del río Guatiquía, que incluye la ciudad de Villavicencio. Los autores utilizaron datos hidrológicos y climáticos para desarrollar un modelo hidrológico que permitió la evaluación de la disponibilidad de agua en la cuenca en el pasado, presente y futuro. Otro estudio realizado por (León, 2017) evaluó la variabilidad del caudal del río Guayuriba, que es una de las principales fuentes de agua para el municipio de Villavicencio. Los autores utilizaron datos hidrológicos y climáticos para desarrollar un modelo hidrológico que permitió la evaluación de la variabilidad del caudal en el pasado y el presente.

Además de los estudios previamente citados, se han llevado a cabo otras investigaciones vinculadas a la evaluación de caudales utilizan el método de balance hídrico de largo plazo en cuencas pertinentes del municipio de Villavicencio. Por ejemplo:

En un estudio realizado por (Silva León, 2004), se estimó los promedios de precipitación esorrentía y evapotranspiración por medio del balance hídrico para diferentes sitios de la cuenca del río Orinoco y para la desembocadura de sus tributarios principales como los ríos Guaviare, Caroní y Meta. Otro estudio realizado por (Silva Herrera & Caballero Hernández, 2019), fórmula el desarrollo de estrategias para la gestión del agua en la quebrada Mancilla que implica la caracterización de la cuenca mediante la evaluación de diversos parámetros morfométricos e hidrológicos. Esto incluye el análisis de los caudales, la determinación del balance hídrico y del caudal ecológico, así como una evaluación de la situación actual de la cuenca en términos de

calidad del agua, cambios en las coberturas lo largo del tiempo y demanda de agua, identificando los diversos usos del agua según las concesiones otorgadas por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR en el área de estudio.

Así mismo, (Sanabria Morera, 2019) evalúa el impacto del cambio climático en la disponibilidad del agua en la cuenca del río Coello, utilizando diversos modelos de balance hídrico a escala mensual como los modelos Témez y GR2M y el modelo WEAP de planificación y evaluación de los cambios en los caudales mensuales. En otro estudio realizado por (Vega et al., 2016), se evaluó la respuesta hidrológica de la cuenca del río Guatiquía a diferentes usos del suelo. Los autores utilizaron datos hidrológicos y climáticos para desarrollar un modelo hidrológico que permitió la evaluación de la respuesta hidrológica de la cuenca en diferentes escenarios de uso del suelo.

El proyecto investigativo realizado por (Díaz Suescún & Alarcon Africano, 2018) tiene como objetivo llevar a cabo el balance hídrico de la cuenca Quebrada Niscota, con el propósito de determinar su viabilidad como fuente de agua para un acueducto que beneficie a seis veredas inscritas al municipio de Nunchía, Casanare. Así, se procede al análisis utilizando el software Hec Ras como herramienta de SIG para determinar los parámetros morfológicos de la cuenca y calcular los caudales mínimos y máximos esperados en el sitio de captación.

Por lo general, la integración de datos climatológicos y del balance hídrico de largo plazo es una técnica ampliamente empleada para evaluar los caudales en cuencas hidrográficas, y existen numerosos estudios sobre este tema en la región del Meta. Estos estudios podrían servir de base para guiar la planificación de investigaciones futuras en el municipio de Villavicencio.

## 6. Marco Conceptual

### 6.1. Ciclo Hidrológico

El ciclo hidrológico es un término que describe la circulación general del agua en la tierra y establece como el proceso por el cual el agua pasa de la atmósfera a la tierra y de la tierra a la atmósfera (Campos Aranda, 1998). El ciclo del agua se da a través de diferentes procesos como la evaporación, condensación, precipitación, sedimentación, escorrentía, el flujo de infiltración, sublimación, transpiración, fusión y aguas subterráneas (Ordoñez Gálvez & Casaverde Riveros, 2011).

Los procesos mencionados incluyen el transporte circulatorio y permanente del agua. La acción del sol es el causante de estos procesos, el cual proporciona energía para elevar el agua en estado gaseoso y a la gravedad terrestre, que realiza el descenso del agua condensada. Es necesario recalcar que el ciclo hidrológico no es continuo y que depende de factores como el tiempo y el espacio (Campos Aranda, 1998).

### 6.2. Balance Hídrico

Es una representación teórica de los intercambios de agua entre las plantas, el suelo y la atmósfera. El balance hídrico establece las ganancias y pérdidas de agua que se registran en un área específica. (Jiménez Otárola, 1994). Mediante la ecuación 1. de balance hídrico, se puede hallar la conducta del agua que permite comparar las cantidades de agua que circulan en el ciclo. (Campos Aranda, 1998):

*Ecuación 1. Balance Hídrico*

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} = \text{Cambio de Almacenamiento}$$

Nota. Adaptado de (Jiménez Otárola, 1994).

Para la determinación de los factores de entradas y salidas, se emplean variables hidrológicas como la precipitación, evaporación, transpiración, escurrimiento superficial, infiltración, escurrimiento subterráneo y los términos de almacenamiento (Campos Aranda, 1998).

La ecuación de balance hidrológico es una herramienta útil para estimar la magnitud y distribución en el tiempo de las variables que tienen intervención (Campos Aranda, 1998).

### **6.3. Precipitación**

Es un término hídrico que define el agua en estado líquido y/o sólido que cae en la superficie de la tierra. Es una variable fundamental en el ciclo hidrológico en una región, y se forma a partir de la condensación del vapor de agua atmosférico. La precipitación se puede catalogar en tres grupos según su origen (Cárdenas et al., 2021):

### **6.4. Temperatura**

Es una magnitud escalar de la intensidad de energía térmica presente en un sistema en su totalidad, indistintamente de su tamaño, donde tiene una relación con la energía cinética media de una gran cantidad de partículas (Roller & Blum, 1986).

La temperatura es uno de los caracteres climatológicos con mayor importancia, por la gran dependencia que tiene la vida del hombre, vegetación, entre otros. Las clasificaciones de la temperatura, se determina mediante algunos valores absolutos como las temperaturas máximas diarias, mínimas diarias, máxima y mínima anuales y máximas y mínimas mensuales (Cárdenas et al., 2021).

En Colombia, la temperatura del aire cambia según su altitud. El método de regionalización de Cenicafé (Jaramillo Robledo, 2005) es ideal para estimar la temperatura media, máxima media y mínima media multianual en cualquier región del país. Este método fue elaborado por las diversas regiones del país, teniendo como base información básica de los registros de las temperaturas medias mensuales de 1002 estaciones. En la tabla 2, se visualiza las relaciones que se obtuvieron a partir de los resultados de la regionalización.

Tabla 2. Relación entre la temperatura media, máxima y mínima del aire, y la altitud para las grandes regiones de Colombia.

| Región                                | Expresión                              | Altitud(m) | R <sup>2</sup> |
|---------------------------------------|--|------------|----------------|
| Andina                                | $T_m = 29.42 - 0.0061 * A$             | 100 - 4480 | 0.99           |
|                                       | $T_{m\acute{a}x} = 33.97 - 0.0058 * A$ |            | 0.86           |
|                                       | $T_{m\acute{i}n} = 23.97 - 0.0059 * A$ |            | 0.92           |
| Oriental<br>(Orinoquía y<br>Amazonía) | $T_m = 27.37 - 0.0057 * A$             | 120 - 4000 | 0.99           |
|                                       | $T_{m\acute{a}x} = 32.13 - 0.0054 * A$ |            | 0.92           |
|                                       | $T_{m\acute{i}n} = 22.63 - 0.0059 * A$ |            | 0.95           |
| Atlántica                             | $T_m = 27.72 - 0.0055 * A$             | 2 - 4000   | 0.99           |
|                                       | $T_{m\acute{a}x} = 33.06 - 0.0062 * A$ |            | 0.79           |
|                                       | $T_{m\acute{i}n} = 23.10 - 0.0061 * A$ |            | 0.90           |
| Pacífica                              | $T_m = 29.42 - 0.0057 * A$             | 2 - 1850   | 0.99           |

Nota. Esta tabla demuestra la relación entre las temperaturas media (T<sub>m</sub>), máxima media (T<sub>máx</sub>) y mínima media (T<sub>mín</sub>) del aire (°C) y la altitud (A), para las regiones de Colombia. Adaptado de (Jaramillo Robledo, 2005)

## 6.5. Evapotranspiración

Es la pérdida de agua en forma de vapor de los seres orgánicos y de la superficie del suelo que se transfiere a la atmósfera. Depende de diversos factores como la energía disponible para la vaporización del agua, el déficit de saturación de la atmosfera, temperatura del aire, velocidad y turbulencia del viento, naturaleza y estado de la superficie de evaporación. La importancia de la evapotranspiración constituye en la base del cálculo de las necesidades hídricas, factor importante para la planificación de proyectos hídricos (Cárdenas et al., 2021).

## 6.6. Evapotranspiración Potencial

Es la pérdida de agua observada en una superficie cubierta por vegetación, que ocurre por medio de un adecuado abastecimiento de humedad de agua al suelo en todo momento. (Rivera et al., 2000). La evapotranspiración es de los factores con mayor importancia en el balance hídrico

debido a la representación de la cantidad de agua en forma de vapor que asciende hacia la atmósfera. (Cárdenas et al., 2021).

A partir de los registros de las estaciones climáticas de Colombia. El centro Nacional de Estudios del Café (CENICAFE), se genera la ecuación empírica para determinar la evapotranspiración potencial, donde Z es la altura media sobre el nivel del mar (Cárdenas et al., 2021).

*Ecuación 2. Evapotranspiración Potencial*

$$ETP = 1700.17 \exp(-0.0002 * Z)$$

Nota. Adaptado de (Cárdenas et al., 2021).

## 6.7. Evapotranspiración Real

Es la evaporación de un suelo cubierto por vegetación donde el suministro de agua es restringido. La evapotranspiración real es menor a la evapotranspiración potencial en un área determinada, siempre y cuando no se suministre agua a la superficie para reemplazar ya el agua evaporada. Los factores que afectan el valor de la evapotranspiración real es la estructura del suelo, la especie vegetal que cubre el terreno, la fase vegetativa que se encuentra y algunos elementos climatológicos que pueden llegar a ser determinantes. (Cárdenas et al., 2021).

En 1974, Budyko genera una ecuación teórica donde la evapotranspiración real (ETR) se transforma a evapotranspiración potencial (ETP) en una cuenca hidrográfica a largo plazo, a partir de la precipitación (P) y la evapotranspiración potencial en el período de tiempo de un año. (Cárdenas et al., 2021).

*Ecuación 3. Evapotranspiración Real- BUDYKO.*

$$ETR = \left( ETP * P * \tanh\left(\frac{P}{ETP}\right) * \left(1 - \cosh\left(\frac{ETP}{P}\right) + \sinh\left(\frac{ETP}{P}\right)\right) \right)^{0.5}$$

Nota. Adaptado de (Cárdenas et al., 2021).

## 6.8. Escorrentía

Es el agua precipitada que no tiene proceso de infiltración, interceptación o evaporación, a causa de lo mencionado anteriormente, el agua fluye sobre la superficie terrestre hasta finalizar a una corriente para terminar siendo drenada hasta la salida de la cuenca hidrográfica (Villón Bejas, 2004).

## 6.9. Balance Hídrico de Largo Plazo

Es un método que permite estimar los valores de “ingresos” y “egresos” de agua en un área determinada. Se basa en la formulación de ecuaciones de conservación de masa para volúmenes de control en columnas de suelos, atmosfera y la unión de ambas (García & Otero, 2005).

Por medio del balance hídrico de largo plazo, se determina la ecuación del caudal medio a partir del área de la cuenca hidrográfica de estudio (A), la precipitación (P) y la evapotranspiración real (ETR). Donde “mediante la ecuación de balance hídrico de largo plazo, en la que se considera que el cambio en el almacenamiento es despreciable frente a los cambios de los otros flujos involucrados” (Mesa et al., 1999).

*Ecuación 4. Balance Hídrico*

$$Q_{medio} = A(P - ETR)$$

Nota. Adaptado de (Cárdenas et al., 2021).

## 6.10. Oferta Hídrica

La oferta hídrica se define como la cantidad de agua que escurre por los cauces mayores de los ríos y demás corrientes superficiales, después de haber precipitado sobre la cuenca y cumpliendo las cuotas de evapotranspiración e infiltración del sistema de suelo cobertura vegetal. Esta porción de agua alimenta lagunas, reservorios y lagos que se unen con otras corrientes y llega al mar de forma directa o indirectamente (Caballero & Pérez, 2007).

### 6.10.1 Caudal

Se define como el volumen de agua que circula por medio de una sección transversal de un río o canal en un período de tiempo. (UNESCO, 2012). Esta cantidad de agua que fluye se puede determinar mediante la ecuación 4, siendo Q (Caudal), V (Volumen) y t (tiempo).

*Ecuación 5. Ecuación General del Caudal.*

$$Q = V/t$$

Nota. Adaptado de (UNESCO, 2012).

### **6.11. Geomorfología**

Es el estudio que registra información del conjunto de deformaciones de la superficie de la Tierra. (Carvajal,2012). En las etapas del ciclo hidrológico, ocurre diversos procesos que altera el escurrimiento del agua en la salida, en donde interviene la geomorfología de la cuenca hidrográfica, donde el factor de mayor importancia es la climatología, el uso y tipo del suelo, la cobertura vegetal. (Córdova,2016).

### **6.12. SIG en Información de ráster y vectorial**

Para el adecuado manejo del recurso hídrico, es necesario emplear varios datos geoespaciales, donde la modelación hidrológica y Sistemas de Información Geográfica (SIG), es una herramienta para conocer el estado de los recursos hídricos, y de esta manera, contribuir de una manera relevante para la toma y gestión de decisiones (Wilson et al. 2000).

Los Sistemas de Información Geográfica unidos con diversos modelos de simulación hidrológica, donde sus resultados han sido un aporte significativo a la identificación y evaluación de factibles soluciones a dificultades relacionadas con el recurso hídrico. Los SIG han desempeñado un papel significativo en el proceso de modelos hidrológicos. Con el uso eficiente de los modelos, se puede optimizar la comprensión de los procesos espaciales, distribución afectada por patrones y el movimiento del agua en las cuencas hidrográficas (Wilson et al. 2000).

## 7. Marco Normativo

En la tabla 3, se resume de manera explícita la normativa legal que se justifica en el presente proyecto. Es de reiterar que la identificación de decretos y leyes con relación a los planes de mitigación y prevención a tipos de amenazas naturales, es fundamental para el desarrollo del presente proyecto investigativo, como recurso al cumplimiento de la presente ley decreto.

*Tabla 3. Normativa Legal Vigente para la evaluación de caudales*

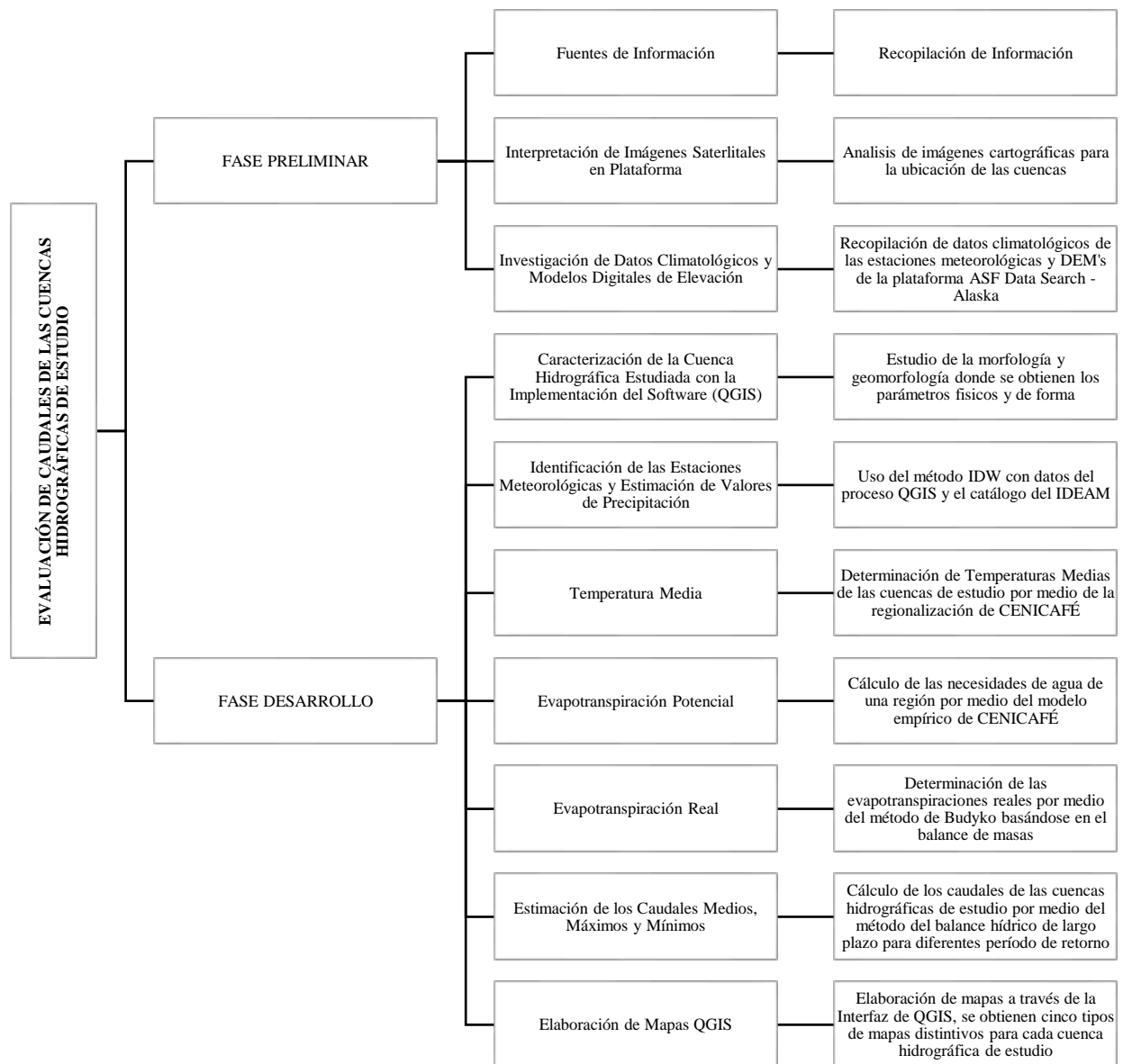
| <b>Título</b> | <b>Año</b> | <b>Descripción</b>   |
|---------------|------------|--|
| Ley 1523      | 2012       | La presente ley manifiesta la obligatoriedad y exigencia a las entidades encargadas de las gestiones de riesgo ante desastres, de generar planes de mitigación y prevención a cualquier tipo de amenaza natural. Así mismo, solicita a la población nacional proceder de manera precavida y acatando la directriz de las autoridades (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), 2020) |
| Ley 99        | 1993       | Establece el marco general para la gestión ambiental en el país. En el contexto de esta ley, se establecen los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA), que son instrumentos de planificación y gestión para las cuencas hidrográficas (Ministerio de vivienda (Minvivienda), 2021).  |
| Ley 388       | 1997       | Regula el desarrollo territorial y urbano del país. Esta ley establece los principios, instrumentos y procedimientos para la planificación, ordenamiento y gestión del territorio colombiano con el objetivo de promover un desarrollo equitativo, sostenible y participativo en el país (Minvivienda, 2021).  |
| Decreto 1077  | 2015       | Incorpora la gestión del riesgo de desastres en los planos de ordenamiento territorial para el ministerio de vivienda, ciudad y territorio, lo cual permite priorizar las zonas en donde se requiere adelantar estudios que permitan categorizar el riesgo y establecer las medidas de intervención estructural para su manejo. (Minvivienda, 2021).   |

## 8. Metodología

Para el presente proyecto de investigación y de acuerdo con los objetivos planteados y el alcance del proyecto, se adoptará un enfoque mixto predominante cuantitativo de tipo explicativo y analítico, a causa de la capacidad de proporción con datos numéricos objetivos y medibles que permitan evaluar de manera precisa la relación entre variables, ecuaciones y parámetros obtenidos de fuentes como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFÉ), Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), Metodología de balance hídrico de largo plazo, el análisis de desarrollo mediante el programa de sistema de información geográfica QGIS, Alaska Satellite Facility ASF Data Search herramienta de búsqueda de datos SAR, entre otros.

Esta metodología realiza un análisis del comportamiento climático de la zona de estudio por medio de modelos digitales de elevación obtenidos por ASF Data Search, mediante información suministrada por el IDEAM. Además, a partir del análisis morfológico de las cuencas hidrográficas de estudio, de la metodología de regionalización generada por CENICAFÉ y de la metodología de balance hídrico de largo plazo, se determina los caudales máximos, medios y mínimos, donde se realiza un análisis hidro-climatológico para los caños de estudio. La metodología de investigación se definirá en las siguientes fases, véase en la figura 2.

Figura 2. Metodología de la Evaluación de los Caudales Medio, Máximos y Mínimos de las Cuencas Hidrográficas de Estudio.



## **8.1. Fase Preliminar: Registro de Información**

### ***8.1.1 Fuentes de Información***

Se realiza una búsqueda y compilación investigativa de diversas fuentes de información con relación a la evaluación de caudales en cuencas hidrográficas que intervienen en las zonas urbanas a largo plazo mediante metodologías de balance hídrico y análisis de datos climatológicos, para determinar una comparación de los resultados del presente proyecto investigativo con los obtenidos por los diferentes autores indagados.

Para la presente metodología investigativa, se utilizan bases de datos de artículos científicos y proyectos investigativos como Google Académico, Scielo, Science Direct, Scopus, ResearchGate, repositorio institucional de la Universidad Santo Tomás, entre otros. De igual manera, se obtiene información por parte de estudios técnicos locales y nacionales como la Alcaldía de Villavicencio, la Unidad nacional para la gestión del riesgo de desastres de Villavicencio, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), ASF Data Search, entre otros.

### ***8.1.2 Interpretación de Imágenes Satelitales en Plataforma***

Mediante el Sistema de Información Geográfica Google Earth, se interpretan imágenes cartográficas donde se ubican las cuencas hidrográficas de estudio que intervienen en la zona urbana de la ciudad de Villavicencio. A fin de tener información geoespacial que permita visualizar y tener un enfoque en el área de estudio.

### ***8.1.3 Investigación de Datos Climatológicos y Modelos Digitales de Elevación***

Por medio del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), en la sección de Datos Abiertos en formato Csv se obtiene la información climatológica de las estaciones meteorológicas que se encuentran en el casco urbano de la Ciudad de Villavicencio y/o más cercanas posibles a las cuencas de estudio.

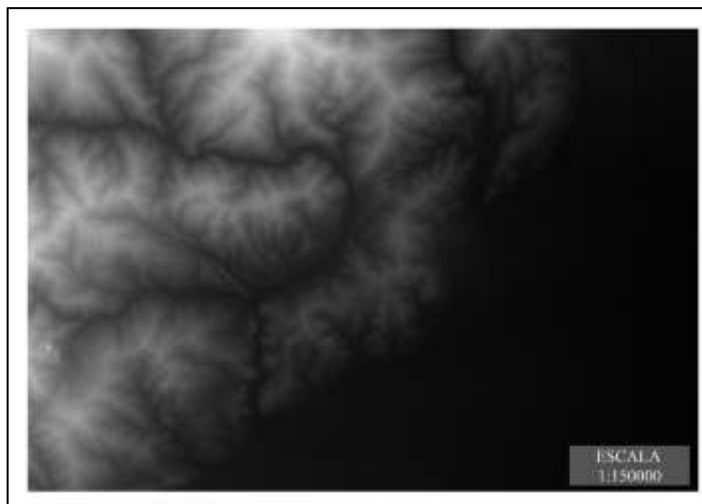
## 8.2. Fase de Desarrollo

### 8.2.1 Caracterización de la Cuenca Hidrográfica Estudiada con la Implementación del Software de Sistema de Información Geográfica (QGIS)

Quantum GIS (QGIS) es un sistema de información geográfica (SIG) de código abierto, que posibilita la creación, visualización, análisis, edición, y publicación de información geoespacial. Entre las muchas funcionalidades del software QGIS destaca la implementación del plugin de procesamiento GRASS, que ofrece diversas herramientas fundamentales para el análisis hidrológico.

El proceso emprende su desarrollo con la carga de datos en formato ráster como lo es el modelo digital de elevación (DEM). Datos los cuales deben ser sometidos a las herramientas de modelación del software, ajustando vacíos que se pueden catalogar como errores del DEM, para así dar continuidad a la visualización y procesamiento de diferentes capas ráster hasta generar la georreferenciación de las cuencas a desarrollar.

Figura 3. DEM de Base de Estudio en Tamaño 12.5 x 12.5 pixel.



Nota. DEM recopilado de la plataforma ASF Data Search-Alaska y adaptado por Autores en QGIS, 2024.

Tras obtener la georreferenciación de las cuencas en desarrollo, se aplican individualmente las herramientas pertinentes en el software QGIS, para estimar los valores fundamentales en la caracterización de cada cuenca hidrográfica.

La caracterización, se origina tras el estudio de su morfología y su geomorfología, obteniendo los parámetros físicos, de forma y las características del relieve. Entre los parámetros físicos se encuentran el área, el perímetro, la longitud y el ancho de la cuenca. Dentro de los estudios geológicos se obtiene los parámetros de forma en el que se halla el índice de Gravelius, el factor forma y el índice de alargamiento. Por último, se obtendrá las características del relieve donde se calcula la composición de elevaciones, la curva hipsométrica y la pendiente media.

- **Parámetros Físicos**

Los parámetros físicos área y perímetro se obtienen por medio de la calculadora ráster en el software QGIS, la longitud de la cuenca se halla trazando una línea recta paralela al cauce principal y el ancho será el cociente entre el área y la longitud.

- **Parámetros de Forma**

Por consiguiente, los parámetros de forma se expresarán tras ecuaciones matemáticas determinadas y relacionadas con los parámetros físicos ya descritos.

- **Índice de Compacidad o índice de Gravelius ( $k_c$ )**

Este índice da un valor adimensional independiente al área de estudio, el cual obedece a un valor de 1 para cuencas imaginarias exactamente circulares.

*Ecuación 6. Índice de Gravelius ( $k_c$ ).*

$$K_c = \frac{P}{2\pi \left(\frac{A}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}}$$

Adaptado: (Vieja, 2015)

Donde:

$K_c$ : Índice de Gravelius

$P$ : Perímetro de la cuenca hidrográfica

$A$ : Área de la cuenca hidrográfica

- **Factor Forma ( $K_f$ )**

Este parámetro adimensional propuesto por Gravelius, evalúa si la cuenca tiende a experimentar crecidas repentinas e intensas o crecimientos más graduales y sostenidos.

*Ecuación 7. Factor Forma*

$$K_f = \frac{A}{L^2}$$

Adaptado: (Vieja, 2015)

Donde:

$K_f$ : Factor forma

$A$ : Área de la cuenca hidrográfica

$L$ : Longitud de la cuenca hidrográfica

- **Índice de Alargamiento**

Este parámetro determina si la cuenca es alargada, si su valor es mayor a la unidad o si por el contrario es inferior a la unidad determinara una cuenca achatada

*Ecuación 8. Índice de Alargamiento*

$$I_a = \frac{L}{w}$$

Adaptado: (Vieja, 2015)

Donde:

$I_a$ : Índice de alargamiento

$L$ : Longitud de la cuenca hidrográfica

$w$ : Ancho de la cuenca hidrográfica

- **Características del Relieve**

Son de gran importancia puesto que el relieve de una cuenca tiene más influencia sobre la respuesta hidrológica que su forma.

- **Elevaciones**

Una vez modelado el DEM y ajustado a las proporciones adecuadas del perímetro de la cuenca hidrográfica, se usará la herramienta de procesos Estadísticas de Zona para generar la altura máxima, mínima y media de la cuenca.

- **Pendiente Media**

Es la variación de la inclinación de la cuenca que determina el tipo de relieve según el comportamiento del desplazamiento de las capas del suelo. Se halla por medio de la ecuación matemática de Avord.

*Ecuación 9. Pendiente Media*

$$S_m = \frac{Lcn \cdot D}{A}$$

Adaptado: (Vieja, 2015)

Donde:

*S<sub>m</sub>: Pendiente media de la cuenca hidrográfica*

*Lcn: Longitud de las curvas de nivel*

*D: Equidistancia de las curvas de nivel*

*A: Área de la cuenca hidrográfica*

- **Curva Hipsométrica**

La curva hipsométrica describe la propiedad altimétrica de la cuenca y su área. Está ayuda a caracterizar la edad del cauce de la cuenca, la cual se procesa mediante la herramienta “Curvas Hipsométricas” por medio del Análisis del Terreno Ráster. Esta herramienta genera un histograma en formato Csv que contiene dos columnas de datos interrelacionados entre altitud y área acumulada, la cual se opera y se reclasifica para generar la correcta tabulación y así poder graficar la curva hipsométrica. La elevación media tiene contacto directo con la curva hipsométrica ya que corresponde a la elevación del 50% del área total.

### ***8.2.2 Identificación de las Estaciones Meteorológicas y Estimación de Valores de Precipitación en las Cuencas Hidrográficas de Estudio.***

Para identificar las estaciones meteorológicas relevantes en el área de interés, se empleó el software QGIS y el catálogo de estaciones del IDEAM en formatos .SHP (Shapefile) y .CSV (Valores Separados por Comas). Optando por las estaciones con mayor influencia en el área de estudio y con la información multianual más completa de los valores de precipitación.

Por consiguiente, los valores de Precipitación media anual se estimarán por el método de Inverso de la Distancia (IDW – Inverse Distance Weighting); Este método se utiliza para estimar valores desconocidos en ubicaciones dentro de un área, basándose en cada uno de los datos conocidos que se ponderan de acuerdo con el inverso de su distancia elevado a un exponente hacia el punto de interpolación. (Escriba, 2021). Este punto será vital para la investigación debido a que la información de las estaciones no recaerá de manera directa en las áreas de cada cuenca hidrográfica.

La precipitación es una variable fundamental, debido a que representa la entrada principal en el Balance Hídrico, su estimación será necesaria mediante dos enfoques distintos utilizando el método IDW. El primer enfoque consistirá en calcularla como un valor medio a través de cálculos manuales, empleando su ecuación teórica. El segundo enfoque es por medio del software QGIS y la herramienta de procesos “Interpolación IDW” que determina los valores del pixel, a partir de los valores de cada punto.

Para el primer enfoque es necesario gestionar la información de la precipitación anual de los últimos 20 a 25 años de dos o tres estaciones cercanas a la cuenca en desarrollo, calcular el centroide de la cuenca y hallar la distancia cartesiana entre las estaciones seleccionadas y el centroide de la cuenca. Para así poder aplicar la ecuación teórica.

*Ecuación 9. Interpolación IDW*

$$Yp = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Y_i}{d_i^a}\right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^a}\right)}$$

Adaptado: (Escriba, 2021)

Donde:

$Y_p$ : Valor estimado de precipitación en el centroide de la cuenca.

$n$ : Número de estaciones utilizadas.

$Y_i$ : Valor de la precipitación media en la  $i$ -ésimo estación.

$d_i$ : Distancia desde la estación  $i$  al centroide de la cuenca

$a$ : Potencia del inverso de la distancia

En el segundo enfoque se agregará el nuevo atributo de precipitación media a cada estación seleccionada en la capa de la interfaz de QGIS, determinado en el primer enfoque. Para iniciar posteriormente con la modelación de la herramienta de procesos de interpolación en la cual se seleccionan la capa de estaciones, el atributo de precipitación y la máscara donde se creará la nueva capa ráster de precipitación.

### 8.2.3 *Temperatura Media*

La temperatura del aire cambia según la altitud sobre el nivel de mar. Para el cálculo de la temperatura media se adoptará la ecuación de Temperatura Media según la regionalización de CENICAFE.

*Ecuación 10. Ecuación de Temperatura Media - CENICAFÉ*

$$T_{med} = 29.42 - 0.0061Z$$

Adaptado: (Jaramillo Robledo, 2005)

Donde:

$T_{med}$ : Valor de la Temperatura en °C

$Z$ : Elevación media de la cuenca en m

### 8.2.4 *Evapotranspiración Potencial*

La evapotranspiración es otra variable importante en el balance hídrico. En el presente proyecto se abordan los dos tipos de evapotranspiración, la potencial y la real. En la que se distinguen en este proyecto de investigación por la diversidad de desarrollo que se realiza.

El conocimiento de la evapotranspiración potencial es útil para determinar las necesidades de agua de un cultivo o de una región, por lo que Cenicafé genera un modelo empírico de ecuación simple (Ecuación 11), el cual solo depende de la elevación media de la cuenca.

*Ecuación 11. Evapotranspiración Potencial - CENICAFÉ*

$$ETP = 1700.17 \exp(-0.0002 * Z)$$

Adaptado: (Jaramillo Robledo, 2005)

Donde:

*ETP: Valor de la Evapotranspiración Potencial en unidades de mm/año*

*Z: Elevación media de la cuenca hidrográfica en unidades de msnm*

En la presente clasificación de ETP, se facilita la evaluación de las condiciones hidrológicas y el manejo del recurso hídrico. Véase en la tabla

*Tabla 4. Clasificación de Evapotranspiraciones Potenciales.*

| <b>Clasificación de ETP</b> |                    |
|-----------------------------|--------------------|
| Muy Alta                    | >1500 mm/año       |
| Alta                        | 1000 – 1500 mm/año |
| Moderada                    | 500 – 1000 mm/año  |
| Baja                        | <500 mm/año        |

*Nota.* Adaptado: (Jaramillo Robledo, 2005)

### **8.2.5 Evapotranspiración Real**

Budyko (1974) estima la ecuación teórica de evapotranspiración real (Ecuación 13) basándose en un balance de masas y partiendo de las relaciones heurísticas por Schreiber. Observó que cuando la precipitación decrece, la escorrentía superficial también lo hace, pero cuando la precipitación aumenta, el caudal tiende a algún valor límite. (Giraldo & Pérez, 2006). Ecuación que dependerá de las variables precipitación y evapotranspiración potencial.

*Ecuación 12. Evapotranspiración Real - CENICAFÉ*

$$ETR = \left( ETP * P * \tanh\left(\frac{P}{ETP}\right) * \left(1 - \cosh\left(\frac{ETP}{P}\right) + \sinh\left(\frac{ETP}{P}\right)\right) \right)^{0.5}$$

Adaptado: (Jaramillo Robledo, 2005)

Donde:

*ETR*: Valor de la Evapotranspiración Real en unidades de mm/año

*ETP*: Valor de la Evapotranspiración Potencial en unidades de mm/año

*P*: Precipitación media de la cuenca hidrográfica en unidades de msnm

Tabla 5. Clasificación de Evapotranspiraciones Reales.

| Clasificación de ETR |                    |
|----------------------|--------------------|
| Muy Alta             | >90% de la ETP     |
| Alta                 | 70 – 90% de la ETP |
| Moderada             | 50 – 70% de la ETP |
| Baja                 | <50% de la ETP     |

Nota. Adaptado: (Jaramillo Robledo, 2005)

### 8.2.6 Estimación de los Caudales Medios, Máximos y Mínimos de las cuencas hidrográficas

En el cálculo de los caudales mínimos, medios y máximos en las cuencas hidrográficas se demandan todas las variables anteriormente mencionadas. En primera instancia se calcula el valor del caudal medio, con la ecuación 12 del presente proyecto recopilada de la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) del balance hídrico de largo plazo, la cual define la precipitación como única entrada y la evapotranspiración real como única salida.

*Ecuación 13. Caudal Medio de Balance Hídrico de Largo Plazo*

$$Q_{\text{medio}} = A \cdot (P - ETR)$$

Adaptado: (UPME, 2000)

Donde:

*Q<sub>medio</sub>*: Valor del Caudal Medio en m<sup>3</sup>/s

*A*: Área de la cuenca hidrográfica en m<sup>2</sup>

*P*: Valor de la Precipitación Media Anual Interpolada en m/s

*ETR*: Valor de la Evapotranspiración Real en unidades de m/s

Para la estimación de los caudales mínimos y máximos se indaga en los mares conceptuales e investigativos del Atlas Hidrológico de Colombia de la UPME, donde específicamente se aborda los capítulos 3 y 4. En el capítulo 3 se estiman los Caudales Máximos en diferentes periodos de retorno, por la metodología de Análisis regional de los caudales máximos en la cuenca hidrográfica. En el análisis regional a través de un riguroso procedimiento por los autores del atlas hidrológico se pueden conocer los parámetros fluctuantes según el tiempo de retorno y la subregión, para aplicar en la ecuación 13.

*Ecuación 14. Caudal Máximo en un Tiempo de Retorno*

$$Q_{tr} = c_{tr} * A^{q_{tr}}$$

Adaptado: (UPME, 2000)

Donde:

$Q_{tr}$ : Valor del Caudal Máximo en un tiempo de retorno en  $m^3/s$

$A$ : Área de la cuenca hidrográfica en  $Km^2$

$q_{tr}$ : Parámetro  $q$  en la subregión

$c_{tr}$ : Parámetro  $c$  en la subregión

En el capítulo 4 titulado Caudales Mínimos; Se indaga sobre la estimación del caudal mínimo a diferentes tiempos de retorno por medio del mismo método de análisis regional. En el cual proyectan una ecuación principal para el caudal mínimo a distintos tiempos de retorno, partiendo de dos valores estadísticos como es la media, la desviación estándar y el factor de frecuencia.

*Ecuación 15. Media de Caudal Mínimo en un Tiempo de Retorno.*

$$\mu = C_{\mu} \cdot Q_{medio}$$

Adaptado: (UPME, 2000)

*Ecuación 16. Desviación Estándar de Caudal Mínimo en un Tiempo de Retorno.*

$$\sigma = C_{\sigma} \cdot Q_{medio}$$

Adaptado: (UPME, 2000)

*Ecuación 17. Período de Retorno para Caudal Mínimo*

$$k_{Tr} = (-\sqrt{6})/\pi[0.5772 + \ln(\ln(Tr))]$$

Adaptado: (UPME, 2000)

*Ecuación 18. Caudal Mínimo en un Tiempo de Retorno.*

$$Q_{\min tr} = \mu + K_{tr} \cdot \sigma$$

Adaptado: (UPME, 2000)

Donde:

*Q<sub>medio</sub>: Valor del Caudal Medio en m<sup>3</sup>/s*

*μ= Media*

*σ= Desviación Estándar*

*Cσ= Constante de la desviación estándar según región*

*Cμ= Constante de la media según región*

*K<sub>tr</sub>= Factor de frecuencia*

### **8.2.7 Elaboración de Mapas**

En la elaboración de los mapas a través de la interfaz de Composición del software QGIS se obtuvieron cinco tipos de mapas distintivos por cada cuenca hidrográfica, que se nombraron Mapa de Composición de Elevaciones, Mapa de Evapotranspiración Potencial, Mapa de Evapotranspiración Real, Mapa de Precipitación, Mapa de Temperatura y un Mapa General de Ubicación de todas las cuencas hidrográficas y sus estaciones. Cada mapa contiene su escala determinante, sus convenciones, su mapa de ubicación, sus coordenadas (EPSG: 6274 – MAGNA-SIRGAS/ Villavicencio urban grid) y sus capas de tipo vectorial y ráster.

## 9. Resultados y análisis

### 9.1. Propiedades Morfométricas de las Cuencas Hidrográficas de Estudio

El Nacimiento y la salida de la cuenca hidrográfica son propiedades importantes para su caracterización geomorfológica y para la evaluación de caudales, ya que permite definir la red de drenaje, que es esencial para comprender cómo fluye el agua dentro de la cuenca y cómo se distribuye a lo largo de su territorio, como también el análisis de estos puntos ayuda a comprender la morfología del área de estudio y cómo interactúa con el flujo de agua. véase en la tabla 4.

Tabla 6. Nacimiento y Desembocadura de las Cuencas Hidrográficas de Estudio.

| <b>Cuencas Hidrográficas</b> | <b>Nacimiento</b>   | <b>Estuario</b>      |
|------------------------------|---------------------|----------------------|
| Buque                        | Cordillera Oriental | Cuenca Río Ocoa      |
| Gramalote                    | Cordillera Oriental | Cuenca Río Guatiquía |
| La Cuerera                   | Cordillera Oriental | Cuenca Río Ocoa      |
| Maizaro                      | Cordillera Oriental | Cuenca Río Ocoa      |
| Parrado                      | Cordillera Oriental | Cuenca Río Guatiquía |

A través del procesamiento en el software QGIS, es posible obtener datos derivados de parámetros físicos fundamentales para la caracterización de las cuencas de estudio. Estos parámetros abarcan el área, perímetro, longitud y ancho, que se utilizan para clasificar la cuenca en función de su tamaño. Esta clasificación facilita el cálculo de los parámetros de forma, los cuales son importantes para comprender la morfología y la dinámica hidrológica de la cuenca.

Tabla 7. Parámetros físicos de las Cuencas Hidrográficas de Estudio.

| <b>Cuencas Hidrográficas</b> | <b>Área (km<sup>2</sup>)</b> | <b>Perímetro (Km)</b> | <b>Longitud (km)</b> | <b>Ancho (km)</b> |
|------------------------------|------------------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|
| Buque                        | 5.98                         | 23.55                 | 8.56                 | 0.70              |
| Gramalote                    | 5.71                         | 24.89                 | 8.03                 | 0.74              |
| La Cuerera                   | 2.80                         | 15.53                 | 5.26                 | 0.53              |
| Maizaro                      | 19.91                        | 44.66                 | 15.20                | 1.31              |
| Parrado                      | 6.27                         | 20.53                 | 6,89                 | 0.91              |

Las elevaciones medias, mínimas y máximas, así como la pendiente media, son aspectos clave del relieve que afectan la distribución, el flujo y la disponibilidad de agua en una cuenca hidrográfica. La distribución altitudinal dentro de la cuenca influye directamente en el clima y, por ende, en el régimen hidrológico. Esta variación altitudinal se determinó mediante el uso del software QGIS.

La pendiente media, que indica la tasa de cambio de la inclinación de la cuenca, juega un papel crucial en el comportamiento de los procesos de erosión y sedimentación en las capas del suelo. Se estimó utilizando la ecuación de Avord, tal como se propuso en la metodología. Véase en la tabla 8.

*Tabla 8. Características del Relieve de las Cuencas Hidrográficas.*

| <b>Cuencas<br/>Hidrográficas</b> | <b>H max<br/>(m.s.n.m.)</b> | <b>H min<br/>(m.s.n.m.)</b> | <b>H med<br/>(m.s.n.m.)</b> | <b>Pendiente<br/>media (%)</b> |
|----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| Buque                            | 1332                        | 403                         | 684.74                      | 20.8                           |
| Gramalote                        | 687                         | 396                         | 480.20                      | 10.8                           |
| La Cuerera                       | 929                         | 412                         | 577.77                      | 18.1                           |
| Maizaro                          | 1349                        | 369                         | 519.74                      | 11.5                           |
| Parrado                          | 1349                        | 435                         | 836.97                      | 33.5                           |

Los factores geológicos ejercen influencia en la configuración de la fisiografía, especialmente en la morfología de las cuencas hidrográficas. Para la caracterización se lleva a cabo una comparación entre la forma de la cuenca y figuras geométricas reconocidas para su análisis. A continuación, la Tabla 9 presenta los parámetros de forma calculados mediante las ecuaciones matemáticas descritas en la metodología, utilizando los datos físicos presentados anteriormente en la Tabla 7.

*Tabla 9. Parámetros de Forma de las Cuencas de Estudio.*

| <b>Cuencas<br/>Hidrográficas</b> | <b>K<sub>c</sub></b> | <b>K<sub>f</sub></b> | <b>I<sub>a</sub></b> |
|----------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Buque                            | 2.72                 | 0.09                 | 10.81                |
| Gramalote                        | 2.94                 | 0.08                 | 12.85                |
| La Cuerera                       | 2.66                 | 0.10                 | 9.88                 |
| Maizaro                          | 2.82                 | 0.09                 | 11.60                |
| Parrado                          | 2.31                 | 0.13                 | 7.58                 |

### 9.1.1 Análisis de los resultados de las propiedades morfométricas

Para el análisis y caracterización final de los resultados de las propiedades morfométricas de cada cuenca, se analizarán mediante las tablas de clasificación y evaluación adaptadas de Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca Rio la Vieja por el Ministerio de Ambiente y Ministerio de Hacienda, 2015.

Tabla 10. Índice de compacidad para la evaluación de la forma.

| Clase | Rango      | Descripción                                  |
|-------|------------|--|
| Kc1   | 1 a 1.25   | Forma casi redonda a oval - redonda          |
| Kc2   | 1.25 a 1.5 | Forma oval – oblonga                         |
| Kc3   | > 1.5      | Forma oval – oblonga a rectangular - oblonga |

Nota. Adaptado: (Vieja, 2015)

Tabla 11. Clasificación Factor Forma.

| $K_f$ | Descripción   |
|-------|---|
| <1    | Tiende a ser ovalada, baja susceptibilidad a las avenidas |
| 1     | Cuadrada  |
| > 1   | Tiende a ser achatada, propensa a ocurrencia de avenidas  |

Nota. Adaptado: (Vieja, 2015)

Tabla 12. Índice de Alargamiento

| $I_a$     | Descripción  |
|-----------|--|
| $I_a > 1$ | Cuenca alargada  |
| $I_a < 1$ | Cuenca achatada y por lo tanto su cauce principal es corto |

Nota. Adaptado: (Vieja, 2015)

Tabla 13. Clasificación de la cuenca según su pendiente

| Pendiente Media (%) | Tipo de Relieve             |
|---------------------|-----------------------------|
| 0-3                 | Plano                       |
| 3-7                 | Suave                       |
| 7-12                | Medianamente accidentado    |
| 12-20               | Accidentado                 |
| 20-35               | Fuertemente accidentado     |
| 35-50               | Muy fuertemente accidentado |
| 50-75               | Escarpado                   |
| >75                 | Muy escarpado               |

Nota. Adaptado: (Vieja, 2015)

- **Cuenca Hidrográfica Caño Buque**

Caño Buque con un área superficial de drenaje de 5.98 Km<sup>2</sup>, nacida en las montañas de la cordillera oriental y con desembocadura en la zona sur del municipio de Villavicencio actúa como afluente de la Cuenca del Río Ocoa, caracterizándose como una cuenca hidrográfica exorreica muy pequeña de clase Kc3 de forma oval, oblonga a rectangular, oblonga que tiende a ser ovalada, alargada, con baja susceptibilidad a avenidas y un tipo de relieve fuertemente accidentado.

- **Cuenca Hidrográfica Caño Gramalote**

La cuenca Gramalote con un área superficial de drenaje de 5.71 Km<sup>2</sup>, nacida en las montañas de la cordillera oriental y con desembocadura en la zona noreste del municipio de Villavicencio actúa como afluente de la Cuenca del Río Guatiquia, caracterizándose como una cuenca hidrográfica exorreica muy pequeña de clase Kc3 de forma oval, oblonga a rectangular, oblonga que tiende a ser ovalada, alargada, con baja susceptibilidad a avenidas y un tipo de relieve medianamente accidentado.

- **Cuenca Hidrográfica Caño La Cuerera**

La Cuerera con un área superficial de drenaje de 2.80 Km<sup>2</sup>, nacida en las montañas de la cordillera oriental y con desembocadura en la zona suroeste del municipio de Villavicencio actúa como afluente de la Cuenca del Río Ocoa, caracterizándose como una cuenca hidrográfica exorreica muy pequeña de clase Kc3 de forma oval, oblonga a rectangular, oblonga que tiende a ser ovalada, alargada, con baja susceptibilidad a avenidas y un tipo de relieve accidentado.

- **Cuenca Hidrográfica Caño Maizaro**

Caño Maizaro con un área superficial de drenaje de 19.91 Km<sup>2</sup>, nacida en las montañas de la cordillera oriental y con desembocadura en la zona sur del municipio de Villavicencio actúa como afluente de la Cuenca del Río Ocoa, caracterizándose como una cuenca hidrográfica exorreica muy pequeña de clase Kc3 de forma oval, oblonga a rectangular, oblonga que tiende a ser ovalada, alargada, con baja susceptibilidad a avenidas y un tipo de relieve medianamente accidentado.

- **Cuenca Hidrográfica Caño Parrado**

La cuenca hidrográfica Caño Parrado con un área superficial de drenaje de 6.27 Km<sup>2</sup>, nacida en las montañas de la cordillera oriental y con desembocadura en la zona noreste del municipio de Villavicencio actúa como afluente de la Cuenca del Río Guatiquia, caracterizándose como una cuenca hidrográfica exorreica muy pequeña de clase Kc3 de forma oval, oblonga a rectangular, oblonga que tiende a ser ovalada, alargada, con baja susceptibilidad a avenidas y un tipo de relieve fuertemente accidentado.

## 9.2. Curva Hipsométrica

En el procedimiento realizado en el software QGIS, se hallan los valores de las diferentes altitudes teniendo como referencia el nivel del mar y las áreas que existen por cierta cota determinada que se encuentran dentro del área de estudio. Véase en la tabla 14.

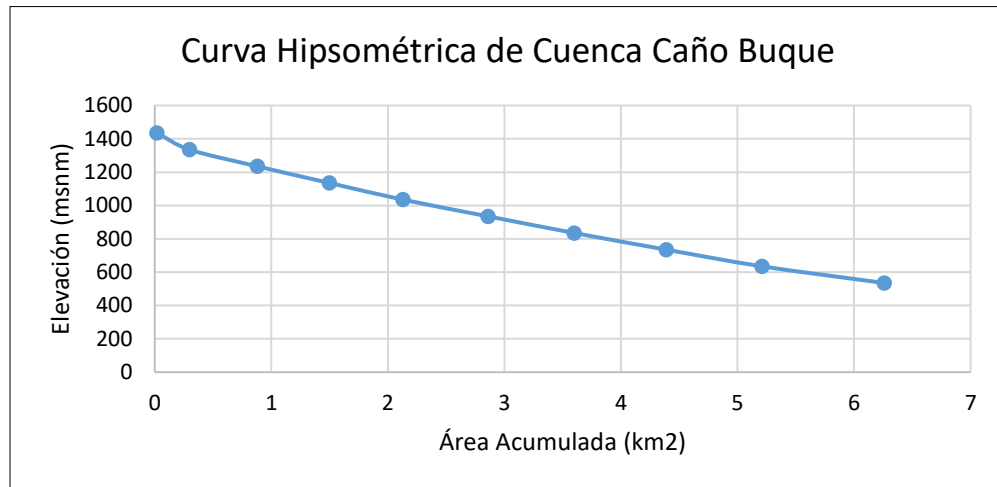
Tabla 14. Datos de Altitud, Área y Área Acumulada de la Cuenca Caño Buque.

| Altitud (msnm)            | Área (km <sup>2</sup> ) | Área Acumulada (km <sup>2</sup> ) |               |
|---------------------------|-------------------------|-----------------------------------|---------------|
| 1403.00                   | 0.01                    | 0.01                              | 0.17%         |
| 1303.00                   | 0.11                    | 0.12                              | 2.01%         |
| 1203.00                   | 0.53                    | 0.65                              | 10.87%        |
| 1103.00                   | 0.54                    | 1.19                              | 19.90%        |
| 1003.00                   | 0.49                    | 1.68                              | 28.09%        |
| 903.00                    | 0.46                    | 2.14                              | 35.79%        |
| 803.00                    | 0.27                    | 2.41                              | 40.30%        |
| 703.00                    | 0.16                    | 2.57                              | 42.98%        |
| 603.00                    | 0.78                    | 3.35                              | 56.02%        |
| 503.00                    | 2.63                    | 5.98                              | 100.00%       |
| <b>50% Área acumulada</b> |                         | <b>2.99</b>                       | <b>50.00%</b> |

Nota. El 50% del área acumulada de la cuenca hidrográfica caño Buque, es necesaria para corroborar la elevación media de la cuenca hidrográfica, mediante el método de interpolación sencilla.

Se determina la curva hipsométrica que representa la variación de elevación de las cuencas de estudio. Donde esta misma, traza un por ciento del área de estudio sobre una determinada curva de nivel. Se muestra gráficamente la curva hipsométrica para la cuenca caño buque en la gráfica 1.

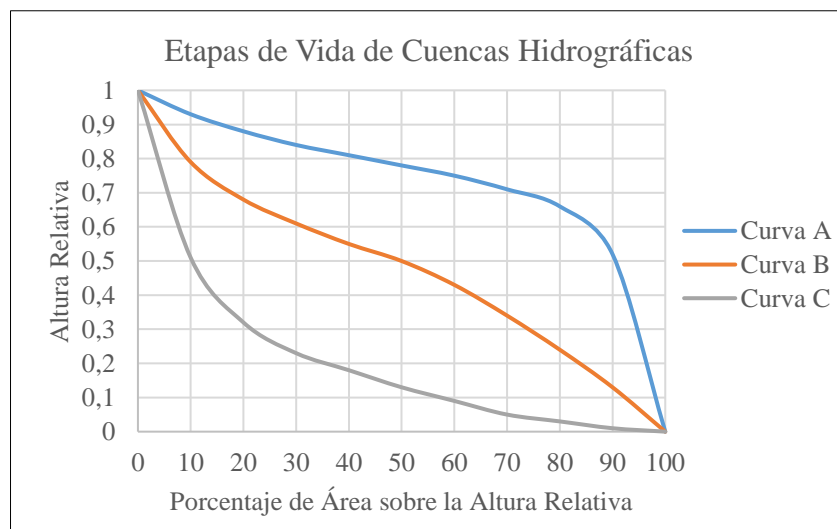
Figura 4. Curva Hipsométrica de la Cuenca Caño Buque.



Las cuencas hidrográficas evolucionan después de un levantamiento tectónico, teniendo como resultado a la degradación y la erosión al paso del tiempo (David,1989).

Por lo dicho anteriormente, mediante la curva hipsométrica se analiza si la cuenca hidrográfica de estudio se encuentra en fase de juventud, madurez o vejez. (Rojas,2015).

Figura 5. Etapas de Vida de Cuencas Hidrográficas.



Nota. Adaptado de Rojas,2015

Donde:

- Curva A: Cuenca con gran potencial erosivo (Cuenca Joven)
- Curva B: Cuenca en equilibrio (Cuenca Madura)

- *Curva C: Cuenca sedimentaria (Cuenca Vieja)*

La curva hipsométrica de caño Buque, muestra que es una cuenca madura, basándonos en la clasificación de las etapas de vida en la gráfica 2 y de una comparación visual. En esta etapa la cuenca ha alcanzado un estado de estabilidad relativa después de un período de evolución, y donde la red de drenaje y topografía ha alcanzado un estado de equilibrio relativo.

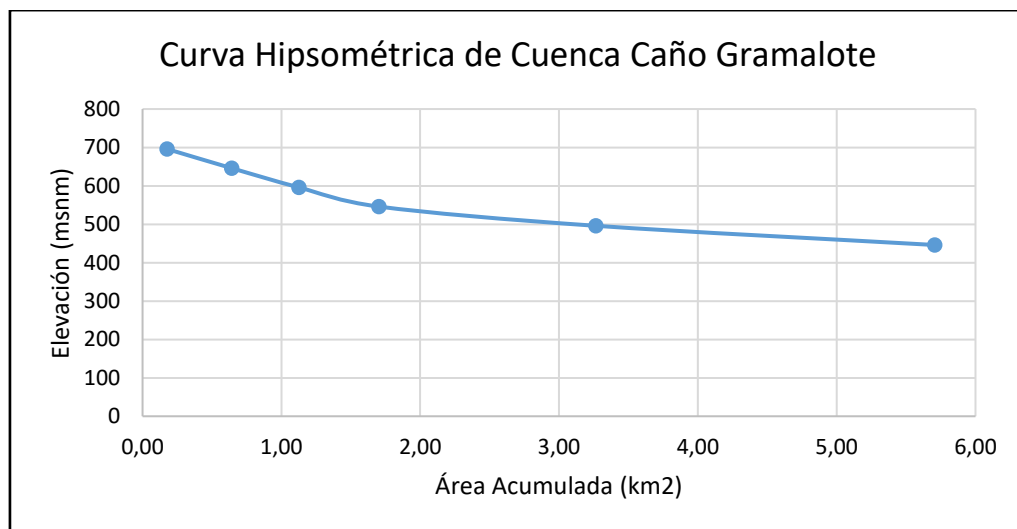
Para las demás cuencas de estudio, se desarrolla con el mismo procedimiento de metodología de caño Buque, teniendo como resultados los siguientes datos:

- **Cuenca Hidrográfica de Caño Gramalote**

Tabla 15. Datos de Altitud, Área y Área Acumulada de la Cuenca Hidrográfica Caño Gramalote.

| Altitud (msnm)            | Área (km <sup>2</sup> ) | Área Acumulada (km <sup>2</sup> ) |               |
|---------------------------|-------------------------|-----------------------------------|---------------|
| 696.00                    | 0.18                    | 0.18                              | 3.08%         |
| 646.00                    | 0.47                    | 0.64                              | 11.25%        |
| 596.00                    | 0.48                    | 1.13                              | 19.74%        |
| 546.00                    | 0.58                    | 1.70                              | 29.83%        |
| 496.00                    | 1.56                    | 3.26                              | 57.21%        |
| 446.00                    | 2.44                    | 5.71                              | 100.00%       |
| <b>50% Área acumulada</b> |                         | <b>2.85</b>                       | <b>50.00%</b> |

Figura 6. Curva Hipsométrica de la Cuenca Caño Gramalote.



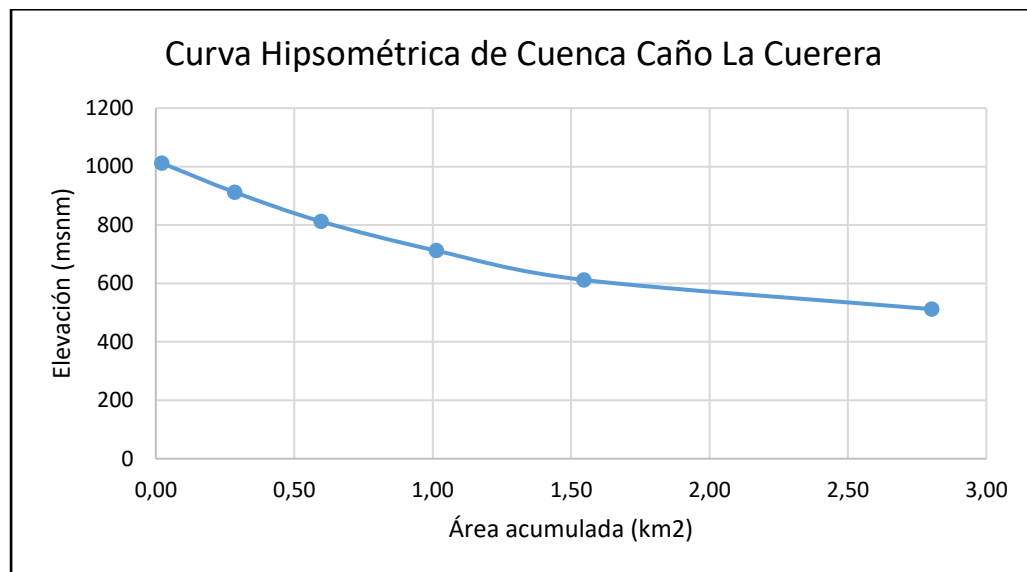
La curva hipsométrica de Caño Gramalote representada en la gráfica 3, indica que se trata de una cuenca gran potencial erosivo (Cuenca Joven). Esta observación se basa en una comparación visual con la curva A de la clasificación de la figura 2. En esta etapa la cuenca se caracteriza por un relieve pronunciado, una red de drenaje en desarrollo, suelos poco desarrollados y la formación de características geomorfológicas erosivas. Estas características mencionadas hacen que la cuenca sea altamente susceptible durante eventos de lluvia intensa.

- **Cuenca Hidrográfica de Caño La Cuerera**

Tabla 16. Datos de Altitud, Área y Área Acumulada de la Cuenca Hidrográfica Caño La Cuerera.

| Altitud (msnm)            | Área (km <sup>2</sup> ) | Área Acumulada (km <sup>2</sup> ) |               |
|---------------------------|-------------------------|-----------------------------------|---------------|
| 1012.00                   | 0.02                    | 0.02                              | 0.75%         |
| 912.00                    | 0.26                    | 0.29                              | 10.19%        |
| 812.00                    | 0.31                    | 0.60                              | 21.31%        |
| 712.00                    | 0.42                    | 1.01                              | 36.17%        |
| 612.00                    | 0.53                    | 1.55                              | 55.16%        |
| 512.00                    | 1.26                    | 2.80                              | 100.00%       |
| <b>50% Área acumulada</b> |                         | <b>1.40</b>                       | <b>50.00%</b> |

Figura 7. Curva Hipsométrica de la cuenca Caño La Cuerera.



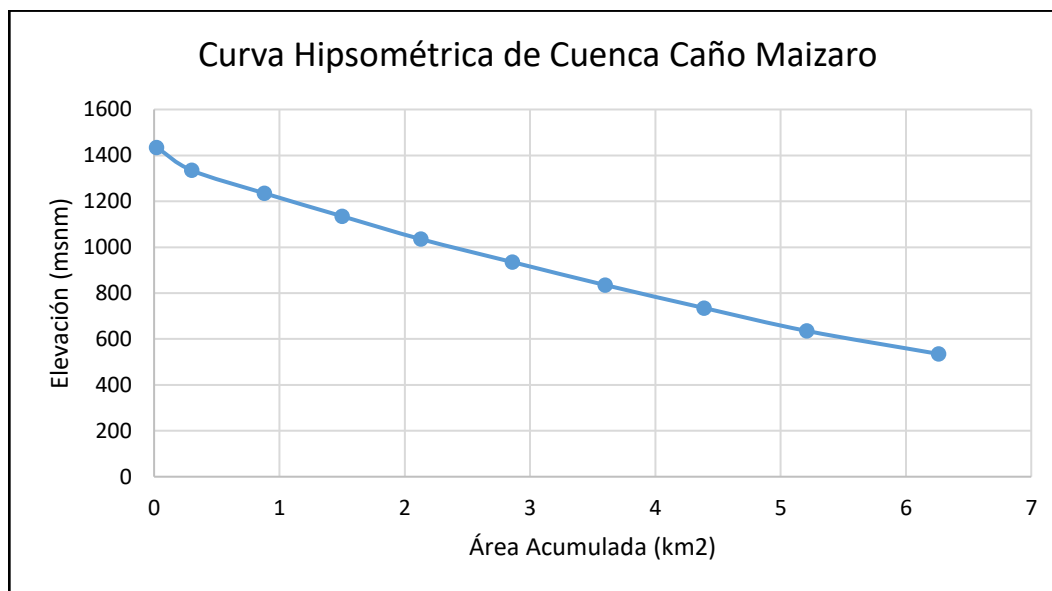
La curva hipsométrica de la cuenca hidrográfica de Caño La Cuerera muestra que es una cuenca con gran potencial erosivo (Cuenca Joven), teniendo como resultado de una comparación visual, donde se asimila con la curva A de la clasificación de la figura 1.

- **Cuenca Hidrográfica de Caño Maizaro**

Tabla 17. Datos de Altitud, Área y Área Acumulada de la Cuenca Hidrográfica Caño Maizaro.

| Altitud (msnm)            | Área (km <sup>2</sup> ) | Área Acumulada (km <sup>2</sup> ) |               |
|---------------------------|-------------------------|-----------------------------------|---------------|
| 1369.00                   | 0.16                    | 0.16                              | 0.82%         |
| 1269.00                   | 0.26                    | 0.42                              | 2.12%         |
| 1169.00                   | 0.44                    | 0.86                              | 4.32%         |
| 1069.00                   | 0.45                    | 1.31                              | 6.56%         |
| 969.00                    | 0.48                    | 1.78                              | 8.95%         |
| 869.00                    | 0.57                    | 2.36                              | 11.83%        |
| 769.00                    | 0.67                    | 3.03                              | 15.20%        |
| 669.00                    | 1.53                    | 4.55                              | 22.88%        |
| 569.00                    | 2.21                    | 6.76                              | 33.96%        |
| 469.00                    | 13.15                   | 19.91                             | 100.00%       |
| <b>50% Área acumulada</b> |                         | <b>9.95</b>                       | <b>50.00%</b> |

Figura 8. Curva Hipsométrica de la Cuenca Caño Maizaro.



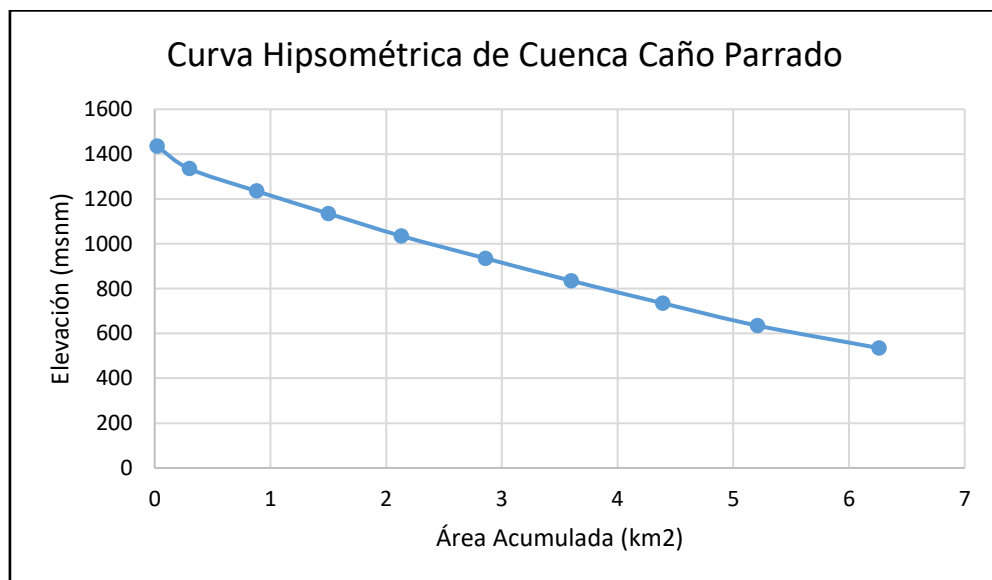
La curva hipsométrica de la cuenca de caño Maizaro, indica que se encuentra en una fase de madurez sedimentaria, como se evidencia al comparar visualmente su forma con la clasificación de etapas de vida de una cuenca en la gráfica 2.

- **Cuenca Hidrográfica de Caño Parrado**

Tabla 18. Datos de Altitud, Área y Área Acumulada de la Cuenca Hidrográfica Caño Parrado.

| Altitud (msnm)            | Área (km <sup>2</sup> ) | Área Acumulada (km <sup>2</sup> ) |               |
|---------------------------|-------------------------|-----------------------------------|---------------|
| 1435.00                   | 0.02                    | 0.02                              | 0.32%         |
| 1335.00                   | 0.28                    | 0.30                              | 4.79%         |
| 1235.00                   | 0.58                    | 0.88                              | 14.06%        |
| 1135.00                   | 0.62                    | 1.50                              | 23.96%        |
| 1035.00                   | 0.63                    | 2.13                              | 34.03%        |
| 935.00                    | 0.73                    | 2.86                              | 45.69%        |
| 835.00                    | 0.74                    | 3.60                              | 57.51%        |
| 735.00                    | 0.79                    | 4.39                              | 70.13%        |
| 635.00                    | 0.82                    | 5.21                              | 83.23%        |
| 535.00                    | 1.05                    | 6.26                              | 100.00%       |
| <b>50% Área acumulada</b> |                         | <b>3.13</b>                       | <b>50.00%</b> |

Figura 9. Curva Hipsométrica de la Cuenca Caño Parrado.



La curva hipsométrica de la cuenca de caño Maizaro, indica que se trata de una cuenca sedimentaria en una etapa avanzada (vejez) de su desarrollo, se caracteriza por ser una topografía suavizada, con una red de drenaje estable y un equilibrio relativo entre los procesos de erosión y sedimentación.

### 9.3. Elevación Media interpolada al 50% del Área de las Cuencas Hidrográficas de Estudios

Con el método numérico de interpolación lineal, descrito en la ecuación 19, que posibilita la determinación de datos desconocidos entre o dentro de otros datos conocidos, se calcula el valor interpolado de elevación media de la cuenca de estudio. Este valor se comparará con el obtenido mediante el uso de QGIS. A continuación, se ilustra este proceso con la cuenca del caño Buque.

*Ecuación 19. Interpolación con Dos Variables*

$$y_x = y_0 + \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} * (y_1 - y_0)$$

Adaptado: Rubio et al., 2014.

Utilizando los datos derivados del análisis en el Software, según se presenta en la tabla 19. La altitud de cada sección de la zona se relaciona la variable Y, mientras que el área acumulada se relaciona con variable X. Esto permite determinar la elevación media del 50% del área total acumulada de la cuenca de estudio

*Tabla 19. Interpolación Lineal de Elevación Media de la Cuenca Hidrográfica Caño Buque.*

| <b>Interpolación Lineal</b> |                |
|-----------------------------|----------------|
| $y_0(E)$                    | 703.00         |
| $x_0(V)$                    | 2.57           |
| $x(V)$                      | 2.99           |
| $y_1(E)$                    | 603.00         |
| $x_1(V)$                    | 3.35           |
| <b>Y(x)</b>                 | <b>649.154</b> |

Así mismo, para las restantes cuencas hidrográficas de estudio, se han obtenido los siguientes resultados de las elevaciones medias. Estos se han determinado mediante la

interpolación lineal mencionada previamente y considerando el 50% del área total acumulada obtenida a través del proceso en la herramienta SIG. En la tabla 20, se observa que la cuenca de caño Parrado exhibe una elevación media superior a las demás cuencas hidrográficas de estudio, atribuible a su ubicación en la base de la cordillera oriental.

*Tabla 20. Elevaciones Medias y el 50 % del Área Acumulada de las Cuencas Hidrográficas de Estudio.*

| <b>Cuencas<br/>Hidrográficas</b> | <b>50% Área<br/>Acumulada<br/>(km<sup>2</sup>)</b> | <b>Elevación Media<br/>Interpolada<br/>(msnm)</b> | <b>Elevación Media<br/>QGIS<br/>(msnm)</b> |
|----------------------------------|--|---|--|
| Buque                            | 2.99   | 649.154   | 684.74                                     |
| Gramalote                        | 2.85   | 509.163   | 480.20                                     |
| La Cuerera                       | 1.40   | 639.187   | 577.77                                     |
| Maizaro                          | 9.95   | 544.717   | 519.74                                     |
| Parrado                          | 3.13   | 898.514   | 836.97                                     |

La disparidad porcentual entre los valores de elevación media obtenidos mediante la curva hipsométrica y aquellos derivados directamente del QGIS equivale a un diferencial del 7%. Es crucial destacar que la elevación media derivada de la curva hipsométrica fue ajustada para alinearse con las ecuaciones relacionadas con la evapotranspiración potencial y la temperatura media. Además, en las cuencas de caño Gramalote y caño Maizaro se evidencia que son las que poseen áreas de elevación media más baja y pueden ser propensas a los procesos de sedimentación. Con respecto a las cuencas de caño La Cuerera, Buque y Parrado que tienen las áreas de elevación más altas pueden indicar zonas con propiedades erosivas.

#### **9.4. Estimación de Precipitación por el método IDW y Temperatura Media**

##### **9.4.1 Precipitación**

En la estimación de la precipitación, como se detalló anteriormente en la metodología, se siguió el procedimiento utilizando el método de IDW. Esto se debe a que la estación meteorológica "Alcaldía" está ubicada dentro del área de la cuenca más pequeña de Gramalote, registrando directamente la precipitación. A continuación, se presentan los resultados de la precipitación interpolada en el centroide de las cuencas hidrográficas:

Tabla 21. IDW de las Cuencas Hidrográficas de Estudio.

| Cuencas Hidrográficas | Estaciones Meteorológicas | Parámetros de IDW          |   |   |
|-----------------------|---------------------------|----------------------------|---|---|
|                       |                           | Distancia al centroide (m) | Precipitación media anual en la estación (mm/año) | Precipitación interpolada en el centroide de la Cuenca (mm/año) |
| Buque                 | Alcaldía                  | 2290.87                    | 4085.3  | 4082.57   |
|                       | Sena                      | 415.497                    | 4082  |   |
| La Cuerera            | Alcaldía                  | 3620.232                   | 4085.3  | 4082.71   |
|                       | Sena                      | 1073.098                   | 4082  |   |
| Maizaro               | Alcaldía                  | 2246.069                   | 4085.3  | 4084.21   |
|                       | Sena                      | 2819.012                   | 4082  |   |
| Parrado               | Alcaldía                  | 4579.625                   | 4085.3  | 5255.64   |
|                       | Servita                   | 3622.725                   | 6908.2  |   |
|                       | Acu. la Esmeralda         | 2776.495                   | 4082  |   |
| Gramalote             | Alcaldía                  | -                          | 4085.32   | 4085.32   |

#### 9.4.2 Temperatura Media

La determinación de la temperatura media, se efectuó por medio de la ecuación de CENICAFE previamente mencionada en la metodología, dando como resultados la tabla 22.

Tabla 22. Temperatura Media.

| Cuencas Hidrográficas | Elevación Media (msnm) | Temperatura Media (°C) |
|-----------------------|------------------------|------------------------|
| Buque                 | 649.154                | 25.24                  |
| Gramalote             | 509.163                | 26.49                  |
| La Cuerera            | 639.187                | 25.90                  |
| Maizaro               | 544.717                | 26.25                  |
| Parrado               | 898.514                | 24.31                  |

Para el análisis y caracterización, se interpreta la tabla de regiones climáticas de Colombia a partir de la precipitación y la temperatura media de Carlos Higuera en su libro de Nociones sobre Métodos de Diseño de Estructuras de Pavimentos para Carreteras, 2011.

Tabla 23. Regiones Climáticas según Temperatura y Precipitación.

|    | <b>Región</b>               | <b>Temperatura Media (°C)</b> | <b>Precipitación (mm/año)</b> |
|----|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| R1 | Fría seca y fría semihúmeda | < 13                          | < 2000                        |
| R2 | Templado seco y semihúmedo  | 13 – 20                       | < 2000                        |
| R3 | Cálido seco y semihúmedo    | 20 – 30                       | < 2000                        |
| R4 | Templado Húmedo             | 13 – 20                       | 2000 - 4000                   |
| R5 | Cálido Húmedo               | 20 -30                        | 2000 - 4000                   |
| R6 | Cálido muy Húmedo           | 20 – 30                       | > 4000                        |

Nota. Adaptado de Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras, 2011.

Tabla 24. Temperatura Media y Precipitaciones Interpoladas en el Centroide de las Cuencas Hidrográficas de Estudio.

| <b>Cuencas Hidrográficas</b> | <b>Temperatura Media (°C)</b> | <b>Precipitación interpolada en el centroide de la cuenca (mm/año)</b> |
|------------------------------|-------------------------------|--|
| Buque                        | 25.24                         | 4082.57  |
| Gramalote                    | 26.49                         | 4082..71   |
| La Cuerera                   | 25.90                         | 4084.21  |
| Maizaro                      | 26.25                         | 5255.64  |
| Parrado                      | 24.31                         | 4085.32  |

Las cuencas estudiadas en el municipio de Villavicencio obedecen a la región Cálida muy húmeda, R6. Con una temperatura media que oscila de los 24 a 27 grados centígrados y una precipitación mayor a los 4000 mm/año.

Se observa que las temperaturas medias varían entre las cuencas, con valores que oscilan entre 24.31°C en caño Parrado y 26.49°C en caño Gramalote. Este rango de temperatura puede influir en los procesos hidrológicos, como la evaporación y la evapotranspiración, que a su vez afectan la disponibilidad de agua en cada cuenca. A su vez, La precipitación interpolada varía significativamente entre las cuencas, con valores que van desde 4082.57 mm/año en caño Buque hasta 5255.64 mm/año en caño Maizaro. Esta variabilidad en la precipitación puede influir en la disponibilidad de agua superficial y subterránea en cada cuenca, así como en la recarga de los acuíferos y el caudal de los cauces.

La relación entre la temperatura media y la precipitación en cada área de estudio, comprende que las cuencas con temperaturas más altas pueden experimentar una mayor evaporación, lo que puede influir en la disponibilidad de agua, especialmente durante períodos de sequía.

### 9.5. Evapotranspiración Potencial y Evapotranspiración Real

Basándose en el modelo empírico de CENICAFÉ, y tomando en consideración los datos de elevación media de las cuencas hidrográficas de estudio en la tabla 18. Se calcula la evapotranspiración potencial, utilizando la ecuación 2.

$$ETP = 1700.17 \exp(-0.0002 * Z)$$

Nota. Adaptado de (Cárdenas et al., 2021).

Igualmente, por medio de la ecuación teórica de Budyko (1974), se calcula la evapotranspiración real de las cuencas hidrográficas de estudio. Los datos de precipitación media anual utilizados en la ecuación 3 de evapotranspiración real (ETR) se obtienen de la tabla 24. *Temperatura Media y Precipitaciones Interpoladas en el Centroide de las Cuencas Hidrográficas de Estudio.*

$$ETR = \left( ETP * P * \tanh\left(\frac{P}{ETP}\right) * \left(1 - \cosh\left(\frac{ETP}{P}\right) + \sinh\left(\frac{ETP}{P}\right)\right) \right)^{0.5}$$

Nota. Adaptado de (Cárdenas et al., 2021).

Como resultados de la ecuación 2 y ecuación 3 de CENICAFÉ y Budyko. Se visualiza las evapotranspiraciones potenciales y evapotranspiraciones reales de las cuencas hidrográficas de estudio. Véase en la tabla 25.

Tabla 25. Evapotranspiraciones Potenciales y Reales de las Cuencas Hidrográficas de Estudio.

| <b>Cuencas<br/>Hidrográficas</b> | <b>ETP<br/>(mm/año)</b> | <b>ETR<br/>(mm/año)</b> |
|----------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Buque                            | 1493.164                | 1360.739                |
| Gramalote                        | 1535.561                | 1395.118                |
| La Cuerera                       | 1496.143                | 1363.162                |
| Maizaro                          | 1524.681                | 1386.308                |
| Parrado                          | 1420.524                | 1328.916                |

Previamente, con los resultados de la tabla 25, se analiza que las cuencas de estudio contienen evapotranspiraciones potenciales superiores a 1500 mm/año y evapotranspiraciones reales superiores al 90% de la ETP, lo que quiere decir que son ETP y ETR muy altas que

experimentan condiciones climáticas y secas que indican una eficiente evaporación y transpiración de la vegetación y la superficie del suelo.

En este caso, la ETR de las cuencas de estudio es baja en relación con la precipitación, lo que se analiza que una mayor proporción de la precipitación se convierte en escorrentía y/o se almacena en el suelo, lo que es beneficioso para la recarga y la disponibilidad de agua a largo plazo.

La relación entre ETR/ETP de las cuencas son cercanas, lo cual indica que las condiciones locales permiten una alta realización de la evaporación y transpiración potencial.

## 9.6. Cálculo de Caudales Medios, Mínimos y Máximos por Medio del Balance Hídrico de Largo Plazo

### 9.6.1 Caudal Medio

Por medio de la ecuación 4 del método del balance hídrico de largo plazo, se estima el caudal medio de las cuencas hidrográficas de estudio.

$$Q_{medio} = A \cdot (P - ETR)$$

Nota. Adaptado de (Cárdenas et al., 2021).

Teniendo como variables, los resultados ya calculados como el área de la cuenca, la precipitación media anual interpolada como única entrada y la evapotranspiración real como única salida. Véase en la tabla 26.

Tabla 26. Caudal Medio de las Cuencas Hidrográficas de Estudio.

| Cuencas Hidrográficas | Área (m <sup>2</sup> ) | Precipitación Media Anual Interpolada (m/s) | ETR (m/s)  | Q <sub>medio</sub> (m <sup>3</sup> /s) |
|-----------------------|------------------------|---|------------|--|
| Buque                 | 5979628.91             | 1.2946E-07                                  | 4.3149E-08 | 0.516                                  |
| Gramalote             | 5705566.41             | 1.2954E-07                                  | 4.4239E-08 | 0.487                                  |
| La Cuerera            | 2802128.91             | 1.2946E-07                                  | 4.3226E-08 | 0.242                                  |
| Maizaro               | 19907285.15            | 1.2951E-07                                  | 4.3960E-08 | 1.703                                  |
| Parrado               | 6271660.16             | 1.6666E-07                                  | 4.2140E-08 | 0.781                                  |

### 9.6.2 Caudal Mínimo

Para la estimación del caudal mínimo medio a diferentes tiempos de retorno de 2.33, 5, 10, 25 y 50 años por medio del método de análisis regional de la UPME, es necesario determinar los parámetros de media, desviación estándar y factor de frecuencia.

$$Q_{\min tr} = \mu + K_{tr} \cdot \sigma$$

Adaptado: (UPME, 2000)

Donde los valores de las constantes de la media ( $C_{\mu}$ ) y desviación estándar ( $C_{\sigma}$ ) de la región Orinoco (0.171 y 0.071), se obtienen de la tabla 27. Son necesarias para hallar la media y la desviación estándar, es importante mencionar que estas constantes serán iguales para la estimación de los caudales mínimos medios de las cuencas hidrográficas de estudio a causa de que se encuentran en la misma región.

Tabla 27. Valores de  $C$ , para el Caudal Mínimo Medio.

| Región   | $C_{\mu}$ | $C_{\sigma}$ | Número de Estaciones |
|----------|-----------|--------------|----------------------|
| Pacífico | 0.277     | 0.098        | 15                   |
| Orinoco  | 0.171     | 0.071        | 32                   |
| Amazonas | 0.258     | 0.073        | 12                   |

Nota. Adaptado de la Unión de Planeación Minero-Energética (UPME, 2000)

Se estima la media ( $\mu$ ) y desviación estándar ( $\sigma$ ), parámetros para determinar el caudal mínimo, por medio de la ecuación 15 y ecuación 16, teniendo presente los valores de las constantes de la media ( $C_{\mu}$ ) y desviación estándar ( $C_{\sigma}$ ), visto anteriormente en la tabla 22.

$$\mu = C_{\mu} \cdot Q_{\text{medio}}$$

Adaptado: (UPME, 2000)

$$\sigma = C_{\sigma} \cdot Q_{\text{medio}}$$

Adaptado: (UPME, 2000)

De igual manera, se establece el parámetro de factor de frecuencia ( $k_{tr}$ ) para la distribución de probabilidad elegida en tiempos de retorno ( $Tr$ ) de 2.33, 5, 10, 25 y 50 años. Los valores del

factor de frecuencia serán los mismos para las cuencas hidrográficas, dado que este depende del tiempo de retorno.

$$k_{Tr} = (-\sqrt{6})/\pi[0.5772 + \ln(\ln(Tr))]$$

Adaptado: (UPME, 2000)

Con los datos estimados anteriormente, se calcula el caudal mínimo para los diferentes tiempos de retorno de las cuencas de estudio, teniendo como resultados la tabla 28.

Tabla 28. Caudal Mínimo Medio de las Cuencas Hidrográficas de Estudio.

| Parámetros<br>Constantes del<br>Caudal<br>Mínimo Medio | Período de Retorno<br>(años)         | 2.33         | 5            | 10           | 25           | 50           |
|--|--------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|  | $C\mu$                               |              |              |              | 0.171        |              |
| $C\sigma$  |                                      |              |              | 0.071        |              |              |
| $K_{Tr}$   |                                      | -0.320       | -0.821       | -1.100       | -1.362       | -1.514       |
| Cuenca<br>Buque  | $\mu$                                |              |              | 0.037        |              |              |
|  | $\sigma$                             |              |              | 0.088        |              |              |
|  | $Q_{min_{Tr}}$ (m <sup>3</sup> /seg) | <b>0.076</b> | <b>0.058</b> | <b>0.04</b>  | <b>0.038</b> | <b>0.033</b> |
| Cuenca<br>Gramalote                                    | $\mu$                                |              |              | 0.083        |              |              |
|  | $\sigma$                             |              |              | 0.035        |              |              |
|  | $Q_{min_{Tr}}$ (m <sup>3</sup> /seg) | <b>0.072</b> | <b>0.055</b> | <b>0.04</b>  | <b>0.036</b> | <b>0.031</b> |
| Cuenca<br>La Cuerera                                   | $\mu$                                |              |              | 0.041        |              |              |
|  | $\sigma$                             |              |              | 0.017        |              |              |
|  | $Q_{min_{Tr}}$ (m <sup>3</sup> /seg) | <b>0.036</b> | <b>0.027</b> | <b>0.02</b>  | <b>0.018</b> | <b>0.015</b> |
| Cuenca<br>Maizaro                                      | $\mu$                                |              |              | 0.291        |              |              |
|  | $\sigma$                             |              |              | 0.121        |              |              |
|  | $Q_{min_{Tr}}$ (m <sup>3</sup> /seg) | <b>0.252</b> | <b>0.192</b> | <b>0.158</b> | <b>0.126</b> | <b>0.108</b> |
| Cuenca<br>Parrado                                      | $\mu$                                |              |              | 0.134        |              |              |
|  | $\sigma$                             |              |              | 0.055        |              |              |
|  | $Q_{min_{Tr}}$ (m <sup>3</sup> /seg) | <b>0.116</b> | <b>0.088</b> | <b>0.072</b> | <b>0.058</b> | <b>0.050</b> |

### 9.6.3 Caudal Máximo

Para la estimación del caudal máximo se realiza por medio de dos métodos: El método del Multiescalamiento para la regionalización de caudales máximos en Colombia y el método de

regionalización de cuantiles. Para obtener una verificación donde los resultados entre ambos métodos sean similares o cercanos para tener mayor validez.

- **Método del Multiescalamiento para la Regionalización de Caudales Máximos en Colombia.**

Para la estimación del caudal máximo para 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años de período de retorno, se considera los parámetros  $q$  y  $C$  mediante las regresiones que realizaron la UPME del tipo  $Q_{TR}$  vs Área de la cuenca. Considerando que las cuencas hidrográficas de estudio se localizan en la región de la Orinoquía, véase los parámetros en la tabla 29.

*Tabla 29. Resumen de los Resultados Obtenidos por Subregiones por el Método del Multiescalamiento para la Estimación de los Caudales Máximos para Diferentes Periodos de Retorno.*

| Subregión | Parámetros | 2.33      | 5       | 10      | 25       | 50       |
|-----------|------------|-----------|---------|---------|----------|----------|
|           |            | Orinoquía | $q(Tr)$ | 0.3971  | 0.3635   | 0.3433   |
|           | $C(Tr)$    | 45.1081   | 71.5170 | 94.8427 | 125.7660 | 149.5030 |
|           | $R$        | 0.6629    | 0.6376  | 0.6210  | 0.6034   | 0.5919   |
| Colombia  | $q(Tr)$    | 0.7484    | 0.7156  | 0.6968  | 0.6790   | 0.6682   |
|           | $C(Tr)$    | 1.4796    | 2.3279  | 3.0455  | 3.9760   | 4.6506   |
|           | $R$        | 0.8529    | 0.8476  | 0.8431  | 0.8382   | 0.8333   |

Nota. Adaptado de la Unión de Planeación Minero-Energética (UPME, 2000)

Se procede a estimar el caudal máximo a las cuencas hidrográficas de estudio, mediante la ecuación 14:

$$Q_{tr} = c_{tr} * A^{q_{tr}}$$

Adaptado: (UPME, 2000)

Tabla 30. Caudal Máximo por Método de Multiescalamiento de las Cuencas Hidrográficas de Estudio.

|                         |   | <b>Período de Retorno<br/>(años)</b> |               |               |               |               |
|-------------------------|---|--------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                         |   | 2.33                                 | 5             | 10            | 25            | 50            |
| Cuenca<br>Buque         | Área de la Cuenca<br>(km <sup>2</sup> ) | 5.98                                 |               |               |               |               |
|                         | $q$                                     | 0.397                                | 0.364         | 0.343         | 0.324         | 0.312         |
|                         | $C$                                     | 45.108                               | 71.517        | 94.843        | 125.76        | 149.50        |
|                         | R                                       | 0.663                                | 0.638         | 0.621         | 0.603         | 0.592         |
|                         | <b>Qmáx (m<sup>3</sup>/seg)</b>         | <b>91.764</b>                        | <b>137.00</b> | <b>175.24</b> | <b>224.29</b> | <b>260.96</b> |
| Cuenca<br>Gramalote     | Área de la Cuenca<br>(km <sup>2</sup> ) | 5.71                                 |               |               |               |               |
|                         | $q$                                     | 0.397                                | 0.364         | 0.343         | 0.324         | 0.312         |
|                         | $C$                                     | 45.108                               | 71.517        | 94.843        | 125.76        | 149.50        |
|                         | R                                       | 0.663                                | 0.638         | 0.621         | 0.603         | 0.592         |
|                         | <b>Qmáx (m<sup>3</sup>/seg)</b>         | <b>90.070</b>                        | <b>134.68</b> | <b>172.44</b> | <b>220.91</b> | <b>257.18</b> |
| Cuenca<br>La<br>Cuerera | Área de la Cuenca<br>(km <sup>2</sup> ) | 2.80                                 |               |               |               |               |
|                         | $q$                                     | 0.397                                | 0.364         | 0.343         | 0.324         | 0.312         |
|                         | $C$                                     | 45.108                               | 71.517        | 94.843        | 125.76        | 149.50        |
|                         | R                                       | 0.663                                | 0.638         | 0.621         | 0.603         | 0.592         |
|                         | <b>Qmáx (m<sup>3</sup>/seg)</b>         | <b>67.913</b>                        | <b>104.00</b> | <b>135.09</b> | <b>175.52</b> | <b>206.08</b> |
| Cuenca<br>Maizaro       | Área de la Cuenca<br>(km <sup>2</sup> ) | 19.91                                |               |               |               |               |
|                         | $q$                                     | 0.397                                | 0.364         | 0.343         | 0.324         | 0.312         |
|                         | $C$                                     | 45.108                               | 71.517        | 94.843        | 125.76        | 149.50        |
|                         | R                                       | 0.663                                | 0.638         | 0.621         | 0.603         | 0.592         |
|                         | <b>Qmáx (m<sup>3</sup>/seg)</b>         | <b>147.94</b>                        | <b>212.12</b> | <b>264.82</b> | <b>330.97</b> | <b>379.57</b> |
| Cuenca<br>Parrado       | Área de la Cuenca<br>(km <sup>2</sup> ) | 6.27                                 |               |               |               |               |
|                         | $q$                                     | 0.397                                | 0.364         | 0.343         | 0.324         | 0.312         |
|                         | $C$                                     | 45.108                               | 71.517        | 94.843        | 125.76        | 149.50        |
|                         | R                                       | 0.663                                | 0.638         | 0.621         | 0.603         | 0.592         |
|                         | <b>Qmáx (m<sup>3</sup>/seg)</b>         | <b>93.518</b>                        | <b>139.40</b> | <b>178.13</b> | <b>227.78</b> | <b>264.87</b> |

- **Método de Regionalización por Cuantiles**

Previamente, se estima los parámetros constantes de media máximos, desviación estándar y factor de frecuencias para hallar el caudal máximo en cada cuenca de estudio. A través de la ecuación

*Ecuación 20. Caudal Máximo en un Tiempo de Retorno por Regionalización Cuantil.*

$$Q_{\text{máx } t r} = kx + K_{tr} \cdot ks$$

Adaptado: (UPME, 2000)

Donde los valores de las constantes de la media ( $Kx$ ) y desviación estándar ( $Ks$ ) de la región Orinoco (27.2185 y 19.0857), se obtienen de la tabla 31. Estas constantes mencionadas, son necesarias para determinar la media y la desviación estándar, es importante mencionar que estas constantes serán iguales para la estimación de los caudales máximos de las Cuencas hidrográficas de estudio, por motivo de que se encuentran en la misma región.

*Tabla 31. Valores Calculados de K para las diferentes subregiones consideradas en Colombia.*

| <b>Subregión</b> | <b>K MEDIA MÁXIMOS</b> | <b>K DESVIACIÓN ESTÁNDAR</b> |
|------------------|------------------------|------------------------------|
| Amazonía         | 25.1349                | 17.1221                      |
| Caribe           | 16.0697                | 8.8739                       |
| Orinoquía        | 27.2185                | 19.0857                      |
| Pacífico         | 24.5141                | 16.6944                      |

Nota. Adaptado de la Unión de Planeación Minero-Energética (UPME, 2000)

Se estima la media ( $x$ ) y desviación estándar ( $s$ ), parámetros para determinar el caudal máximo, por medio de la ecuación 15 y ecuación 16, ecuaciones empíricas, donde se tiene presente los valores de las constantes de la media máximos ( $km$ ) y desviación estándar ( $ks$ ), visto anteriormente en la tabla 34. De igual manera, se establece el parámetro de factor de frecuencia ( $k_{tr}$ ) para la distribución de probabilidad elegida en tiempos de retorno ( $Tr$ ) de 2, 3, 5, 10, 25 y 50 años. Los valores del factor de frecuencia serán los mismos para las cuencas hidrográficas, dado que este depende del tiempo de retorno.

$$k_{Tr} = (-\sqrt{6})/\pi[0.5772 + \ln(\ln(Tr))]$$

Adaptado: (UPME, 2000)

Con los datos estimados anteriormente, se calcula el caudal máximo para los diferentes tiempos de retorno de las cuencas hidrográficas, teniendo como resultados en la tabla 21.

Tabla 32. Caudal Máximo por Método Cuantil de las Cuencas Hidrográficas de Estudio.

| Parámetros                         | Período de Retorno                   | 2.33          | 5             | 10            | 25            | 50            |
|------------------------------------|--------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                                    | (años)                               |               |               |               |               |               |
| Constantes del Caudal Máximo Medio | $kx$                                 |               |               | 27.2185       |               |               |
|                                    | $ks$                                 |               |               | 19.0857       |               |               |
|                                    | $K_{Tr}$                             | 0.0011        | 0.7195        | 1.3046        | 2.0438        | 2.5923        |
| Cuenca Buque                       | X                                    |               |               | 19.097        |               |               |
|                                    | S                                    |               |               | 13.391        |               |               |
|                                    | $Q_{máx_{Tr}}$ (m <sup>3</sup> /seg) | <b>19.112</b> | <b>28.732</b> | <b>36.567</b> | <b>46.467</b> | <b>53.811</b> |
| Cuenca Gramalote                   | X                                    |               |               | 18.507        |               |               |
|                                    | S                                    |               |               | 12.977        |               |               |
|                                    | $Q_{máx_{Tr}}$ (m <sup>3</sup> /seg) | <b>18.521</b> | <b>27.844</b> | <b>35.437</b> | <b>45.030</b> | <b>52.148</b> |
| Cuenca La Cuerera                  | X                                    |               |               | 12.718        |               |               |
|                                    | S                                    |               |               | 8.918         |               |               |
|                                    | $Q_{máx_{Tr}}$ (m <sup>3</sup> /seg) | <b>12.728</b> | <b>19.135</b> | <b>24.353</b> | <b>30.946</b> | <b>35.837</b> |
| Cuenca Maizaro                     | X                                    |               |               | 36.202        |               |               |
|                                    | S                                    |               |               | 25.385        |               |               |
|                                    | $Q_{máx_{Tr}}$ (m <sup>3</sup> /seg) | <b>36.230</b> | <b>54.466</b> | <b>69.319</b> | <b>88.085</b> | <b>102.00</b> |
| Cuenca Parrado                     | X                                    |               |               | 23.841        |               |               |
|                                    | S                                    |               |               | 16.718        |               |               |
|                                    | $Q_{máx_{Tr}}$ (m <sup>3</sup> /seg) | <b>23.860</b> | <b>35.869</b> | <b>45.651</b> | <b>58.010</b> | <b>67.179</b> |

#### 9.6.4 Análisis General de las Evaluaciones de Caudales Medios, Mínimos y Máximos de las Cuencas Hidrográficas de Estudio.

Las cuencas no solo tienen un componente hidrológico sino también un componente socioeconómico, que promueve de gran manera la evaluación de sus propiedades hidrológicas y climatológicas. Esta data informativa nos conlleva al análisis de los caudales medios, mínimos y máximos.

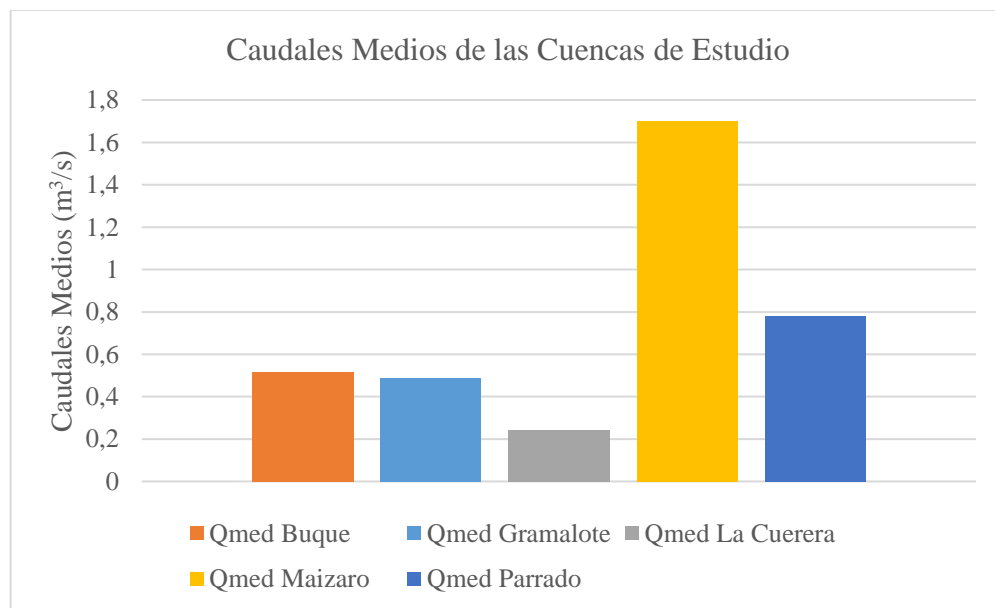
Tabla 33. Caudales Medios, Máximos y Mínimos de las Cuencas Hidrográficas de Estudio.

| Cuencas Hidrográficas | Caudales (m <sup>3</sup> /s) | Período de Retorno (años) |        |        |        |        |        |
|-----------------------|------------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                       |                              | N/A                       | 2.33   | 5      | 10     | 25     | 50     |
| Cuenca Buque          | $Q_{med}$                    | 0.516                     |        |        |        |        |        |
|                       | $Q_{mín_{Tr}}$               |                           | 0.076  | 0.058  | 0.04   | 0.038  | 0.033  |
|                       | $Q_{máx_{Tr}}$               |                           | 19.112 | 28.732 | 36.567 | 46.467 | 53.811 |

Tabla 33. Continuación

|                         |                    |              |        |        |        |        |
|-------------------------|--------------------|--------------|--------|--------|--------|--------|
| <b>Cuenca Gramalote</b> | <b>Qmed</b>        | <b>0.487</b> |        |        |        |        |
|                         | Qmín <sub>Tr</sub> | 0.072        | 0.055  | 0.04   | 0.036  | 0.031  |
|                         | Qmáx <sub>Tr</sub> | 18.521       | 27.844 | 35.437 | 45.030 | 52.148 |
| Cuenca La Cuerera       | Qmed               | 0.242        |        |        |        |        |
|                         | Qmín <sub>Tr</sub> | 0.036        | 0.027  | 0.02   | 0.018  | 0.015  |
|                         | Qmáx <sub>Tr</sub> | 12.728       | 19.135 | 24.353 | 30.946 | 35.837 |
| Cuenca Maizaro          | Qmed               | 1.703        |        |        |        |        |
|                         | Qmín <sub>Tr</sub> | 0.252        | 0.192  | 0.158  | 0.126  | 0.108  |
|                         | Qmáx <sub>Tr</sub> | 36.230       | 54.466 | 69.319 | 88.085 | 102.00 |
| Cuenca Parrado          | Qmed               | 0.781        |        |        |        |        |
|                         | Qmín <sub>Tr</sub> | 0.116        | 0.088  | 0.072  | 0.058  | 0.050  |
|                         | Qmáx <sub>Tr</sub> | 23.860       | 35.869 | 45.651 | 58.010 | 67.179 |

Figura 10. Comparación de Caudales Medios de las Cuencas Hidrográficas de Estudio.



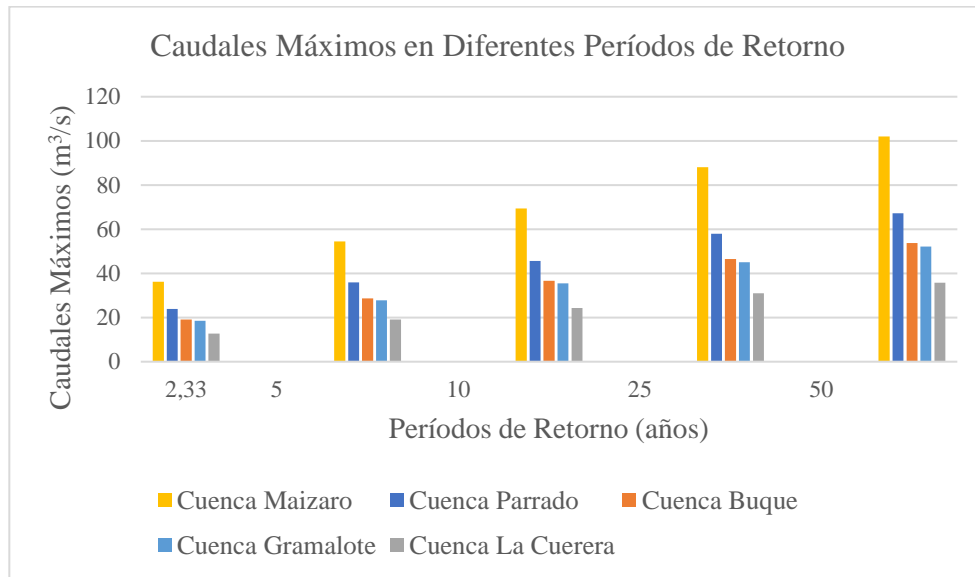
Los caudales medios proporcionan una medida de la cantidad promedio de agua que fluye a través de cada cuenca. Si bien Maizaro destaca con el caudal medio más alto ( $Q_{med} = 1.703 \text{ m}^3/\text{s}$ ), indicando una mayor cantidad de agua disponible, Parrado también muestra un valor significativo ( $Q_{med} = 0.781 \text{ m}^3/\text{s}$ ), mientras que Buque ( $Q_{med} = 0.516 \text{ m}^3/\text{s}$ ), Gramalote ( $Q_{med} = 0.487 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y La Cuerera ( $Q_{med} = 0.242 \text{ m}^3/\text{s}$ ) tienen caudales medios más bajos en comparación.

En este contexto, las cuencas con caudales medios más altos pueden requerir estrategias de mitigación más robustas debido a su mayor potencial de inundaciones y erosión. Maizaro, por ejemplo, podría necesitar medidas como la construcción de infraestructuras de control de inundaciones. Por otro lado, aunque Parrado tiene un caudal medio considerable, si las precipitaciones en su área de influencia no son tan intensas, su susceptibilidad a riesgos naturales puede ser menor en comparación con Maizaro. Las cuencas con caudales medios más bajos, como Buque, Gramalote y La Cuerera, también pueden ser susceptibles a riesgos naturales, especialmente si experimentan eventos de precipitación extrema. En este caso, los planes de mitigación deben centrarse en la gestión de las aguas pluviales y la conservación del suelo para reducir la erosión y la escorrentía

Los caudales máximos se ordenan en una secuencia correlativa según el tamaño de las áreas de las cuencas, de mayor a menor extensión. Esta clasificación se fundamenta en el hecho de que la determinación de los caudales máximos y mínimos está intrínsecamente relacionada con el caudal medio de cada cuenca, el cual está directamente influenciado por el área de la misma. Por lo tanto, en orden decreciente de tamaño de área y clasificación de caudales, encontramos: Caño Maizaro, Caño Parrado, Caño Buque, Caño Gramalote y Caño La Cuerera.

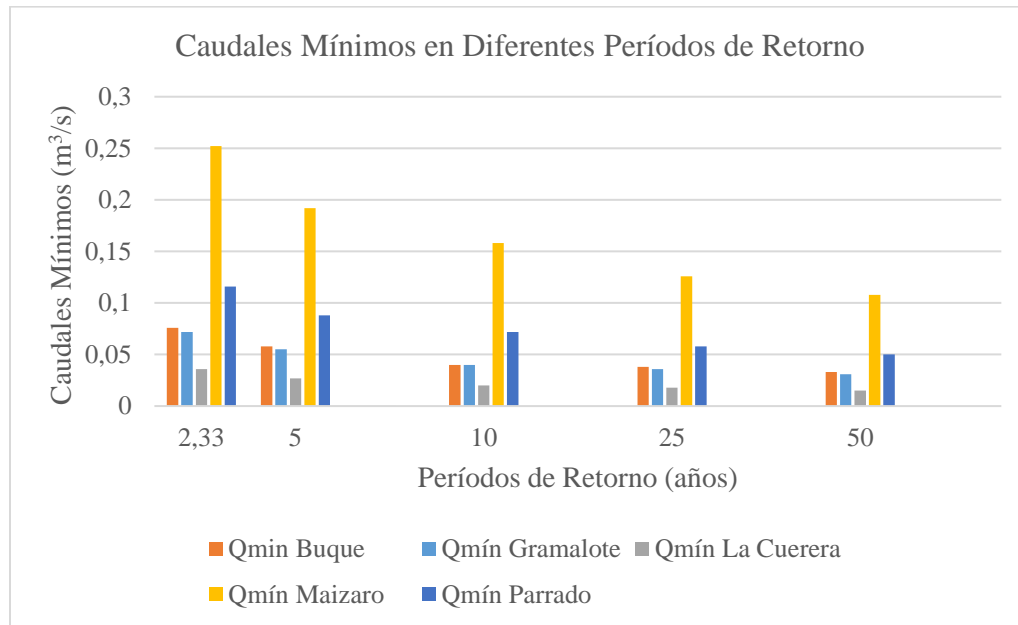
En resumen, la cuenca más susceptible a riesgos naturales puede ser Maizaro debido a la magnitud de sus caudales máximos, pero las otras cuencas también enfrentan riesgos significativos y requieren una atención adecuada en términos de planes de mitigación. La efectividad de estos planes dependerá de la implementación adecuada de medidas estructurales y no estructurales, así como de la capacidad de adaptación a los cambios climáticos futuros. Dado que estos cauces son afluentes de los ríos Ocoa y Guatiquia, es de vital importancia monitorear de cerca los caudales máximos, ya que podrían sobrecargar los ríos en los que confluyen y provocar desbordamientos que afecten las comunidades ubicadas en áreas vulnerables.

Figura 11. Comparación de Caudales Máximos de las Cuencas Hidrográficas de Estudio.



Al comparar ambas metodologías para calcular los caudales máximos, se evidencia una discrepancia cuantitativa en los caudales para diferentes períodos de retorno. Esto subraya la importancia de seleccionar una metodología precisa y confiable para estas evaluaciones hidrológicas. En este sentido, se propone la adopción del Método del Multiescalamiento para la Regionalización de Caudales Máximos en Colombia. Este método cuenta con respaldo y verificación por parte de la Unidad de Planeación Minero-Energético (UPME), lo que garantiza la robustez y la confiabilidad de los resultados obtenidos. Al utilizar esta metodología respaldada por instituciones reconocidas, se asegura una mayor precisión en la estimación de los caudales máximos, lo que es fundamental para la planificación y la gestión efectiva de los recursos hídricos en el país.

Figura 12. Comparación de Caudales Mínimos de las Cuencas Hidrográficas de Estudio.



El análisis de los caudales mínimos de las cuencas de estudio es fundamental porque proporciona información para el diseño e implementación de estrategias de gestión y conservación ambiental orientadas a mantener la salud y la funcionalidad de las cuencas hidrográficas. Los caudales mínimos obtenidos subrayan la relevancia de determinar el riesgo frente a la contaminación, dado que durante estos periodos se observa una limitada capacidad de transporte de sedimentos, tanto de origen natural como antropogénico. Estos hallazgos subrayan la necesidad de considerar la capacidad de autodepuración de los cuerpos hídricos, lo que implica comprender cómo los ecosistemas hidrológicos pueden procesar y eliminar contaminantes presentes en el agua.

Se analiza que la Cuenca de caño Maizaro, muestra los caudales mínimos más altos, lo que indica que, durante los períodos de escasez de agua, esta cuenca puede no estar tan expuesta a la acumulación de contaminantes. Por otro lado, La Cuerera presenta los caudales mínimos más bajos, lo que sugiere una mayor capacidad de autodepuración en el cuerpo hídrico durante los períodos de escasez. Esta cuenca puede ser más vulnerable a la acumulación de contaminantes, lo que subraya la necesidad de implementar medidas de gestión ambiental para proteger su salud y funcionalidad.

## 10. Conclusiones

Con la implementación del método de balance hídrico de largo plazo, se ha logrado una evaluación exhaustiva de los caudales y los patrones climáticos, incluso en eventos extremos. Este enfoque ha permitido estimar la susceptibilidad a riesgos de amenazas naturales en las cuencas que se encuentran en el epicentro geográfico de nuestro municipio. Destacamos especialmente la cuenca de Caño Maizaro, que se erige como una de las zonas más vulnerables a desbordamientos, dada su ubicación estratégica que atraviesa el tejido urbano de Villavicencio, abarcando cinco comunas y numerosos barrios. Es esencial destacar que, según las estimaciones del proyecto, Caño Maizaro registra un caudal máximo de 88.085 m<sup>3</sup>/s, a un período de retorno de 25 años, lo que incrementa la importancia de tomar medidas preventivas adecuadas para proteger a la población y la infraestructura ante tales eventos extremos.

Los resultados obtenidos en este proyecto de investigación revelan una diversidad significativa en los caudales medios estimados para las cuencas hidrográficas evaluadas. Estos varían desde 0.242 m<sup>3</sup>/s hasta 1.703 m<sup>3</sup>/s, reflejando la complejidad y la heterogeneidad de los sistemas hidrológicos en nuestra región. Es crucial destacar el papel fundamental de dos de nuestras principales cuencas, Caño Gramalote y Caño Parrado, cuyas aguas convergen en el caudaloso Río Guatiquia, contribuyendo con un total de 1.268 m<sup>3</sup>/s. Por otro lado, el caudal del Río Ocoa, alimentado por las cuencas de Caño Buque, Caño La Cuerera y Caño Maizaro, alcanza un total de 2.461 m<sup>3</sup>/s. Esta conclusión destaca la importancia vital de estas fuentes hídricas tanto para el abastecimiento de agua como para la gestión sostenible de nuestros recursos naturales. Asimismo, ofrece una visión integral de la distribución y la interconexión de los flujos de agua en nuestra región.

Se concluye mediante el análisis del desarrollo, que las cuencas comparten una caracterización geomorfológica similar, que se manifiesta en su tamaño, forma y componentes hidrológicos. Sin embargo, es posible distinguir las cuencas mediante el análisis del relieve y la pendiente media de cada cuenca, así como su punto final de drenaje. Enfatizando en que todas las cuencas estudiadas comparten un abanico aluvial y actúan como afluentes de los ríos Ocoa y Guatiquia, que rodean el municipio de Villavicencio. Esta conexión hidrológica entre las cuencas subraya la importancia de considerarlas como partes interdependientes de un sistema hidrográfico más amplio.

En la comparación hidro climatológica entre las cuencas adyacentes en el municipio, se concluye una notable similitud en sus propiedades climáticas debido a su cercanía geográfica y a la compartición de sus líneas divisorias. Esta proximidad conduce a una homogeneidad en muchos aspectos de su régimen hidrológico. Sin embargo, la diferencia más prominente entre ellas radica en sus áreas respectivas, lo que ejerce una influencia directa en la variación de los caudales. Es importante destacar que, a pesar de la similitud en las condiciones climáticas, las disparidades en el tamaño de las cuencas pueden generar discrepancias significativas en la disponibilidad y flujo de agua.

Para asegurar la coherencia y efectividad del proyecto de evaluación de caudales en la zona urbana de Villavicencio, es imperativo complementar el enfoque del balance hídrico y el análisis de datos climatológicos con mediciones directas de caudales mediante aforos. Estos aforos son fundamentales no solo para validar la precisión del modelo hidrológico empleado en el balance hídrico, sino también para verificar la consistencia entre las estimaciones teóricas y los datos observados en el terreno. Al realizar aforos en diversos puntos dentro de la cuenca hidrográfica urbana, podremos obtener mediciones directas de los flujos de agua, lo que permitirá evaluar la confiabilidad de las estimaciones y ajustar los parámetros del modelo según sea necesario. En este contexto, resulta esencial continuar con la vigilancia y análisis de estas cuencas para profundizar en la comprensión de su dinámica y adoptar medidas de gestión y conservación de los recursos hídricos en el área de Villavicencio.

## 11. Bibliografía

- Caballero, D., & Pérez, J. (2007). *Balance hídrico a largo plazo e indicadores de información hidro climática en la mesa de Barichara*. [Trabajo de Grado] Universidad Industrial de Santander. Repositorio Institucional <https://repository.udistrital.edu.co>
- Campos Aranda, D. (1998). *Procesos del Ciclo Hidrológico*. Universidad Autónoma de San Luis. <https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/handle/i/3331>.
- Cárdenas Gutiérrez, J. A., Jacome Carrascal, J. L., & Vergel Ortega, M. (2021). *Determinación de la evapotranspiración potencial y real en cuenca hidrográfica, utilizando modelos matemáticos*. *Revista Boletín Redipe*. 10-3 <https://revista.redipe.org/index.php/1/article/view/1230>.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2018). *Censo Nacional de Población y Vivienda*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018>.
- Díaz Suescún, L. L., & Alarcon Africano, J. G. (2018). *Estudio hidrológico y balance hídrico para determinar la oferta y la demanda de agua de la cuenca de la quebrada niscota para un acueducto interveredal en nunchía, casanare*. [Trabajo de grado] Universidad Católica de Colombia. <http://hdl.handle.net/10983/15989>.
- Escriba, L. (2021). IDW-Validación Cruzada-Python. *Linkedin*, 1. <https://www.linkedin.com/pulse/idw-validaci%25C3%25B3n-cruzada-python-luis-david-escriba-cuya/?trackingId=rClrREYIS3y%2B9hJlfiWVPA%3D%3D>.
- García, S., & Otero, J. (2005). *Estimación de la evapotranspiración real en la cuenca superior del Río Lebrija*. [Trabajo de grado] Universidad industrial de Santander. <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/f3541183-8d29-4fc5-99fb-c42935dd4340/content>.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2019). *Características de Ciudades Principales y Municipios Turísticos*. <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima>.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Departamento Administrativo Nacional de Estadística, & Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2011). *reporte final de*

- áreas afectadas por inundaciones 2010-2011.*  
[https://www.dane.gov.co/files/noticias/Reunidos\\_presentacion\\_final\\_areas.pdf](https://www.dane.gov.co/files/noticias/Reunidos_presentacion_final_areas.pdf).
- Jaimes, C. (18 de Octubre de 2022). *Zonas de Colombia donde más llueve: En algunas cae 20 veces más agua que en Bogotá.* Radio Cadena Nacional.  
<https://www.rcnradio.com/colombia/zonas-de-colombia-donde-mas-llueve-en-algunas-cae-20-veces-mas-agua-que-en-bogota-solo-rcn>.
- Jaramillo Robledo, Á. (2005). *Clima Andino y Café en Colombia.* Centro Nacional de Investigaciones de Café, 63-74.  
<https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/859/1/Portada.pdf>.
- Jiménez Otárola, F. (12 de 08 de 1994). *Planificación y Manejo de los Recursos Hidrológicos en la Agricultura mediante el Balance Hídrico.* Obtenido de Repositorio Centro Agronomico Tropical de Investigación y Enseñanza: <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/3394>
- Mesa, O., Poveda, G., & Vélez J. (1999). *Hidro-SIG: Una herramienta para la estimación de balances hidrológicos de Colombia.* . In VII congreso Ibero-Americano de Sistemas de Información Geográfica. <https://www.researchgate.net/profile/John-Mejia-3/publication/237315938>.
- Ministerio de Ambiente. (2015). *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Del Río La Vieja.*  
[https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/2020-02/Documento\\_General\\_POMCA\\_LaVieja.pdf](https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/2020-02/Documento_General_POMCA_LaVieja.pdf)
- Ministerio de Ambiente de Colombia. (2014). *Guía técnica para la formulación de planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas.*  
[https://www.andi.com.co/uploads/guia\\_de\\_pomcas.pdf](https://www.andi.com.co/uploads/guia_de_pomcas.pdf)
- Ministerio de vivienda. (2021). *Función Pública* . Obtenido de Normas y Leyes Colombianas:  
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=339>
- Ordoñez Gálvez, J. J., & Casaverde Riveros, M. R. (2011). *Cartilla Técnica: ¿Qué es una cuenca hidrológica?.* Sociedad Geográfica de Lima.  
[https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam\\_files/publicaciones/varios/cuenca\\_hidrologica.pdf](https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/cuenca_hidrologica.pdf)
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (2012). *International Glossary of Hydrology.* Geneva, Switzerland : UNESCO.  
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000221862>

- Pérez, D., & Giraldo, L. (2006). *Determinación de la Oferta y la Demanda Hídrica de la Región de la Comunidad de Source Matelas (Haití), para el Estudio de Prefactibilidad de Construcción de una Presa*. [Trabajo de grado] Escuela de Ingeniería de Antioquía. <https://repository.eia.edu.co/handle/11190/3217>
- Roller, D., & Blum, R. (1986). *Volumen 1 de Física 1: Mécanica, Ondas y Termodinámica*. Reverte. <https://www.alphaeditorialcloud.com/library/publication/fisica-tomo-i-mecanica-ondas-y-termodinamica-volumen-1>
- Sanabria Morera, A. C. (2019). *Implementación de Modelos de Balance Hídrico a Nivel Mensual para la Evaluación del Efecto del Cambio Climático Sobre la Disponibilidad del Recurso Hídrico en la Cuenca del Río Coello*. [Trabajo de grado]. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/77184>
- Sierra, C., Peña, C., & Báez, C. (2019). *Hidrología urbana: estado del arte y perspectivas*. Obtenido de doi: 10.31910/rudca.v22.n2.2019.1429
- Silva Herrera, Á. M., & Caballero Hernández, A. N. (2019). *Formulación de Estrategias para la Gestión de la Microcuenca Quebrada Mancilla a partir del Cálculo Del Balance Hídrico y el Caudal Ecológico en Facatativá, Cundinamarca*. [Trabajo de grado] Universidad de Cundinamarca. <https://repositorio.ucundinamarca.edu.co/handle/20.500.12558/2687?show=full>
- Silva León, G. (2004). *La cuenca del río Orinoco: Visión hidrográfica y balance hídrico*. Revista Geográfica Venezolana. <https://www.redalyc.org/pdf/3477/347730348007.pdf>
- Trefethen, J. M. (1987). *Geología Para Ingenieros*. Continental S. A. [https://books.google.com.co/books/about/Geolog%C3%ADa\\_para\\_ingenieros.html?id=5cEPnQEACAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.co/books/about/Geolog%C3%ADa_para_ingenieros.html?id=5cEPnQEACAAJ&redir_esc=y)
- Trujillo, J. (23 de Enero de 2023). *Hasta 22 días mensuales fue promedio de lluvias entre enero y octubre del año pasado*. La Republica Más. <https://www.larepublica.co/especiales/lluvias-mil/hasta-22-dias-mensuales-fue-el-promedio-de-lluvias-entre-enero-y-octubre-de-2022-3527844>.
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. (19 de 08 de 2020). *Portal Gestión de Riesgo*. Obtenido de Portal gestión de riesgo: <https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Noticias/2020/Riesgo-por-movimientos-en-masa-en-Colombia.aspx>

Universidad of Alaska Fairbanks. (01 de Enero de 2006). *ASF*. Obtenido de Alaska Satellite Facility - Distributed Active Archive Center: <https://asf.alaska.edu/datasets/daac/alos-palsar/>

Unidad de Planeación Minero Energética. (2000). *Atlas Hidrológico de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia.

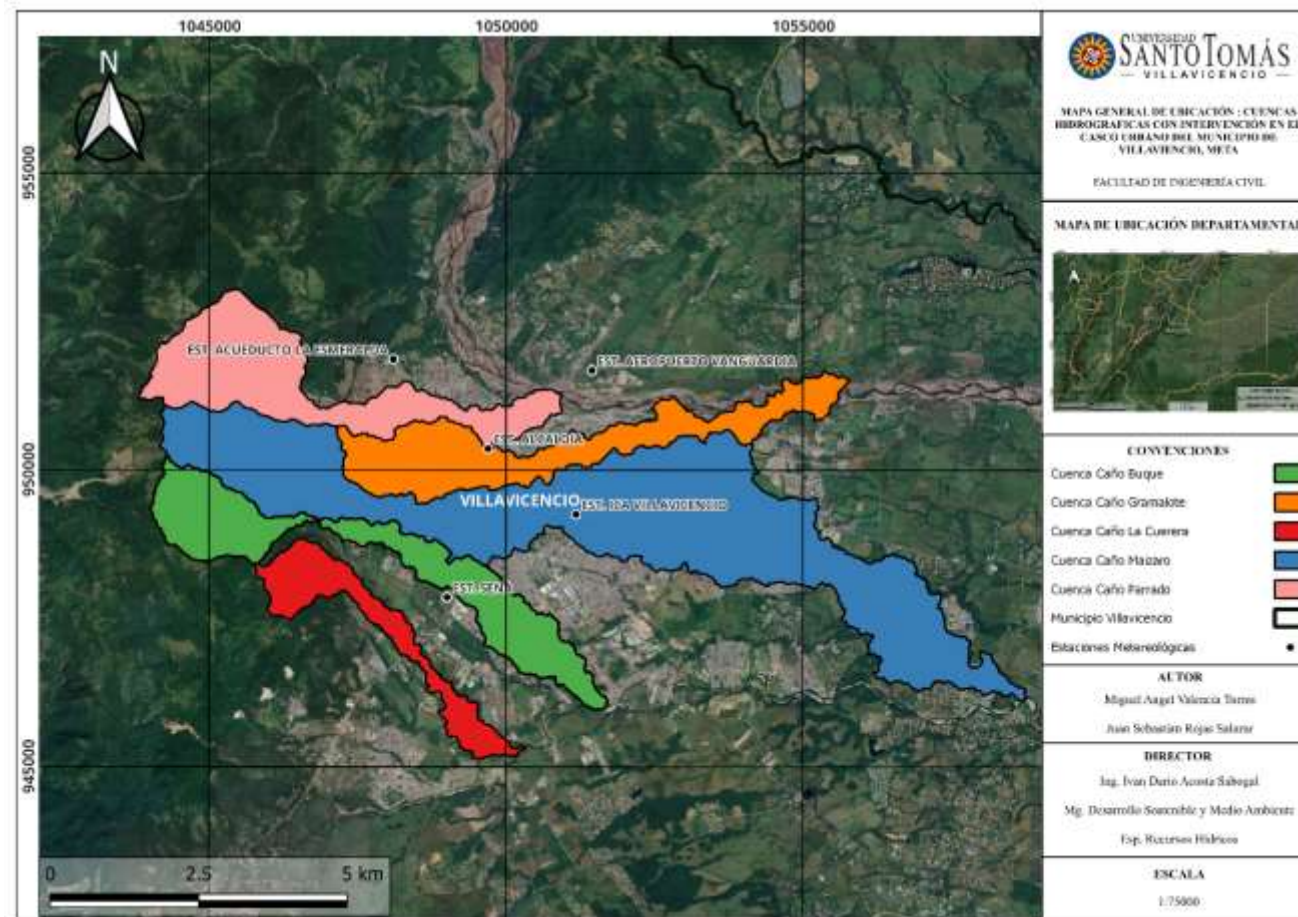
Vargas Cuervo, G. (2012). *Geología, Geomorfología y Dinámica Fluvial Aplicada a Hidráulica de Ríos*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Villón Bejas, M. (2004). *Hidrología*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. <https://www.hidrosm.com/2021/01/libro-hidrologia-maximo-villon-bejar.html>

## 12. Anexos

### Anexo 1: Caracterización gráfica de las cuencas hidrográficas de estudio

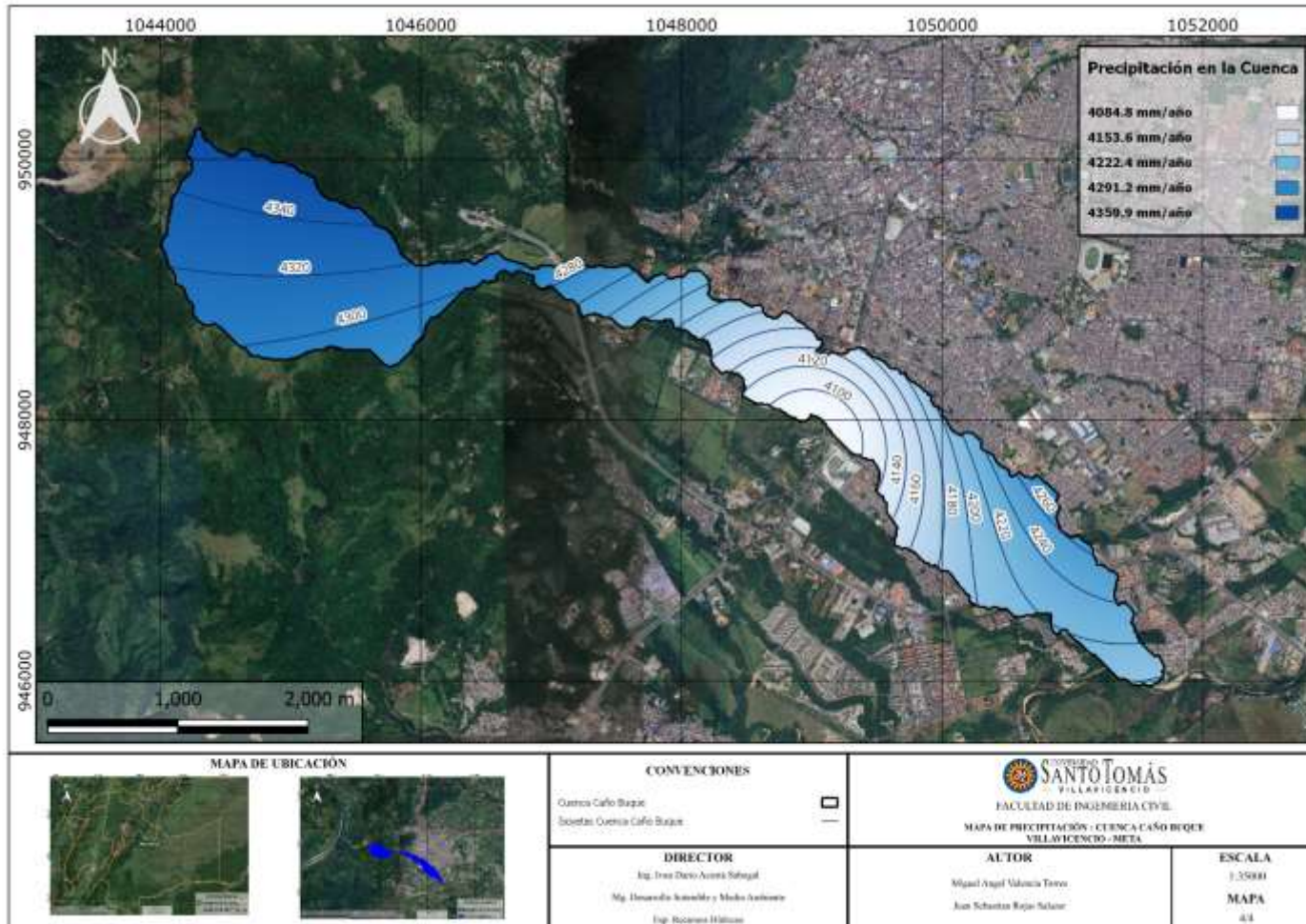
Mapa 1. Ubicación General de las Cuencas Hidrográficas de Estudio.



*Nota.* Mapa de la localización general del casco urbano de la ciudad de Villavieancio donde se visualiza la limitación territorial de cada cuenca hidrográfica de estudio por medio de QGIS.

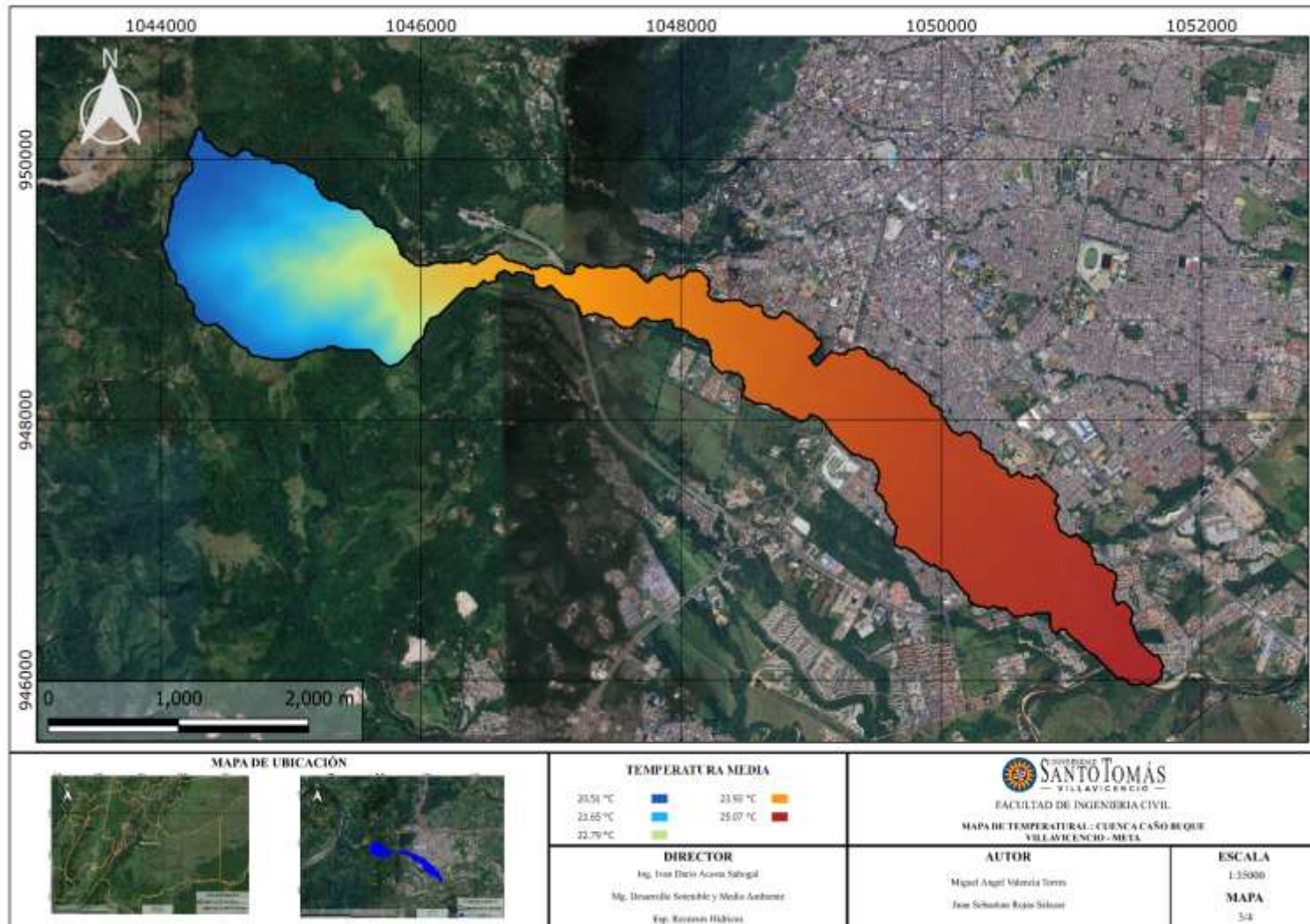
- Mapas de la Cuenca Hidrográfica Caño Buque

Mapa 2. Precipitación Media Anual en la Cuenca Hidrográfica Caño Buque



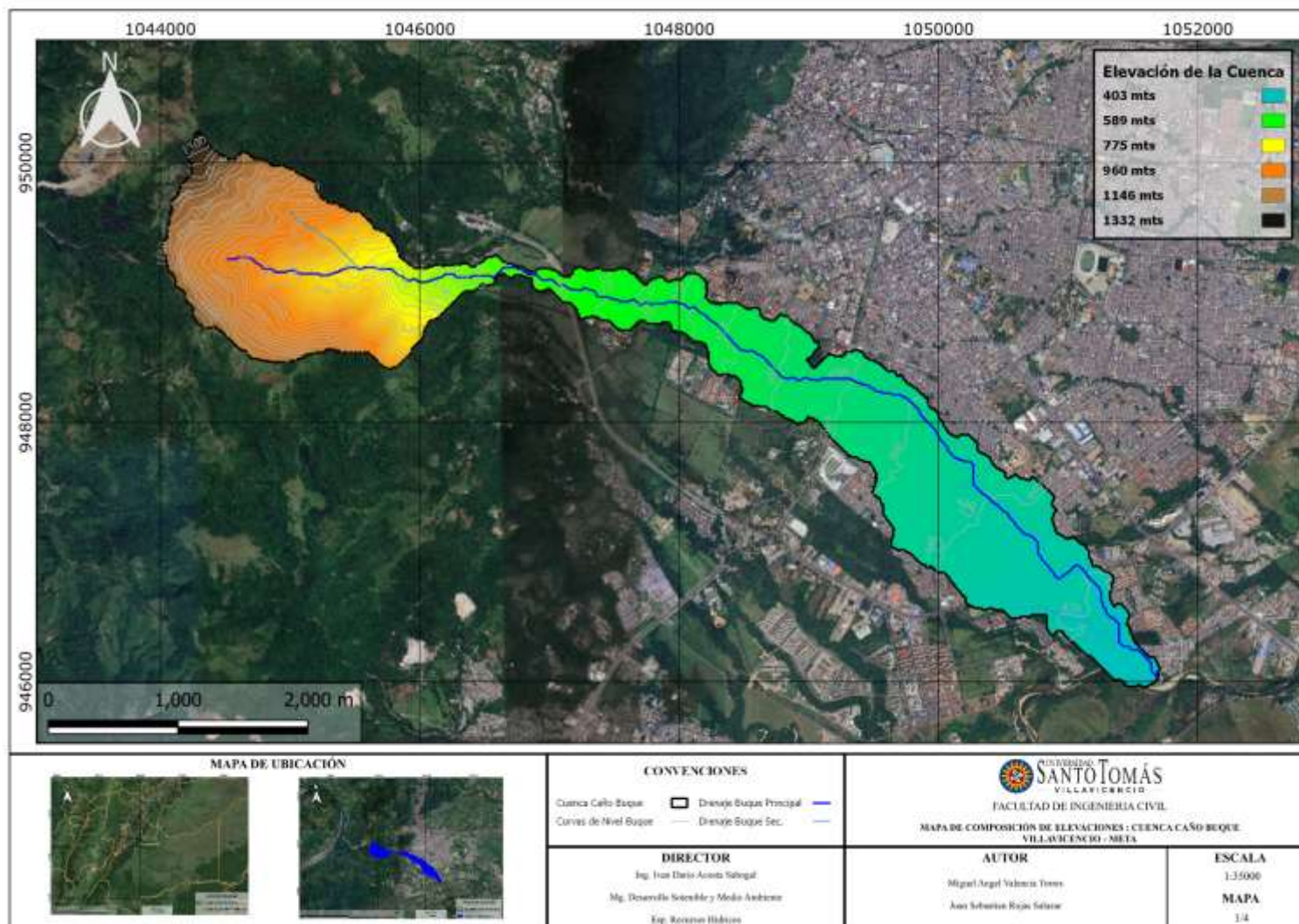
Nota. Mapa de la precipitación media anual que se presenta en el área territorial de la cuenca caño buque en la ciudad de Villavicencio por medio de QGIS.

Mapa 3. Temperatura media anual en la Cuenca Hidrográfica Caño Buque.



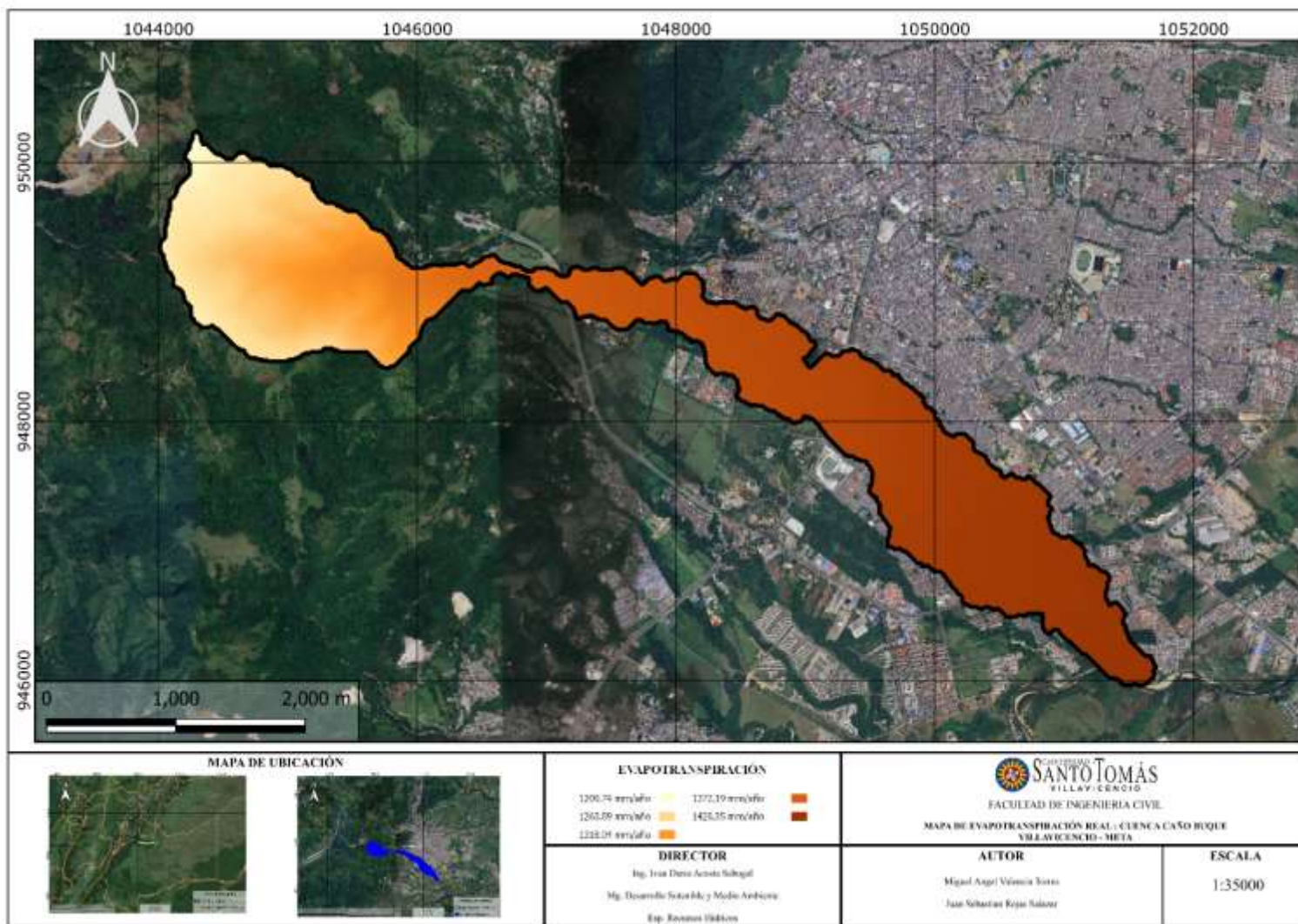
Nota. Mapa de la temperatura media que se presenta en la cuenca caño buque en la ciudad de Villavicencio por medio de QGIS.

Mapa 4. Elevaciones Medias presentadas en el Área Territorial de la Cuenca Hidrográfica Caño Buque.



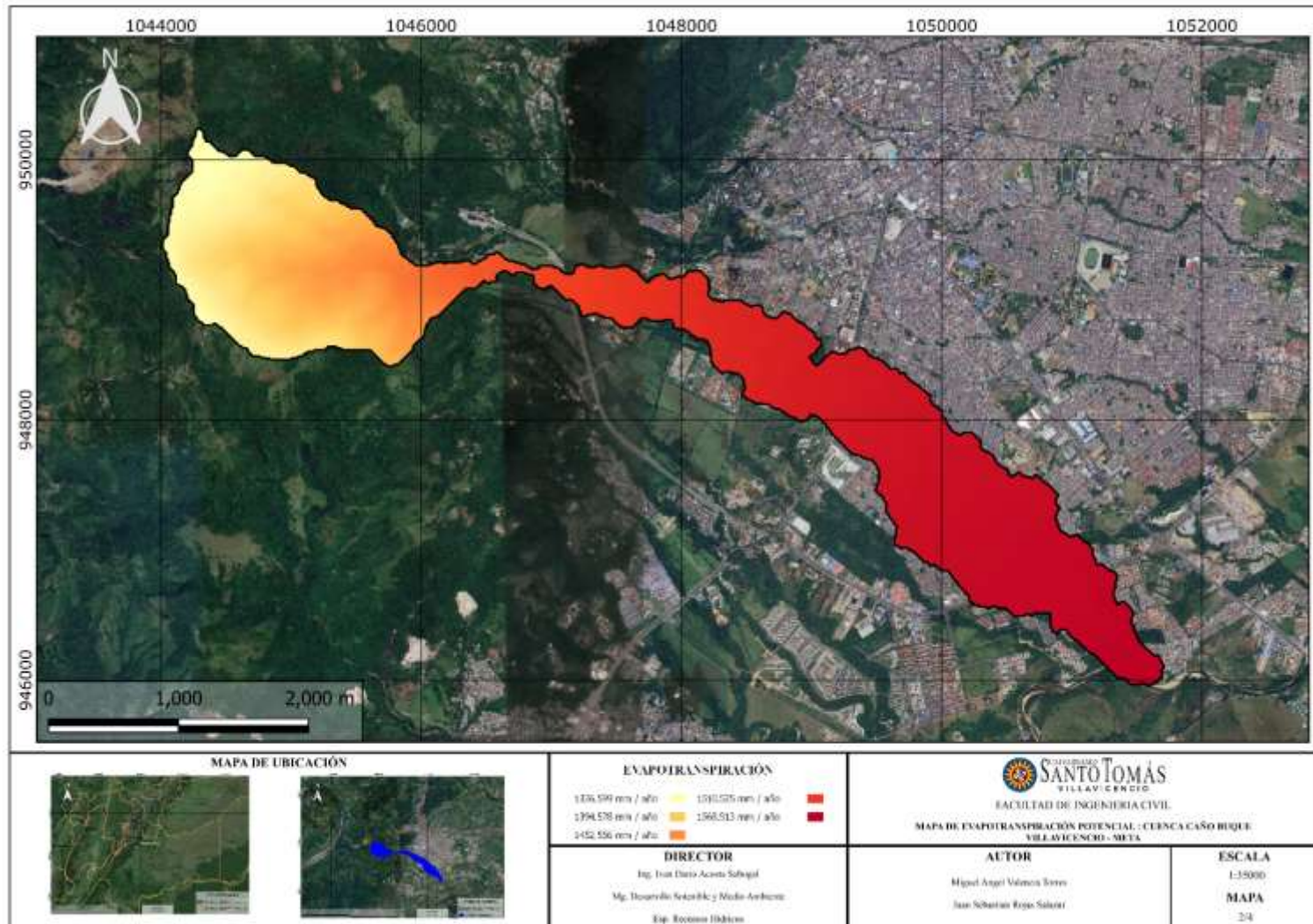
Nota. Mapa de las elevaciones media presentadas dentro del área territorial de la cuenca caño buque en la ciudad de Villavicencio por medio de QGIS.

Mapa 5. Evapotranspiración Real de la Cuenca Hidrográfica Caño Buque.



Nota. Mapa de las elevaciones media presentadas dentro del área territorial de la cuenca caño buque en la ciudad de Villavicencio por medio de QGIS.

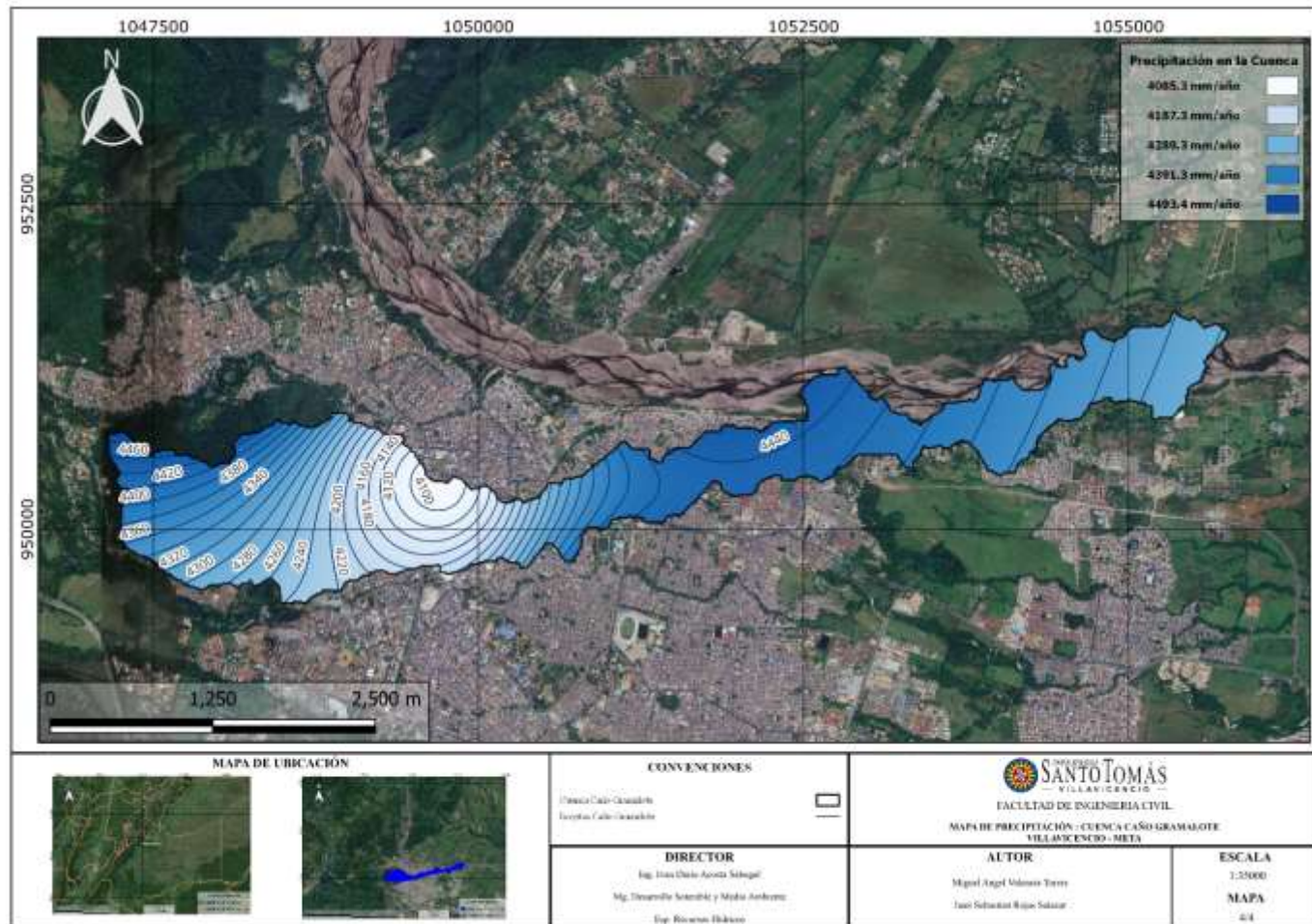
Mapa 6. Evapotranspiración Potencial de la Cuenca Hidrográfica Caño Buque.



Nota. Mapa de las elevaciones media presentadas dentro del área territorial de la cuenca caño buque en la ciudad de Villavicencio por medio de QGIS.

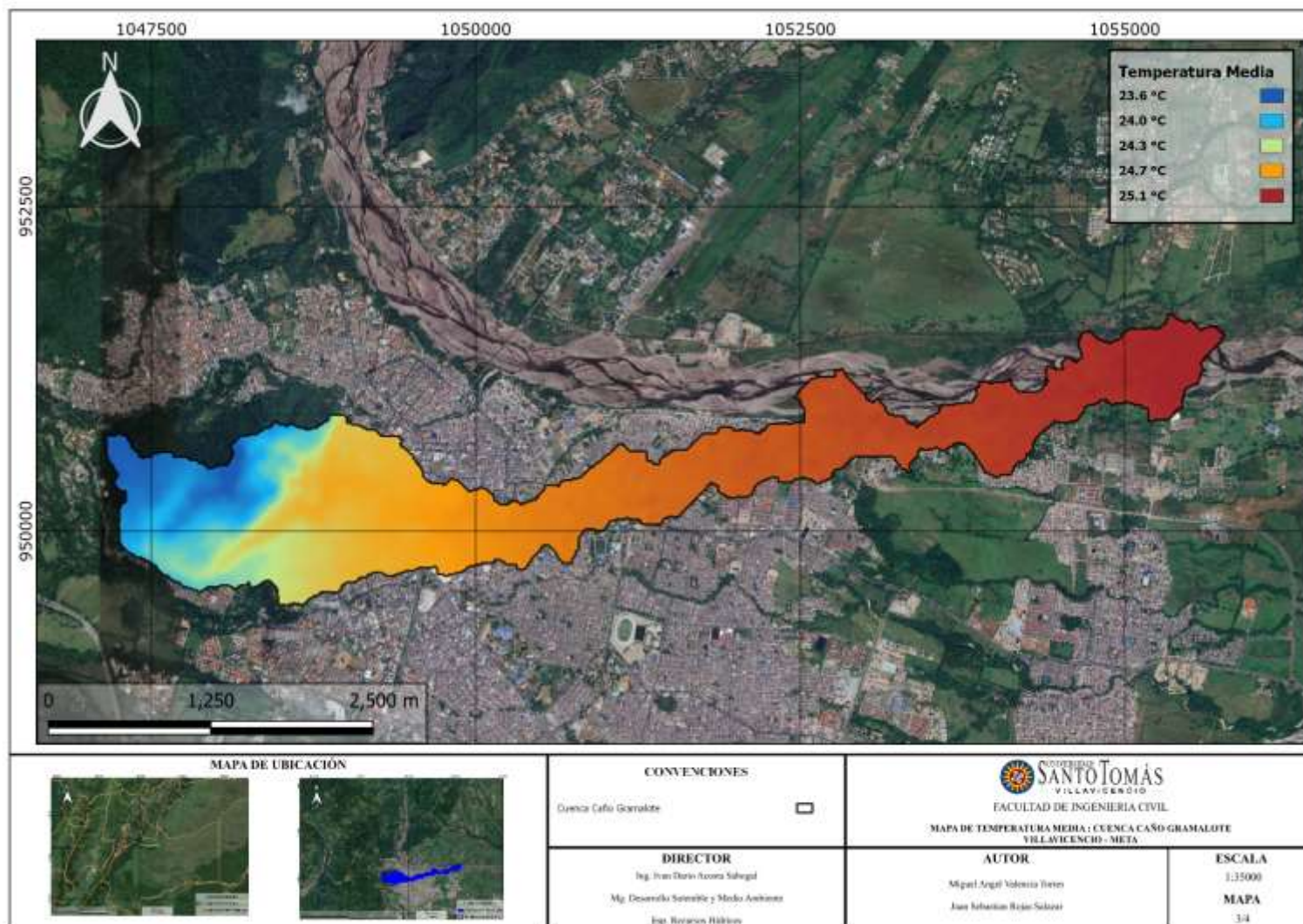
- **Mapas de la Cuenca Hidrográfica Caño Gramalote**

*Mapa 7. Precipitación Media Anual en la Cuenca Hidrográfica Caño Gramalote.*



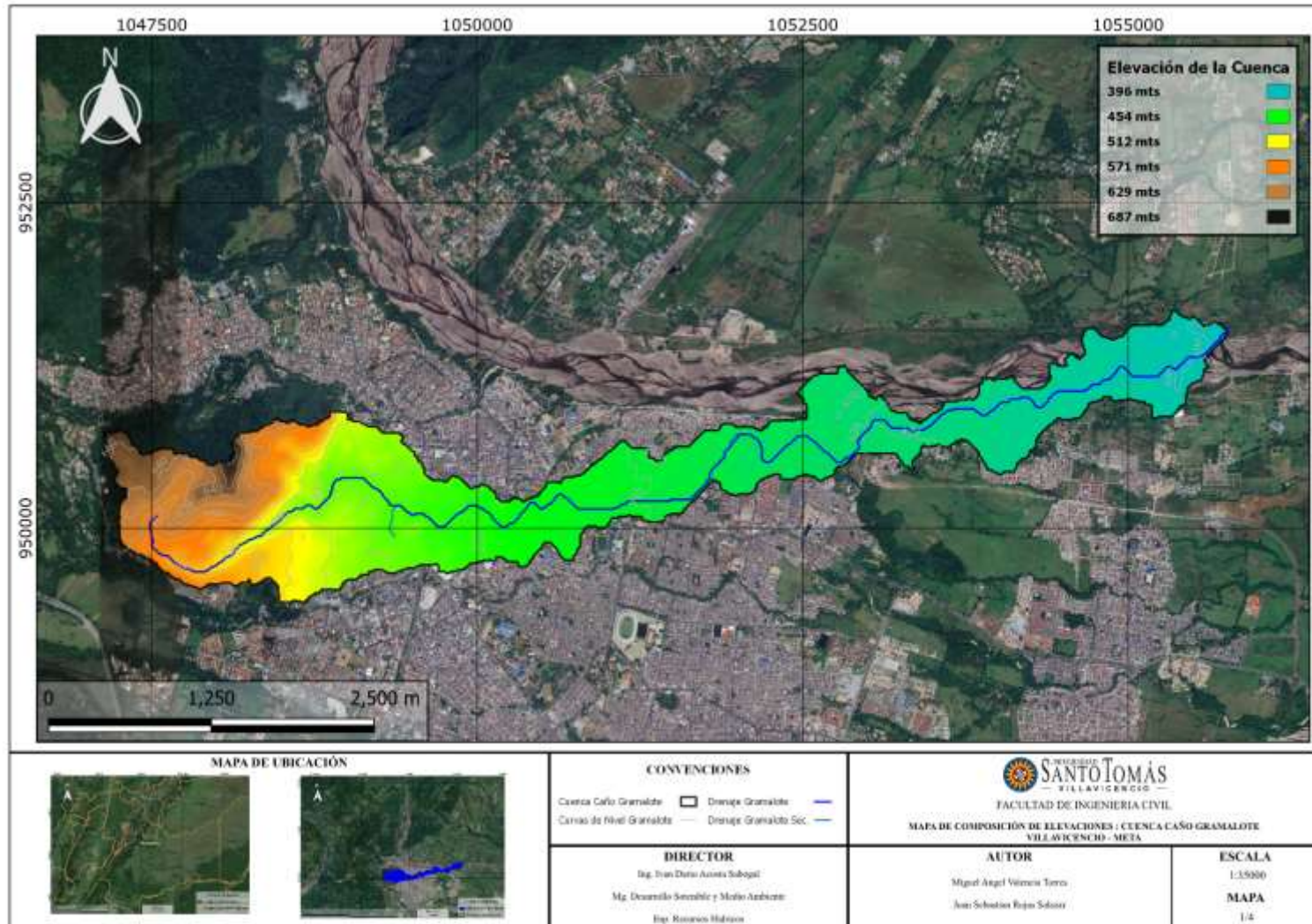
*Nota.* Mapa de la precipitación media anual que se presenta en el área territorial de la cuenca caño gramalote en la ciudad de Villavicencio por medio de QGIS.

Mapa 8. Temperatura media anual en la Cuenca Hidrográfica Caño Gramalote.



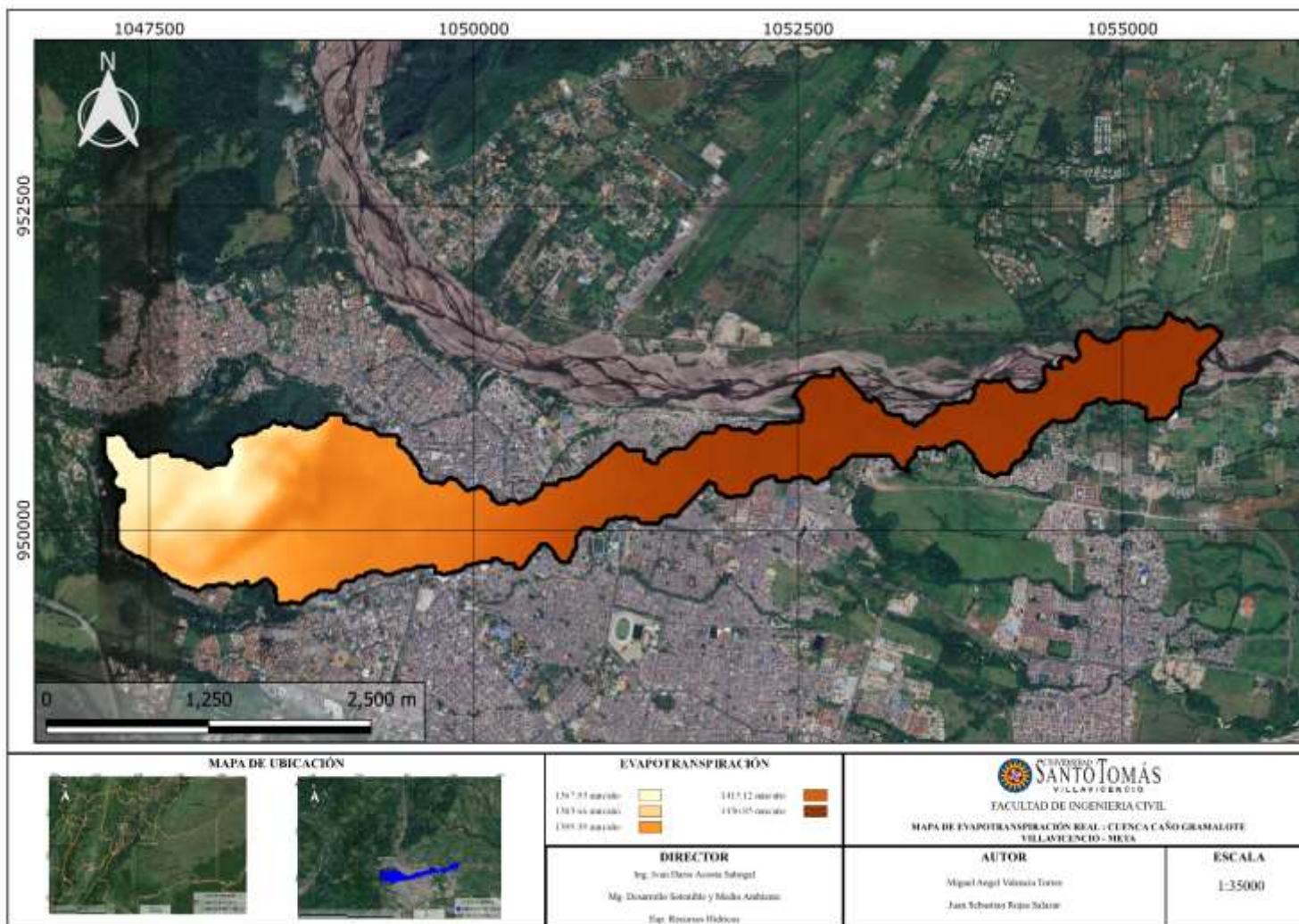
Nota. Mapa de la temperatura media que se presenta en la cuenca caño gramalote en la ciudad de Villavicencio por medio de QGIS.

Mapa 9. Elevaciones Medias presentadas en el Área Territorial de la Cuenca Hidrográfica Caño Gramalote.



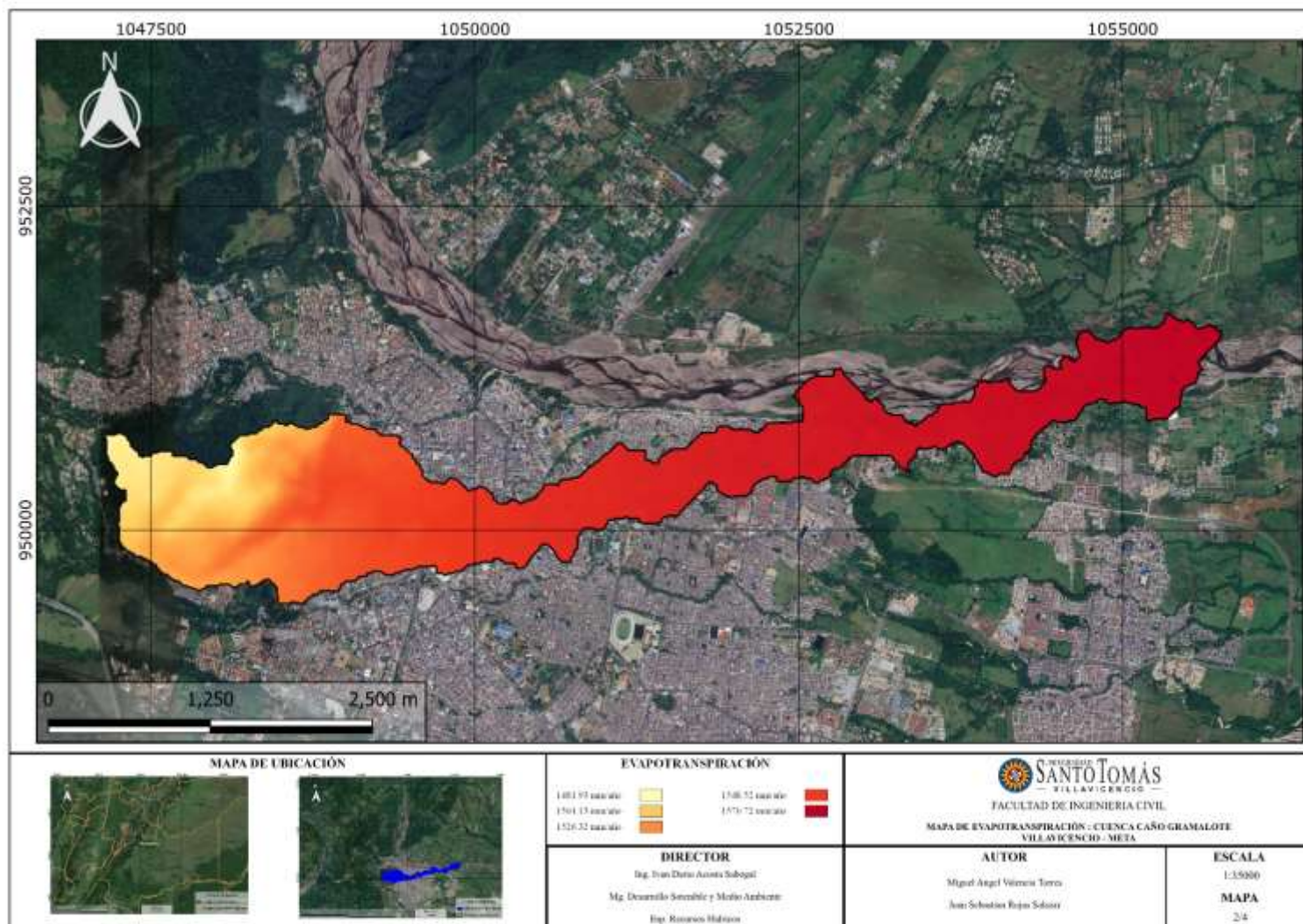
Nota. Mapa de las elevaciones media presentadas dentro del área territorial de la cuenca caño gramalote en la ciudad de Villavicencio por medio de QGIS.

Mapa 10. Evapotranspiración Real de la Cuenca Hidrográfica Caño Gramalote.



Nota. Mapa de las elevaciones media presentadas dentro del área territorial de la cuenca caño gramalote en la ciudad de Villavicencio por medio de QGIS.

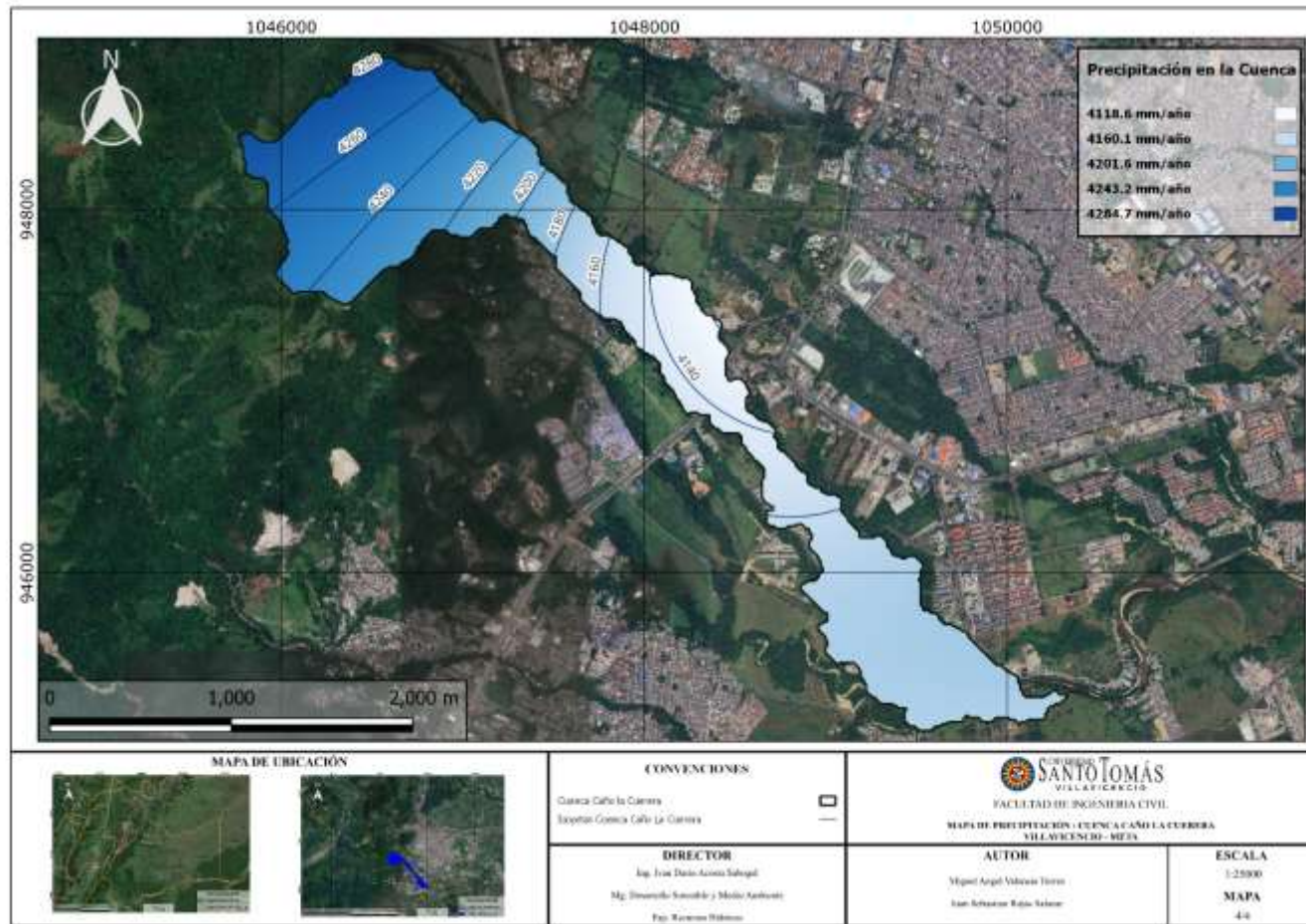
Mapa 11. Evapotranspiración Potencial de la cuenca Hidrográfica Caño Gramalote.



Nota. Mapa de las elevaciones media presentadas dentro del área territorial de la cuenca caño gramalote en la ciudad de Villavicencio por medio de QGIS.

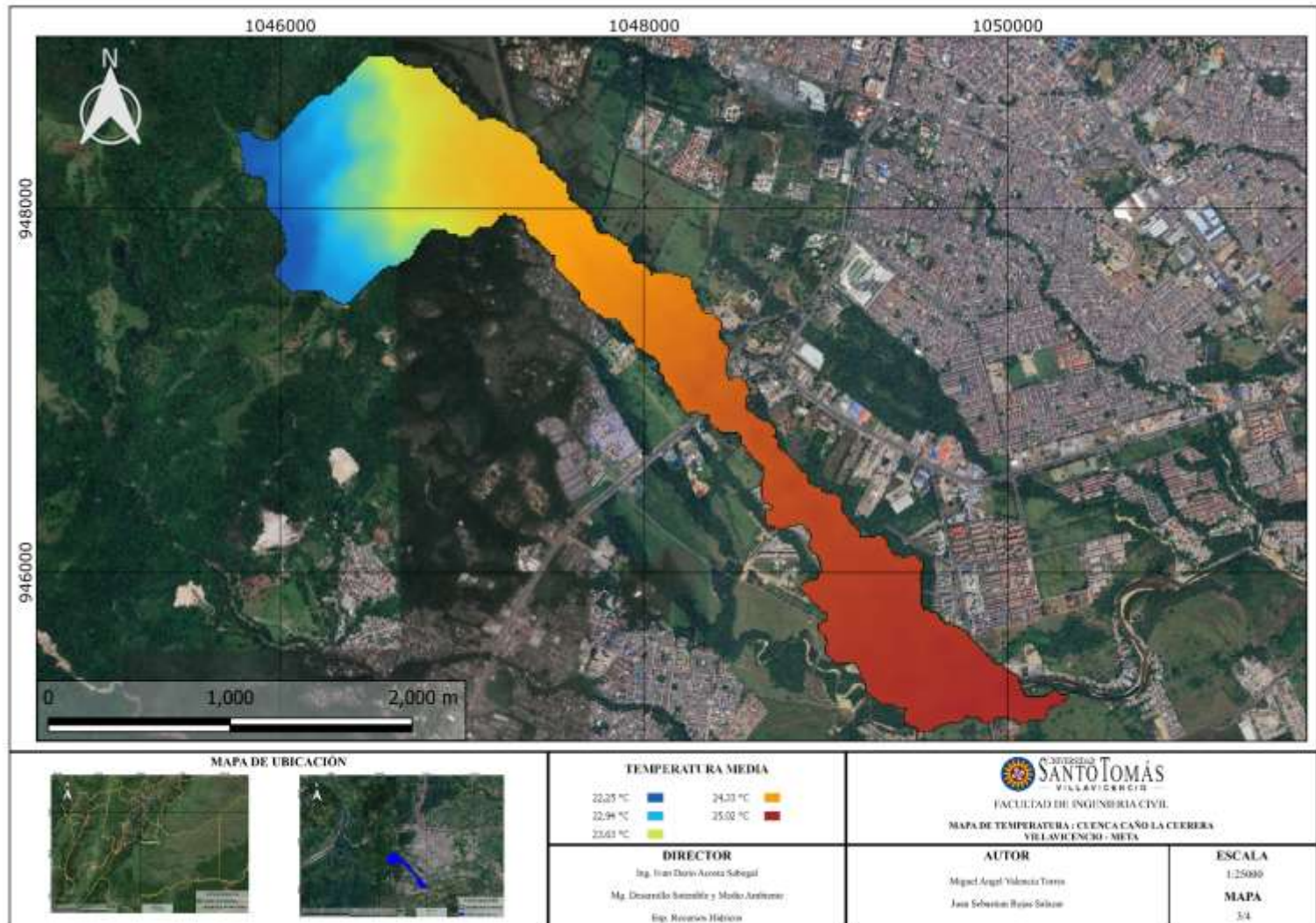
- Mapas de la Cuenca Hidrográfica Caño La Cuerera

Mapa 12. Precipitación Media Anual en la Cuenca Hidrográfica Caño La Cuerera.



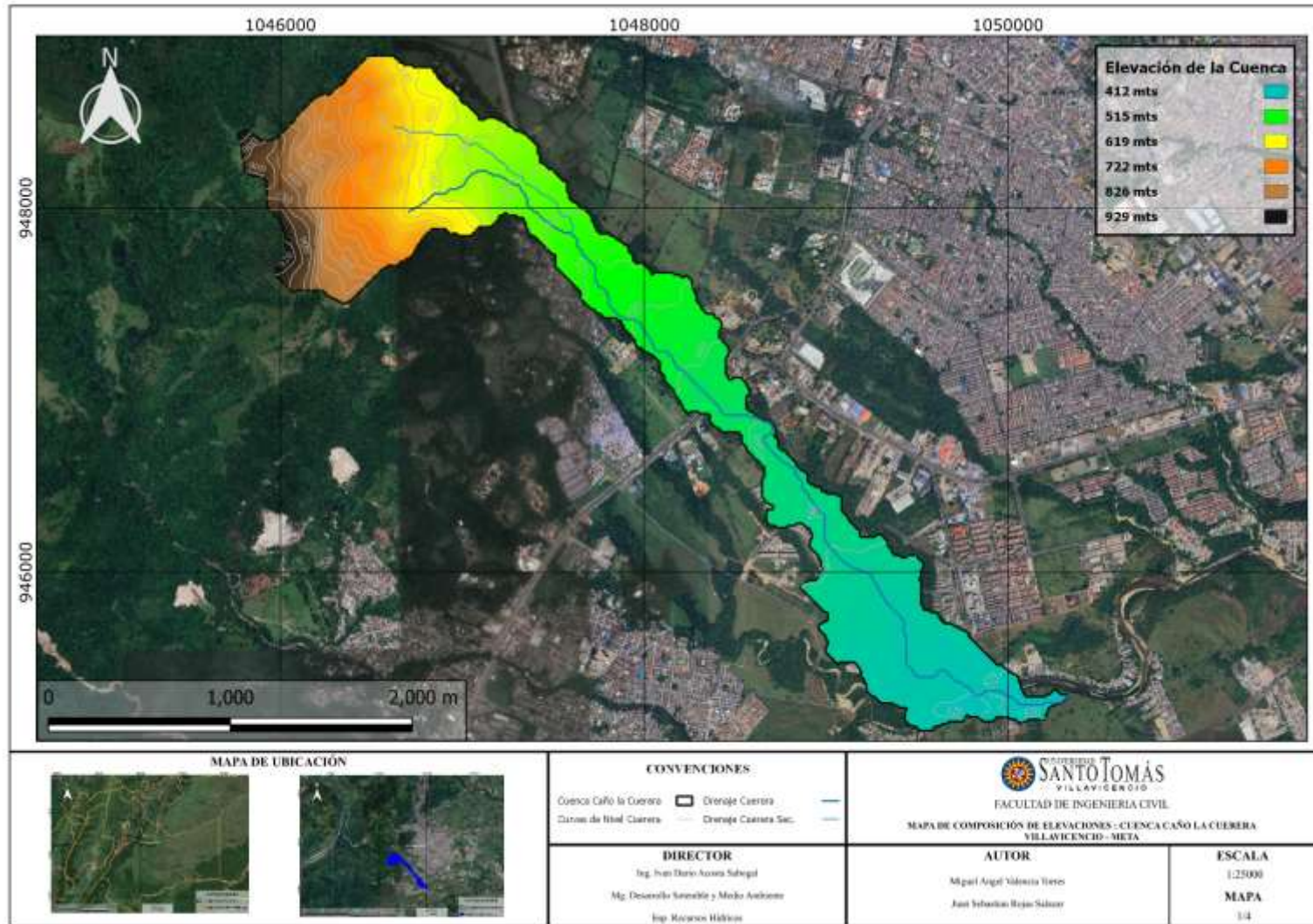
Nota. Mapa de la precipitación media anual que se presenta en el área territorial de la cuenca caño la cuerera en la ciudad de Villavicencio por medio de QGIS.

Mapa 13. Temperatura media anual en la Cuenca Hidrográfica Caño La Cuerera.



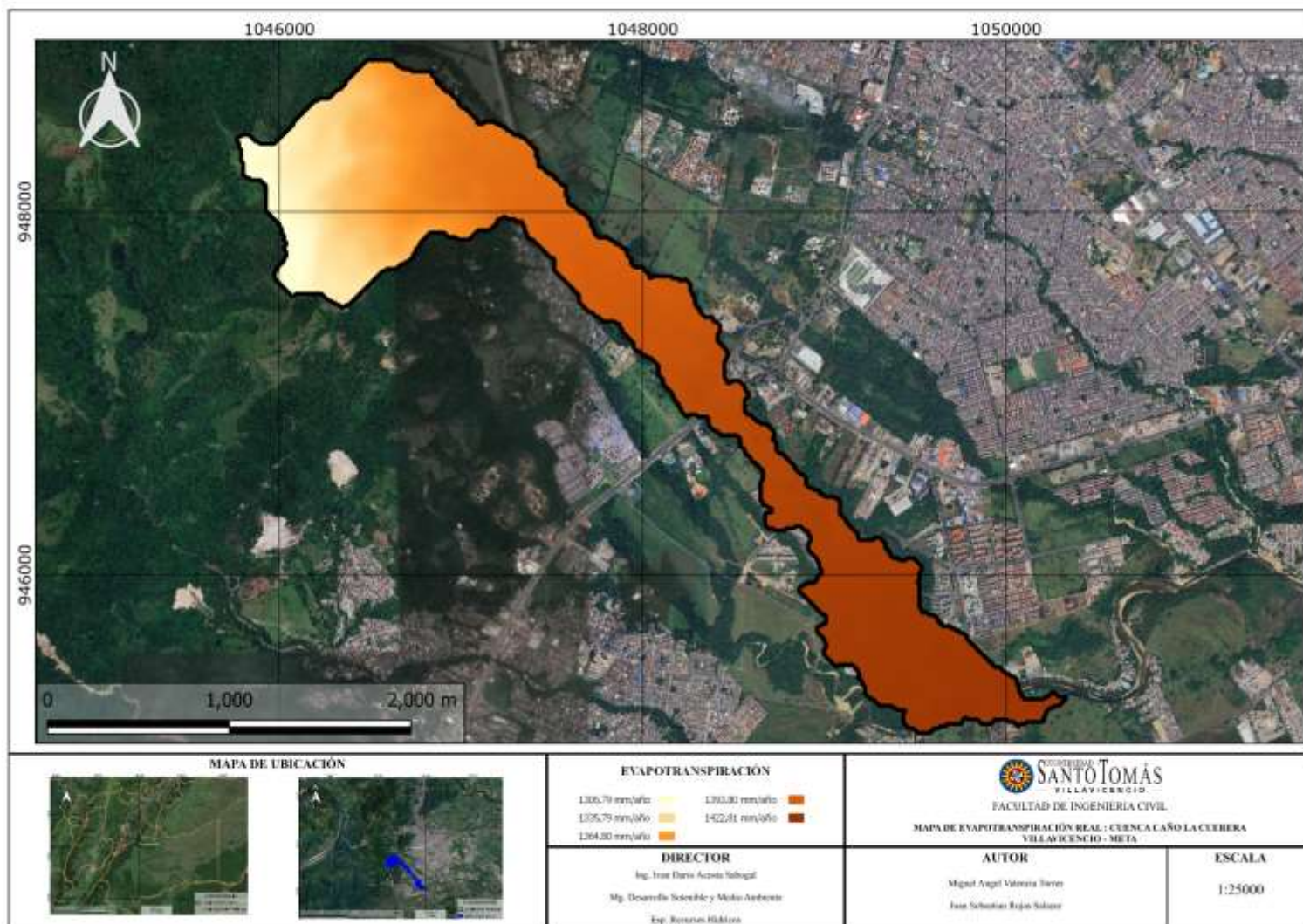
Nota. Mapa de la temperatura media que se presenta en la cuenca caño la cuerera en la ciudad de Villavicencio por medio de QGIS.

Mapa 14. Elevaciones Medias presentadas en el Área Territorial de la Cuenca Hidrográfica Caño La Cuerera.



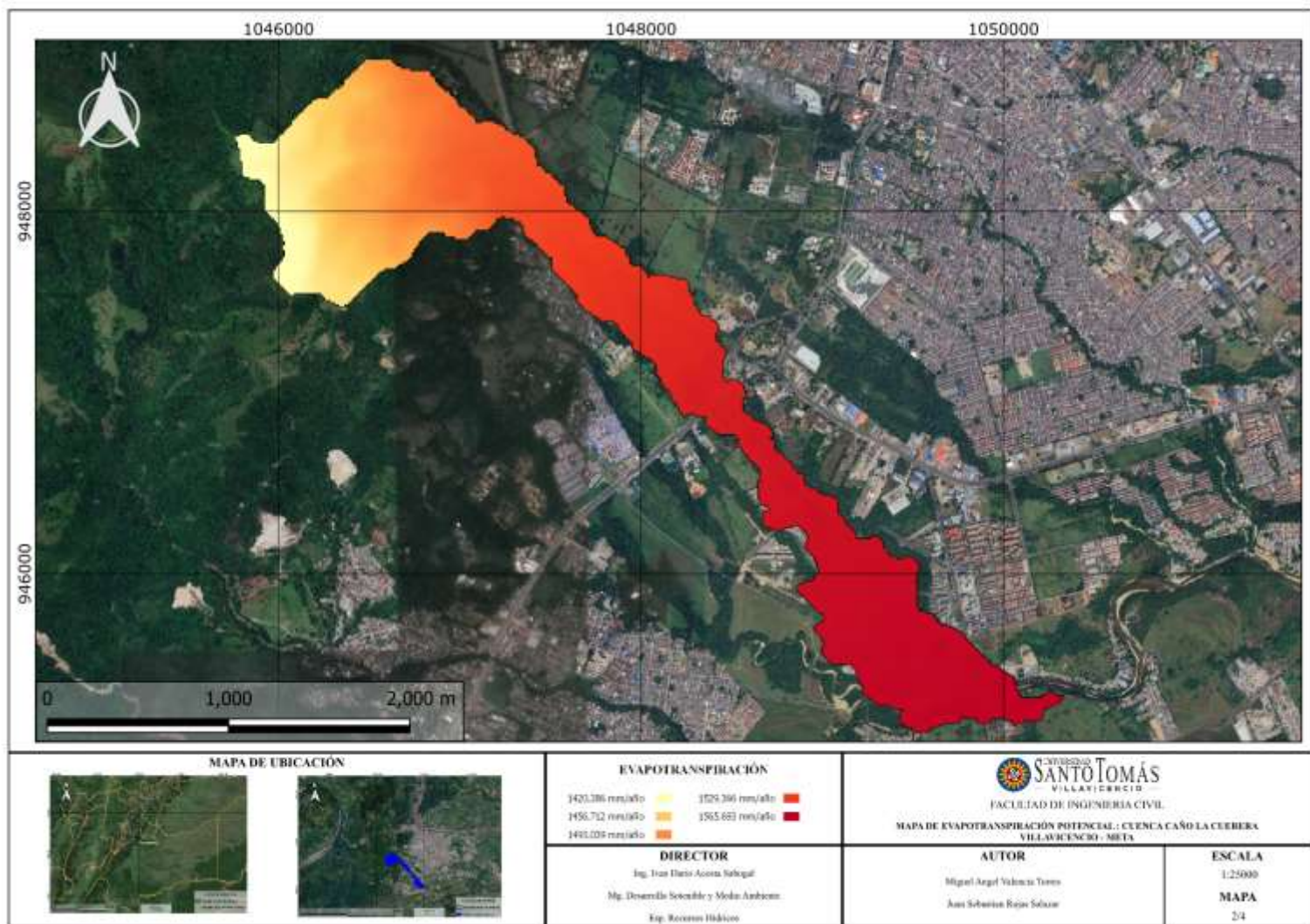
Nota. Mapa de las elevaciones media presentadas dentro del área territorial de la cuenca caño la cuerera en la ciudad de Villavicencio por medio de QGIS.

Mapa 15. Evapotranspiración Real de la Cuenca Hidrográfica Caño La Cuerera.



Nota. Mapa de las elevaciones media presentadas dentro del área territorial de la cuenca caño la cuerera en la ciudad de Villavicencio por medio de QGIS.

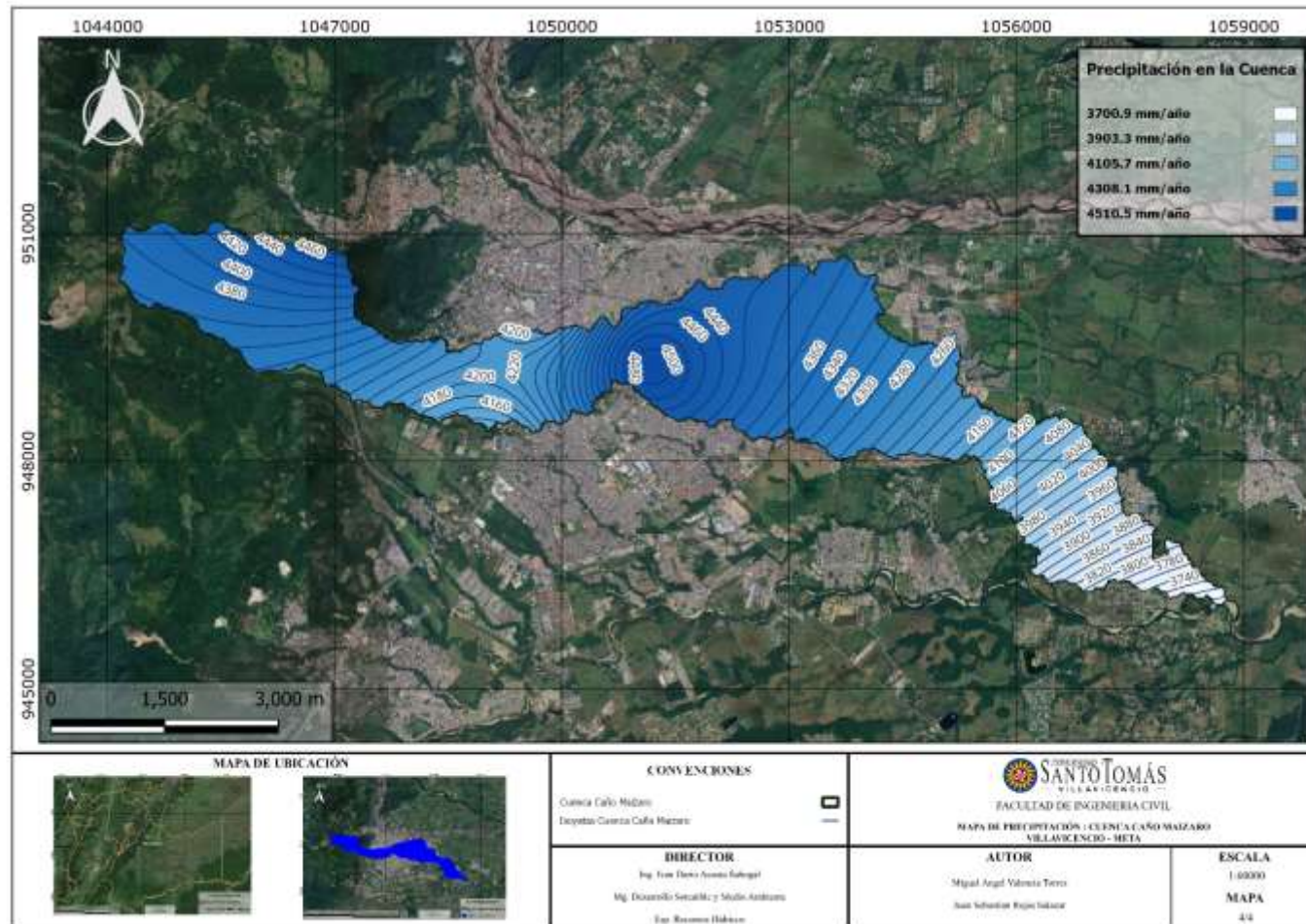
Mapa 16. Evapotranspiración Potencial de la Cuenca Hidrográfica Caño La Cuerera.



Nota. Mapa de las elevaciones media presentadas dentro del área territorial de la cuenca caño la cuerera en la ciudad de Villavicencio por medio de QGIS.

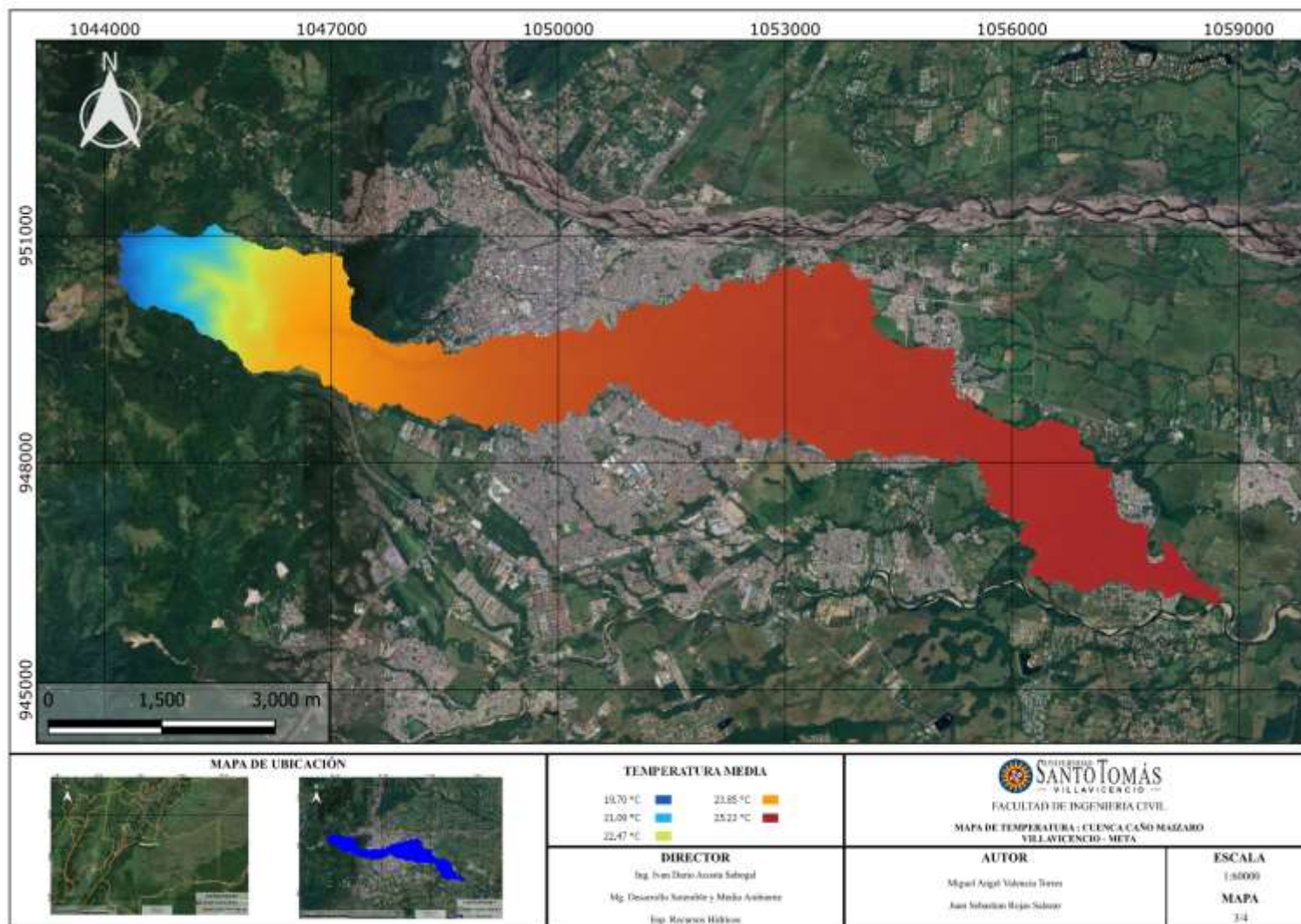
- Mapas de la Cuenca Hidrográfica Caño Maizaro

Mapa 17. Precipitación Media Anual en la Cuenca Hidrográfica Caño Maizaro.



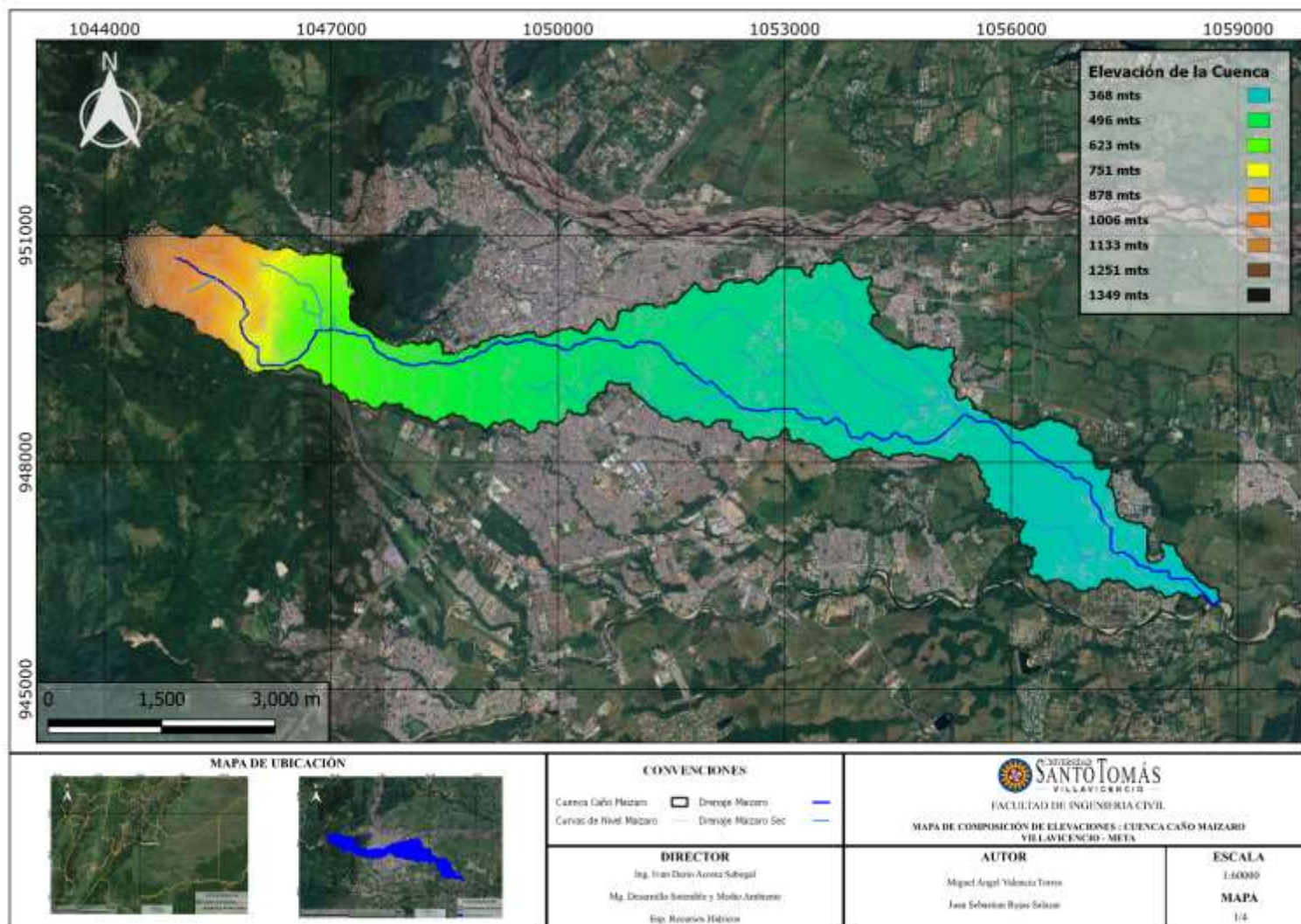
Nota. Mapa de la precipitación media anual que se presenta en el área territorial de la cuenca caño Maizaro en la ciudad de Villavicencio por medio de QGIS.

Mapa 18. Temperatura media anual en la Cuenca Hidrográfica Caño Maizaro.



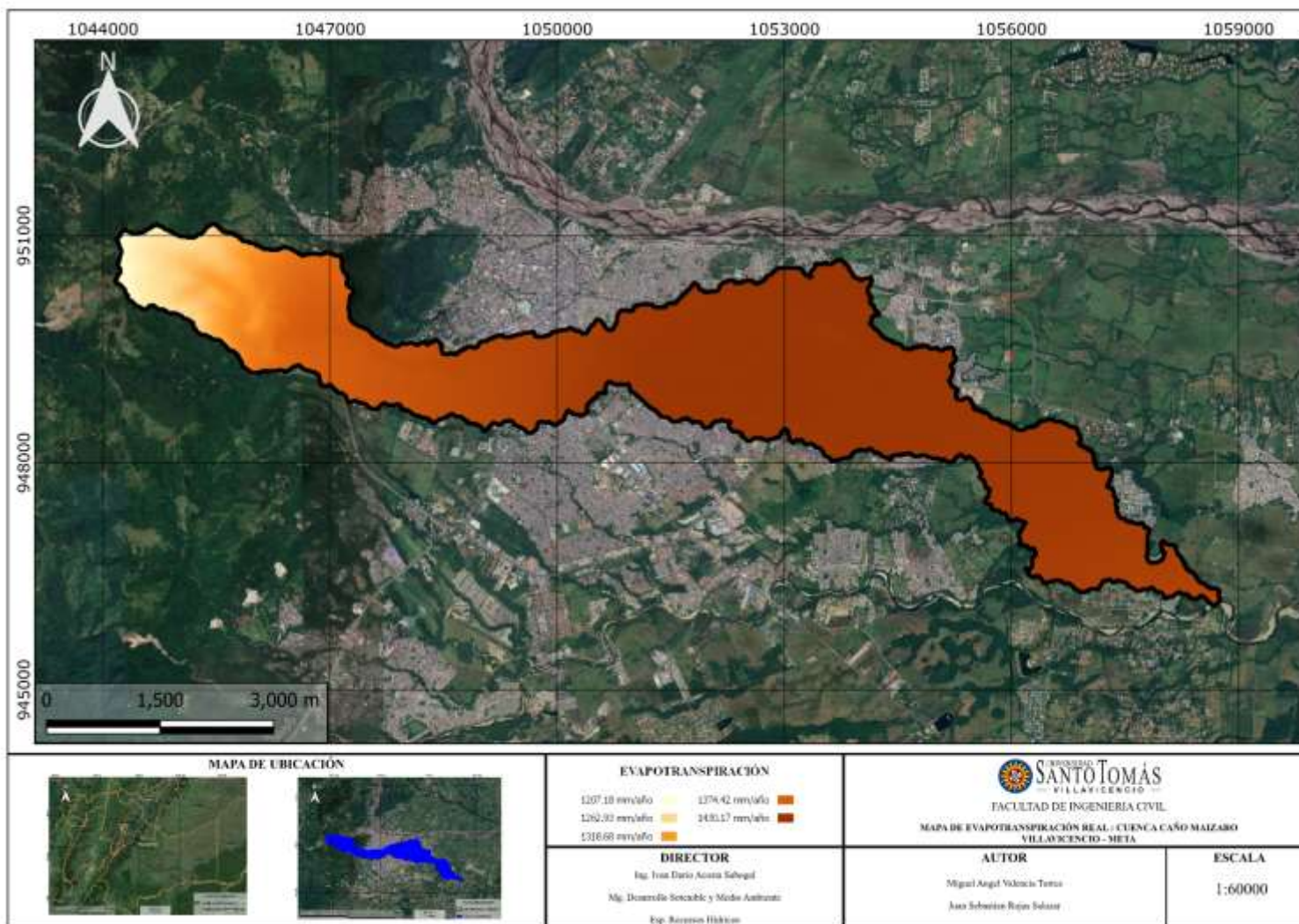
Nota. Mapa de la temperatura media que se presenta en la cuenca caño Maizaro en la ciudad de Villavicencio por medio de QGIS.

Mapa 19. Elevaciones Medias presentadas en el Área Territorial de la Cuenca Hidrográfica Caño Maizaro.



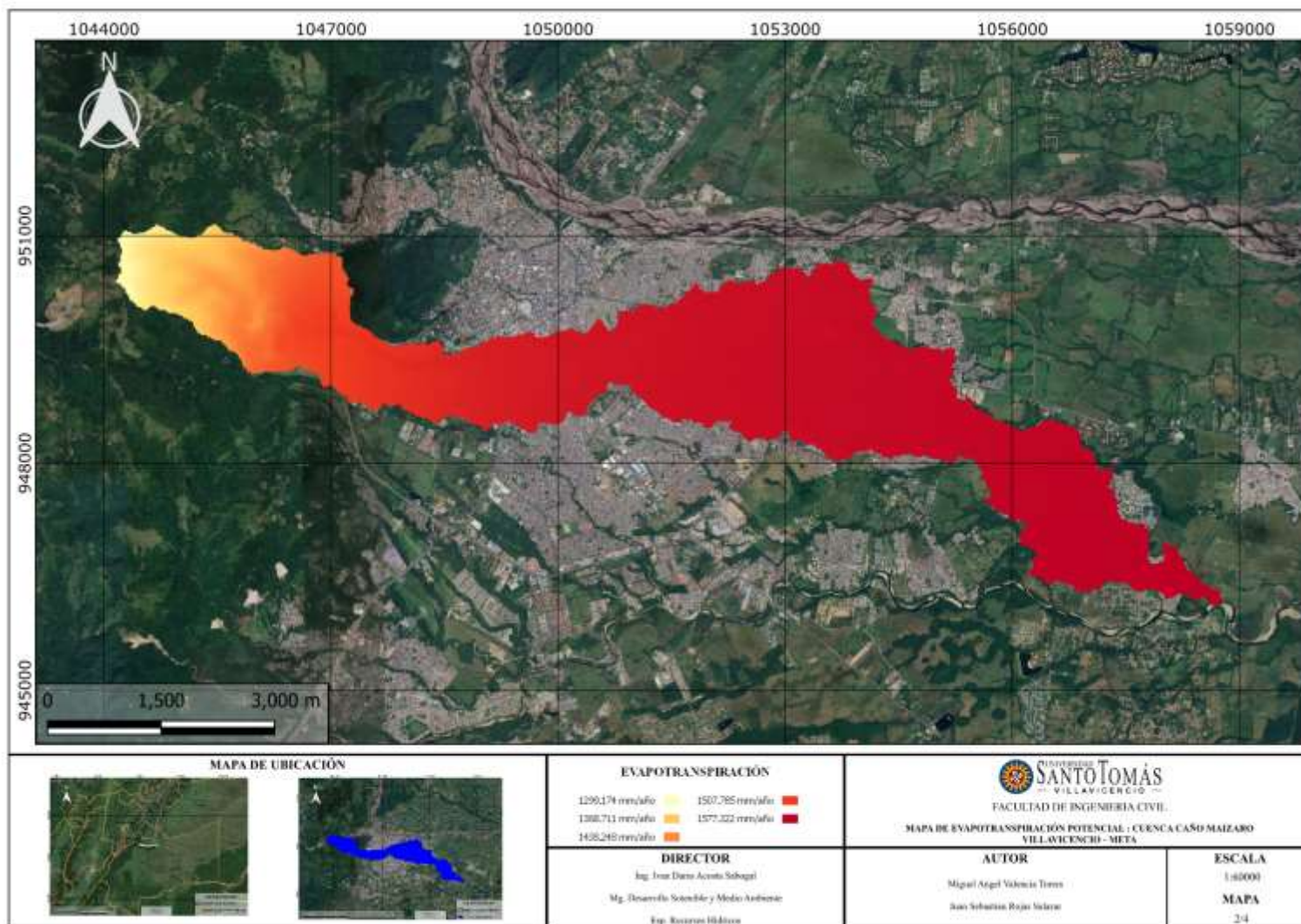
Nota. Mapa de las elevaciones media presentadas dentro del área territorial de la cuenca caño Maizaro en la ciudad de Villavicencio por medio de QGIS.

Mapa 20. Evapotranspiración Real de la Cuenca Hidrográfica Caño Maizaro.



Nota. Mapa de las elevaciones media presentadas dentro del área territorial de la cuenca caño Maizaro en la ciudad de Villavicencio por medio de QGIS.

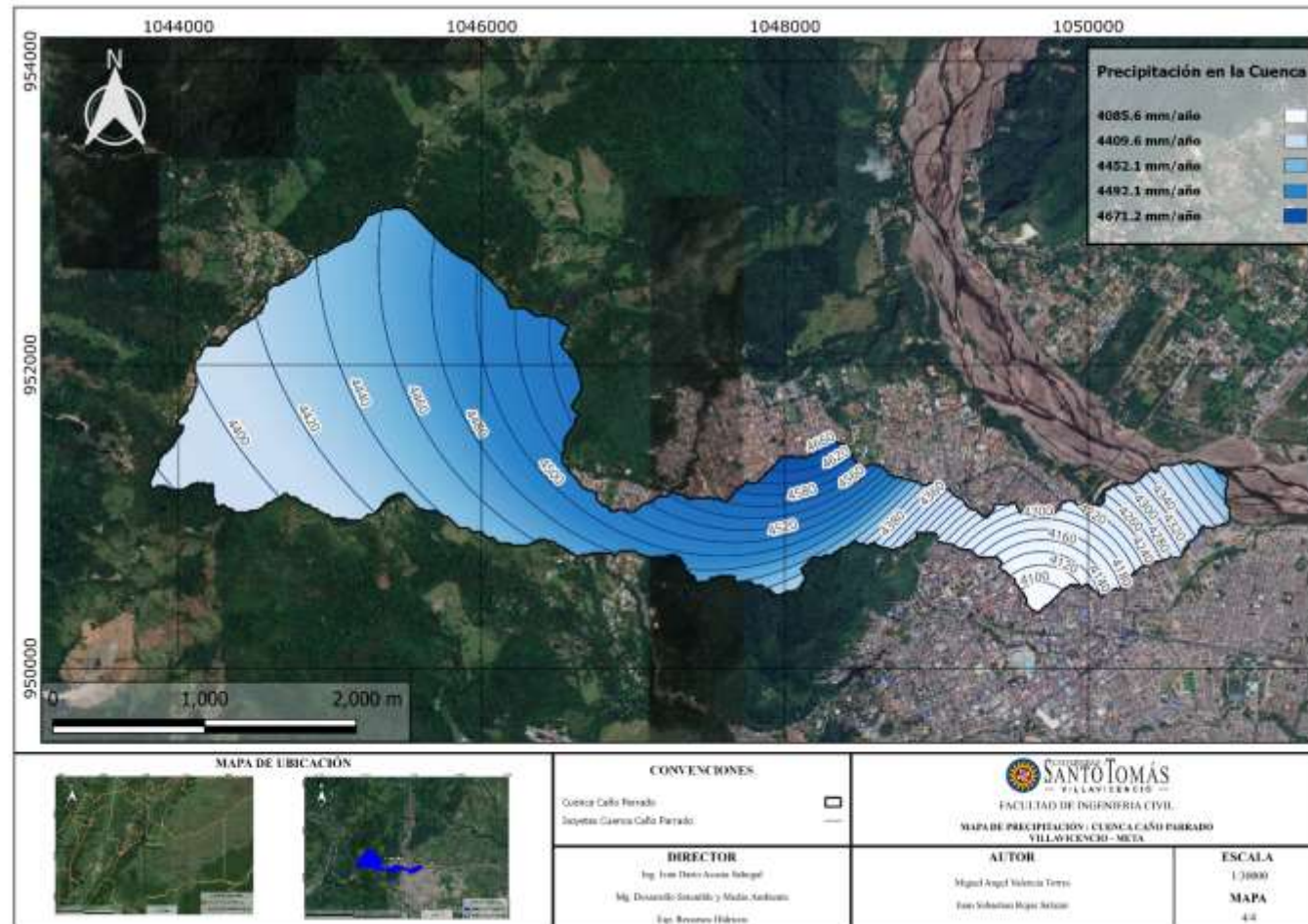
Mapa 21. Evapotranspiración Potencial de la Cuenca Hidrográfica Caño Maizaro.



Nota. Mapa de las elevaciones media presentadas dentro del área territorial de la cuenca caño Maizaro en la ciudad de Villavicencio por medio de QGIS.

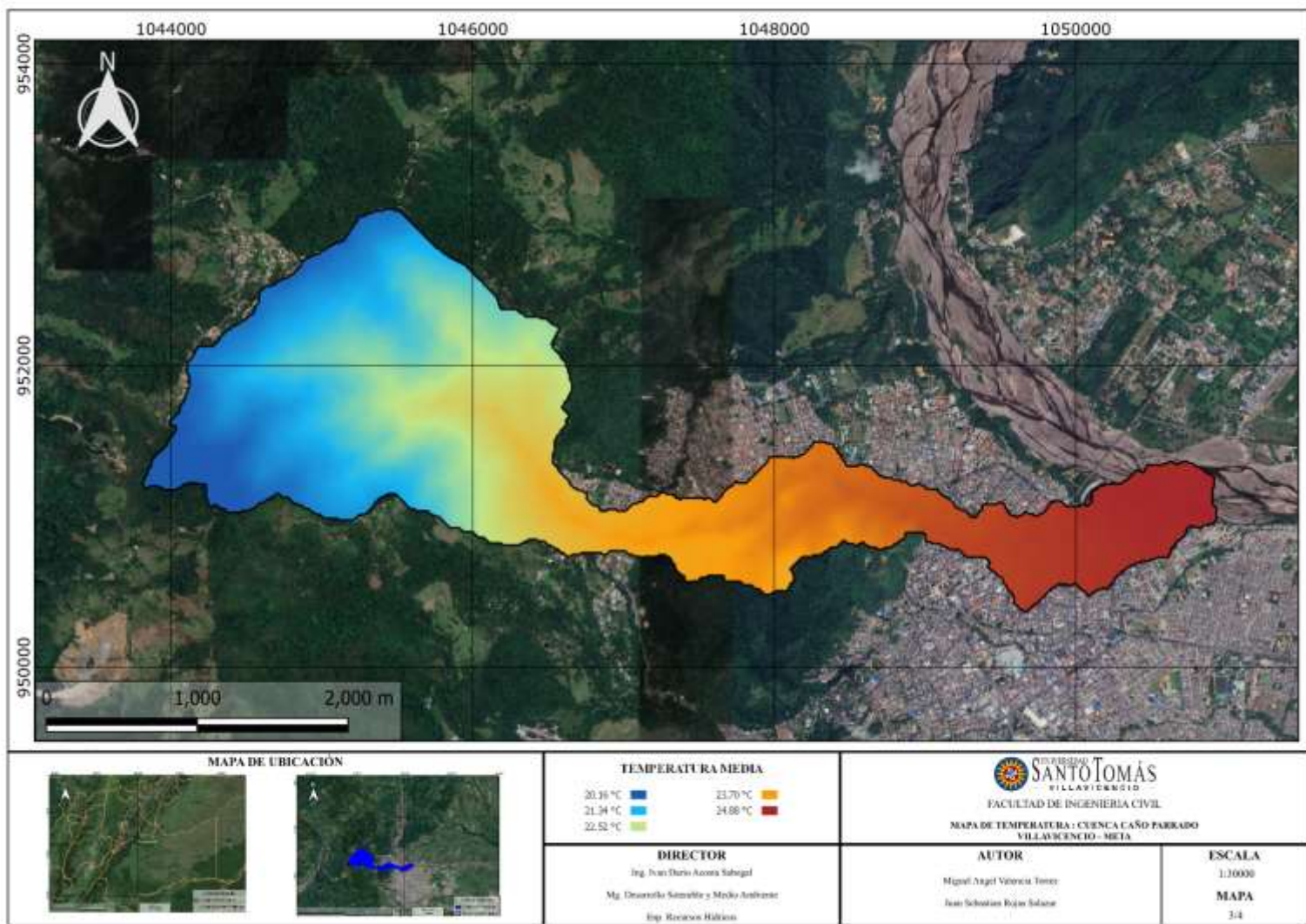
- **Mapas de la Cuenca Hidrográfica Caño Parrado**

*Mapa 22. Precipitación Media Anual en la Cuenca Hidrográfica Caño Parrado.*



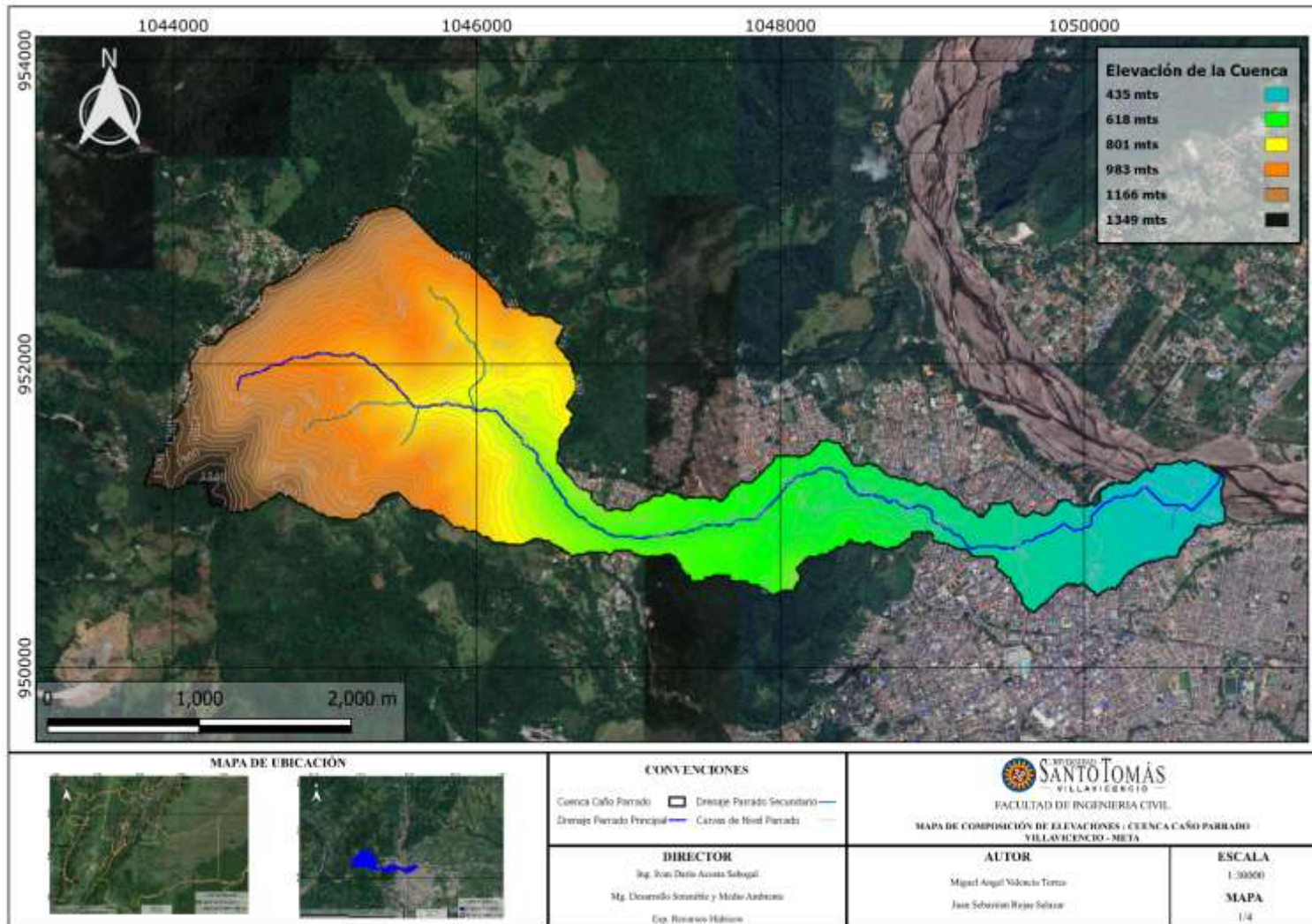
*Nota.* Mapa de la precipitación media anual que se presenta en el área territorial de la cuenca caño parrado en la ciudad de Villavieja por medio de QGIS.

Mapa 23. Temperatura media anual en la Cuenca Hidrográfica Caño Parrado.



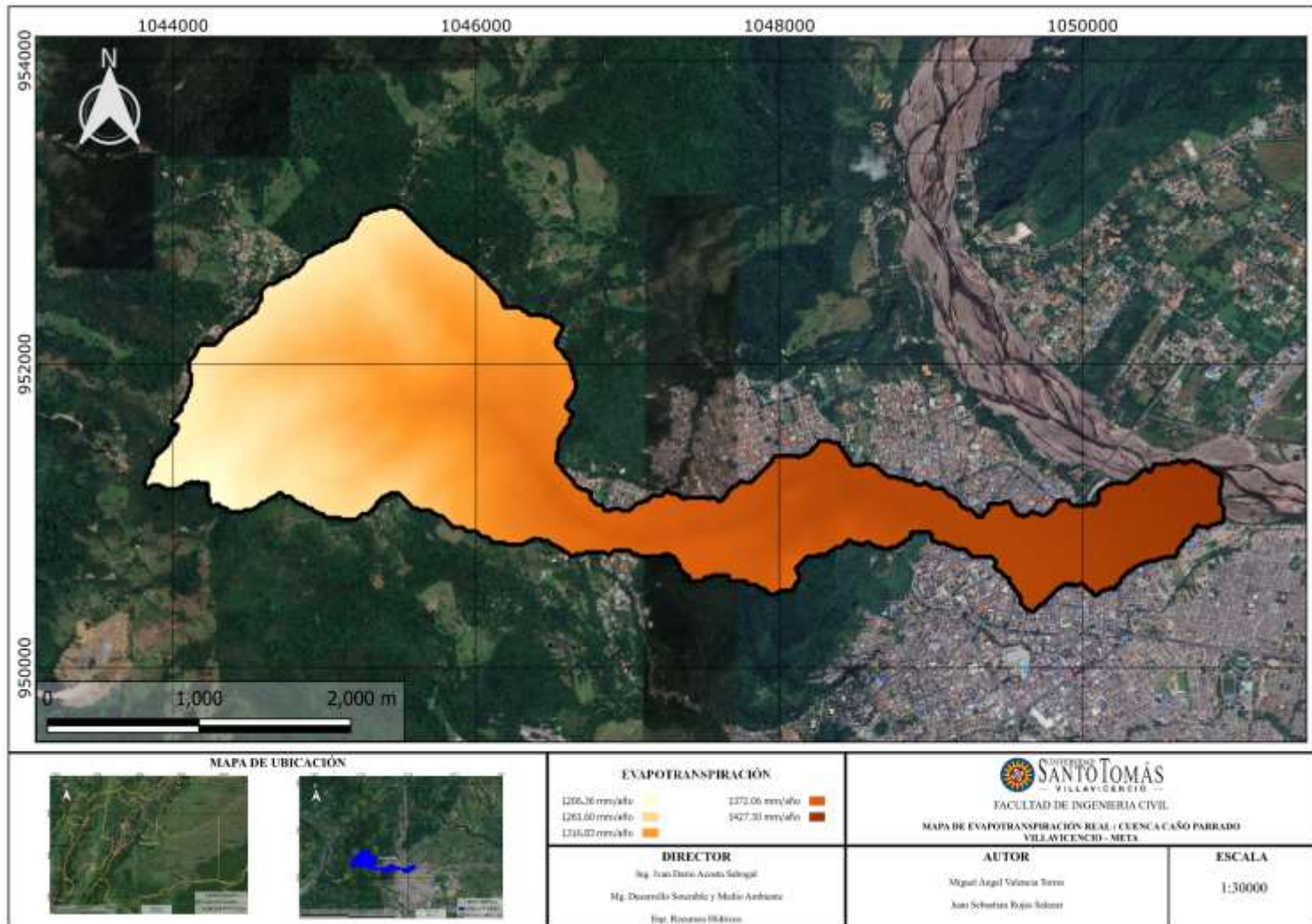
Nota. Mapa de la temperatura media que se presenta en la cuenca caño parrado en la ciudad de Villavicencio por medio de QGIS.

Mapa 24. Elevaciones Medias presentadas en el Área Territorial de la Cuenca Hidrográfica Caño Parrado.



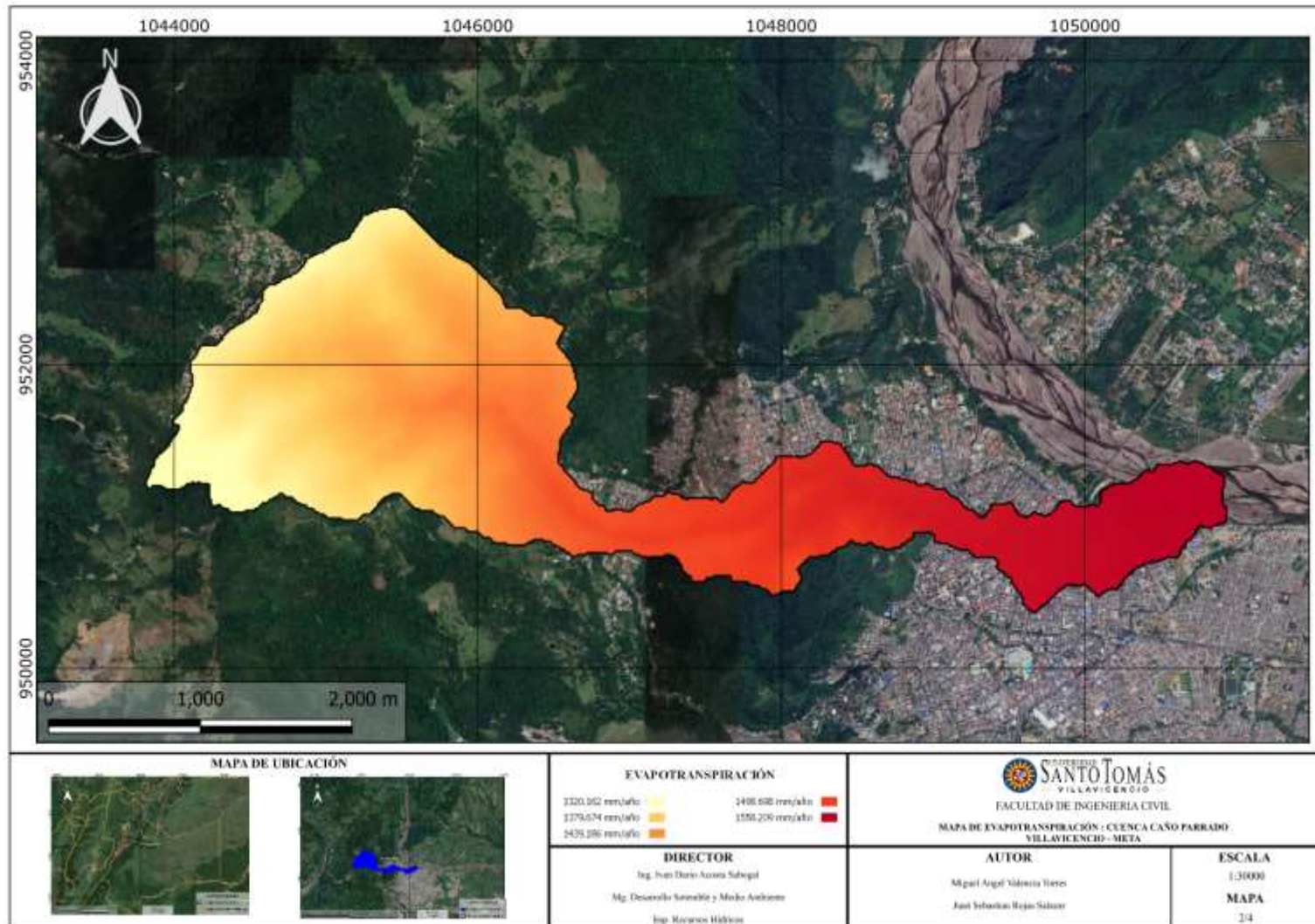
Nota. Mapa de las elevaciones media presentadas dentro del área territorial de la cuenca caño parrado en la ciudad de Villavicencio por medio de QGIS.

Mapa 25. Evapotranspiración Real de la Cuenca Hidrográfica Caño Parrado.



Nota. Mapa de las elevaciones media presentadas dentro del área territorial de la cuenca caño parrado en la ciudad de Villavieja por medio de QGIS.

Mapa 26. Evapotranspiración Potencial de la Cuenca Hidrográfica Caño Parrado.



Nota. Mapa de las elevaciones media presentadas dentro del área territorial de la cuenca caño parrado en la ciudad de Villavicencio por medio de QGIS.