



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 1

Neiva, 11 de septiembre del 2018

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

Los suscritos:

Nicole Castañeda Chavarro, con C.C. No. 1075296269, Melany Lizette Muñoz Plazas, con C.C. No. 1075294516, autores del trabajo de grado titulado Balance hídrico de la cuenca del río del Oro para determinar la recarga del acuífero Gigante medio, presentado y aprobado en el año 2018 como requisito para optar al título de Ingeniero Agrícola; autorizamos al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:  
Nicole Castañeda Chavarro

Firma

EL AUTOR/ESTUDIANTE:  
Melany Lizette Muñoz Plazas

Firma

Vigilada Mineducación



**TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO:** Balance hídrico de la cuenca del río del Oro para determinar la recarga del acuífero Gigante Medio.

**AUTOR O AUTORES:**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Castañeda Chavarro	Nicole
Muñoz Plazas	Melany Lizette

**DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Izquierdo Bautista	Jaime

**ASESOR (ES):**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Torrente Trujillo	Armando
Bedoya Cardoso	Marlio

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE:** Ingeniero Agrícola

**FACULTAD:** Ingeniería

**PROGRAMA O POSGRADO:** Agrícola

**CIUDAD:** Neiva

**AÑO DE PRESENTACIÓN:** 2018

**NÚMERO DE PÁGINAS:** 103

**TIPO DE ILUSTRACIONES** (Marcar con una X):

Diagramas \_\_\_ Fotografías X Grabaciones en discos \_\_\_ Ilustraciones en general \_\_\_ Grabados \_\_\_  
Láminas \_\_\_ Litografías \_\_\_ Mapas X Música impresa \_\_\_ Planos \_\_\_ Retratos \_\_\_ Sin ilustraciones \_\_\_  
Tablas o Cuadros X



DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 3
--------	--------------	---------	---	----------	------	--------	--------

**SOFTWARE** requerido y/o especializado para la lectura del documento: ninguno

**MATERIAL ANEXO:** Mapas detallados de la zona de estudio.

**PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:**

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. Aguas Subterráneas	<i>Groundwater</i>	6. Zonas de recarga	<i>Recharge areas</i>
2. Análisis hidrológico	<i>Hydrological analysis</i>		
3. Infiltración	<i>Infiltration</i>		
4. Escorrentía	<i>Runoff</i>		
5. Evapotranspiración	<i>Evapotranspiration</i>		

**RESUMEN DEL CONTENIDO:** (Máximo 250 palabras)

El río del Oro, que corta la ciudad de Neiva en su parte oriental, posee una cuenca de 70.88 km<sup>2</sup> que se sitúa entre las cuencas del río Las Ceibas y la cuenca del río Frío. En ella, se encuentran importantes quebradas que abastecen y que han sido fuente importante para algunas veredas del municipio. Con base en el análisis hidrológico realizado en la zona de estudio, se evidenció una tendencia de mayor precipitación para las zonas más cercanas a la cordillera oriental, es decir, al este de la cuenca, lo cual implica que ésta sea una zona potencial de recarga del acuífero Gigante, y que, por lo tanto, se le debe dar mayor atención tanto en términos ambientales como en términos organizacionales. Únicamente en el mes de noviembre, la precipitación es tal que se supera el umbral de escorrentía y evapotranspiración, obteniendo recargas potenciales de 0,23x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/año. Se evidenció, además, que la pendiente, los tipos de suelo y la cobertura vegetal presente en la cuenca, son los factores que favorecen la escorrentía y la evapotranspiración; esto significa que se pierde el potencial de recarga del acuífero en gran parte del año, cuando las precipitaciones son bajas. Los resultados obtenidos dejan ver la necesidad de llevar un control y registro estricto de los pozos y los caudales de extracción, que permitan plantear una gestión integral del recurso hídrico subterráneo y desarrollar estrategias que propendan por el uso adecuado del mismo.



**ABSTRACT:** (Máximo 250 palabras)

The Oro river, which cuts the city of Neiva in its eastern part, has a basin of 70.88 km<sup>2</sup> that is situated between the Las Ceibas river basin and the Frio river basin. In her, important streams have been found that have been important water supply source for some paths of the municipality. Based on the hydrological analysis carried out in the study area, a trend of greater precipitation was evidenced for the areas closest to the eastern mountain range, that is, east of the basin, which implies that this is a potential recharge zone of the Gigante aquifer, and that, therefore, the greatest attention must be given to that area both in environmental and organic terms. Only in November month, the precipitation is such that it exceeds the threshold of runoff and evapotranspiration, obtaining potential recharges of 0.23x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> / year. It was also shown that the slope, the types of soil and the vegetation cover present in the basin, are factors that favor runoff and evapotranspiration; this means that it loses the recharge potential of the aquifer during a large part of the year, when rainfall is low. The results obtained leave the need to keep a strict control and record of wells and extraction flows, which allows to propose an integral management of the underground hydric resource and develop strategies that favor the proper use of it.

**APROBACION DE LA TESIS**

Presidente del jurado:

Jaime Izquierdo Bautista

Jurado:

Marlio Bedoya Cardoso

Jurado:

Armando Torrente

BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA DEL RÍO DEL ORO PARA DETERMINAR LA  
RECARGA DEL ACUÍFERO GIGANTE MEDIO

Autores:

NICOLE CASTAÑEDA CHAVARRO

MELANY LIZETTE MUÑOZ PLAZAS



UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA  
NEIVA-HUILA

2018

BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA DEL RÍO DEL ORO PARA DETERMINAR LA  
RECARGA DEL ACUÍFERO GIGANTE MEDIO

Autores:

NICOLE CASTAÑEDA CHAVARRO

MELANY LIZETTE MUÑOZ PLAZAS

Proyecto presentado a la Facultad de Ingeniería como requisito parcial para optar al Título de  
Ingeniero Agrícola

Director

Jaime Izquierdo Bautista

IA. M.Sc. C-P.hD Manejo Cuencas Hidrográficas



UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA  
NEIVA-HUILA  
2018

**Nota de aceptación:**

El trabajo de grado fue aceptado como requisito para optar al título de ingeniero agrícola por el director y los jurados de la tesis



**Presidente del jurado**  
**C-Ph. D. Jaime Izquierdo Bautista**



**Jurado**  
**Ph. D. Armando Torrente Trujillo**



**Jurado**  
**Ph. D. Marlio Bedoya Cardoso**

## **Agradecimientos**

A Dios damos gracias por habernos permitido iniciar, desarrollar y terminar este trabajo que con esfuerzo y dedicación llevamos a cabo. De la misma manera queremos agradecer a nuestro director Jaime Izquierdo, quien nos acompañó y dirigió en el transcurso del proyecto. También a nuestras familias por brindarnos apoyo incondicional, el cual fue vital para vencer cada uno de los diferentes obstáculos que se presentaron. Por último a nuestro gran amigo Jesús Coqueco quien nos guió, apoyó y estuvo brindándonos durante todo el desarrollo del trabajo sus conocimientos en las diferentes áreas, su compañía y motivación para poder culminar con éxito este trabajo.

## Tabla de contenido

<b>1. Introducción .....</b>	<b>11</b>
<b>1.1 Planteamiento del problema.....</b>	<b>11</b>
<b>1.2 Objetivos .....</b>	<b>12</b>
<b>2. Marco Teórico .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 Delimitación del área de estudio .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2 Características morfométricas.....</b>	<b>13</b>
<b>2.3 Identificación de las zonas de recarga .....</b>	<b>15</b>
2.3.1 Evaluación geológica.....	16
2.3.2 Sondeos eléctricos verticales (SEV) .....	16
<b>2.4 Características hidráulicas de los acuíferos .....</b>	<b>17</b>
2.4.1 Transmisividad .....	17
2.4.2 Conductividad hidráulica .....	18
2.4.3 Coeficiente de almacenamiento .....	19
2.4.4 Tipos de acuíferos.....	19
2.4.4.1 Acuíferos libres .....	19
2.4.4.2 Acuíferos confinados.....	20
2.4.4.3 Acuíferos semiconfinados .....	20
<b>2.5 Balance hídrico .....</b>	<b>21</b>
2.5.1 Precipitación .....	21
2.5.1.1 Análisis exploratorio de datos.....	22
2.5.1.2 Completamiento de datos faltantes .....	23
2.5.1.3 Precipitación media de la cuenca .....	24
2.5.2 Evapotranspiración .....	26
2.5.2.1 Evapotranspiración potencial .....	26
2.5.2.2 Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar ETC .....	31
2.5.3 Escorrentía.....	31
2.5.3.1 Tipo de suelo .....	32
2.5.3.2 Tipo de cobertura vegetal o uso del suelo .....	33
2.5.3.3 Tratamiento o forma de explotación .....	33
2.5.3.4 Condición hidrológica.....	34
2.5.3.5 Condición inicial de humedad del suelo.....	34
2.5.4 Infiltración.....	37
<b>2.6 Estimación de la recarga .....</b>	<b>37</b>
<b>3. Materiales y Métodos.....</b>	<b>39</b>
<b>3.1 Determinación de las zonas de recarga: .....</b>	<b>39</b>
<b>3.2 Selección y análisis de la información meteorológica: .....</b>	<b>39</b>
<b>3.3 Calculo de la precipitación media:.....</b>	<b>39</b>
<b>3.4 Estimación de la evapotranspiración:.....</b>	<b>39</b>

3.5 Estimación de la escorrentía: .....	40
3.6 Construcción del balance hídrico: .....	40
3.7 Estimación de la recarga de la formación Gigante Medio: .....	40
<b>4. Resultados y discusión .....</b>	<b>41</b>
4.1 Características morfométricas de la cuenca río del Oro.....	41
4.2 Identificación de las zonas de recarga .....	44
4.2.1 Geología de la cuenca río del Oro.....	44
3.2.2 Sondeos Eléctricos Verticales.....	46
4.2.1.1 Unidad cuaternaria (Q) .....	46
4.2.1.2 Formación Gigante Medio (NgQgm) .....	47
4.3 Características hidráulicas de los acuíferos .....	47
4.3.1 Acuífero cuaternario .....	48
4.3.2 Acuífero Gigante Medio.....	48
4.4 Balance hídrico .....	48
4.4.1 Precipitación .....	48
4.4.1.1 Análisis exploratorio .....	49
4.4.1.2 Histogramas .....	52
4.4.1.3 Precipitación media de la cuenca .....	55
4.4.2 Evapotranspiración .....	64
4.4.3 Escorrentía .....	67
4.4.3.1 Tipo de suelos .....	67
4.4.3.2 Tipo de cobertura vegetal .....	69
4.4.3.3 Escorrentía de la cuenca del río del Oro .....	69
4.4.3.4 Escorrentía de la formación Gigante Medio .....	70
4.4.4 Infiltración.....	72
4.5 Estimación de la recarga .....	73
<b>5. Conclusiones.....</b>	<b>77</b>
<b>6. Prospectivas de la investigación.....</b>	<b>78</b>
<b>Referencias bibliográficas.....</b>	<b>79</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>83</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características morfométricas de una cuenca .....	13
Tabla 2. Clasificación de unidades hidrográficas en función del área geométrica .....	14
Tabla 3. Clasificación de cuenca de la FAO en función del índice de compacidad .....	14
Tabla 4. Clasificación de las rocas en términos de sus transmisividad .....	17
Tabla 5. Valores típicos de conductividad de algunos tipos de roca .....	18
Tabla 6. Radiación extraterrestre tomada en la parte superior de la atmosfera (cal/m <sup>2</sup> día) .....	27
Tabla 7. Factores de corrección K <sub>i</sub> para la fórmula de Thorthwaite y Wilm .....	29
Tabla 8. Coeficientes del tanque evaporímetro (K <sub>p</sub> ) para el tanque Clase A.....	30
Tabla 9. Grupo hidrológico de suelos .....	33
Tabla 10. Números de la curva de escorrentía para áreas urbanas .....	34
Tabla 11. Números de la curva de escorrentía para tierras agrícolas.....	35
Tabla 12. Puntos visitados en campo de la cuenca río del Oro.....	45
Tabla 13. Estaciones del IDEAM seleccionadas para el estudio.....	49
Tabla 14. Porcentaje de datos faltantes de las estaciones seleccionadas (1987-2016) .....	50
Tabla 15. Precipitación media mensual .....	56
Tabla 16. Escala de colores para los rangos de precipitación (mm) presentes en las isoyetas .....	57
Tabla 17. Evapotranspiración calculada para las estaciones Aeropuerto y Juncal. ....	64
Tabla 18. ETo media por método del tanque evaporímetro Cuenca río del Oro.....	65
Tabla 19. Kc ponderados de la cuenca río del Oro y de la formación Gigante medio. ....	66
Tabla 20. Evapotranspiración real determinada para la cuenca río del Oro y formación Gigante medio.....	67
Tabla 21. Curva número II de la cuenca del río del Oro.....	70
Tabla 22. Escorrentía de la cuenca del río del Oro .....	70
Tabla 23. Curva número II de la formación Gigante Medio.....	71
Tabla 24. Escorrentía de la formación Gigante Medio .....	71
Tabla 25. Balance hídrico. ....	73
Tabla 26. Humedad aprovechable según la textura del suelo.....	75
Tabla 27. Porcentaje de humedad por volumen aprovechable de las plantas .....	75
Tabla 28. Recarga del acuífero Gigante Medio en m <sup>3</sup> /año. ....	76

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de Caja y Bigotes .....	23
Figura 2. Delimitación de la cuenca del río del Oro .....	41
Figura 3. Perfil Longitudinal del Cauce Principal .....	42
Figura 4. Curva Hipsométrica.....	43
Figura 5. Mapa de pendientes de la cuenca río del Oro.....	43
Figura 6. Mapa geológico de la cuenca río del Oro a escala 1:25.000 .....	44
Figura 7. Perfil representativo de la cuenca río del Oro a partir de SEV. ....	46
Figura 8. Mapa de ubicación de las estaciones climatológicas.....	50
Figura 9. Box-plots para los datos de precipitación de las estaciones seleccionadas .....	51
Figura 10. Histograma de precipitación media mensual multianual para la estación sinóptica secundaria Apto Benito Salas, periodo 1987-2016.....	52
Figura 11. Histograma de precipitación media mensual multianual para la estación climatológica ordinaria Juncal, periodo 1987-2016. ....	53
Figura 12. Histograma de precipitación media mensual multianual para la estación pluviográfica la Girona, periodo 1987-2016. ....	53
Figura 13. Histograma de precipitación media mensual multianual para la estación pluviométrica el Guadual, periodo 1987-2016.....	54
Figura 14. Histograma de precipitación media mensual multianual para la estación pluviométrica Hato Bogotá, periodo 1987-2016.....	54
Figura 15. Histograma de precipitación media mensual multianual para la estación pluviométrica Hato Milagro, periodo 1987-2016. ....	55
Figura 16. Histograma de precipitación media mensual multianual para la estación pluviográfica Sta. Helena, periodo 1987-2016.....	55
Figura 17. Mapa de isoyetas del mes de enero de la cuenca río del oro.....	58
Figura 18. Mapa de isoyetas del mes de febrero de la cuenca río del oro. ....	58
Figura 19. Mapa de isoyetas del mes de marzo de la cuenca río del oro.....	59
Figura 20. Mapa de isoyetas del mes de abril de la cuenca río del oro. ....	59
Figura 21. Mapa de isoyetas del mes de mayo de la cuenca río del oro.....	60
Figura 22. Mapa de isoyetas del mes de junio de la cuenca río del oro.....	60
Figura 23. Mapa de isoyetas del mes de julio de la cuenca río del oro. ....	61
Figura 24. Mapa de isoyetas del mes de agosto de la cuenca río del oro. ....	61
Figura 25. Mapa de isoyetas del mes de septiembre de la cuenca río del oro. ....	62
Figura 26. Mapa de isoyetas del mes de octubre de la cuenca río del oro.....	62
Figura 27. Mapa de isoyetas del mes de noviembre de la cuenca río del oro.....	63
Figura 28. Mapa de isoyetas del mes de diciembre de la cuenca río del oro.....	63
Figura 29. Mapa de cobertura vegetal de la cuenca río del Oro a escala 1:25.000.....	65
Figura 30. Mapa de suelos de la cuenca río Oro según su geomorfología y edafología. ....	68
Figura 31. Mapa de suelos de la cuenca río del Oro según el grupo hidrológico. ....	69
Figura 32. Curva de retención de humedad de un suelo arenoso limo .....	74
Figura 33. Curva de retención de humedad de un suelo franco arcillo arenoso. ....	74

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Coeficiente de Sinuosidad.....	13
Ecuación 2. Ancho medio de la Cuenca .....	14
Ecuación 3. Coeficiente de forma.....	14
Ecuación 4. Coeficiente de compacidad .....	14
Ecuación 5. Altura media de la cuenca.....	15
Ecuación 6. Ecuación de transmisividad .....	17
Ecuación 7. Ecuación de la conductividad hidráulica .....	18
Ecuación 8. Balance hídrico .....	21
Ecuación 9. Balance hídrico 2. ....	21
Ecuación 10. Valor del campo de interpolación .....	24
Ecuación 11. Valor de los pesos .....	24
Ecuación 12. Factor de normalización.....	24
Ecuación 13. Precipitación media ponderada por método de los polígonos de Thiessen.....	25
Ecuación 14. Precipitación media ponderada por método de isoyetas. ....	25
Ecuación 15. Evapotranspiración potencial mensual por el método de Christiansen.....	27
Ecuación 16. Radiación solar.....	27
Ecuación 17. Coeficiente de viento .....	28
Ecuación 18. Coeficiente de humedad relativa.....	28
Ecuación 19. Coeficiente de temperatura. ....	28
Ecuación 20. Coeficiente de brillo solar.....	28
Ecuación 21. Insolación.....	28
Ecuación 22. Coeficiente de elevación.....	28
Ecuación 23. Evapotranspiración Potencial mensual por el método de Thornthwaite.....	29
Ecuación 24. Índice de calor anual. ....	29
Ecuación 25. Índice de calor mensual.....	29
Ecuación 26. Exponente a.....	30
Ecuación 27. Evapotranspiración potencial por el método de tanque evaporímetro.....	30
Ecuación 28. Evapotranspiración del cultivo.....	31
Ecuación 29. Escurrimiento directo.....	32
Ecuación 30. Potencial máximo de retención.....	32

## **Resumen**

El río del Oro, que corta la ciudad de Neiva en su parte oriental, posee una cuenca de 70.88 km<sup>2</sup> que se sitúa entre las cuencas del río Las Ceibas y la cuenca del río Frío. En ella, se encuentran importantes quebradas que abastecen y que han sido fuente importante para algunas veredas del municipio. Con base en el análisis hidrológico realizado en la zona de estudio, se evidenció una tendencia de mayor precipitación para las zonas más cercanas a la cordillera oriental, es decir, al este de la cuenca, lo cual implica que ésta sea una zona potencial de recarga del acuífero Gigante, y que, por lo tanto, se le debe dar mayor atención tanto en términos ambientales como en términos organizacionales. Únicamente en el mes de noviembre, la precipitación es tal que se supera el umbral de escorrentía y evapotranspiración, obteniendo recargas potenciales de  $0,23 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/año. Se evidenció, además, que la pendiente, los tipos de suelo y la cobertura vegetal presente en la cuenca, son los factores que favorecen la escorrentía y la evapotranspiración; esto significa que se pierde el potencial de recarga del acuífero en gran parte del año, cuando las precipitaciones son bajas. Los resultados obtenidos dejan ver la necesidad de llevar un control y registro estricto de los pozos y los caudales de extracción, que permitan plantear una gestión integral del recurso hídrico subterráneo y desarrollar estrategias que propendan por el uso adecuado del mismo.

## **Abstract**

The Oro river, which cuts the city of Neiva in its eastern part, has a basin of 70.88 km<sup>2</sup> that is situated between the Las Ceibas river basin and the Frio river basin. In her, important streams have been found that have been important water supply source for some paths of the municipality. Based on the hydrological analysis carried out in the study area, a trend of greater precipitation was evidenced for the areas closest to the eastern mountain range, that is, east of the basin, which implies that this is a potential recharge zone of the Gigante aquifer, and that, therefore, the greatest attention must be given to that area both in environmental and organic terms. Only in November month, the precipitation is such that it exceeds the threshold of runoff and evapotranspiration, obtaining potential recharges of  $0.23 \times 10^6$  m<sup>3</sup> / year. It was also shown that the slope, the types of soil and the vegetation cover present in the basin, are factors that favor runoff and evapotranspiration; this means that it loses the recharge potential of the aquifer during a large part of the year, when rainfall is low. The results obtained leave the need to keep a strict control and record of wells and extraction flows, which allows to propose an integral management of the underground hydric resource and develop strategies that favor the proper use of it.

## **1. Introducción**

El recurso hídrico es un elemento clave para el funcionamiento de los ecosistemas naturales y su biodiversidad; así mismo, de este depende la calidad de los bienes y servicios ambientales que sostienen a la sociedad en general. Es evidente que el agua superficial es cada vez más escasa, debido a problemas como el crecimiento de la población, la contaminación de los cuerpos de agua por descargas sin tratamiento, las captaciones ilegales y el cambio climático; la inminente escasez de agua superficial obligará a todas las industrias a buscar una fuente de agua diferente que abastezca las necesidades de los distintos sectores productivos, entre ellos el sector agrícola.

Con el ánimo de encontrar una solución a la problemática anterior, se buscaron respuestas en la hidrología, que es la ciencia que estudia la dinámica del agua. Un ítem importante en la hidrología es el estudio de las aguas subterráneas, que constituyen la mayor reserva de agua potable alrededor del mundo (representan más del 95% del total de las aguas dulces a nivel mundial) (Vélez Otálvaro, et al., 2014). Estas aguas presentan una “menor susceptibilidad a procesos de contaminación y degradación en comparación con las fuentes superficiales. De ahí la importancia de conocer su ocurrencia, distribución y principales características hidráulicas e hidrológicas para una gestión adecuada y sostenible del recurso” (IDEAM, 2014).

La principal herramienta que se utilizó para el desarrollo del presente documento es el balance hídrico, el cual permite cuantificar el recurso hídrico en sus diferentes fases y en sus distintas escalas espaciales y temporales (Malcolm G & McDonnell 2007). Aquí, se resume el comportamiento hidrológico de una de las cuencas más influyentes en la ciudad de Neiva, la cuenca hidrográfica del río del Oro, y se presenta además una estimación de la recarga hídrica del acuífero Gigante Medio, cuya importancia está siendo cada vez más significativa.

### **1.1 Planteamiento del problema**

El uso del agua en el departamento del Huila ha tenido como prioridad la demanda del consumo humano, que se concentra en las cabeceras municipales y en las áreas urbanas, y posteriormente se ha enfocado en el suministro de agua para riego de los cultivos (CAM, 2014). La gestión, el aprovechamiento y, especialmente, la toma de decisiones en la distribución del recurso hídrico, es indispensable si se quieren cubrir estas necesidades.

Además de que la disponibilidad del agua superficial es cada vez menor, se ha hecho más frecuente el uso inadecuado del recurso hídrico superficial debido a la captación excesiva y derivaciones no autorizadas; esto implica una drástica disminución de la capacidad hídrica de la región en un futuro cercano. Si no se soluciona el problema de escasez, la consecuencia será la afectación de los procesos productivos y la viabilidad de los cultivos actuales, con incidencias graves para la

seguridad alimentaria, la salud pública y la sostenibilidad de los asentamientos humanos en pueblos y ciudades (CAM, 2014).

A raíz de la problemática mencionada, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es la recarga neta del acuífero Gigante Medio presente en la cuenca río del Oro?

## **1.2 Objetivos**

Realizar el balance hídrico de la cuenca del río del Oro en el municipio de Neiva-Huila y estimar la recarga potencial del acuífero Gigante Medio en la zona de estudio. Para darle cumplimiento a estos objetivos, es necesario llevar a cabo las siguientes tareas específicas:

- Estimar la precipitación media, evapotranspiración, escorrentía e infiltración de la cuenca del río del Oro.

## 2. Marco Teórico

### 2.1 Delimitación del área de estudio

La delimitación del área de estudio se realiza teniendo en cuenta aspectos tanto geológicos, como geomorfológicos. El uso de un DEM (Modelo Digital de Elevación) es la principal herramienta para delimitar una cuenca hidrográfica, sin embargo, también se pueden utilizar imágenes satelitales y fotografías aéreas. Los Modelos de Elevación Digital se pueden conseguir en la red en sitios web de acceso gratuito como el de la NASA o el de la UAF, cuya resolución llegan incluso a 12.5 metros.

### 2.2 Características morfométricas

El funcionamiento de una cuenca depende de las condiciones climáticas y de las características físicas de la misma. Según Gaspari et al. (2012), citado por Cardona (2013) el análisis morfométrico estudia el relieve y drenaje que permiten conocer las características físicas de una cuenca, lo cual ayuda a la interpretación de la funcionalidad hidrológica y a la definición de las estrategias para la formulación de su manejo.

La caracterización morfométrica de una cuenca incluye área, perímetro, longitud y ancho, parámetros que permiten obtener indicadores como el factor de forma, coeficiente de compacidad, longitud del cauce principal y curva hipsométrica. El objetivo de este capítulo es presentar los conceptos básicos de morfometría e introducir los cálculos básicos de las características morfométricas mencionadas. La Tabla 1 resume la definición de algunas características morfométricas evaluadas en una cuenca.

*Tabla 1. Características morfométricas de una cuenca*

Parámetro	Definición
Longitud del cauce principal (Lt)	Es la distancia del recorrido que hace el cauce principal desde su nacimiento hasta su desembocadura medida en kilómetros (Ibáñez, et al., 2011). Esta distancia se obtiene directamente de los mapas, imágenes satelitales o fotografías aéreas disponibles en el área de estudio.
Coeficiente de sinuosidad (Ks)	Es la relación entre la longitud del cauce principal (Lt) y la distancia lineal (Ll) desde el nacimiento hasta la desembocadura del cauce (Burbano Girón, et al., 2016). $Ks = \frac{Lt}{Ll}$ <p><i>Ecuación 1. Coeficiente de Sinuosidad</i></p>

<p>Área aferente de la cuenca</p>	<p>Es el territorio sobre el que yace el cauce principal y del cual recolecta sus aguas, medido en kilómetros cuadrados. (Burbano Girón, et al., 2016). La Tabla 2 presenta la clasificación según el área de la cuenca.</p> <p><b>Tabla 2. Clasificación de unidades hidrográficas en función del área geométrica</b></p> <table border="1" data-bbox="586 401 1243 621"> <thead> <tr> <th>Área (Km<sup>2</sup>)</th> <th>Unidad hidrológica</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>&lt;5</td> <td>Unidad</td> </tr> <tr> <td>5-20</td> <td>Sector</td> </tr> <tr> <td>20-100</td> <td>Microcuenca</td> </tr> <tr> <td>100-300</td> <td>Subcuenca</td> </tr> <tr> <td>&gt;300</td> <td>Cuenca</td> </tr> </tbody> </table> <p><b>Fuente: (Reyes Trujillo, et al., 2010)</b></p>	Área (Km <sup>2</sup> )	Unidad hidrológica	<5	Unidad	5-20	Sector	20-100	Microcuenca	100-300	Subcuenca	>300	Cuenca			
Área (Km <sup>2</sup> )	Unidad hidrológica															
<5	Unidad															
5-20	Sector															
20-100	Microcuenca															
100-300	Subcuenca															
>300	Cuenca															
<p>Ancho medio de la cuenca (B)</p>	<p>Se define como la relación entre el área de la cuenca (A) y la longitud axial de la cuenca (L) (Burbano Girón, et al., 2016); la Ecuación 2 muestra dicha relación.</p> $B = \frac{A}{L}$ <p><b>Ecuación 2. Ancho medio de la Cuenca</b></p>															
<p>Coefficiente de forma (σ)</p>	<p>Se calcula como el cociente entre la longitud axial de la cuenca (L) y el ancho medio de la cuenca (Burbano Girón, et al., 2016)</p> $\sigma = \frac{L}{B}$ <p><b>Ecuación 3. Coeficiente de forma</b></p>															
<p>Coefficiente de compacidad (kc)</p>	<p>Es la relación entre la longitud del perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo teórico con área equivalente a la de la cuenca (Gaspari , 2007).</p> $k_c = \frac{P_{cuenca}}{P_{circulo}} = \frac{P_{cuenca}}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28 \frac{P_{cuenca}}{\sqrt{A}}$ <p><b>Ecuación 4. Coeficiente de compacidad</b></p> <p>La tabla 3; <b>Error! No se encuentra el origen de la referencia.</b> contiene la clasificación de cuenca en función del índice de compacidad según la FAO (1985).</p> <p><b>Tabla 3. Clasificación de cuenca de la FAO en función del índice de compacidad</b></p> <table border="1" data-bbox="545 1476 1284 1766"> <thead> <tr> <th>Tipo</th> <th>Rango</th> <th>Descripción</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>KC1</td> <td>1.00 – 1.25</td> <td>Redonda a oval redonda</td> </tr> <tr> <td>KC2</td> <td>1.26 – 1.50</td> <td>Oval redonda a oval oblonga</td> </tr> <tr> <td>KC3</td> <td>1.51 – 1.75</td> <td>Oval oblonga a rectangular oblonga</td> </tr> <tr> <td>KC4</td> <td>&gt; 1.75</td> <td>rectangular oblonga</td> </tr> </tbody> </table> <p><b>Fuente: (FAO 1985)</b></p>	Tipo	Rango	Descripción	KC1	1.00 – 1.25	Redonda a oval redonda	KC2	1.26 – 1.50	Oval redonda a oval oblonga	KC3	1.51 – 1.75	Oval oblonga a rectangular oblonga	KC4	> 1.75	rectangular oblonga
Tipo	Rango	Descripción														
KC1	1.00 – 1.25	Redonda a oval redonda														
KC2	1.26 – 1.50	Oval redonda a oval oblonga														
KC3	1.51 – 1.75	Oval oblonga a rectangular oblonga														
KC4	> 1.75	rectangular oblonga														
<p>Curva hipsométrica</p>	<p>Según Monsalve, G. (1995), la curva hipsométrica es la representación gráfica del relieve de una cuenca. Representa la variación de la elevación con referencia al nivel medio del</p>															

	mar, es decir, una representación bidimensional, que grafica en el eje vertical la elevación y en el eje horizontal el porcentaje del área sobre cada curva de nivel, en términos del área total.
Altura media de la cuenca (H)	Se calcula con base al diagrama de frecuencias de la curva hipsométrica, homólogo al cálculo de $H_{cauce}$ , pero usando las 8 a 12 zonas altitudinales definidas (Monsalve, 1995).  $H_{cuenca} = H_1f_1 + H_2f_2 + \dots + H_nf_n$ <b>Ecuación 5.</b> Altura media de la cuenca  $H_i$ Es la cota de altura en la mitad del intervalo de cada clase y $f_i$ es la frecuencia que le corresponde a ese intervalo.
Pendiente media de la cuenca (I cuenca)	La pendiente media de una cuenca es el promedio de las alturas y las pendientes dentro del área aferente de la cuenca y es uno de los principales parámetros que caracteriza el relieve de la misma y permite hacer comparaciones entre cuencas (Guilarte, 1978).

### 2.3 Identificación de las zonas de recarga

La recarga natural de un acuífero puede darse de dos maneras: por el movimiento descendente del agua debido a la fuerza de gravedad o por el movimiento horizontal del flujo. La primera forma puede darse a través de precipitación, por aguas superficiales (ríos y lagos) y la segunda forma por medio de transferencias desde otras unidades hidrogeológicas o acuíferos debido a las diferentes condiciones hidráulicas de las capas que constituyen el perfil del suelo. La recarga subterránea también se puede dar de manera artificial, producto de actividades como la irrigación y fugas de redes de acueducto o alcantarillado; esta última se debe tener en cuenta en las zonas urbanizadas (Vélez Otálvaro , et al., 2014).

Las zonas de recarga según Vélez O. et al. (2014) se identifican con base en una amplia gama de criterios que incluyen, entre otros: tipo de suelo, geología, usos de la tierra, superficies impermeables, acuíferos deteriorados, clima, precipitación, vegetación y topografía; estos criterios pueden ser evaluados con la ayuda de sistemas de información geográfica, a través de la cartografía existente, en la que se incluya topografía, suelos, vegetación, geología y mapas de isoyetas. Sin embargo, según Sutton IV (2011) los criterios fundamentales para identificar áreas de recarga de aguas subterráneas son la permeabilidad del suelo y la geología. Para que se produzca la recarga del agua subterránea, es necesario que el suelo sea permeable, para que el agua pueda infiltrarse en el subsuelo, y que la geología subyacente no restrinja el movimiento descendente del agua, por lo cual, las formaciones que conforman el acuífero deben aflorar en superficie para que exista recarga.

La permeabilidad y la geología tienen una estrecha relación. La permeabilidad del suelo, que a menudo se usa indistintamente con el término conductividad hidráulica, es una medida de la

capacidad de una roca para transmitir agua, que se ve afectada por el tamaño, la forma y la interconexión del espacio poroso. Los materiales como la arena y la grava tienen una alta permeabilidad y permiten que el agua se mueva a la superficie de la tierra a un ritmo mucho más rápido que los materiales como la arcilla o el granito, que tienen baja permeabilidad. (Vélez Otálvaro , et al., 2014).

### **2.3.1 Evaluación geológica**

La geología es la base para la identificación de los acuíferos, pues permite identificar los tipos de roca y las estructuras que favorecen la circulación y almacenamiento del agua subterránea. Los acuíferos subterráneos se encuentran normalmente asociados a rocas sedimentarias consolidadas y semiconsolidadas de conglomerados y areniscas, que tienen permeabilidad y porosidades de media a alta, aunque también es posible encontrar agua subterránea almacenada en la red de fracturas de rocas ígneas y metamórficas.

La evaluación geológica inicia con la revisión de la cartografía existente a escala regional, así como de la información indirecta obtenida de fotografías aéreas e imágenes satelitales. Una vez se tiene una noción general del área de estudio, se debe realizar un trabajo de campo a escala detallada el cuál debe tener especial énfasis en la caracterización litológica, mineralógica, estratigráfica, estructural, y en la definición de la porosidad primaria o secundaria de cada una de las unidades identificadas (Vélez Otálvaro , et al., 2014).

### **2.3.2 Sondeos eléctricos verticales (SEV)**

La identificación de las diferentes unidades acuíferas subterráneas en una zona determinada, inicia con un estudio geológico detallado, pero se debe complementar con diferentes técnicas geofísicas. La principal técnica de prospección geofísica utilizada en la identificación de acuíferos se conoce como ‘Sondeos Eléctricos Verticales (SEV)’, aunque existen otros métodos como la gravimetría, magnetometría o la sísmica (Telford, et al., 1990).

La finalidad del sondeo eléctrico vertical (SEV) es determinar la distribución en profundidad de las resistividades aparentes bajo el punto sondeado a partir de medidas de la diferencia de potencial en la superficie; con dichas mediciones de resistividad, es posible estimar la distribución vertical de geomateriales presentes en el subsuelo (ver Figura 1). La profundidad de penetración de la corriente eléctrica depende de la separación de los electrodos: si la distancia entre los electrodos aumenta, la corriente circula a mayor profundidad, pero su resolución disminuye (Telford, et al., 1990).

Una de las principales limitantes de éste método es que debe existir un contraste importante entre las propiedades físicas de las unidades litológicas de interés, por ello es necesario conocer previamente la geología del área de estudio.

## 2.4 Características hidráulicas de los acuíferos

En el análisis del comportamiento de un acuífero es indispensable la estimación de parámetros hidráulicos como la conductividad hidráulica, transmisividad y coeficiente de almacenamiento, los cuales se obtienen mediante la realización de pruebas de bombeo. (Fetter, 2000). Es importante conocer estos parámetros para realizar una gestión integral del recurso hídrico, y evitar problemas que agoten el potencial del acuífero de manera temprana; uno de los problemas más comunes es la existencia de altos abatimientos que causan la disminución drástica del nivel piezométrico (Monsalve, 1995). A continuación, se describen los parámetros hidráulicos más utilizados en la caracterización de sistemas acuíferos.

### 2.4.1 Transmisividad

Según Monsalve, Germán (1995) la transmisividad es la capacidad que posee un acuífero para transmitir agua a través de toda su altura, es decir, el caudal que fluye entre la base y el tope de la unidad acuífera. Esto es lo mismo que la conductividad hidráulica, multiplicado por la altura de la zona saturada, como se observa en la Ecuación 6. En este sentido, la transmisividad mide la cantidad de agua que puede ser transmitida horizontalmente a través de la anchura total del acuífero, bajo un gradiente hidráulico determinado (Fetter, 2000).

$$T = b * K$$

*Ecuación 6. Ecuación de transmisividad*

Dónde:

T: Transmisividad ( $\frac{L^2}{T}$ )

b: Espesor saturado del acuífero (L)

K: Conductividad hidráulica ( $\frac{L}{T}$ )

En la Tabla 4, se presenta la calificación de la roca en términos de su transmisividad.

**Tabla 4.** Clasificación de las rocas en términos de sus transmisividad

Transmisividad (m <sup>2</sup> /día)	Calificación	Caudal esperado L/s (espesor 10m)
--------------------------------------	--------------	--------------------------------------

T < 10	Muy baja	< 1
10 < T < 100	Baja	1 < Q < 10
100 < T < 500	Media a alta	10 < Q < 50
500 < T < 1000	Alta	50 < Q < 100
T > 1000	Muy alta	Q > 1000

*Fuente:* (Universidad Nacional de Colombia UNAL. Sede Medellín., 2009)

## 2.4.2 Conductividad hidráulica

Es la capacidad de una roca para transmitir el agua a través de un área transversal determinada, bajo un gradiente determinado. Este parámetro es explicado por la ley de Darcy para flujo en medio poroso, que se expresa claramente en la Ecuación 7.

$$K = \frac{-Q}{A \left( \frac{dh}{dL} \right)}$$

*Ecuación 7. Ecuación de la conductividad hidráulica*

Dónde:

K: Conductividad hidráulica ( $\frac{L}{T}$ )

Q: Caudal ( $\frac{L^3}{T}$ ); donde el signo negativo indica que el flujo está en la dirección de la disminución de la carga hidráulica.

A: Área de la sección transversal ( $L^2$ )

dh/dL: Gradiente hidráulico ( $\frac{L}{L}$ )

Existen rocas que poseen porosidad, pero carecen de poros interconectados, por lo que no pueden transportar el agua de un poro a otro (Fetter, 2000), lo que significa que tienen una baja conductividad hidráulica. En este sentido, la conductividad hidráulica es función de las propiedades del medio poroso, que dependen a su vez de las características litológicas de la formación. En la Tabla 5, se presentan algunos valores de conductividad hidráulica definidos para diferentes tipos de roca:

*Tabla 5. Valores típicos de conductividad de algunos tipos de roca*

Rocas	K (m/día)	Grado de Permeabilidad	Tipo de Formación
Grava limpia	1000	Buena - muy buena	Permeable

Arena gruesa limpia	10-1000	Buena - muy buena	Permeable
Mezcla de arena	5-10	Mala	Semipermeable
Arena fina	1-5	Mala	Semipermeable
Arena limosa	0.1-2	Mala	Semipermeable
Limo	0.001-0.5	Mala	Semipermeable
Arcilla	<0.001	Nula	Impermeable

**Fuente:** (Universidad Nacional de Colombia UNAL. Sede Medellín., 2009)

### 2.4.3 Coeficiente de almacenamiento

El coeficiente de almacenamiento es un parámetro adimensional que representa la capacidad de un acuífero para liberar agua a causa de un cambio de presión determinado; éste cambio de presión produce una disminución en la presión de poro y expansión del agua contenida en el medio poroso, que causa su liberación. En un acuífero libre, el coeficiente de almacenamiento es representado por la porosidad efectiva, y varía entre 0,01 y 0,30. En los acuíferos confinados y semiconfinados, el coeficiente de almacenamiento representa el descenso en un valor unitario de la presión hidrostática, y varía entre 0.000001-0.001. (Díaz Ortiz, 2012).

### 2.4.4 Tipos de acuíferos

Los acuíferos son formaciones rocosas, generalmente de origen sedimentario, que almacenan y transmiten agua en cantidades significativas. La clasificación más común se realiza en términos de su presión hidrostática, siendo éstos acuíferos libres, acuíferos confinados y acuíferos semiconfinados. (Martínez Alfaro, et al., 2006). A continuación, se describen los tipos de acuíferos.

#### 2.4.4.1 *Acuíferos libres*

Poseen una superficie freática que se encuentra en contacto directo con la atmósfera; cuando ésta superficie aflora da lugar a manantiales y depresiones encharcadas. Éstos acuíferos se forman al caer precipitación sobre un terreno sedimentado que se encuentra sobre una capa impermeable; el agua, al no poder infiltrarse a mayor profundidad, se acumula y circula según la pendiente de la superficie freática (Díaz Ortiz, 2012). Según Martínez Alfaro, et al. (2006) los acuíferos libres son los más expuestos a la contaminación y, por ende, los más vulnerables. De éstos acuíferos extraen agua principalmente los aljibes, puntos de agua que no son muy regulados por la autoridad ambiental.

#### **2.4.4.2    *Acuíferos confinados***

Se encuentran bajo presión y aislados de la atmósfera por unidades geológicas impermeables; esto implica que permanecen saturados de agua y a una presión mayor que la atmosférica, y que poseen mayor protección natural frente a la contaminación (Martínez Alfaro, et al., 2006). Éstos se recargan únicamente en los sitios donde afloran sus formaciones rocosas y en donde a su vez se convierten en acuíferos libres; los sitios de afloramiento se comportan como un conducto que transporta el agua hasta la zona confinada. En este caso, las variaciones en el nivel piezométrico se dan a causa de su explotación mediante pozos, y afectan muy poco su almacenamiento (Díaz Ortíz, 2012).

#### **2.4.4.3    *Acuíferos semiconfinados***

Estos acuíferos, al igual que los acuíferos confinados, se encuentran bajo presión y aislados de la atmósfera por unidades geológicas impermeables; la diferencia radica en que las capas impermeables que los suprayacen, no son tan impermeables, y permiten la circulación vertical de agua; estos acuíferos son mucho más frecuentes en la naturaleza que los confinados, pues en los ambientes sedimentarios no existen rocas que sean totalmente impermeables. El movimiento de agua en estos acuíferos depende de la altura piezométrica (Díaz Ortíz, 2012).

## 2.5 Balance hídrico

El balance hídrico es una representación matemática de cada uno de los componentes del ciclo hidrológico, en el cual es fundamental conocer las entradas y salidas del sistema. Según Chow et al. (1994) la hidrología de una cuenca varía según diversos parámetros como el clima, la geología, la topografía y la vegetación; y se ve alterada por las actividades humanas que modifican el medio ambiente, provocando nuevos eventos en el ciclo hidrológico.

El balance hídrico es una herramienta que permite conocer características de la cuenca mediante la aplicación del principio de conservación de la masa o la ecuación de continuidad; de esta forma cualquier diferencia entre las entradas y salidas se ve reflejada en un cambio en el almacenamiento de agua como se presenta en la siguiente ecuación:

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} = \text{Variación en el almacenamiento}$$

*Ecuación 8.* Balance hídrico  
Tomado de: (Martínez Alfaro, et al., 2006)

Las entradas del balance hídrico son representadas por la precipitación (P), mientras las salidas incluyen la evapotranspiración (ETP) y la escorrentía (E). Por tanto, el balance hídrico en su forma más general, vendrá representado por la siguiente ecuación:

$$\Delta S = P - ETP - E$$

*Ecuación 9.* Balance hídrico 2.  
Tomado de: (Martínez Alfaro, et al., 2006)

Analizar la estructura del balance hídrico es fundamental para mejorar el control y redistribución del recurso agua, así como para conseguir un uso más racional en el espacio y en el tiempo y de esta forma establecer el grado de su influencia en las variaciones del régimen natural. (Sokolov & Chapman, 1981). A continuación, se detalla cada uno de los parámetros que se deben tener en cuenta para realizar el balance hídrico.

### 2.5.1 Precipitación

Precipitación es cualquier tipo de forma en que el agua cae desde las nubes a la tierra. Se distinguen normalmente tres tipos: lluvia, granizo y nieve. Desde el punto de vista atmosférico, se entiende que el enfriamiento de las nubes, causado por su ascensión, provoca que el vapor de agua pase a estado líquido, que por efecto de la gravedad cae hacia el suelo, originando las diferentes

precipitaciones. En este sentido, la precipitación varía en el espacio y en el tiempo de acuerdo con el patrón general de circulación atmosférica y con factores locales. Su medición es fundamental, ya que es la fuente primaria del agua superficial y subterránea, y a partir de su conocimiento es posible realizar los estudios concernientes al uso y control del agua. (Aparicio Mijares, 2004).

La precipitación, normalmente se mide en estaciones pluviométricas, muchas veces integradas en estaciones hidrometeorológicas, cuyos datos sólo son representativos para su lugar de medida y su entorno, en un rango que depende de diversos factores. La densidad de una red de pluviómetros depende en gran medida del relieve de la zona y según la Organización Meteorológica Mundial es recomendable un pluviómetro cada  $250 \text{ km}^2$  en topografía suave (Martínez Alfaro, et al., 2006). Esto significa que es indispensable analizar varias estaciones para caracterizar la precipitación de una cuenca; es fundamental, entonces, analizar de manera muy detallada la información obtenida de las estaciones pluviométricas o meteorológicas, antes de realizar cualquier análisis cuantitativo.

Debido a que una de las mayores dificultades en Colombia para el análisis del balance hídrico, es la escasez de registros hidrometeorológicos y sus cortas series históricas, es indispensable recolectar toda la información disponible de registros históricos de las variables hidroclimatológicas tales como la precipitación, la evaporación, la humedad relativa y la temperatura y, muchas veces, realizar completamiento de los datos con base en estaciones vecinas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible MADS, 2014).

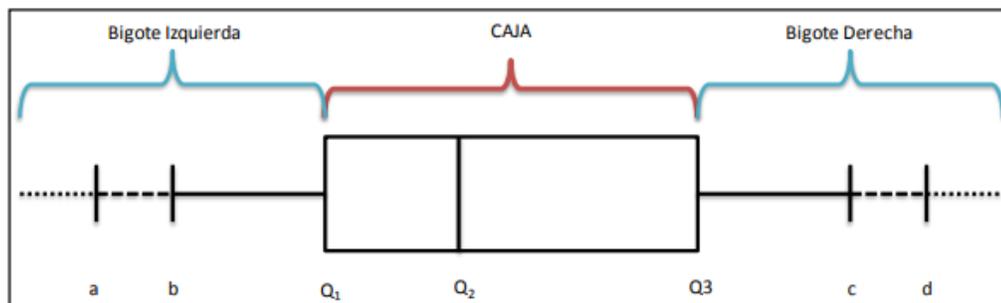
### ***2.5.1.1 Análisis exploratorio de datos***

Para el desarrollo de estudios climáticos es de vital importancia realizar el análisis exploratorio a los históricos de las estaciones a utilizar antes de cualquier análisis cuantitativo, ya que es usual encontrar deficiencias en los mismos, tanto en la calidad como en los años de registro, presenciando series con cambios, falta de información, tendencias y datos atípicos que posteriormente generaran error a la hora de ser utilizados para simular o modelar algún evento (Carvajal & Castro, 2010).

El análisis de los datos se puede realizar por varios métodos, entre los cuales se destaca el método gráfico, que permite una mejor visualización y comprobación de las tendencias y cambios que pueda tener la serie de tiempo (Carvajal & Castro, 2010). Dentro de los métodos gráficos más conocidos se encuentra el de diagrama de cajas, el cual será explicado a continuación.

#### ***2.5.1.1.1 Diagrama de cajas***

El diagrama de cajas o BoxPlot (por su término en inglés), es un resumen gráfico de información donde se presenta una idea de la tendencia central, variabilidad y puntos atípicos de una serie de datos (Carvajal & Castro, 2010). En la Figura 1 se presenta la ilustración de un diagrama de cajas.



**Figura 1.** Diagrama de Caja y Bigotes  
**Fuente:** Moros (2010)

Según (Moros Vivas, 2010), el diagrama de cajas divide la serie de datos en cuatro áreas de igual frecuencia en los intervalos:  $(-\infty, Q_1)$ ,  $(Q_1, Q_2)$ ,  $(Q_2, Q_3)$ ,  $(Q_3, +\infty)$ ; en éste, es posible identificar dos partes fundamentales: los bigotes y la caja central.

La caja central encierra el 50% de los datos y en su interior se encuentra una línea vertical que representa la mediana o cuartil dos ( $Q_2$ ); si esta línea se encuentra en el centro de la caja, se concluye que no hay asimetría en los datos. Por su parte los lados verticales de la caja están situados en los cuartiles inferior ( $Q_1$ ) y superior ( $Q_3$ ), de los que parten los bigotes hacia cada lado.

### 2.5.1.2 Completamiento de datos faltantes

Los estudios climáticos requieren como información de entrada series de tiempo de variables meteorológicas que sean representativas del área de estudio. Dado que las series de tiempo usualmente presentan datos faltantes por diversas circunstancias, principalmente técnicas, es necesario utilizar métodos para el relleno o completamiento de los mismos (Toro Trujillo, et al., 2015).

Dentro de los distintos métodos para el completamiento de datos, el método del U.S National Weather Service (IDW) ha resultado ser el más confiable y simple, además de tener aplicación en diversos entornos. Según Toro et al. (2015), el método IDW consiste en un promedio con el inverso de la distancia al cuadrado como factor ponderador. Para la estimación de los datos perdidos por medio del método IDW, se tiene en cuenta la distancia existente entre la estación de referencia o estación que presenta vacíos en sus históricos y las estaciones auxiliares o cercanas (García, et al., 2008). El valor del campo de interpolación  $P_i$  para la localización  $(X_i, Y_i)$  se establece por medio de la siguiente ecuación:

$$P_i = \frac{1}{W_i} \sum_{n=1}^{nn \leq N} w_{i,n} p_n$$

*Ecuación 10. Valor del campo de interpolación*

Donde el valor de  $P_n$  es conocido al realizar la medición en campo de  $n$ , mientras que el valor de los pesos,  $W_{i,n}$  está dado por:

$$W_{i,n} = [C_x(X_i - X_n)^k + C_y(Y_i - Y_n)^k + C_z(Z_i - Z_n)^k]$$

*Ecuación 11. Valor de los pesos*

Siendo  $C_x, C_y, C_z$  los coeficientes que permiten los pesos antrópicos.

Por otra parte, la obtención del factor de normalización de  $W_i$  se determina por medio de la siguiente ecuación:

$$W_i = \sum_{n=1}^{nn \leq N} w_{i,n}$$

*Ecuación 12. Factor de normalización*

### **2.5.1.3 Precipitación media de la cuenca**

Generalmente el cálculo del volumen de agua precipitado sobre una cuenca, se realiza teniendo en cuenta diferentes escenarios: 1) para la precipitación media de toda la serie considerada, 2) para la media de una secuencia seca representativa, 3) para la media de una secuencia húmeda representativa, 4) para el año más seco del periodo y 5) para el año más húmedo del periodo (Martínez Alfaro, et al., 2006). Se considera como año más seco al año con menor precipitación registrada en el mayor número de estaciones pluviométricas y al año más húmedo al de mayor precipitación en el mayor número de estaciones (Martínez Alfaro, et al., 2006).

Dentro de los métodos más comunes para el cálculo de la precipitación media de la cuenca, se encuentran el método de los polígonos de Thiessen y el método de las isoyetas.

#### *2.5.1.3.1 Polígonos de Thiessen*

En éste método se deben tener en cuenta 2 parámetros importantes: la media ponderada de la precipitación y el área de influencia de la estación, la cual es delimitada por un polígono (Martínez Alfaro, et al., 2006). Para la determinación del polígono se deben llevar a cabo los siguientes pasos:

- a. Realizar la triangulación de la cuenca uniendo cada estación pluviométrica con las adyacentes a ella.
- b. Obtener el volumen total de precipitado en la cuenca, multiplicando la precipitación en cada estación por el área de su polígono asociado y posteriormente sumando los volúmenes de todos los polígonos presentes en la cuenca.

La precipitación media ponderada está dada por la siguiente ecuación:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n P_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

*Ecuación 13. Precipitación media ponderada por método de los polígonos de Thiessen*

**Dónde:**

**P:** Precipitación regional (mm).

**P<sub>i</sub>:** Precipitación para cada estación i (mm).

**A<sub>i</sub>:** Área de cada estación i (km<sup>2</sup>)

**n:** Número de estaciones.

#### 2.5.1.3.2 Método de las Isoyetas

Una isoyeta corresponde al lugar geométrico de los puntos de igual precipitación. Según Martínez A, et al. (2006), éste es el método que proporciona unos resultados más ajustados a la realidad.

Para la obtención de la precipitación media por este método, primero se calcula la media ponderada, usando el área generada entre cada par de isoyetas y el valor de la precipitación de la isoyeta media del área. Finalmente, el total de agua precipitada sobre la cuenca es la suma de los volúmenes de agua calculados sobre el área total de la cuenca. La precipitación media se calcula con la siguiente ecuación:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n P_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

*Ecuación 14. Precipitación media ponderada por método de isoyetas.*

**Dónde:**

**P:** Precipitación regional (mm).

**P<sub>i</sub>:** Precipitación media entre cada dos isoyetas (mm).

**A<sub>i</sub>:** Área entre cada dos isoyetas (km<sup>2</sup>)

**n:** Número de estaciones.

## 2.5.2 Evapotranspiración

Según el documento 56 de la FAO, (1998), la evapotranspiración se conoce como la combinación de dos procesos por los que se pierde el agua: evaporación y transpiración, que ocurren simultáneamente. La evaporación corresponde al proceso en el que el agua líquida se convierte en vapor de agua y se retira de la superficie evaporante (ríos, caminos, suelos y vegetación mojada). La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de las plantas y su posterior remoción hacia la atmósfera.

Valencia (2010), menciona que aproximadamente el 60% del agua total anual que cae sobre la superficie terrestre en forma de precipitación regresa a la atmósfera por medio de la evapotranspiración y lo que queda se reparte en diversas proporciones entre escorrentía superficial, subterránea e infiltración.

### 2.5.2.1 Evapotranspiración potencial

Debido a la importancia que tiene la evapotranspiración en el ciclo del agua y los balances hídricos, diversos autores han desarrollado ecuaciones empíricas con las cuales es posible determinar una aproximación del valor de la evapotranspiración potencial. Sin embargo, es necesario tener en cuenta las características climáticas de la zona en la que se desea dar uso de dichas ecuaciones, ya que al ser empíricas, han sido desarrolladas bajo condiciones específicas. Dentro de las ecuaciones empíricas existentes, las más utilizadas son: Penman-Monteith, Thornthwaite, Christiansen, Hargreaves, tanque evaporímetro tipo A, Turc y Blaney-Criddle (Marín Valencia, 2010).

Según la FAO (1998), el método de Penman-Monteith es el más apropiado para el cálculo de la evapotranspiración ya que tiene en cuenta diferentes variables: horas de sol, temperatura, humedad atmosférica y velocidad del viento. Sin embargo, la principal limitante de éste método es la falta de variables registradas en las estaciones climatológicas. Por otra parte, Silva (2015), a partir de la comparación de las mediciones directas realizadas en campo por el método del tanque evaporímetro clase A, concluyó que para diferentes lugares en el departamento del Huila y principalmente para la zona en la que se encuentra la ciudad de Neiva, se puede obtener una buena estimación de la evapotranspiración usando las ecuaciones empíricas de Penman-Monteith, Christiansen y Thornthwaite. A continuación, se describen los métodos utilizados para la estimación de la evapotranspiración para la cuenca río del Oro:

#### 2.5.2.1.1 Método de Christiansen (1966)

Para la estimación de la evapotranspiración potencial mensual (ver Ecuación 15), Christiansen desarrollo una ecuación empírica basada en la radiación solar, velocidad del viento, temperatura, humedad relativa, insolación y elevación (Marín Valencia, 2010). Ésta ecuación presenta mejores

resultados en zonas cálidas, como lo es el caso del área de estudio, sin embargo, la principal desventaja radica en que requiere datos que no todas las estaciones climatológicas registran.

$$ETP = 0.324 R_{xt} C_w C_H C_t C_S C_e$$

*Ecuación 15. Evapotranspiración potencial mensual por el método de Christiansen*

Donde  $R_{xt}$  es la radiación solar,  $C_w$  es el coeficiente del viento,  $C_H$  es el coeficiente de humedad relativa,  $C_T$  es el coeficiente de temperatura,  $C_S$  es el coeficiente de brillo solar y  $C_e$  es el coeficiente de elevación.

El valor de la radiación solar depende de la radiación extraterrestre tomada en la parte superior de la atmosfera ( $R_{tt}$ ), y se estima usando la Ecuación 16; estos valores de  $R_{tt}$  dependen de la ubicación geográfica de la zona de estudio y del mes del año en que se desea realizar el cálculo; la Tabla 6 resume dichos valores.

$$R_{xt} = \frac{R_{tt} * \text{Numero dias al mes}}{60}$$

*Ecuación 16. Radiación solar.*

**Tabla 6.** Radiación extraterrestre tomada en la parte superior de la atmosfera (cal/m<sup>2</sup>día)

Latitud Norte	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
0	885	915	925	900	850	820	830	870	905	910	890	875
10	780	840	900	925	915	900	905	915	905	865	800	760
20	660	750	850	920	960	965	960	935	875	785	685	630
30	520	630	775	895	975	1000	990	925	820	685	560	490
40	380	505	675	845	965	1020	985	895	740	565	415	335
50	225	360	555	750	930	1010	970	830	640	435	265	190
60	90	215	425	670	890	1000	945	770	510	285	120	60
70	0	70	275	565	855	1025	945	685	385	145	15	0
80	0	0	125	480	890	1075	995	660	255	25	0	0
90	0	0	40	470	900	1085	1010	670	170	0	0	0

*Fuente: Marín, V (2010)*

El coeficiente de viento  $C_w$  se calcula usando la ecuación 17. La velocidad media mensual del viento  $W$  se mide a 2.0 m de altura sobre el suelo;  $W_0$  es una constante cuyo valor es 6.7 km/hora.

$$C_W = 0.672 + 0.406 \left( \frac{W}{W_0} \right) - 0.078 \left( \frac{W}{W_0} \right)^2$$

**Ecuación 17.** *Coficiente de viento*

El coeficiente de humedad relativa ( $C_H$ ) se calcula usando la Ecuación 18. El valor de  $H_m$  corresponde a la humedad relativa media mensual (en decimales) y  $H_{mo}$  es una constante cuyo valor es 0,6.

$$C_H = 1.035 + 0.24 \left( \frac{H_m}{H_{mo}} \right)^2 - 0.275 \left( \frac{H_m}{H_{mo}} \right)^3$$

**Ecuación 18.** *Coficiente de humedad relativa.*

El coeficiente de temperatura  $C_T$  se calcula con la Ecuación 19, y tiene en cuenta la temperatura media mensual del aire ( $T_C$ ) expresada en °C, y la constante  $T_{co}$  cuyo valor es 20°C.

$$C_t = 0.463 + 0.425 \left( \frac{T_C}{T_{co}} \right) + 0.122 \left( \frac{T_C}{T_{co}} \right)^2$$

**Ecuación 19.** *Coficiente de temperatura.*

El coeficiente de brillo solar  $C_s$  se calcula con la Ecuación 20, y tiene como parámetros de entrada el valor de insolación, calculado a partir de la ecuación 21, y una constante  $S_0$  cuyo valor es 0.8.

$$C_s = 0.340 + 0.856 \left( \frac{S}{S_0} \right) - 0.196 \left( \frac{S}{S_0} \right)^2 \quad S = \frac{\text{Horas de sol acumuladas en el mes}}{12 \times N^{\circ} \text{ días del mes}} \times 100$$

**Ecuación 20.** *Coficiente de brillo solar.*

**Ecuación 21.** *Insolación.*

El coeficiente de elevación  $C_e$  se calcula con la ecuación 22. Éste coeficiente es función de la elevación promedio de la zona de estudio ( $e$ ) en metros sobre el nivel del mar; la constante  $e_0$  es igual a 305 msnm (Marín Valencia, 2010).

$$C_e = 0.97 + 0.03 \left( \frac{e}{e_0} \right)$$

**Ecuación 22.** *Coficiente de elevación.*

### 2.5.2.1.2 Método de Thornthwaite y Wilm (1944)

Este método fue desarrollado a partir de lecturas de lisímetros y balances hídricos realizados en cuencas pequeñas de diferentes zonas de Estados Unidos (Marín Valencia, 2010). Tiene la ventaja de ser de fácil uso y de requerir información de entrada muy simple, sin embargo, está muy limitado a zonas de estudio con condiciones de bajas temperaturas. La Ecuación 23 muestra el cálculo de la evapotranspiración por dicho método:

$$ETP_i = 16 * K_i \left( \frac{10T_i}{J} \right)^a$$

**Ecuación 23.** Evapotranspiración Potencial mensual por el método de Thornthwaite

Dónde:

$T_i$ : temperatura media mensual del aire para el mes  $i$  (°C).

$K_i$ : factor de corrección.

$J$ : índice de calor anual

El Factor  $K_i$  es un factor de corrección mensual que depende de la latitud, y se obtiene de la Tabla 7.

**Tabla 7.** Factores de corrección  $K_i$  para la fórmula de Thornthwaite y Wilm

Latitud Norte	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
0	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
5	1.02	0.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	0.99	1.02
10	1.00	0.91	1.03	1.03	1.08	1.05	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
15	0.97	0.91	1.03	1.04	1.11	1.08	1.12	1.08	1.02	1.01	0.95	0.97

**Fuente:** Marín, V (2010)

El índice de calor anual  $J$  se calcula a partir de las temperaturas medias de los doce meses, usando la siguiente ecuación.

$$J = \sum_{i=1}^{12} (T_i)$$

**Ecuación 24.** Índice de calor anual.

$$J_i = \left( \frac{T_i}{5} \right)^{1.514}$$

**Ecuación 25.** Índice de calor mensual.

El exponente  $a$  se calcula con la siguiente ecuación:

$$a = 0.49239 + 0.01792 * J - 7.71 \times 10^{-5} * J^2 + 6.75 \times 10^{-7} * J^3$$

**Ecuación 26.** Exponente *a*.

### 2.5.2.1.3 Tanque evaporímetro clase A

Este método provee la evaporación de forma directa, al medir el cambio en el nivel de un tanque debidamente calibrado que se posiciona en diferentes zonas de interés. Aunque es un método directo, hay ciertas precauciones que se deben tener respecto al manejo del tanque, sobre todo su calibración, pues éste proporciona una medida del efecto integrado de la radiación, el viento, la temperatura y la humedad (FAO, 1998). El tanque clase A posee forma circular, de 120,7 cm de diámetro y 25 cm de profundidad, con un tornillo micrométrico que permite medir el nivel de agua con bastante precisión (Silva, 2015). Para determinar la evapotranspiración potencial se usa la siguiente ecuación:

$$ET_o = K_p * E_{pan}$$

**Ecuación 27.** Evapotranspiración potencial por el método de tanque evaporímetro.

Donde  $ET_o$  es la evapotranspiración potencial en mm/día,  $K_p$  es el coeficiente del tanque evaporímetro (adimensional) y  $E_{pan}$  es la evaporación del tanque evaporímetro en mm/día. En la Tabla 8 se presentan los coeficientes del tanque evaporímetro  $K_p$  del tanque Clase A.

**Tabla 8.** Coeficientes del tanque evaporímetro ( $K_p$ ) para el tanque Clase A.

Tanque Clase A	Caso A: Tanque situado en una superficie cultivada				Caso B: Tanque situado en un suelo desnudo			
	Humedad Relativa							
Velocidad del viento (m/s)	Distancia del cultivo a barlovento (m)	Baja <40	Media 40-70	Alta >70	Distancia del barbecho a barlovento (m)	Baja <40	Media 40-70	Alta >70
Baja <2	1	0,55	0,65	0,75	1	0,7	0,8	0,85
	10	0,65	0,75	0,85	10	0,6	0,7	0,8
	100	0,7	0,8	0,85	100	0,55	0,65	0,75
	1000	0,75	0,85	0,85	1000	0,5	0,6	0,7
Moderada 2-5	1	0,5	0,6	0,65	1	0,65	0,75	0,8
	10	0,6	0,7	0,75	10	0,55	0,65	0,7
	100	0,65	0,75	0,8	100	0,5	0,6	0,65
	1000	0,7	0,8	0,8	1000	0,45	0,55	0,6
Alta 5-8	1	0,45	0,5	0,6	1	0,6	0,65	0,7
	10	0,55	0,6	0,65	10	0,5	0,55	0,65
	100	0,6	0,65	0,7	100	0,45	0,5	0,6
	1000	0,65	0,7	0,75	1000	0,4	0,45	0,55
Muy alta	1	0,4	0,45	0,5	1	0,5	0,6	0,65

>8	10	0,45	0,55	0,6	10	0,45	0,5	0,55
	100	0,5	0,6	0,65	100	0,4	0,45	0,5
	1000	0,55	0,6	0,65	1000	0,35	0,4	0,45

*Fuente:* (FAO, 1998)

### 2.5.2.2 *Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar ETc*

La evapotranspiración del cultivo puede ser calculada a partir de datos climáticos e integrando directamente los factores de la resistencia del cultivo, el albedo y la resistencia del aire. Si se conocen las características del cultivo, se puede calcular la ETc, la cual representa el límite máximo de evapotranspiración del cultivo cuando no existen obstáculos al crecimiento del mismo por limitaciones de agua, densidad del cultivo, enfermedades, malezas, insectos o excesiva salinidad. La ETc se calcula a partir de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo), el cual corresponde a un cultivo hipotético de pasto; y de un coeficiente Kc que es único para cada cultivo (FAO, 1998), utilizando la siguiente ecuación:

$$ETc = ETo * Kc$$

*Ecuación 28. Evapotranspiración del cultivo*

El coeficiente Kc es único para cada cultivo: en condiciones de una mayor velocidad del viento y aridez climática, los valores de Kc aumentan, mientras que para climas húmedos los valores de Kc disminuyen.

### 2.5.3 **Escorrentía**

La escorrentía corresponde a la parte de la precipitación que llega hasta la red de drenaje de la cuenca, moviéndose sobre la superficie del terreno por la acción de la gravedad sin infiltrarse en ningún momento (Perdomo & Rojas, 2017).

La escorrentía se ve afectada principalmente por factores climáticos y fisiográficos. En el primer caso, la precipitación influye según su intensidad, duración y distribución dentro de la cuenca; de igual forma la evaporación y la transpiración de la vegetación presente en la zona, contribuyen con el escurrimiento. En cuanto a los factores fisiográficos, el tipo y propiedades físicas del suelo como la estructura, textura, contenido de materia orgánica, entre otras, afectan la capacidad de infiltración; así un suelo permeable tendrá una mayor capacidad de absorción de agua y menor escurrimiento, a diferencia de un suelo estructurado y texturalmente fino, que tendrá mayor

escorrentía. El uso y cobertura del suelo, la pendiente topográfica, el tamaño y forma de la cuenca hidrográfica, también son factores fisiográficos del escurrimiento (Núñez Solís, 2001).

El comportamiento de la escorrentía en una cuenca hidrográfica se puede caracterizar mediante el método del ‘número de curva’, el cual se determina a partir de información sobre el suelo y coberturas. En éste método, que fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos del USDA, la escorrentía es una función de la profundidad total de la precipitación y un parámetro de abstracción denominado número de la curva de escorrentía, que varía en el rango de 1 a 100, donde 1 no representa escurrimiento y 100 son suelos impermeables, es decir, toda la precipitación genera escorrentía. Este método esta en función de: el tipo de suelo hidrológico, el uso y tratamiento de la tierra, la superficie del terreno y la condición de humedad antecedente (Ponce, 1989).

El método del número de la curva de escorrentía establece una relación empírica entre el escurrimiento directo  $Q$  (mm), la precipitación  $P$  (mm) y el potencial máximo de retención  $S$  (mm), de esta forma (Ponce, 1989):

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)}$$

*Ecuación 29. Escurrimiento directo*

La Ecuación 29 está sujeta a la restricción que  $P \geq 0.2S$ , es decir, el 20 % de la retención máxima posible es equivalente al umbral de escorrentía. De no cumplirse esta condición, el escurrimiento directo es igual a cero (Ponce, 1989).

La relación entre la retención máxima y la curva número, puede expresarse como:

$$S = \frac{25.400 - 254 \cdot CN}{CN}$$

*Ecuación 30. Potencial máximo de retención*

Es necesario identificar el tipo de suelo, la cobertura vegetal, la forma de explotación o tratamiento del terreno, la condición hidrológica y el grado de humedad inicial del terreno, para determinar el número curva. A continuación, se explican cada uno de estos parámetros:

### **2.5.3.1 Tipo de suelo**

El método establece cuatro tipos o grupos de suelo desde el punto de vista de su comportamiento hidrológico como se presenta en la Tabla 9.

*Tabla 9. Grupo hidrológico de suelos*

Grupo de suelos	Descripción de las características del suelo
A	Suelos con bajo potencial de escurrimiento por su gran permeabilidad y con elevada capacidad de infiltración, aun cuando estén húmedos. Se trata principalmente de suelos profundos y con texturas gruesas (arenosa o areno-limosa). Infiltración básica 8-12 mm/h.
B	Suelos con moderadamente bajo potencial de escurrimiento. Principalmente consisten en suelos de mediana a alta profundidad, con buen drenaje. Sus texturas van de moderadamente finas a moderadamente gruesas (franca, franco-arenosa o arenosa). Infiltración básica 4-8mm/h.
C	Suelos con moderadamente alto potencial de escurrimiento. Su textura va de moderadamente fina a fina (franco-arcillosa o arcillosa). También se incluyen aquí suelos que presenten horizontes someros bastante impermeables. Infiltración básica 1-4 mm/h.
D	Suelos muy arcillosos con elevado potencial de escurrimiento y, por lo tanto, con muy baja capacidad de infiltración cuando están saturados. También se incluyen aquí los suelos que presentan una capa de arcilla somera y muy impermeable, así como suelos jóvenes de escaso espesor sobre una roca impermeable. Infiltración básica menor a 1mm/h.

*Fuente:* (Ponce, 1989)

### **2.5.3.2 Tipo de cobertura vegetal o uso del suelo**

La condición superficial de una cuenca hidrográfica se evalúa mediante el tipo de cobertura o uso del suelo y el tratamiento del mismo. El uso de la tierra hace referencia a todo tipo de vegetación, suelos desnudos, así como usos no agrícolas tales como superficies de agua (lagos, pantanos, etc.), superficies impermeables (carreteras y similares) y áreas urbanas. El método del número de la curva de escurrimiento distingue entre áreas urbanas, tierras cultivadas, pastizales y bosques.

Para las tierras cultivadas, reconoce los siguientes usos de la tierra: barbecho, cultivos en hilera, cultivos no alineados y cultivos densos de leguminosas o prados en alternancia; para otros usos se encuentran los pastizales o pastos naturales, los prados permanentes, matorral-herbazal, combinación arbolado-herbazal, montes con pastos y los bosques (Ponce, 1989).

### **2.5.3.3 Tratamiento o forma de explotación**

Se aplica principalmente a los usos de la tierra agrícola y condiciona el número de curva. Los casos que contempla el método son los siguientes (Ponce, 1989):

- **Cubierta de residuos vegetales (CR):** Ocupan al menos el 5 % de la superficie de suelo durante todo el año.
- **Labores de la tierra (R):** En línea recta sin considerar la pendiente del terreno.
- **Cultivo según curvas de nivel (C):** Siguen las curvas de nivel. También se incluyen terrenos de pendiente inferior al 2%.
- **Terrenos en terrazas (T):** Terrazas abiertas con desagües para la conservación del suelo.

#### 2.5.3.4 *Condición hidrológica*

La condición hidrológica influye considerablemente sobre la infiltración y a su vez sobre la escorrentía; esta condición depende de factores como la densidad de la cobertura vegetal, el porcentaje de residuos vegetales que cubren la superficie del suelo y la rugosidad superficial. De esta forma, una condición hidrológica deficiente describe menos del 50% de cobertura del área. Una condición hidrológica regular es entre 50% a 75% de cobertura del área y una buena condición representa más del 75% de cobertura vegetal (Ponce, 1989)

#### 2.5.3.5 *Condición inicial de humedad del suelo*

Se refiere a la condición de humedad que tiene el suelo justo antes del aguacero que se pretende analizar. El modelo distingue tres situaciones diferentes (Ponce, 1989):

- **Condición I:** Tiene el menor potencial de escorrentía; el suelo está muy seco, pero sin llegar al punto de marchitez. Suele ser la situación ideal para realizar las labores agrícolas.
- **Condición II:** El suelo está en condición de humedad media, alejado de la capacidad de campo y del punto de marchitez permanente. Los números de curva que figuran en las tablas se refieren a esta situación. La ponderación del número de curva debe realizarse siempre en esta condición.
- **Condición III:** Tiene el mayor potencial de escorrentía; el suelo se encuentra muy húmedo, saturado o próximo a la saturación.

Los números de curva desarrollados por el SCS para diferentes combinaciones de grupos hidrológicos de suelo y coberturas vegetales se presentan en las Tablas 10 y 11:

*Tabla 10. Números de la curva de escorrentía para áreas urbanas*

Descripción de la cubierta	Números de curva para grupo de suelo hidrológico
----------------------------	--

Tipo de cubierta y condición hidrológica	% área impermeable	A	B	C	D
<b>Áreas urbanas completamente desarrolladas</b>					
<i>Espacio abierto (césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.)</i>					
Mal estado (cubierta de hierba menos del 50%)		68	79	86	89
Estado Medio (cubierta de hierba 50 a 75%)		49	69	79	84
Buen estado (cubierta de hierba mayor que 75%)		39	61	74	80
<b>Áreas impermeables</b>					
-Estacionamientos pavimentados, autopistas.		98	98	98	98
<b>Calles y caminos</b>					
-Pavimentado; curvas y alcantarillas		98	98	98	98
-Pavimentado; zanjas abiertas		83	89	92	93
-En grava		76	85	89	91
-En tierra		72	82	87	89
<b>Distritos urbanos</b>					
-Negocios y comercio	85	89	92	94	95
-Industrial	72	81	88	91	93
<b>Distritos residenciales por tamaño de lote promedio</b>					
1/8 ac. o menos	65	77	85	90	92
1/4 ac.	38	61	75	83	87
1/3 ac.	30	57	72	81	86
1/2 ac.	25	54	70	80	85
1 ac.	20	51	68	79	84
2 ac.	12	46	65	77	82
<b>Desarrollo de áreas urbanas</b>		77	86	91	94

Fuente: (Ponce, 1989)

**Tabla 11.** Números de la curva de escorrentía para tierras agrícolas

Tipo de vegetación	Tratamiento	Condición hidrológica	Números de curva para cada grupo de suelo hidrológico			
			A	B	C	D
Barbecho	Suelo desnudo	-	77	86	91	94
	CR	Pobre	76	85	90	93

	CR	Buena	74	83	88	90
Cultivos en hileras	R	Pobre	72	81	88	91
	R	Buena	67	78	85	89
	R+CR	Pobre	71	80	87	90
	R+CR	Buena	64	75	82	85
	C	Pobre	70	79	84	88
	C	Buena	65	75	82	86
	C+CR	Pobre	69	78	83	87
	C+CR	Buena	64	74	81	85
	C+T	Pobre	66	74	80	82
	C+T	Buena	62	71	78	81
	C+T+CR	Pobre	65	73	79	81
	C+T+CR	Buena	61	70	77	80
Cultivos no alineados, o con surcos mal definidos	R	Pobre	65	76	84	88
	R	Buena	63	75	83	87
	R+CR	Pobre	64	75	83	86
	R+CR	Buena	60	72	80	84
	C	Pobre	63	74	82	85
	C	Buena	61	73	81	84
	C+CR	Pobre	62	73	81	84
	C+CR	Buena	60	72	80	83
	C+T	Pobre	61	72	79	82
	C+T	Buena	59	70	78	81
	C+T+CR	Pobre	60	71	78	81
	C+T+CR	Buena	58	69	77	80
Cultivos densos de leguminosas o rotación de praderas	R	Pobre	66	77	85	89
	R	Buena	58	72	81	85
	C	Pobre	64	75	83	85
	C	Buena	55	69	78	83
	C+T	Pobre	63	73	80	83
	C+T	Buena	51	67	76	80
Pastos naturales	-	Pobre	68	79	86	89
	-	Regular	49	69	79	84
	-	Buena	39	61	74	80
Prados permanentes	-	-	30	58	71	78
Matorral-Herbazal, siendo el matorral preponderante	-	Pobre	48	67	77	83
	-	Regular	35	56	70	77
	-	Buena	30	48	65	73
Combinación de arbolado y herbazal, cultivos agrícolas leñosos	-	Pobre	57	73	82	86
	-	Regular	43	65	76	82
	-	Buena	32	58	72	79
	-	Pobre	45	66	77	83
Montes con pastos (aprovechamiento silvopastorales)	-	Regular	36	60	73	79
	-	Buena	25	55	70	77

Bosques	-	Muy pobres	56	75	86	91
	-	Pobres	46	68	78	84
	-	Regulares	36	60	70	76
	-	Buenas	26	52	63	69
	-	Muy buenas	15	44	54	61
Caseríos	-	-	59	74	82	86

*Fuente:* (Ponce, 1989)

#### 2.5.4 Infiltración

La infiltración es el proceso por el cual entra agua en la superficie del suelo. Es uno de los procesos más importantes de la superficie de la tierra, ya que controla el ciclo del agua entre las aguas superficiales y subterráneas (Horton, 1933), así como afecta el suministro de agua para el crecimiento de las plantas, transporte de solutos a aguas profundas y subterráneas y el desarrollo de la escorrentía superficial y la erosión del suelo (Jarvis, 2007).

El proceso de infiltración está dictado por las propiedades hidráulicas del suelo, como la transmisividad y conductividad hidráulica. Bajo condiciones naturales, las propiedades hidráulicas del suelo varían espacialmente a diferentes escalas y son afectadas por un rango de factores ambientales relacionados con el desarrollo de la estructura del suelo, espacio poroso y geometría, como textura del suelo, materia orgánica, actividad microbiana, raíz de la planta, labranza y manejo del suelo (Loague & Gander, 1990).

La infiltración se rige por la relación que existe entre la intensidad de la lluvia y la tasa de infiltración del suelo. Cuando la intensidad de la lluvia es mayor que la tasa de infiltración tendrá lugar la escorrentía; esta tasa de infiltración puede reducirse debido a la pérdida de la porosidad superficial, a una excesiva labranza o la pérdida de materia orgánica del suelo (FAO, 2005).

La porosidad de la superficie del suelo puede obstruirse con partículas desprendidas de los agregados de suelo bajo el impacto de las gotas de lluvia o por la deposición de esas partículas sobre la superficie del suelo formando un encostramiento o un sellado impermeable. De igual forma, la compactación causada por la labranza puede desorganizar los espacios de poros generando una zona de baja permeabilidad en la base de la capa labrada, que limita el desarrollo radicular, pero no afecta severamente la infiltración del agua (FAO, 2005).

#### 2.6 Estimación de la recarga

Cuando ocurre un evento de precipitación, el agua que infiltra se acumula en los poros del suelo para llevarlo a capacidad de campo, que es la máxima acumulación de agua que puede tener un suelo no saturado. Una vez terminado el aguacero, las plantas tomarán el agua necesaria de los

poros del suelo mediante las raíces y se llevará a cabo la evapotranspiración (Schosinsky, 2006). La humedad utilizable corresponde a la diferencia de contenido de humedad del suelo, entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, que representa aquella que puede ser almacenada en el terreno para su utilización por las plantas (Orson & Vaughn, 2003). Si la cantidad de infiltración de la lluvia es suficiente para llevar el suelo a capacidad de campo y suplir las necesidades de las plantas (humedad utilizable), el sobrante del agua que infiltra, se percola para recargar el acuífero.

La recarga es el nombre que se le da al proceso que permite que el agua alimente un acuífero, el cual ocurre de manera natural cuando la lluvia se filtra a través del suelo o roca. El área o zona donde ocurre la recarga es denominada la zona de recarga. De acuerdo al movimiento del agua en el suelo, subsuelo y manto rocoso se puede clasificar en recarga hídrica superficial, subsuperficial y subterránea (Matus Silva, 2007), siendo ésta última la que se estudiará en el presente proyecto.

Existen diferentes modelos matemáticos que permiten caracterizar el movimiento del agua en la zona no saturada, denominados modelos empíricos de retención de humedad en el suelo, con los cuales es posible determinar la curva de retención de humedad y la conductividad hidráulica del suelo. Estos modelos se dividen en exponencial, potencial, coseno hiperbólico y función error, sin embargo muchos autores utilizan la función potencial para caracterizar la retención de humedad del suelo (López Canteñs, et al., 2010). Dentro de los modelos que más se destacan se encuentran el de Van Genuchten y el de Brooks y Corey, sin embargo según López et al. (2010), al evaluar los modelos por medio del software RECT, obtuvo que el de Van Genuchten con la condición de  $m = 1 - 1/n$ , es el que mejor se ajusta a la realidad, evidenciado en más de 200 curvas de tensión de humedad obtenidas tanto in situ como en laboratorio, para suelos de diversas texturas.

El software RETC es un programa desarrollado con base al código SOHYP, que describe las propiedades hidráulicas de los suelos, utilizando los modelos paramétricos de Brooks-Corey (1964) y Van Genuchten (1980) para representar la curva de retención de agua del suelo y los modelos teóricos de distribución de poros de Mualem y Burdine para predecir la función de conductividad hidráulica. Dichas propiedades hidráulicas son parámetros clave en cualquier descripción cuantitativa del flujo de agua hacia y a través de la zona insaturada de los suelos, lo cual puede ser utilizado para adaptar varios modelos analíticos a la retención de agua observada (Van Genuchten, et al., 1991). De esta forma en el presente estudio se utilizó dicho software con el modelo Van Genuchten bajo la condición  $m = 1 - 1/n$  para la estimación de los valores de capacidad de campo y de punto de marchitez permanente, ya que al poseer una zona de estudio amplia, no era posible realizar suficientes muestreos en campo para que los valores determinados fueran significativos.

### 3. Materiales y Métodos

Se recopiló la información necesaria para el desarrollo del estudio, de las bases de datos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), del Servicio Geológico Colombiano (SGC) y de la Corporación Autónoma del Alto Magdalena (CAM). Además se obtuvo el modelo de elevación digital (DEM) de la zona de estudio, del Alaska Satellite Facility a partir del servidor Alos Palsar, con una resolución de 12.5 metros.

Se utilizaron las planchas 323-IV-A y 323-IV-B más recientes elaboradas por la CAM (2016) a escala 1:25.000 para el reconocimiento de la geología, edafología, cobertura vegetal y demás factores influyentes en la coeficiente de sinuosidad, área aferente de la cuenca, ancho medio, coeficiente de forma, coeficiente de compacidad, curva hipsométrica, altura media de la cuenca y pendiente media.

**3.1 Determinación de las zonas de recarga:** Dando uso del mapa geológico de la cuenca río del Oro, se seleccionaron las áreas de afloramiento del acuífero Gigante medio (NgQgm) como zonas de recarga.

**3.2 Selección y análisis de la información meteorológica:** De la base de datos del IDEAM se obtuvo la información meteorológica disponible en cada estación a escala mensual. Para la selección de las estaciones a utilizar, se tuvieron en cuenta: la cercanía a la zona de estudio y que el registro de datos de la misma contara con un mínimo de 30 años de datos consecutivos. Posterior a la selección de las estaciones, se realizó un análisis de homogeneidad a la información adquirida por medio de diagramas de caja y bigotes dando uso del software Statgraphics. Luego de dicho análisis se dio uso del método IDW para el completamiento de datos faltantes.

**3.3 Calculo de la precipitación media:** Se determinó siguiendo la metodología de las isoyetas y a partir de los datos mensuales multianuales calculados para 7 estaciones individualmente, los cuales fueron interpolados por medio de la herramienta IDW del software ArcGis versión 10.1, para graficar las isoyetas de la cuenca río del Oro. Para la determinación de la precipitación media de la formación, se emplearon las mismas isoyetas generadas anteriormente, sin embargo se tuvieron en cuenta únicamente las isolíneas presentes en el área de afloramiento de la formación.

**3.4 Estimación de la evapotranspiración:** Se seleccionó el método del tanque evaporímetro tipo A para determinar la evapotranspiración potencial; al contar solamente con mediciones de dicho parámetro en la estación Aeropuerto y Juncal, estos valores se promediaron y multiplicaron por el factor del tanque ( $K_{pan}$ ), obteniendo de esta manera la evapotranspiración potencial mensual de la cuenca río del Oro. Para la estimación de la evapotranspiración real de la misma, se determinó el coeficiente del cultivo ( $K_c$ ) ponderado teniendo en cuenta los diferentes tipos coberturas presentes en la zona de estudio y las áreas correspondientes para cada caso. Por su parte para la estimación de la evapotranspiración real de la formación, se utilizó el mismo valor de evapotranspiración potencial de la cuenca y se calculó el  $K_c$  ponderado de las coberturas vegetales presentes únicamente en las áreas de afloramiento.

**3.5 Estimación de la escorrentía:** Se realizó a partir del método del ‘número de curva’, desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS), cuyo objetivo es calcular un umbral de escorrentía a través de un número hidrológico o número de curva. Para llevar a cabo este cálculo, fue necesario identificar el tipo de suelo y cobertura vegetal presente en la cuenca. De igual forma, para determinar la escorrentía de la formación Gigante Medio, se empleó esta metodología.

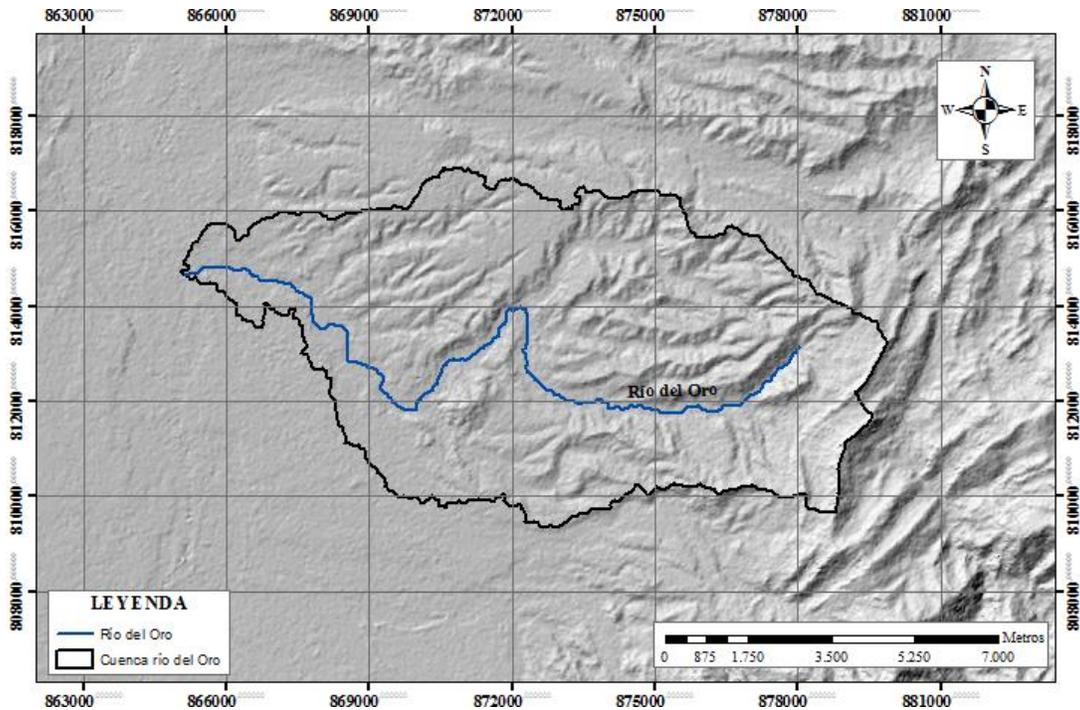
**3.6 Construcción del balance hídrico:** Corresponde a la representación matemática de los componentes del ciclo hidrológico, donde se entiende que las entradas al sistema solamente se dan por medio de la precipitación (omitiendo flujos horizontales y el agua de riego), y las salidas por medio de la evapotranspiración y el escurrimiento superficial. Por lo tanto se tuvieron en cuenta los valores resultantes de la precipitación media, evapotranspiración real y escorrentía, para la determinación del agua que realmente se infiltra en el suelo para cada caso (cuenca río del Oro y formación Neogeno Gigante Medio presente en la cuenca).

**3.7 Estimación de la recarga de la formación Gigante Medio:** Determinada a partir de los milímetros de agua resultantes del balance hídrico y de los milímetros de agua que retiene el suelo para el aprovechamiento de las plantas, donde la diferencia entre dichos factores corresponde al valor aproximado de agua que finalmente se percola para recargar el acuífero.

Por medio del software RECT y el modelo empírico de Van Genuchten con la condición  $m=1-1/n$ , se determinaron las curvas de retención de humedad de los diferentes tipos de suelos presentes en el área de afloramiento de la formación Gigante medio, obteniendo de esta manera los valores de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) para cada tipo. Para lograr consistencia en las unidades resultantes del balance hídrico (mm), fue necesario convertir las humedades del suelo a milímetros de agua. Para esto, se usó la metodología propuesta por Schosinski (2006), que establece que al multiplicar el porcentaje de humedad de un tipo de suelo por su densidad aparente, es posible determinar el porcentaje humedad (bien sea CC o PMP) por volumen. Seguidamente se estimaron los milímetros de agua correspondientes a la humedad aprovechable del suelo, teniendo en cuenta la profundidad radicular de la vegetación presente en la formación Gigante Medio.

## 4. Resultados y discusión

En éste capítulo se presentan los resultados obtenidos en el balance hídrico de la cuenca del río del Oro y la recarga de la formación Neógeno Cuaternario Gigante (NgQgi). El área de estudio corresponde a la cuenca del río del Oro, que se delimitó según parámetros hidrográficos y geomorfológicos, como se observa en la Figura 2.



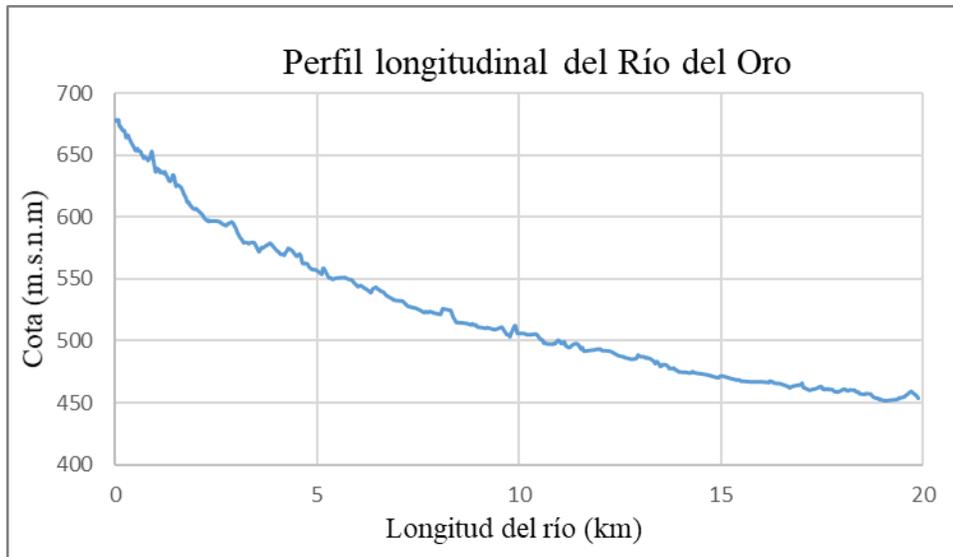
*Figura 2. Delimitación de la cuenca del río del Oro  
Fuente: (NASA, 2018), editado por Castañeda N. & Muñoz M.*

### 4.1 Características morfométricas de la cuenca río del Oro

El río del Oro, que corta la ciudad de Neiva en su parte oriental, posee una cuenca de aproximadamente  $70 \text{ km}^2$  (7000 Ha) que se sitúa entre las cuencas del río Las Ceibas y la cuenca del río Frío. En ella, se encuentran importantes quebradas que abastecen y que han sido fuente importante para algunas veredas del municipio.

El área de estudio de la cuenca del río del Oro es de  $70.88 \text{ Km}^2$ , por lo que se clasifica como una microcuenca según Reyes Trujillo et al. (2010), esta posee un perímetro de 45.43 km y un ancho promedio de 4.76 km. La cuenca tiene una longitud axial de 14.9 km, es decir la distancia del punto de aforo al de mayor altura, en dirección horizontal hasta llegar al límite de la cuenca. El coeficiente de sinuosidad es de 1.5, lo que indica que el cauce no tiene una alineación recta a lo largo de su recorrido desde su nacimiento hasta su desembocadura. De acuerdo con Monsalve

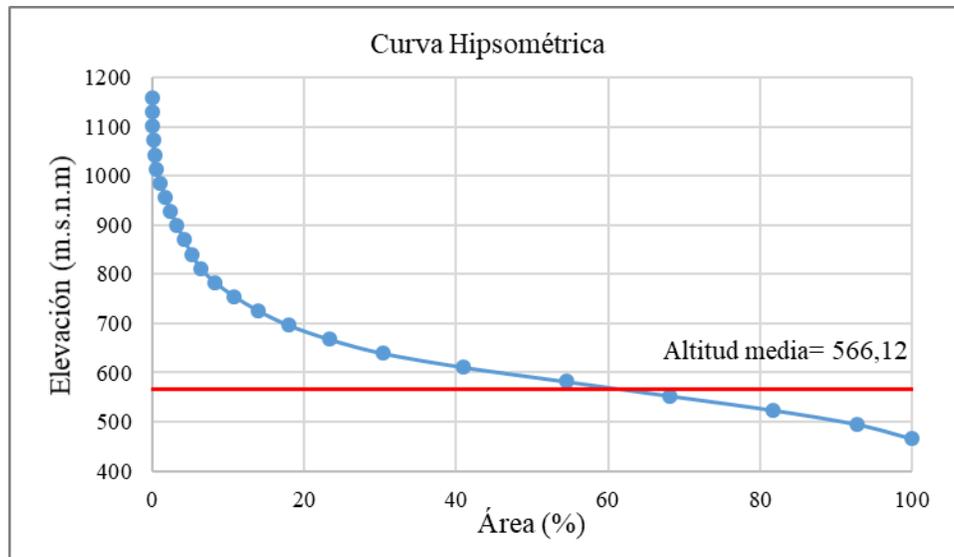
(1995), los valores menores de 1.25 indica baja sinuosidad, es decir, cauce rectilíneo que se caracteriza normalmente por una baja actividad de ensanchamiento y alta actividad incisiva.



*Figura 3. Perfil Longitudinal del Cauce Principal*

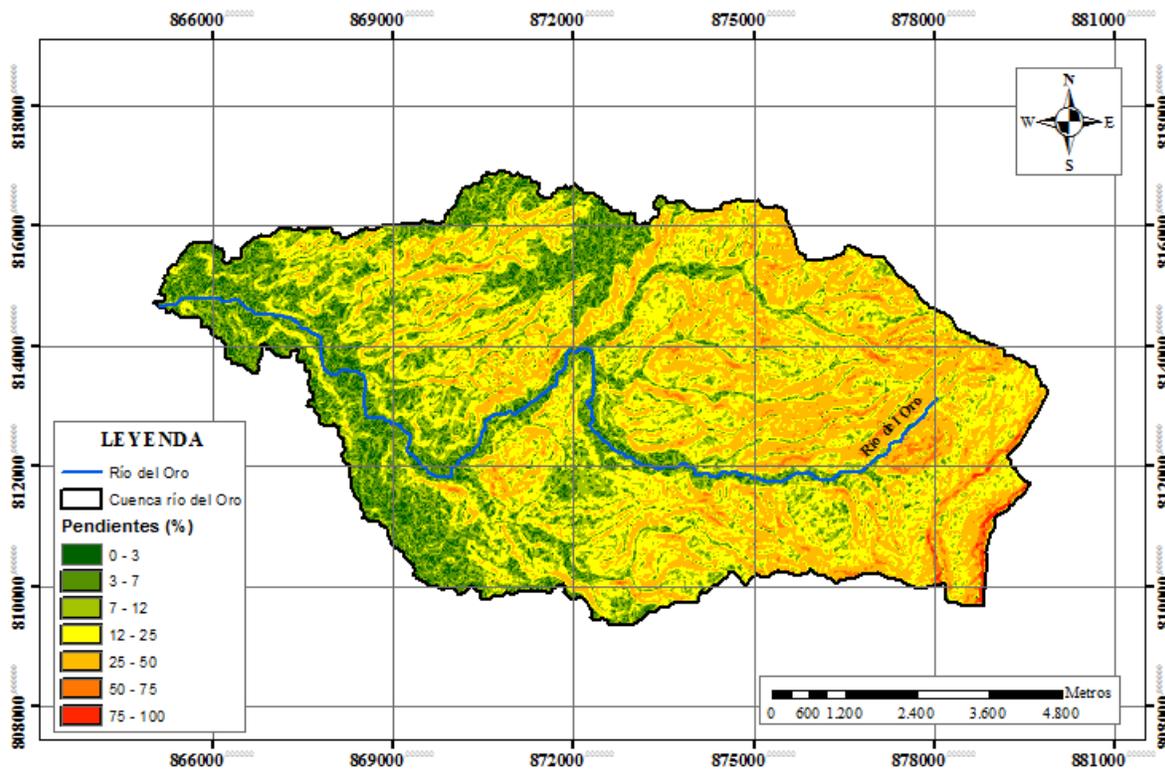
La altura media de la cuenca es de 566.12 m.s.n.m; posee un índice de forma de 0.32, lo que significa que la cuenca es de forma ligeramente alargada, es decir, tiene la capacidad de dispersar el escurrimiento de lluvias intensas y está menos sujeta a crecientes, debido a su bajo factor de forma. El coeficiente de compacidad de la cuenca es de 1.51, lo que indica que la cuenca tiene una forma oval oblonga a rectangular oblonga según la clasificación de la tabla 3.

La figura 4 muestra la curva hipsométrica de la cuenca, que representa todas las elevaciones presentes en la misma.



*Figura 4. Curva Hipsométrica*

La pendiente promedio ponderada de la cuenca es del 17%, como se evidencia en el mapa de pendientes de la Figura 5.



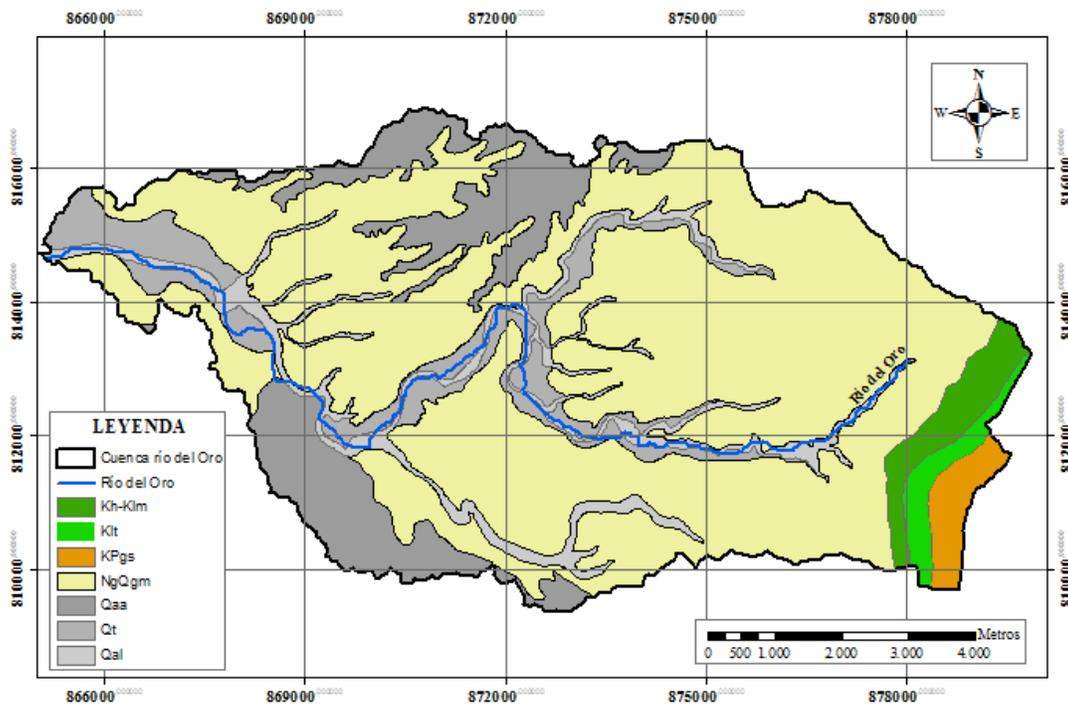
*Figura 5. Mapa de pendientes de la cuenca río del Oro.*

## 4.2 Identificación de las zonas de recarga

Se identificaron las zonas de recarga del acuífero, las cuales corresponden a los lugares en los que aflora la formación Neógeno Cuaternario Gigante medio (NgQgi), que abarcan una extensión de 46.76 km<sup>2</sup>. Ésta información se complementó con salidas de campo en puntos específicos de la cuenca, que permitieron establecer de manera más precisa los límites entre las diferentes unidades acuíferas.

### 4.2.1 Geología de la cuenca río del Oro

La geología de la zona de estudio es el factor fundamental para definir las zonas de recarga. Para ello, se tomó como base el mapa geológico más reciente, que fue elaborado por la CAM (2016) a escala 1:25.000, como se presenta en la Figura 7.



**Figura 6.** Mapa geológico de la cuenca río del Oro a escala 1:25.000  
**Fuente:** (CAM, 2016)

Con base en la información proporcionada en éste mapa, se realizó un reconocimiento geológico a partir de visitas en campo, donde se identificaron algunos puntos de la formación Gigante, los cuales coinciden con las áreas de afloramiento presentes en el mapa geológico de la CAM. A continuación, se describen los puntos visitados.

**Tabla 12. Puntos visitados en campo de la cuenca río del Oro**

No.	Descripción	Imagen
1	<p>Km. 4 vía San Antonio. Bajada Careperro. Cambio de formación cuaternaria a Gigante. Afloran conglomerados de ambiente torrencial con intercalaciones de arena cuarzosa de grano medio. (Escombrera La estrella). Se observa leve inclinación de las capas sedimentarias, cuyos valores son cercanos a los 15°.</p>	
2	<p>Km. 9 vía San Antonio. Depósitos conglomeráticos de origen torrencial. Remanentes muy delgados de los depósitos cuaternarios antiguos que no fueron disectados.</p>	
3	<p>Afloramiento de areniscas conglomeráticas con intercalaciones de areniscas de grano medio pertenecientes a la formación Gigante.</p>	
4	<p>Afloramiento típico de la formación Gigante. Se observa en la parte superior una capa de areniscas conglomeráticas y en la parte inferior una capa de areniscas de grano medio.</p>	

5	Afloramiento típico de la formación Gigante. Se observa en la parte media una capa de areniscas de grano medio, y en la parte superior e inferior areniscas conglomeráticas.	
---	--	--

### 3.2.2 Sondeos Eléctricos Verticales

Con el ánimo de conocer la geología del subsuelo, se analizaron los resultados de los Sondeos Eléctricos Verticales realizados en el área de estudio, debido a que no fue posible acceder a la información de los registros eléctricos de los pozos que fueron perforados dentro de la cuenca (pozos Tigre 1 y Tigre 2). El análisis de los SEV permitió llegar a un perfil representativo, que se muestra en la Figura 7. En dicho perfil, se observan claramente las tres capas que componen la formación Gigante, acuífero objetivo del presente estudio. Igualmente, se evidencian las formaciones suprayacentes (Formaciones cuaternarias) y las formaciones subyacentes (Formación Neiva y Honda), cuyas arenas constituyen acuíferos importantes para la ciudad de Neiva.

PERFIL A-A'

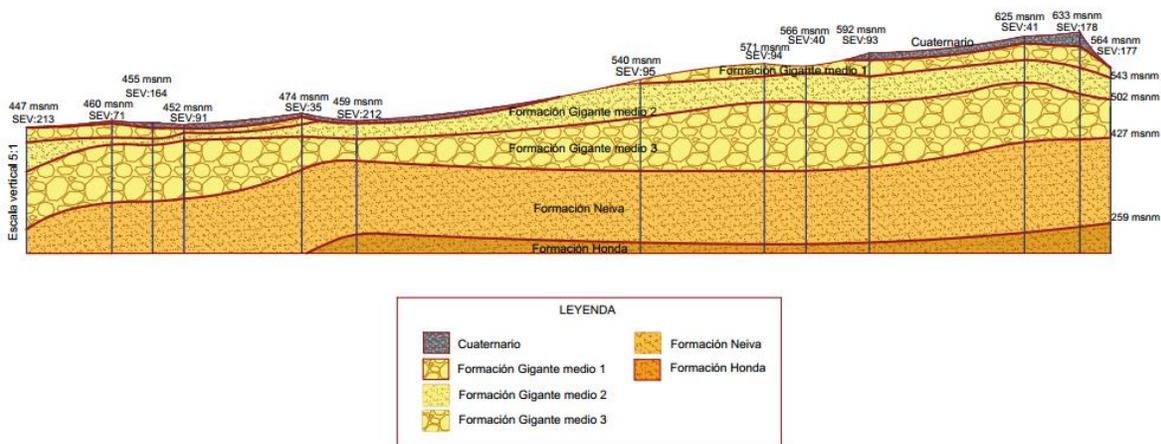


Figura 7. Perfil representativo de la cuenca río del Oro a partir de SEV.

A continuación, se describen las unidades geológicas que fueron evidenciadas en el área de estudio mediante las salidas de campo.

#### 4.2.1.1 Unidad cuaternaria (Q)

En la cuenca río del Oro afloran varios tipos de depósitos cuaternarios, los cuales se clasifican según su composición en sedimentarios de origen fluvial a fluviotorrencial; en la zona de estudio, éstos depósitos se denominan: Abanicos antiguos (Qaal), Terrazas recientes (Qt) y Depósitos Aluviales (Qal). Todas las unidades en general, están litológicamente compuestas por intercalaciones de gravas de diferente granulometría y grado de meteorización, arenas gruesas, limos y arcillas; las gravas poseen forma redondeada a angular, son embebidas en matriz arenarcillosa. Estos depósitos poseen porosidad primaria y capacidad para almacenar y transmitir cantidades variables de agua y conforman acuíferos libres.

La unidad Qaal es una unidad seca que aflora en la parte alta de la zona urbana de Neiva y se extiende hacia el este hasta el Anticlinal El Tigre, y constituye una extensa zona de recarga de los acuíferos subyacentes de la formación Gigante (NgQgi). Los depósitos aluviales (Qal) y las terrazas recientes (Qt) poseen un nivel freático somero, que varía estacionalmente por los cambios de nivel en las quebradas y ríos presentes en el área de estudio, debido a la interconexión hidráulica existente entre dichas corrientes y las terrazas y/o depósitos aluviales. Estos depósitos están compuestos por gravas, arenas y limos, que se unen para formar un sólo acuífero, con un espesor de 30 a 80 m, pues no existen capas impermeables que los separen.

#### **4.2.1.2 Formación Gigante Medio (NgQgm)**

Esta unidad infrayace a la unidad cuaternaria y suprayace la formación Neiva. Aflora extensivamente en el área de estudio y la zona urbana de Neiva, y está compuesta litológicamente de una alternancia de niveles de areniscas tobáceas, conglomerados y arcillolitas, lo cual da lugar a la existencia de distintos niveles de acuíferos separados por acuitardos dentro de la misma unidad. La base de esta unidad se encuentra a un promedio de 180m de profundidad y tiene un espesor de aproximadamente 150m; sin embargo, los registros eléctricos de algunos pozos petroleros de los campos Tello, Pijao y La Jagua indican que el espesor de ésta formación es de aproximadamente 300m.

Las rocas de esta formación tienen un plegamiento suave, lo que ha dado origen a un sistema de anticlinales y sinclinales con ejes orientados paralelamente al río Magdalena, que sirven como una trampa que favorece el almacenamiento del agua; los ángulos de los pliegues no sobrepasan los 15 grados.

### **4.3 Características hidráulicas de los acuíferos**

### **4.3.1 Acuífero cuaternario**

Este acuífero es captado por numerosos aljibes que abastecen pequeños objetivos tales como, gasolineras, estaciones para lavado de carros, colegios y otras instalaciones, cuyos caudales varían entre 0,2 y 7 lps. Existen algunos manantiales en contacto con el Gigante Medio, de tipo descendente, con caudales de 0.1-1.4 lps. En los sectores en donde el acuífero está conectado a los ríos, pueden obtenerse considerables caudales de agua superficial, filtrada a través de los materiales aluviales y las terrazas.

### **4.3.2 Acuífero Gigante Medio**

La parte más promisoría del acuífero, por ser la más arenosa y conglomerática, es su parte central, en donde pueden obtenerse las más altas capacidades específicas del mismo. De acuerdo con los datos de siete pruebas de bombeo realizadas por la CAM, las características hidrogeológicas del acuífero pueden resumirse así: capacidad específica entre 0,2 y 2,0 lps/m, transmisividades entre 28 y 138 m<sup>2</sup>/día y coeficientes de almacenamiento entre 0,02 y 0,0005, es decir típicos de acuífero libre a semiconfinado. Las aguas de este acuífero son dulces, predominantemente Bicarbonatadas Cálcidas, con conductividad eléctrica entre 100 y 500 µS/cm y pH cercano a la neutralidad. Las características fisicoquímicas la hace un agua potable.

El espesor del acuífero es de aproximadamente 150 m y en sus partes más bajas, los pozos que lo captan no han penetrado más de 200 m dentro del mismo. Los niveles estáticos registrados oscilan entre 5 y 35 m de profundidad. El acuífero tiene carácter semiconfinado, excepto en algunos sectores de afloramiento en donde es libre.

## **4.4 Balance hídrico**

Los resultados de precipitación, evapotranspiración y escorrentía, variables que conforman el balance hídrico, se presentan de manera detallada en el presente apartado.

### **4.4.1 Precipitación**

Según García et al. (2012), Colombia tiene regímenes de precipitación y de variabilidad climática muy significativos a lo largo y ancho del país. Para la región Andina, los regímenes de precipitación tienen una tendencia bimodal, el cual se caracteriza por presentar dos periodos lluviosos intercalados por uno seco, donde los niveles de lluvia están influenciados directamente por las condiciones del terreno y la altitud.

#### 4.4.1.1 Análisis exploratorio

Dentro de las estaciones presentes en la zona se seleccionaron 7 que cumplieron con los criterios establecidos, de las cuales 3 son estaciones pluviométricas (PM), 2 pluviográficas (PG), una climatológica ordinaria (CO) y una sinóptica secundaria (SS). En la Tabla 13 se presentan las estaciones mencionadas anteriormente con su respectiva información.

*Tabla 13. Estaciones del IDEAM seleccionadas para el estudio.*

Nombre Estación	Código	Latitud (N)	Longitud (W)	Elevación (msnm)	Categoría	Estado
Aeropuerto	21115020	2° 56" 55.5'	75° 17" 35'	439	SS	Activa
El Juncal	21095010	2° 49" 43.7'	75° 19" 52.2'	460	CO	Activa
Gironda	21110430	2° 54" 22'	75° 7" 13.6'	1060	PG	Activa
Guadual	21110440	2° 47" 44,4'	75° 14" 21.4'	735	PM	Activa
Hato Bogotá	21110180	3° 2" 9.7'	75° 9" 34.9'	591	PM	Activa
Hato Milagro	21110040	3° 4" 29.6'	75° 10" 6.3'	548	PM	Activa
Santa Helena	21110400	2° 51" 4.09'	75° 6" 29.5'	1160	PG	Activa

En la Figura 8 se muestra la ubicación de cada una de las estaciones; allí se evidencia que no hay estaciones dentro de la zona de estudio, por lo cual es posible que se sobreestimen o subestimen algunas variables climatológicas.

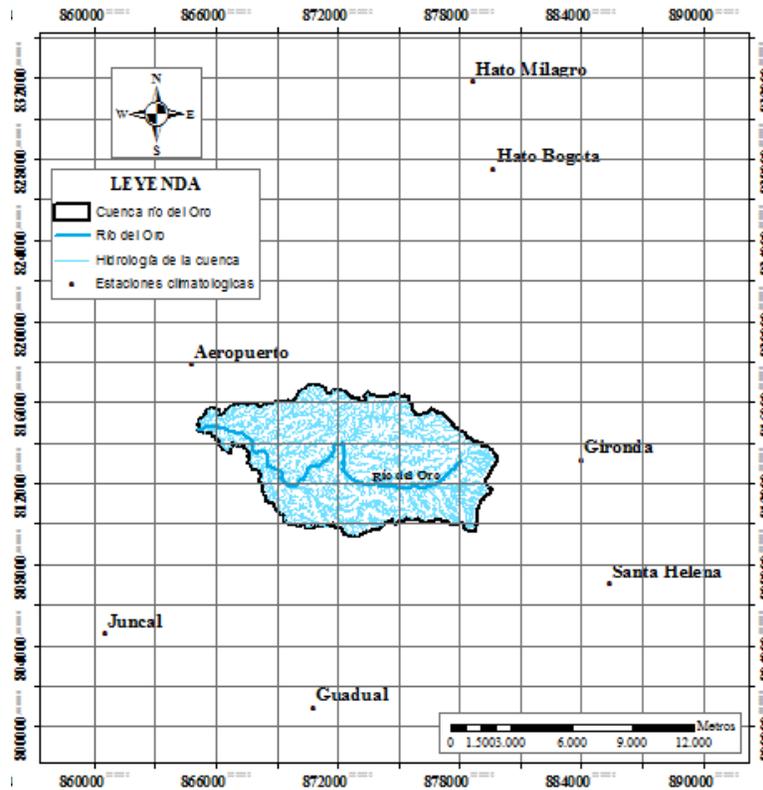


Figura 8. Mapa de ubicación de las estaciones climatológicas.

En la Tabla 14 se presentan las variables utilizadas en el proyecto para la estimación de la recarga del acuífero y el porcentaje de datos faltantes de las mismas. Las estaciones que no poseen registros de algunas variables se marcan con un guion.

Tabla 14. Porcentaje de datos faltantes de las estaciones seleccionadas (1987-2016)

Nombre Estación	Rango de tiempo	% Datos faltantes					
		Precipitación	Evaporación Tanque A	Humedad Relativa	Brillo Solar	Temperatura Media	Velocidad del Viento
Aeropuerto	1987-2016	0.6	3.9	1.3	0	0	17.2
El Juncal	1987-2016	4.4	9.7	25.6	6.9	2.5	-
Gironda	1987-2016	1.4	-	-	-	-	-
Guadual	1987-2016	0.6	-	-	-	-	-
Hato Bogotá	1987-2016	1.7	-	-	-	-	-
Hato Milagro	1987-2016	1.1	-	-	-	-	-
Santa Helena	1987-2016	2.8	-	-	-	-	-

### 3.4.1.1.1 Diagramas de caja y bigotes

En la Figura 9 se presentan los diagramas de caja y bigotes para los datos de precipitación de los 30 años de cada estación; allí es posible observar la simetría y dispersión de los datos. Las líneas rojas ubicadas dentro del cuerpo de la caja representan la mediana de la distribución de los datos así como el comienzo del segundo cuartil. En los diagramas de todas las estaciones se observa que la línea no se encuentra en la mitad de la caja, lo que significa que los datos son asimétricos. Por su parte, el límite inferior de la caja corresponde al primer cuartil, en el cual se encuentran los datos de precipitación superiores al 25% de los valores de distribución, mientras que el límite superior corresponde al tercer cuartil, donde se encuentran los superiores al 75% de los valores de la distribución total (Moros Vivas, 2010). Los asteriscos representan los datos atípicos para cada conjunto de datos. Para el conjunto de datos de la estación Juncal no hay presencia de datos atípicos.

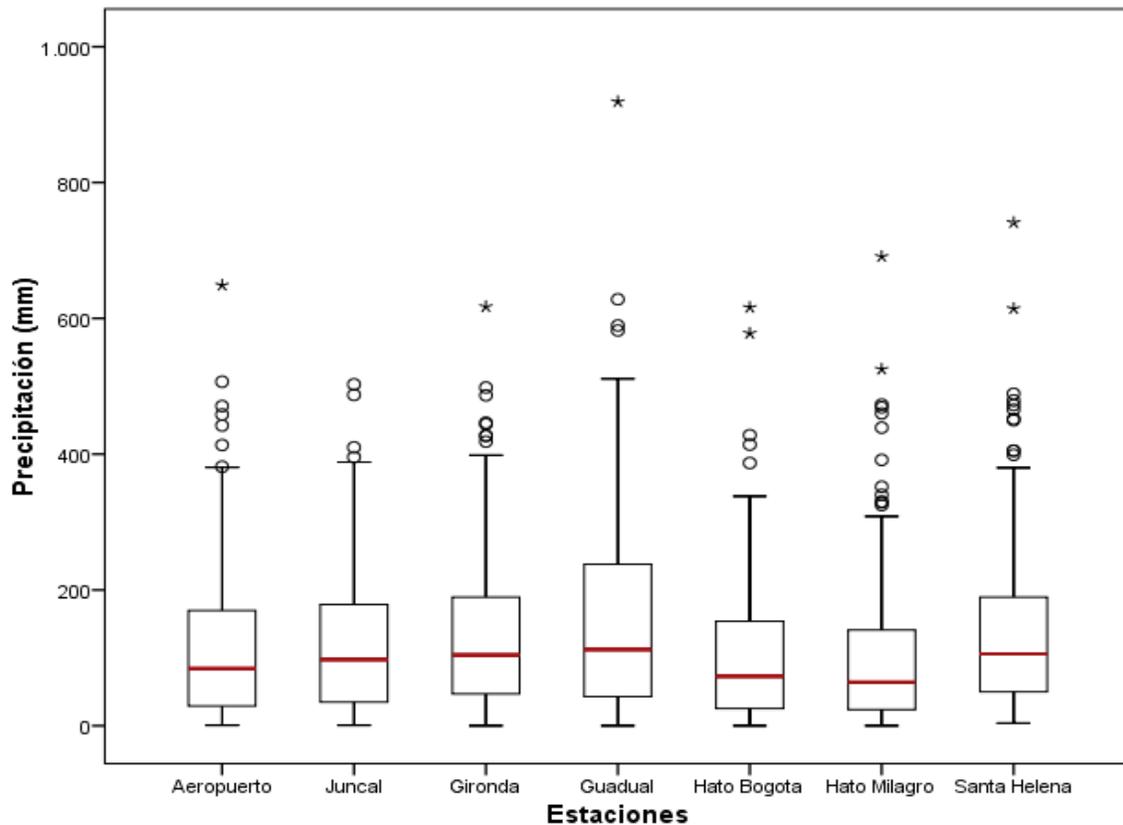


Figura 9. Box-plots para los datos de precipitación de las estaciones seleccionadas

La variación de los rangos de precipitación que se evidencia en los diagramas de caja se explica por la elevación a la que se encuentra cada estación y la existencia del óptimo pluviográfico. Las zonas bajas reciben menos lluvia porque son menos beneficiadas del ascenso orográfico y son afectadas por la evaporación de la lluvia que cae desde la base de las nubes, mientras que las zonas que se encuentran por encima del óptimo pluviográfico, presentan una disminución de la

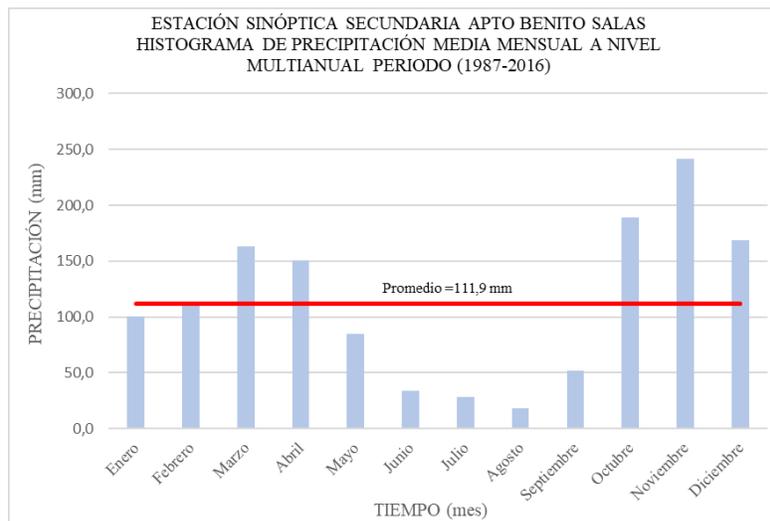
precipitación debido a la disminución de la humedad del aire con la altura a escala global y a la cantidad de agua precipitable en las nubes convectivas a escala local (Velez, et al., 2000).

A continuación, se presentan los histogramas de precipitación mensual multianual para cada estación, obtenidos a partir de los datos ya tratados.

#### 4.4.1.2 *Histogramas*

En general se presenta una distribución de dos periodos máximos o periodos lluviosos en los meses de marzo a abril y de octubre a diciembre sobrepasando los 100 mm de precipitación mensual y dos periodos mínimos de precipitación (inferior a los 100 mm) de enero a febrero y junio a agosto (Poveda, 2004).

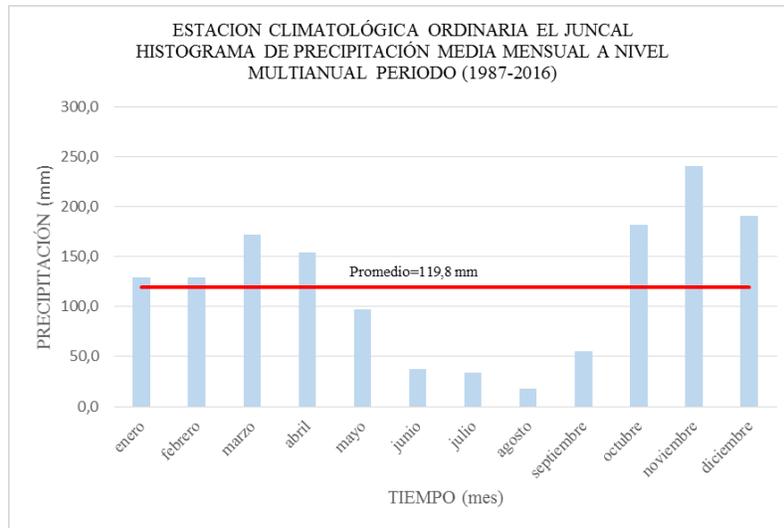
En la Figura 10 se presenta el histograma para la estación sinóptica secundaria Apto Benito Salas ubicada a 439 msnm; su precipitación media anual a nivel multianual calculada del año 1987 a 2016 es de 111.9 mm, variando desde 17.94 mm para el mes de agosto hasta 241.79 mm para el mes de noviembre, obteniendo un total anual a nivel multianual de precipitación de 1342.89 mm. Se evidencia la presencia del régimen de precipitación bimodal a lo largo del año, donde el periodo lluvioso se presenta en los meses de febrero a abril y de octubre a diciembre y la época de estiaje que interrumpe los periodos lluviosos ocurre en el mes de enero y entre los meses de mayo a septiembre.



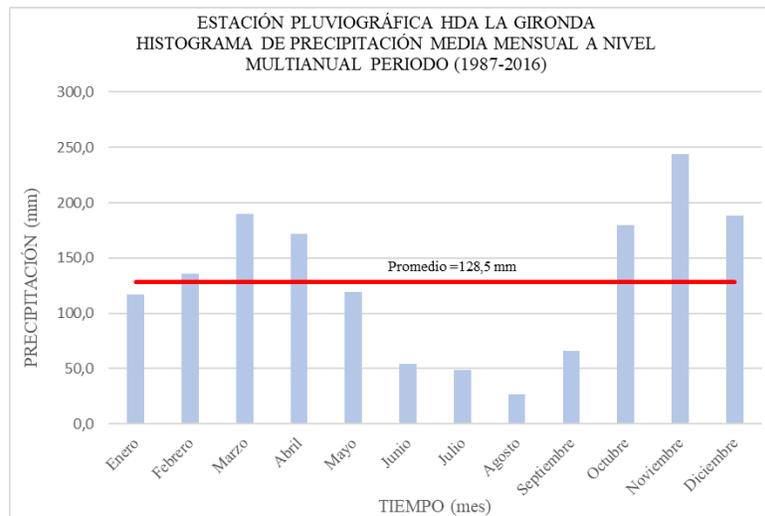
**Figura 10.** Histograma de precipitación media mensual multianual para la estación sinóptica secundaria Apto Benito Salas, periodo 1987-2016.

El histograma de precipitación de las otras estaciones presenta, de igual manera, el régimen de precipitación bimodal donde la época de estiaje ocurre en el mes de enero y entre los meses de

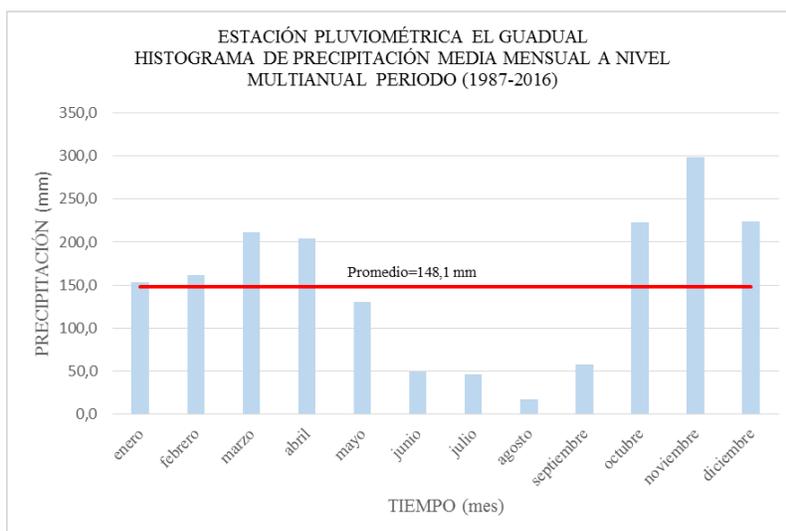
mayo a septiembre. A continuación, se muestran los histogramas de las estaciones El Juncal, La Gironda, El Guadual, Hato Bogotá, Hato Milagro y Santa Helena.



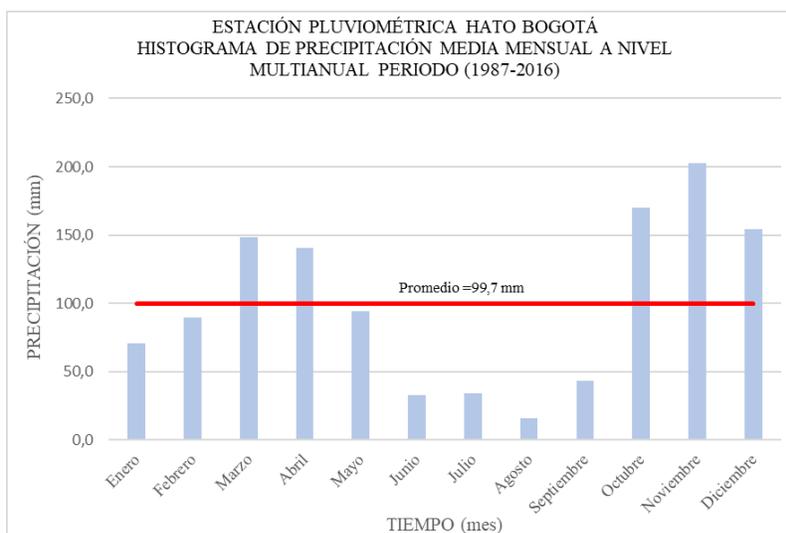
**Figura 11.** Histograma de precipitación media mensual multianual para la estación climatológica ordinaria Juncal, periodo 1987-2016.



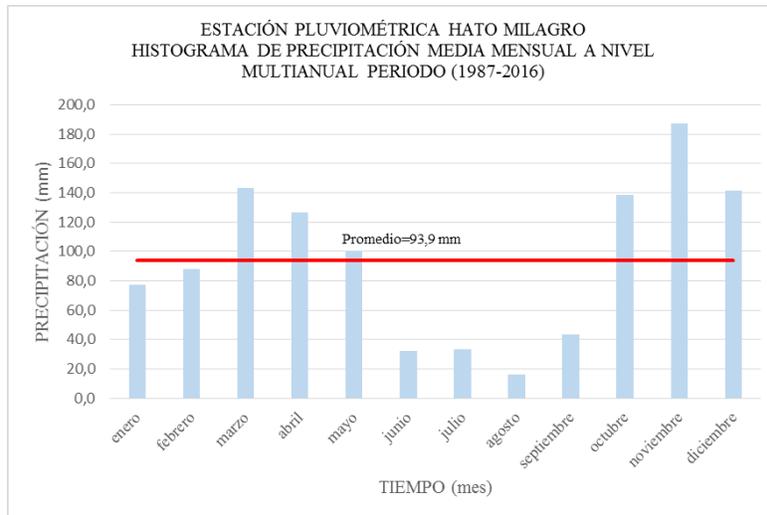
**Figura 12.** Histograma de precipitación media mensual multianual para la estación pluviográfica la Gironda, periodo 1987-2016.



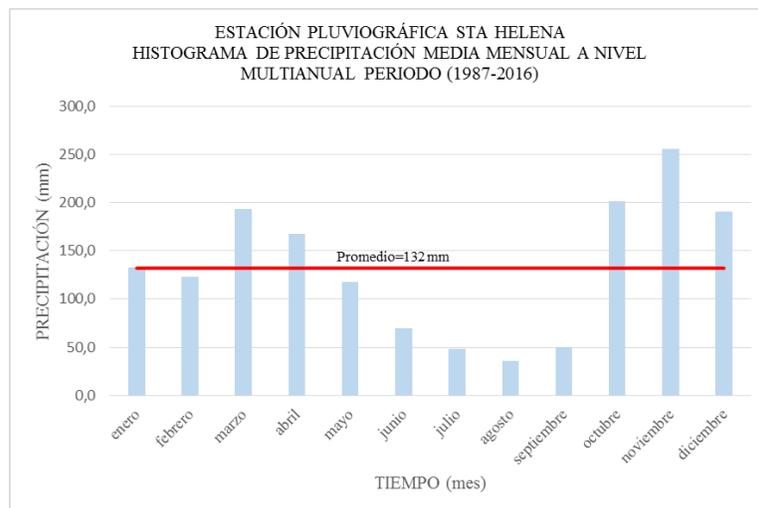
**Figura 13.** Histograma de precipitación media mensual multianual para la estación pluviométrica el Guadual, periodo 1987-2016.



**Figura 14.** Histograma de precipitación media mensual multianual para la estación pluviométrica Hato Bogotá, periodo 1987-2016.



**Figura 15.** Histograma de precipitación media mensual multianual para la estación pluviométrica Hato Milagro, periodo 1987-2016.



**Figura 16.** Histograma de precipitación media mensual multianual para la estación pluviográfica Sta. Helena, periodo 1987-2016.

#### 4.4.1.3 Precipitación media de la cuenca

La propuesta inicial para la determinación de la precipitación media de la cuenca y de la formación Gigante se estableció por dos metodologías: isoyetas y polígonos de Thiessen. Sin embargo, al utilizar la herramienta del software ArcGis para el trazo de los polígonos de Thiessen, se generó un polígono que abarcaba más del 70% de la cuenca, es decir, la precipitación de gran parte de la cuenca estaba regida por la precipitación de estaciones lejanas, ya que no había presencia de estaciones climatológicas con registro de datos significativos dentro de la zona de estudio. Por lo

anterior, la precipitación media de la cuenca y de la formación fue determinada únicamente por el método de isoyetas.

La precipitación media mensual de la cuenca se determinó a partir de los datos de precipitación mensual multianual calculados para las 7 estaciones individualmente, los cuales fueron interpolados para la obtención de las isoyetas de la cuenca por medio de la herramienta IDW del software ArcGis versión 10.1. La herramienta que corresponde al modelo IDW, cumple con la primera ley de la geografía o principio de autocorrección espacial, la cual indica que todas las variables están relacionadas entre sí pero las más próximas en el espacio tienen una relación mayor que las distantes (Londoño, et al., 2014).

El intervalo definido para la generación de las isoyetas fue de 2 mm con el fin de observar de una manera más detallada la distribución de la precipitación a lo largo del área de estudio. Posterior a la obtención de las isoyetas, se calculó la precipitación media de la cuenca teniendo en cuenta la precipitación media entre cada par de líneas y el área que se generaba entre las mismas. Para la determinación de la precipitación media de la formación Gigante Medio, se tuvo en cuenta solamente el área de afloramiento la formación, la cual corresponde al 66% del área total de la cuenca. En la Tabla 15 se presentan los valores de precipitación media obtenidos.

*Tabla 15. Precipitación media mensual*

Mes	Precipitación media cuenca río del Oro (mm)	Precipitación media Formación Gigante medio en la cuenca (mm)
Enero	114,46	114,72
Febrero	125,06	125,34
Marzo	178,59	179,16
Abril	163,24	163,67
Mayo	104,36	105,27
Junio	44,73	45,33
Julio	38,38	38,91
Agosto	21,90	22,21
Septiembre	55,28	55,49
Octubre	188,90	188,67
Noviembre	247,09	246,98
Diciembre	182,85	183,19

La variación evidenciada en la tabla anterior entre la precipitación media de la cuenca y de la formación Gigante Medio, se debe a que ésta última presenta dentro de su área una menor proporción de isoyetas con precipitación baja y una proporción similar de áreas de precipitación

alta respecto a las de la cuenca. A continuación, se presentan las isoyetas mensuales para la zona de estudio de la cuenca río del Oro y para la formación Gigante Medio, donde se clasifican las precipitaciones según la escala de colores de la Tabla 16.

**Tabla 16.** Escala de colores para los rangos de precipitación (mm) presentes en las isoyetas

Color	Rangos de Precipitación (mm)	Color	Rangos de Precipitación (mm)
	10 – 20		130 – 140
	20 – 30		150 – 160
	30 – 40		160 – 170
	40 – 50		170 – 180
	50 – 60		180 – 190
	60 – 70		190 – 200
	80 – 90		200 – 210
	90 – 100		230 – 240
	100 – 110		240 – 250
	110 – 120		250 – 260
	120 – 130		260 - 270

En dichos mapas se observa un comportamiento de régimen bimodal de la precipitación media de la cuenca y su distribución en la misma, en donde los meses de marzo, abril, octubre y noviembre corresponden a las épocas de mayor precipitación , mientras en junio, julio y agosto se presentan rangos menores a 100mm. De igual forma, se observa una tendencia de mayor precipitación para las zonas más cercanas a la cordillera oriental, es decir, al este de la cuenca.

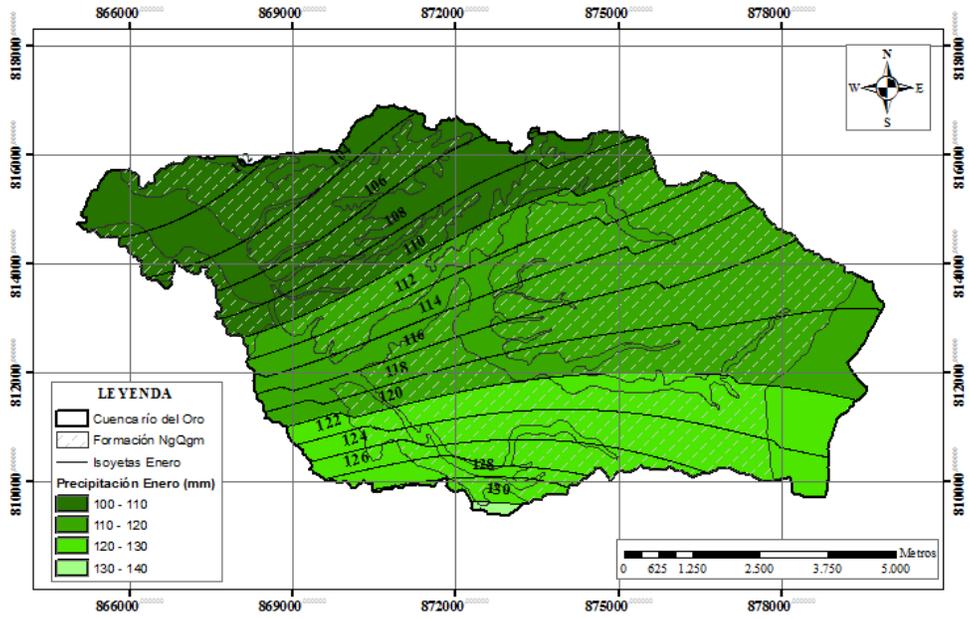


Figura 17. Mapa de isoyetas del mes de enero de la cuenca río del oro.

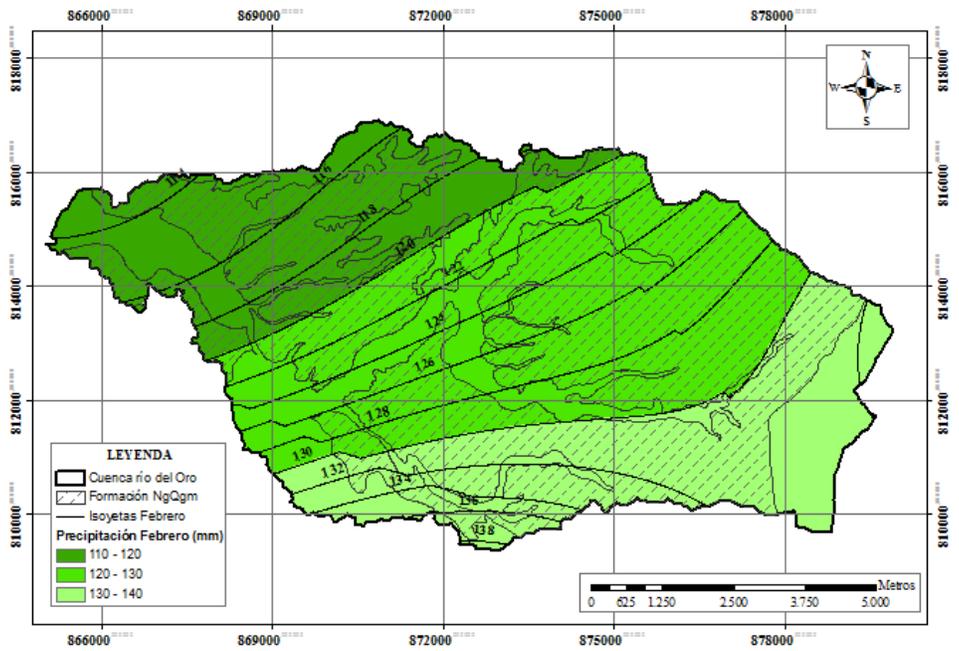


Figura 18. Mapa de isoyetas del mes de febrero de la cuenca río del oro.

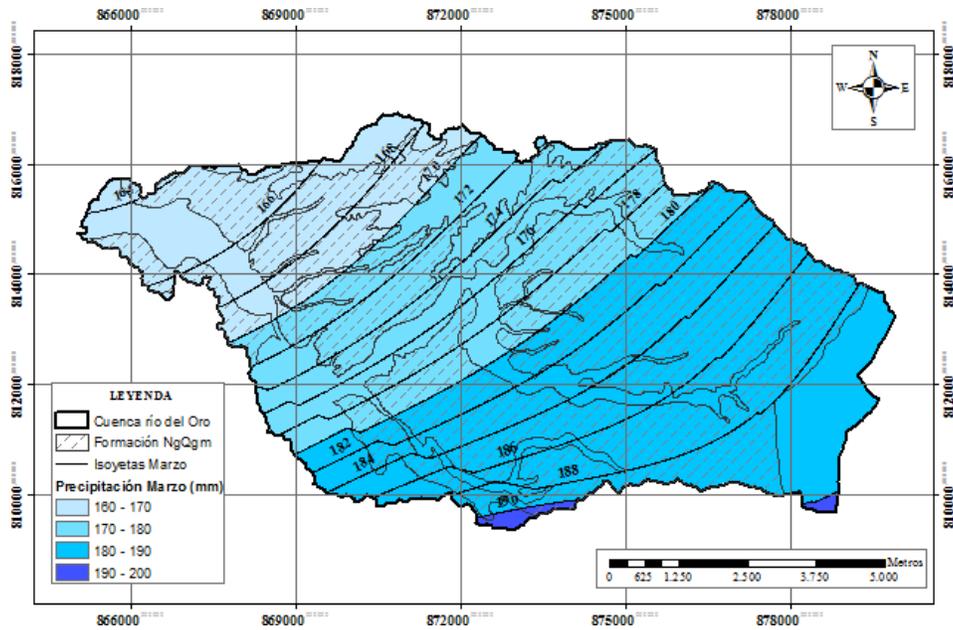


Figura 19. Mapa de isoyetas del mes de marzo de la cuenca río del oro.

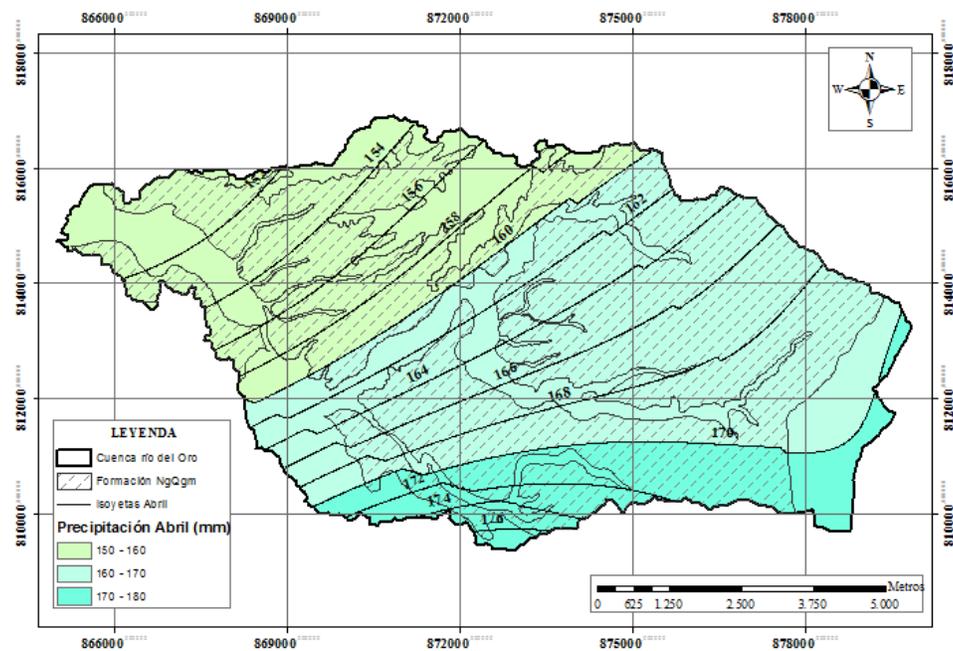


Figura 20. Mapa de isoyetas del mes de abril de la cuenca río del oro.

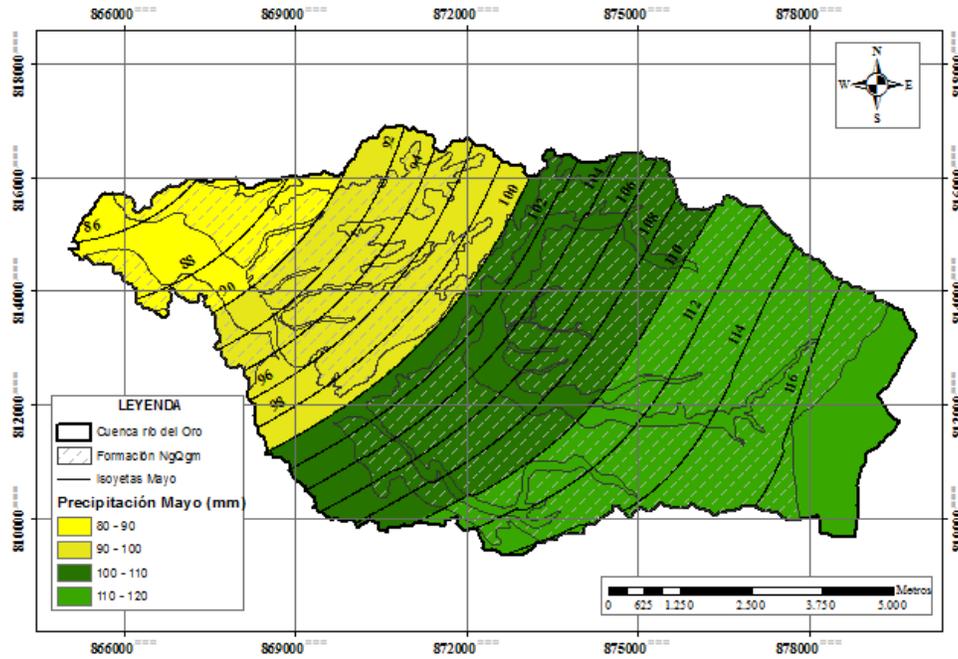


Figura 21. Mapa de isoyetas del mes de mayo de la cuenca río del oro.

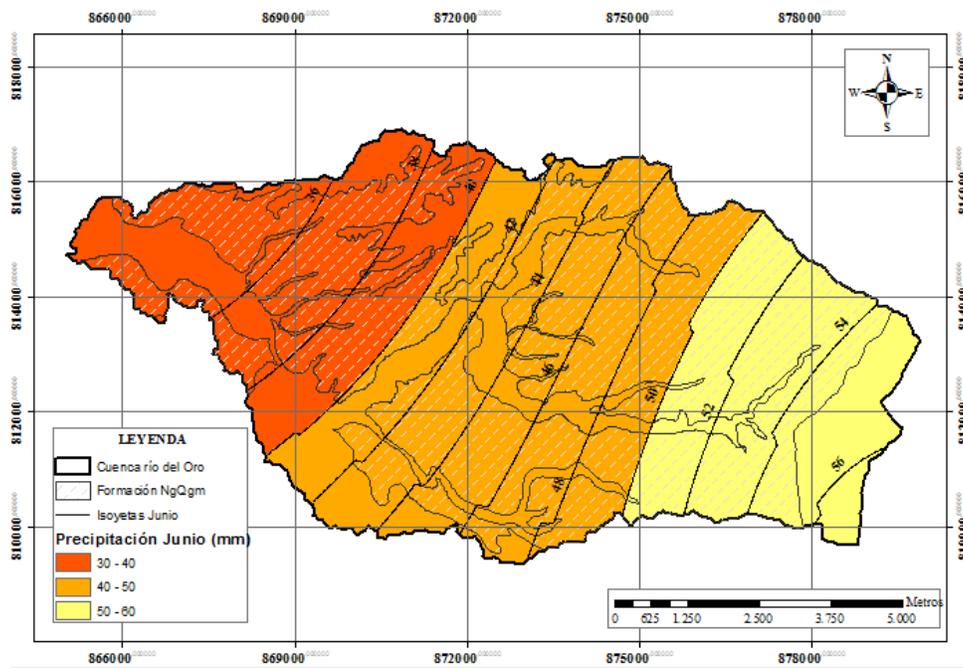


Figura 22. Mapa de isoyetas del mes de junio de la cuenca río del oro.

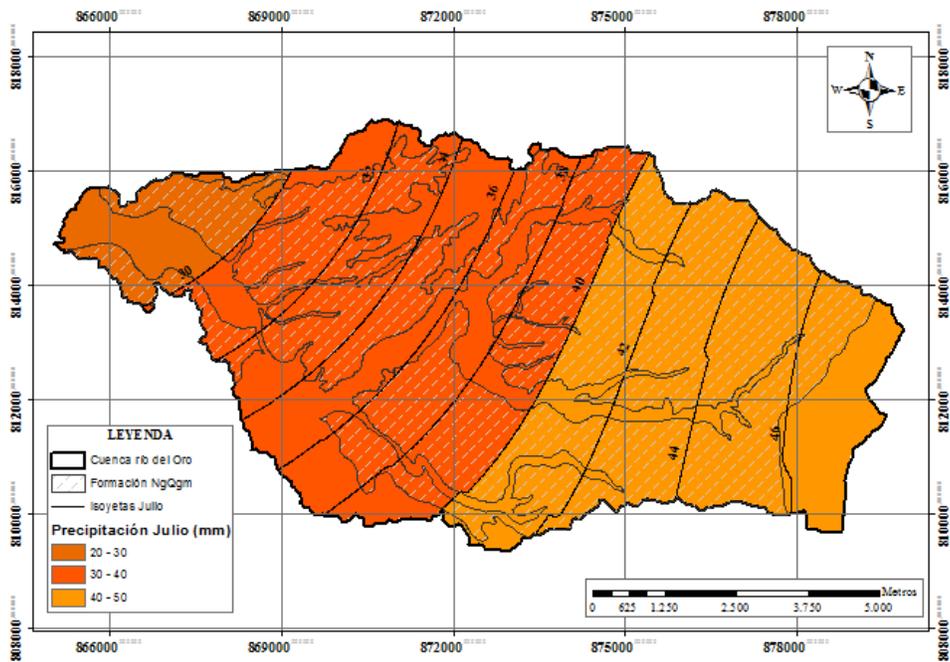


Figura 23. Mapa de isoyetas del mes de julio de la cuenca río del oro.

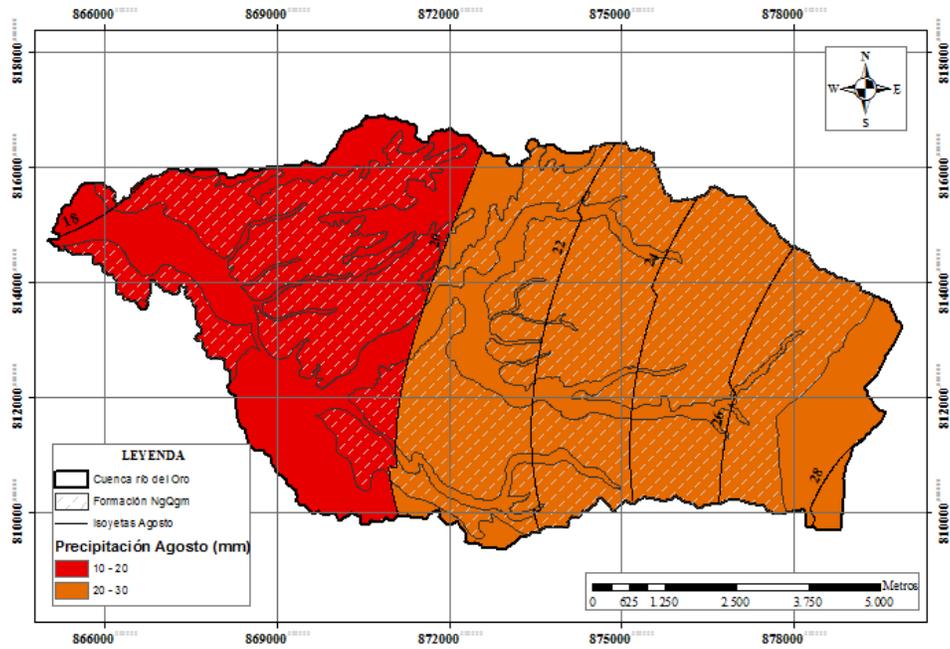
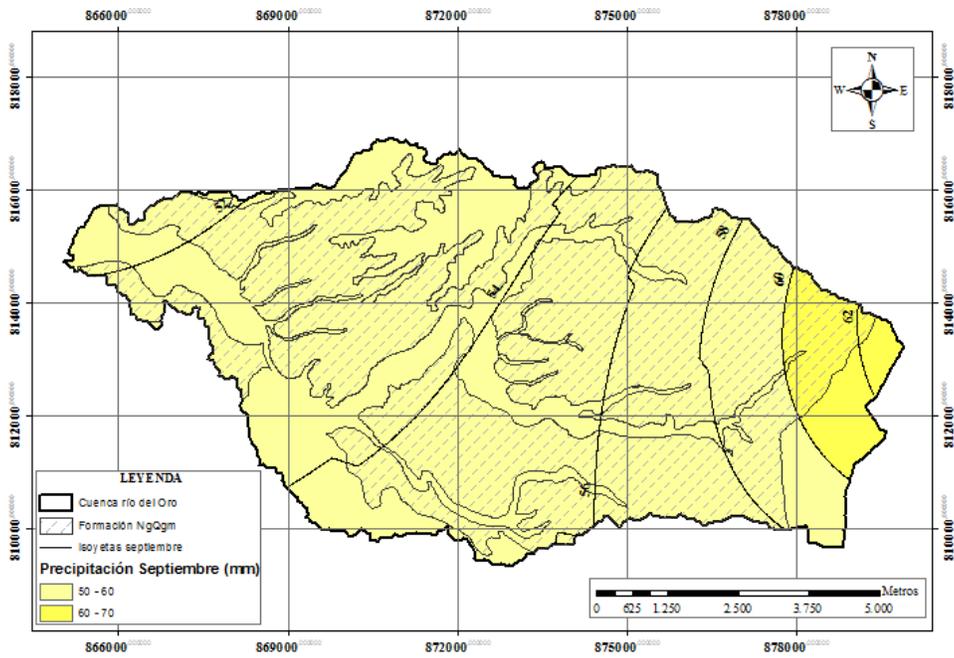
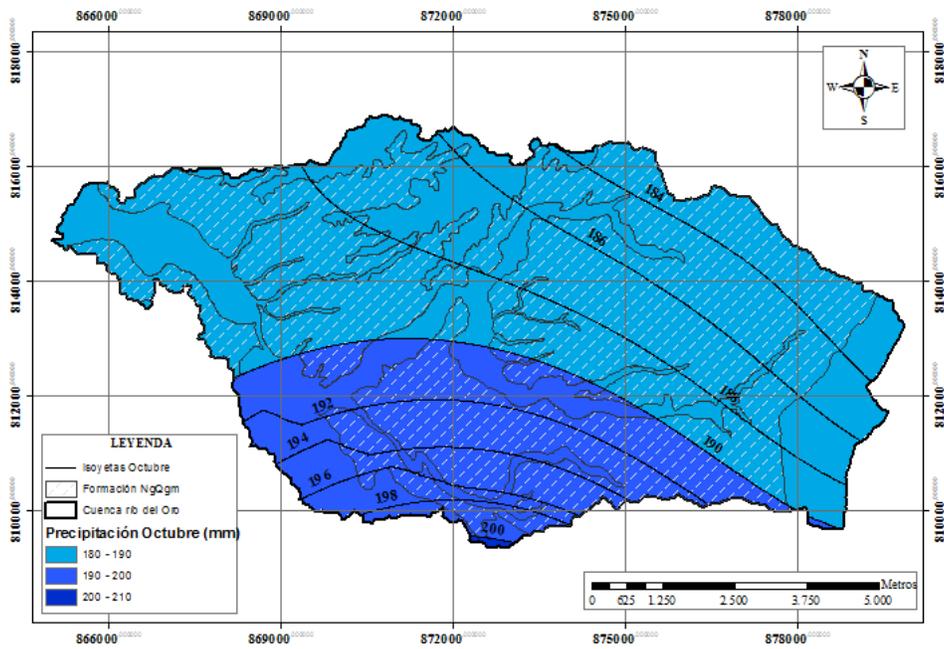


Figura 24. Mapa de isoyetas del mes de agosto de la cuenca río del oro.



*Figura 25. Mapa de isoyetas del mes de septiembre de la cuenca río del oro.*



*Figura 26. Mapa de isoyetas del mes de octubre de la cuenca río del oro.*

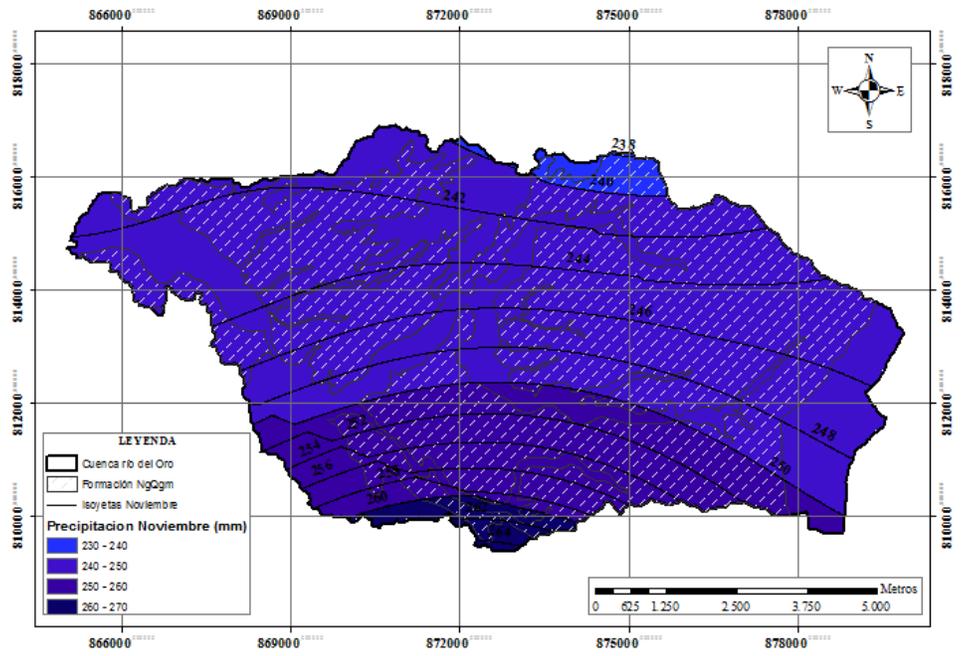


Figura 27. Mapa de isoyetas del mes de noviembre de la cuenca río del oro.

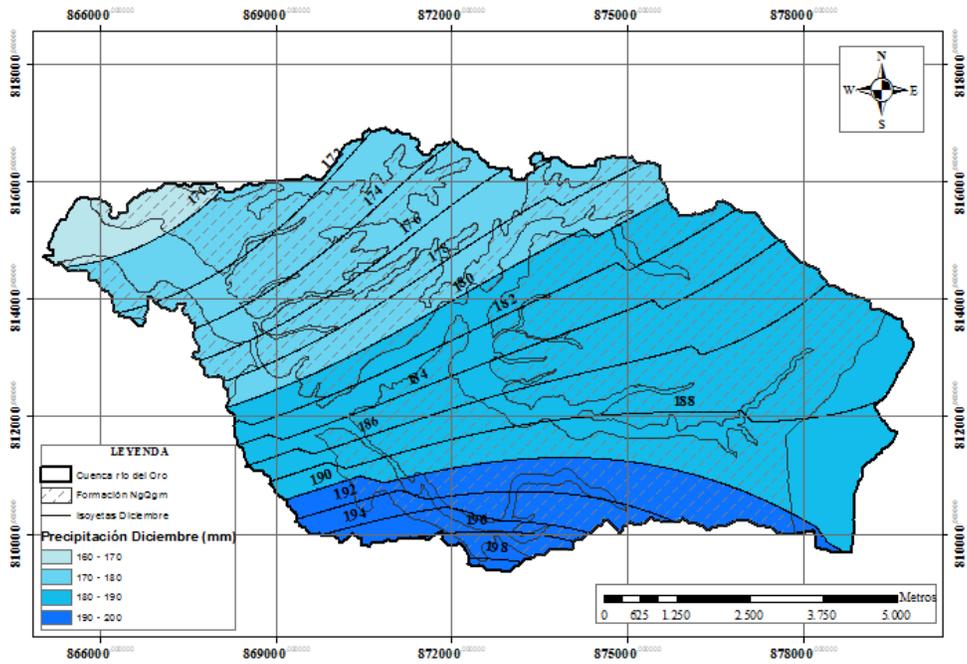


Figura 28. Mapa de isoyetas del mes de diciembre de la cuenca río del oro.

#### 4.4.2 Evapotranspiración

La evapotranspiración potencial de la cuenca río del Oro se determinó a partir de los datos de las estaciones Aeropuerto y Juncal, por los métodos establecidos en el marco teórico: Christiansen, Thornthwaite y tanque de evaporación tipo A. Según Silva (2015), el método que presenta mayor ajuste para la zona de estudio es el de Christiansen, sin embargo, al no contar con los datos de velocidad del viento registrados para la estación el Juncal, se recurre a determinar la evapotranspiración por el método de Thornthwaite y tanque evaporímetro para identificar cuál resultado se acerca más al obtenido por la ecuación de Christiansen calculada para la estación Aeropuerto.

En la Tabla 17 se observan los resultados de evapotranspiración potencial para las estaciones Aeropuerto y Juncal. Se evidencia que el método de Thornthwaite es el que arroja resultados más alejados respecto al método base que es el del Christiansen; esto se explica, debido a que al ser una ecuación empírica que requiere únicamente datos de temperatura media mensual y el índice de calor mensual tiende a sobreestimar la evapotranspiración cuando se aplica a zonas que difieren de la zona en la que se ha desarrollado la ecuación, en este caso de zonas húmedas a muy húmedas. Por otra parte, se observó que el resultado obtenido por el método de tanque evaporímetro se encontró más cercano al resultado de Christiansen, razón por la cual se seleccionó como el método más apropiado para estimar la evapotranspiración potencial de la cuenca y de la formación Gigante medio.

*Tabla 17. Evapotranspiración calculada para las estaciones Aeropuerto y Juncal.*

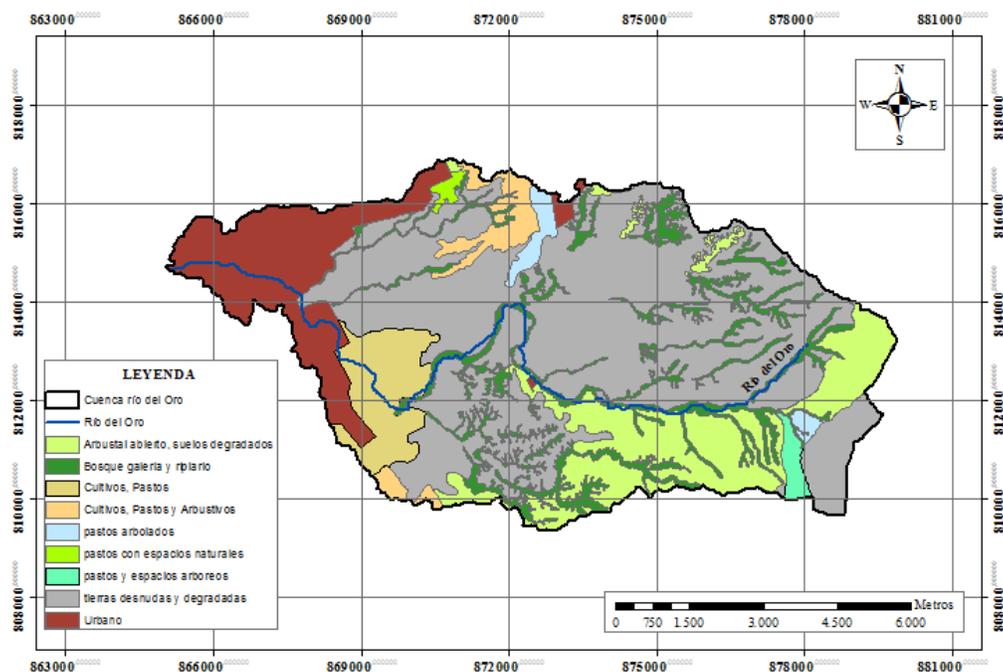
Estación	Método calculo Eto anual (mm)		
	Christiansen	Thornthwaite	Tanque evaporímetro
Aeropuerto	1255,65	1998,09	1538,25
Juncal	-	1803,41	1331,86

Al contar solamente con mediciones de tanque evaporímetro en las estaciones Aeropuerto y Juncal, se promediaron los valores medidos de cada estación para determinar la evaporación media mensual de la zona de estudio, el cual fue multiplicado por el factor  $K_{pan} = 0,75$  del tanque evaporímetro para estimar la evapotranspiración potencial mensual de la cuenca. Para la selección del coeficiente se tuvo en cuenta la ubicación del tanque (suelo desnudo), la humedad relativa de la zona (media) y la velocidad del viento (moderada). En la Tabla 18 se presentan los datos de evapotranspiración potencial mensual para la zona de estudio.

**Tabla 18.** ETo media por método del tanque evaporímetro Cuenca río del Oro.

Mes	ETo mensual (mm)	Total anual (mm)
Enero	109,65	1435,06
Febrero	106,28	
Marzo	105,71	
Abril	103,53	
Mayo	109,98	
Junio	125,43	
Julio	148,47	
Agosto	165,78	
Septiembre	147,62	
Octubre	122,25	
Noviembre	91,89	
Diciembre	98,47	

A partir de los resultados obtenidos de evapotranspiración potencial para la zona de estudio, se procedió a determinar la evapotranspiración real o del cultivo, para la cuenca y el área específica donde aflora la Formación Gigante. Para ello se determinó un coeficiente Kc ponderado teniendo en cuenta los diferentes tipos de coberturas y las áreas correspondientes para cada caso. En la Figura 29 se presenta el mapa de cobertura vegetal de la cuenca río del Oro, tomado del POMCA 2016 a escala 1:25.000, suministrado por la CAM.



**Figura 29.** Mapa de cobertura vegetal de la cuenca río del Oro a escala 1:25.000

**Fuente:** (CAM, 2016)

En la Tabla 19 se presentan los tipos de cobertura presentes en la cuenca, sus áreas individuales y el Kc establecido por la FAO (1998) para cada tipo de cultivo; siendo el Kc para el suelo descubierto (tierras desnudas y degradadas) un coeficiente igual a uno, ya que en esta zona se genera un alto potencial de evaporación por la ausencia de cobertura vegetal, la cual alcanza a ser igual a la evapotranspiración potencial; de esta forma se obtuvo un Kc ponderado para la cuenca río del Oro de 0.78.

*Tabla 19. Kc ponderados de la cuenca río del Oro y de la formación Gigante medio.*

Tipo de Cobertura	Área en la cuenca (km <sup>2</sup> )	Área en la formación Gigante (km <sup>2</sup> )	Kc de cultivo	Kc Cuenca	Kc Formación
Tierras desnudas y degradadas	35,92	28,3	1,00	0,78	0,83
Pastos	5,82	2,09	0,85		
Bosque	7,77	5,22	1,00		
Arbustos abierto, suelos degradado	10,32	7,1	0,41		
Cultivos y arbustivos	2,12	0,12	0,5		
Urbano	8,85	3,92	0,18		
Área total (km <sup>2</sup> )	70,81	46,76	-		

Para determinar la constante Kc de la Formación Gigante Medio, se realizó el corte de la misma en el mapa de coberturas de la cuenca río del Oro, cuya área fue de 46.76 km<sup>2</sup>. Posterior a dicho corte se recalcularon las áreas de cobertura presentes en la formación Gigante Medio, y se obtuvo un Kc ponderado de 0.83.

La diferencia entre los resultados obtenidos se da principalmente por el área que corresponde a tierras desnudas y degradadas, ya que gran parte de este tipo de cobertura se encierra en el área que aflora la formación y al tener un Kc igual a uno por falta de cobertura vegetal, se generan procesos de transpiración bajos y de evaporación altos, dando como resultado un aumento en el Kc ponderado para la zona (FAO, 1998).

A partir de los datos de evapotranspiración potencial y los coeficientes Kc determinados para la cuenca río del Oro y la formación Gigante Medio, fue posible determinar la evapotranspiración real mensual para cada caso. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 20, donde la evapotranspiración real anual para la cuenca es de 1125.21 mm y para la formación Gigante Medio es de 1196.08 mm.

**Tabla 20.** Evapotranspiración real determinada para la cuenca río del Oro y formación Gigante medio.

Mes	Etc con kc cuenca (mm)	Total anual cuenca(mm)	Etc con kc de la formación (mm)	Total anual formación (mm)
Enero	85,98	1125,21	91,39	1196,08
Febrero	83,33		88,58	
Marzo	82,88		88,10	
Abril	81,18		86,29	
Mayo	86,24		91,67	
Junio	98,34		104,54	
Julio	116,41		123,74	
Agosto	129,99		138,17	
Septiembre	115,75		123,04	
Octubre	95,85		101,89	
Noviembre	72,05		76,59	
Diciembre	77,21		82,07	

### 4.4.3 Escorrentía

El método del ‘número de curva’ (CN) es un método sencillo, que tiene un buen ajuste a infinidad de datos experimentales que contemplan la totalidad de las situaciones posibles y los principales factores que regulan el fenómeno de la escorrentía (Manso, 2007). A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los componentes presentes en el método: tipo de suelo y cobertura vegetal de la zona de estudio.

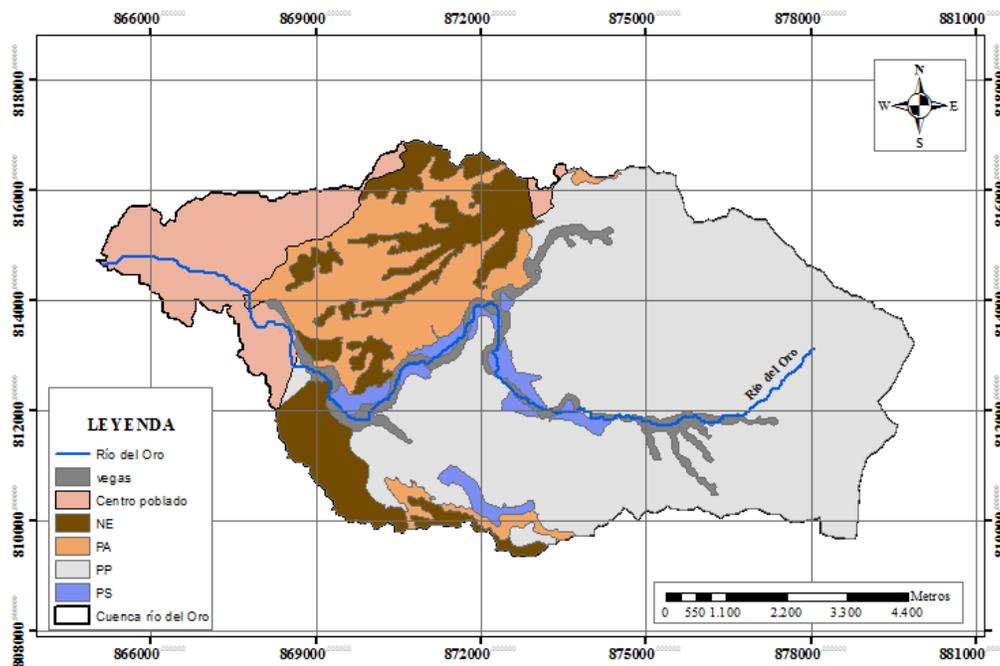
#### 4.4.3.1 Tipo de suelos

Los tipos de suelo que se encuentran en la cuenca de estudio varían texturalmente de franco-arcillo-arenoso a arenoso, lo que se traduce en una buena permeabilidad. En el mapa de suelos de la Figura 30 se presentan los diferentes tipos de suelo, que se describen a continuación:

1. Lithic Ustorthents: Son bien drenados, poco evolucionados, superficiales, limitados por un contacto lítico dentro de los 50 cm de la superficie del suelo mineral. Se localizan en clima cálido seco (Soil Survey Staff, 2006). Estos suelos presentan una textura franco-arenosa en la zona de estudio y relieve de abanico-terrace (piedemonte) y forma del terreno: plano y talud de terraza. Están conformados por la unidad de suelos Neiva (NE) y la unidad de suelos panorama (PA).
2. Typic Ustorthents: Tienen un régimen de humedad del suelo ústico. Son bien drenados, derivados de areniscas y de poco desarrollo pedogenético; son moderadamente profundos, limitados por abundante cantidad de gravilla. También presentan un contacto lítico dentro de los 50 cm de la superficie del suelo mineral (Soil Survey Staff,

2006). Estos suelos presentan una textura franco-arcillo-arenosa en la zona de estudio y están conformados por la unidad de suelos Platanillales (PS).

3. Lithic Ustorthents Fragmental: Son bien drenados, poco desarrollados, domina la condición seca del suelo, limitados por un contacto lítico dentro de los 50 cm de la superficie del suelo y a diferencia de los primeros, estos suelos descansan sobre una roca fragmentada (Soil Survey Staff, 2006). Estos suelos presentan una textura gruesa en la zona de estudio y un relieve fuertemente ondulado a escarpado, con pendientes hasta del 50%. Están conformados por la unidad de suelos Poco a Poco (PP).



**Figura 30.** Mapa de suelos de la cuenca río Oro según su geomorfología y edafología.

**Fuente:** (CAM, 2016)

A partir de las propiedades físicas de los suelos, se unificaron los que poseen características similares y se reclasificaron según los grupos hidrológicos, indicando así que los suelos presentes en la cuenca del río del Oro corresponden con el grupo hidrológico A y B, abarcando el 81% los suelos A y un 19% los suelos del grupo B, como se muestra en la Figura 31.

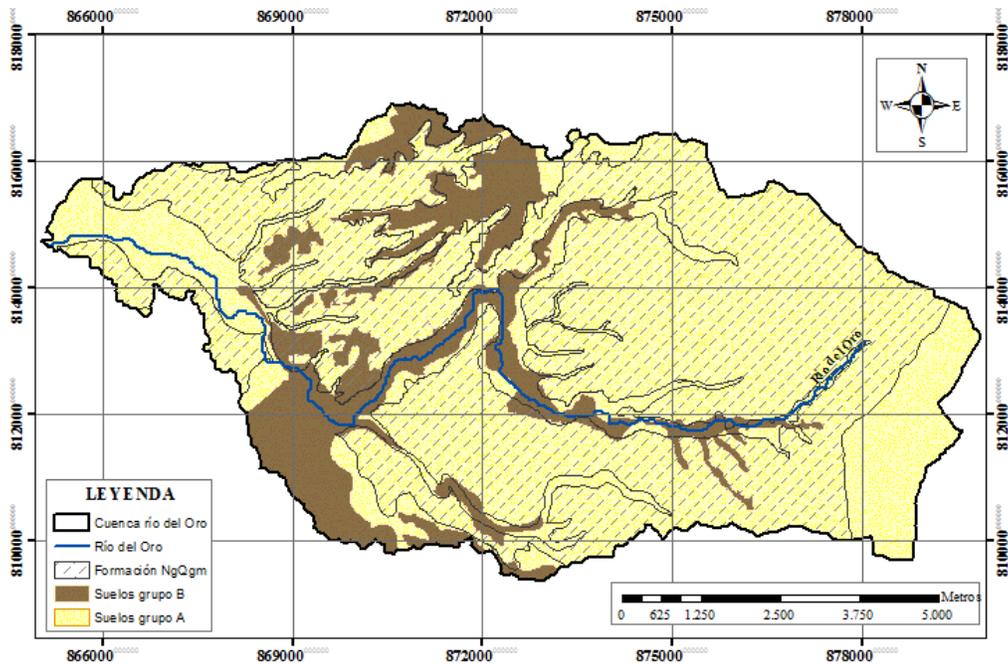


Figura 31. Mapa de suelos de la cuenca río del Oro según el grupo hidrológico.

#### 4.4.3.2 Tipo de cobertura vegetal

La cobertura vegetal de la zona de estudio, que se presentó en la Figura 29, indica la presencia de tierras desnudas y degradadas que representan el 50,7% del área total de la cuenca del río del Oro; el 14,6% está cubierto por arbustales abiertos, el 12,5 % hace parte del área urbana de la ciudad de Neiva, el 11% lo ocupan los bosques de galería y ripiario, el 8,2% son los pastos naturales, mientras los cultivos tan sólo representan el 3% restante.

Una vez identificado el tipo de suelo y de cobertura vegetal del área de estudio, se procedió a determinar el caudal de escorrentía para la cuenca y para la formación Gigante Medio, a partir de la teoría del Número de Curva.

#### 4.4.3.3 Escorrentía de la cuenca del río del Oro

En la Tabla 21 se presentan los datos de la curva número II de la cuenca del río del Oro, para lo cual se determinaron cada de una de las áreas según su tipo de cobertura y suelo. Según Van Mullen et al. (2002) es necesario determinar los números de curva con datos locales, lo cual contribuirá a reducir el margen de error para el cálculo de la escorrentía, sin embargo, en la zona de estudio no se han realizado ajustes a los números curva locales.

**Tabla 21.** Curva número II de la cuenca del río del Oro

Tipo de Cobertura	Áreas Suelo A (km <sup>2</sup> )	Áreas Suelo B (km <sup>2</sup> )	CNII Suelo A	CNII Suelo B	CNII Ponderada	Potencial máximo de retención S (mm)
Tierras desnudas	32,08	3,84	77	86	69,81	109,85
Zona urbana	7,90	0,95	98	98		
Cultivos	0,23	1,89	62	71		
Pastizales	1,94	3,88	49	69		
Bosques	6,15	1,63	26	52		
Matorral-Herbazal	9,05	1,26	48	67		

En la Tabla 22 se muestra el escurrimiento directo de la cuenca del río del Oro, determinado a partir de la Ecuación 29, la cual requiere como datos de entrada la curva número ponderada, el potencial máximo de retención y la precipitación media de la cuenca, anteriormente calculados. Debido a la restricción que presenta dicha ecuación, donde  $P \geq 0.2S$ , el 20% de la retención máxima de la cuenca es 21.97mm; ésta condición no se cumple para el mes de agosto, en el cual la precipitación media es de 21.89mm, por lo que su escurrimiento es igual a cero; en los demás meses del año si existe un caudal de escurrimiento, lo que da lugar a un acumulado de 660.37 mm.

**Tabla 22.** Escorrentía de la cuenca del río del Oro

Mes	Precipitación media de la cuenca (mm/mes)	Caudal Escurrido (mm)	Escurrimiento total (mm)
Enero	114,46	42,27	660,37
Febrero	125,06	49,90	
Marzo	178,59	92,05	
Abril	163,24	79,47	
Mayo	104,36	35,31	
Junio	44,73	3,91	
Julio	38,38	2,13	
Agosto	21,89	0	
Septiembre	55,28	7,75	
Octubre	188,90	100,68	
Noviembre	247,09	151,29	
Diciembre	182,85	95,6	

#### 4.4.3.4 Escorrentía de la formación Gigante Medio

En la Tabla 23 se presentan los datos de la curva número II de la formación Gigante Medio, en donde las tierras desnudas y degradadas representan el 60,5% del área total de la formación, el 15,2% está cubierto por arbustales abiertos, el 8,4 % hace parte del área urbana de la ciudad de Neiva, el 11,2% lo ocupan los bosques de galería y ripiario, el 4,5% son los pastos naturales, mientras los cultivos tan sólo representan el 0,2%. Posteriormente se procedió a tomar valores de la curva número II y se calculó la curva número ponderada de la formación, teniendo en cuenta sus respectivas áreas.

**Tabla 23.** Curva número II de la formación Gigante Medio

Tipo de Cobertura	Áreas Suelo A (km <sup>2</sup> )	Áreas Suelo B (km <sup>2</sup> )	CNII Suelo A	CNII Suelo B	CNII Ponderada	Potencial máximo de retención S (mm)
Tierras desnudas	26,96	1,34	77	86	68,39	117,39
Zona urbana	3,90	0,01	98	98		
Cultivos	0,11	0,02	62	71		
Pastizales	1,06	1,03	49	69		
Bosques	4,93	0,297	26	52		
Matorral-Herbazal	6,71	0,39	48	67		

En la Tabla 24 se muestra el escurrimiento directo de la formación Gigante Medio, determinado a partir de la Ecuación 29. Debido a la restricción que presenta dicha ecuación, donde  $P \geq 0.2S$ , el 20% de la retención máxima de la cuenca es 23.48mm; ésta condición no se cumple para el mes de agosto, en el cual la precipitación media es de 22.21mm, por lo que su escurrimiento es igual a cero; en los demás meses del año si existe un caudal de escurrimiento, lo que da lugar a un acumulado de 633.13 mm.

El escurrimiento de la formación es 27,24 mm menor que el generado por la cuenca, debido a que esta posee un 0,6% más de arbustales y un 0,2% más de bosques, lo que permite que este tipo de cobertura amortigüe el impacto de las gotas de lluvia y evite el escurrimiento y la erosión del suelo; ya que según la FAO (2005) cuando no se presenta algún tipo de cobertura del suelo, las gotas de lluvia rompen los agregados de suelo en partículas más pequeñas, obstruyendo los poros y creando un sellado superficial, lo que aumenta la escorrentía.

De igual manera, la formación tiene un 4,1% menos de área urbana, dando lugar a una menor escorrentía, ya que estas zonas son casi impermeables e impiden la filtración de agua en el suelo.

**Tabla 24.** Escorrentía de la formación Gigante Medio

Mes	Precipitación media de la Formación (mm/mes)	Caudal Escurrecido (mm)	Escorrimento total (mm)
Enero	114,72	39,91	633,13
Febrero	125,34	47,33	
Marzo	179,16	88,76	
Abril	163,67	76,3	
Mayo	105,27	33,59	
Junio	45,33	3,43	
Julio	38,91	1,79	
Agosto	22,21	0	
Septiembre	55,49	6,85	
Octubre	188,67	96,57	
Noviembre	246,98	146,54	
Diciembre	183,19	92,05	

#### 4.4.4 Infiltración

El balance hídrico corresponde a la representación matemática de los componentes del ciclo hidrológico, donde se entiende que las entradas al sistema solamente se dan por medio de la precipitación (omitiendo los flujos horizontales y el agua de riego), y las salidas por medio de la evapotranspiración y el escurrimiento superficial. En la Tabla 25, se presenta el agua neta que llega a los suelos de la cuenca río del Oro y de la Formación Gigante Medio, siendo para el caso de la cuenca un total anual de 40,04mm y de 36,3mm para la formación Gigante Medio; la diferencia entre ambas se da principalmente por la evapotranspiración determinada para la Formación, que es mayor respecto a la de la cuenca.

Los valores negativos que se presentan en la Tabla 25, se generan principalmente porque la precipitación media mensual de la zona es menor que la sumatoria entre la evapotranspiración y la escorrentía, por lo tanto hay déficit hídrico en el suelo y no se presenta infiltración.

*Tabla 25. Balance hídrico.*

Mes	Balance hídrico mensual de la cuenca río del Oro (mm)	Balance hídrico anual (mm)	Balance hídrico mensual de la formación NgQgi (mm)	Balance hídrico anual (mm)
Enero	-13,78	40,04	-16,58	36,3
Febrero	-8,17		-10,57	
Marzo	3,66		2,3	
Abril	2,59		1,08	
Mayo	-17,18		-19,99	
Junio	-57,52		-62,64	
Julio	-80,16		-86,62	
Agosto	-108,09		-115,96	
Septiembre	-68,22		-74,4	
Octubre	-7,63		-9,79	
Noviembre	23,75		23,85	
Diciembre	10,04		9,07	

#### 4.5 Estimación de la recarga

La recarga de agua subterránea de la formación Gigante medio, se estima a partir del agua de lluvia que se ha infiltrado en el suelo y es representada por el exceso de agua para satisfacer las necesidades de transpiración de los cultivos y otra vegetación y que sobrepasa la capacidad de almacenamiento de agua del suelo; esta última es el agua disponible entre la capacidad de campo y el punto permanente de marchitez y es retenida a diferentes tensiones que varían de acuerdo al tamaño de los poros, el contenido de materia orgánica, la profundidad de las raíces y la estructura del suelo. Así un suelo franco con alto contenido de arena muy fina tienen mayor capacidad disponible de agua, los suelos arcillosos tienen valores intermedios, mientras los suelos de arena gruesa tienen la capacidad disponible de agua más baja (FAO, 2005). Teniendo en cuenta la textura de los suelos de la formación, se determinó la capacidad de almacenamiento, a partir de las curvas de retención de humedad.

A continuación se presentan las gráficas de contenido de humedad en el suelo a partir de las cuales se determina la humedad a capacidad de campo y punto de marchitez permanente para cada tipo de suelo.

### Tension vs Contenido de Agua del Suelo

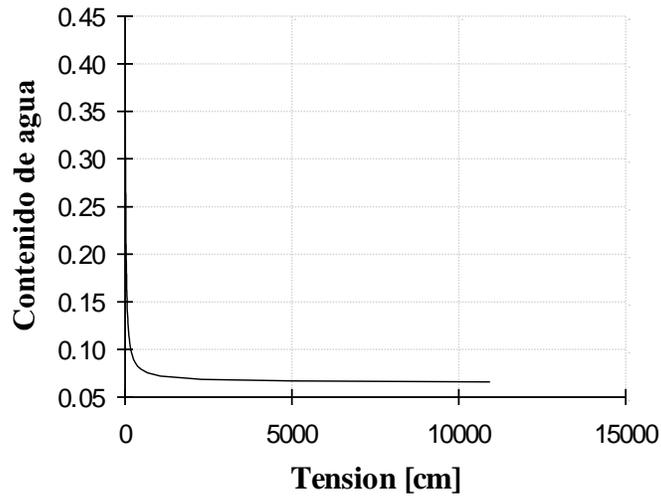


Figura 32. Curva de retención de humedad de un suelo arenoso limo

### Tension vs Contenido de Agua Suelo

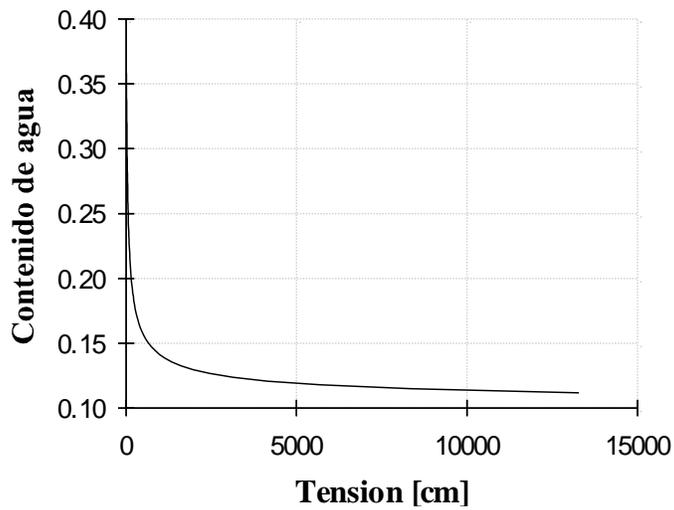


Figura 33. Curva de retención de humedad de un suelo franco arcillo arenoso.

En la Tabla 26 se presentan los resultados obtenidos de la humedad utilizable por las plantas que corresponde a la diferencia entre la humedad a capacidad de campo y punto de marchitez permanente ( $\Theta_{CC} - \Theta_{PMP}$ ).

**Tabla 26.** Humedad aprovechable según la textura del suelo

Textura del suelo	Humedad		
	CC (%)	PMP (%)	(%) Utilizable por las plantas
Arenoso Limo	8,45	6,56	1,88
Limo Arcillo Arenoso	16,89	11,10	5,78

Según Schosinsky (2006), la densidad de un suelo de textura arenoso limo es de 1,5 gr/cm<sup>3</sup> y para uno de textura limo arcillo arenoso es de 1,35 gr/cm<sup>3</sup>, valores que se utilizaron para determinar la humedad por volumen. Por otra parte para la estimación de los milímetros de agua correspondientes a la humedad aprovechable del suelo, se tomó una profundidad de raíces de 0,6 metros, teniendo en cuenta los tipos de suelo presentes en la cuenca y su desarrollo pedogenético. En la Tabla 27 se presentan los porcentajes de humedad disponible para las plantas por volumen, los milímetros de agua calculados para cada tipo de suelo y el ponderado entre los suelos. Este último fue determinado teniendo en cuenta las áreas de cada tipo de suelo presente en la formación, donde el área de suelo arenoso limo es igual a 43,68 km<sup>2</sup> y el área del limo arcillo arenoso a 3,088 km<sup>2</sup>.

**Tabla 27.** Porcentaje de humedad por volumen aprovechable de las plantas

Textura de suelo	% Humedad por volumen aprovechable para las plantas	Agua aprovechable para profundidad estimada (mm)	Ponderado entre suelos de agua aprovechable por las plantas (mm)
Arenoso Limo	2,827	16,96	18,93
Limo Arcillo Arenoso	7,808	46,85	

La recarga del acuífero fue determinada con base en la diferencia de los resultados obtenidos del balance hídrico a nivel mensual y el ponderado de agua disponible que es aprovechable y utilizada por las plantas (Tabla 28). Para el acuífero Gigante Medio se obtuvo una recarga anual de 0,23x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/año, la cual se genera únicamente durante el mes de noviembre.

*Tabla 28. Recarga del acuífero Gigante Medio en m<sup>3</sup>/año.*

Mes	Balace hídrico mensual de la formación NgQgi (mm/mes)	Agua ponderada que retiene el suelo para el uso de las plantas (mm/mes)	Recarga (mm/mes)	Recarga formación NgQgi (m3/mes)	Recarga formación (x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /año)
Enero	0	18,93	0	0	0,23
Febrero	0		0	0	
Marzo	2,3		0	0	
Abril	1,08		0	0	
Mayo	0		0	0	
Junio	0		0	0	
Julio	0		0	0	
Agosto	0		0	0	
Septiembre	0		0	0	
Octubre	0		0	0	
Noviembre	23,85		4,92	229.972,51	
Diciembre	9,07		0	0	

## 5. Conclusiones

La precipitación en la cuenca del río Oro presenta un régimen de dos máximos entre los meses de marzo y abril para el primer semestre del año, y en octubre y noviembre para el segundo semestre del año, siendo este mayor que el primero, así como un periodo de sequía comprendido entre julio y agosto. Además se evidenció a través de las isoyetas una tendencia de mayor precipitación para las zonas más cercanas a la cordillera oriental, es decir, al este de la cuenca.

La estimación de la evapotranspiración potencial, se realizó con base a ecuaciones empíricas diferentes a la ecuación de Penman Monteith, debido a la falta de estaciones climatológicas presentes en la zona de estudio que registren el total de las variables necesarias. Sin embargo, el método del tanque evaporímetro presentó un buen ajuste para esta zona, y se obtuvo una evapotranspiración real anual para la cuenca río del Oro de 1125,21 mm y para la Formación de 1196,08 mm, valores que son representativos de zonas cálidas.

Las diferencias evidenciadas en la CN se deben principalmente a las características del suelo y su cobertura vegetal, de esta forma se obtuvo una CN promedio para la cuenca río del Oro de 69,81 y para la Formación de 68,39, cuyos valores representan alta escorrentía. De igual forma, la cuenca presenta una pendiente promedio del 17% y posee un 50,7% de suelos desnudos y degradados, que favorecen la escorrentía.

La infiltración de agua en el suelo depende de los espacios de los poros, donde los suelos de textura franco arcillo arenosa presentan una capacidad de retención de agua mayor que los suelos arenolimosos, por lo tanto estos últimos posibilitan una mayor infiltración a comparación de los primeros. Aunque los suelos de la Formación Neógeno Gigante Medio tienen menor proporción de textura franco arcillo arenosa, es decir, una menor retención de agua, en el presente estudio se obtuvo una mayor infiltración para la cuenca del río del Oro con un valor de 40,04 mm anual y para la Formación Gigante Medio de 36,29 mm, ya que la Formación posee en su mayor parte suelos desnudos que facilitan la evaporación del agua, lo que reduce su infiltración.

La recarga subterránea del acuífero Gigante Medio es de  $0,23 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/año y se genera únicamente en el mes de noviembre, por lo cual es necesario llevar un control y registro de los pozos que perforan el acuífero y sus respectivos caudales de extracción, para permitir una oportuna recuperación del nivel freático, evitando de esta manera la sobreexplotación del agua subterránea.

## 6. Prospectivas de la investigación

Se recomienda la ubicación de estaciones climatológicas dentro de la zona de estudio para generar una estimación de la recarga de mayor confiabilidad, con las cuales sea posible registrar las variables de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, brillo solar y precipitación a nivel diario. Y de esta forma visualizar de una mejor manera la distribución de precipitación y aplicar la ecuación empírica de Penman Monteith para la estimación de la evapotranspiración. Por otra parte se recomienda instalar una estación limnimétrica con el fin de poder realizar una validación a la recarga estimada para la zona de estudio.

Se requieren estudios detallados de la conductividad hidráulica de los suelos y de la geología estructural, que permitan identificar fracturas o cizallas en las rocas, el grado de permeabilidad de las mismas, la existencia de capas confinadas o acuitardos, y además de esto, evaluar si existe transferencia de agua desde otras unidades hidrogeológicas o acuíferos debido a las diferentes condiciones hidráulicas del suelo; todo esto con el fin de identificar las zonas de recarga y estimar un valor más real y preciso. Identificar estas zonas de recarga también permite realizar un manejo sostenible de los sistemas acuíferos y es fundamental para definir las zonas vulnerables a la contaminación, de esta forma es más fácil implementar medidas de protección y dar un uso eficiente del recurso hídrico subterráneo.

El método utilizado para la estimación de la escorrentía, número de curva (CN) del USSC permite obtener estimaciones seguras para un caso específico en el que se cuente con mediciones de lluvias, sin embargo el principal limitante del método es que al ser desarrollado a partir de información de cuencas de la zona oeste de los Estados Unidos, no es posible asegurar que el resultado sea el mismo para zonas que difieran de dicho lugar. Dada la importancia del tema se recomienda realizar la validación de este método para la zona de estudio con el objeto de obtener procedimientos cada vez más precisos para estimar el escurrimiento.

La cobertura vegetal es un parámetro fundamental de la infiltración, ya que protege el suelo contra el impacto directo de las gotas de lluvia; debido a que la cuenca del río del Oro presenta en su mayor parte suelos desnudos, se requiere la implementación de medidas de conservación del suelo, la siembra de especies mejoradas de pastos y árboles forrajeros, cultivos de cobertura, entre otras especies, con el fin de mejorar la infiltración, disminuir la escorrentía y aumentar la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo.

En el presente trabajo se realizó la estimación de la recarga del acuífero Gigante Medio dando uso de información mensual multianual, generando como resultado la recarga en un solo mes del año (noviembre), por lo tanto se recomienda continuar con la investigación dando uso de información meteorológica a una escala de tiempo menor (decadal o diaria) con el fin de evaluar de una manera más detallada las entradas y salidas del balance hídrico en los meses marzo, abril, octubre, noviembre y diciembre; ya que estos son meses que presentan altas precipitaciones y posiblemente percolación profunda que actué como recarga del acuífero.

Este estudio sirve como base para la formulación de un modelo hidrogeológico conceptual que permita entender la dinámica del agua superficial y subterránea, en el que se desarrolle un estudio detallado de la geología de la zona, las características hidráulicas del acuífero a partir de pruebas de bombeo, las condiciones del flujo de agua subterránea y la delimitación de zonas de recarga y descarga.

### Referencias bibliográficas

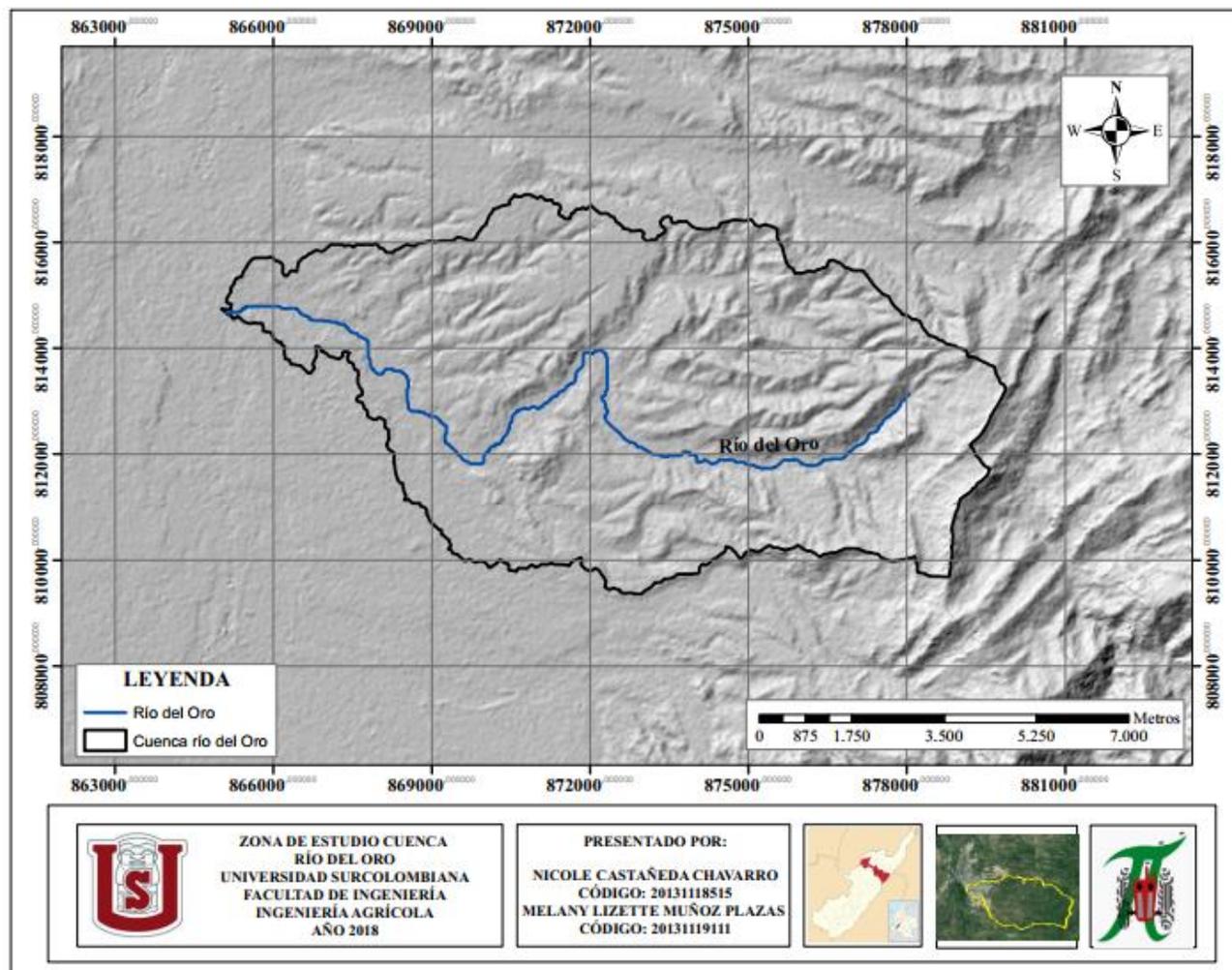
- Aparicio Mijares, F. J., 2004. *Fundamentos de hidrología de superficie*. s.l.:Limusa.
- Burbano Girón, J., Domínguez, E. & Barón Ruiz, O., 2016. *Análisis de la relación entre variables morfológicas y biofísicas en la estimación de características probabilísticas para la oferta hídrica superficial de Colombia..* s.l.:s.n.
- CAM, 2014. *Plan de Cambio Climático Huila 2050 Preparándose para el Cambio Climático*, Neiva: s.n.
- CAM, 2016. *Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Loro-río las Ceibas y otros directos al Magdalena, localizada en el departamento del Huila en la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena (CAM)*. s.l.:s.n.
- Cardona, B. L., 2013. *Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas*.
- Carvajal, Y. & Castro, L., 2010. *Análisis de tendencia y homogeneidad de series climatológicas*. *Eidenar*, Issue 9, pp. 15-25.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. & Mays, L. W., 1994. *Hidrología aplicada*. s.l.:McGraw-Hill.
- Díaz Ortiz, J. E., 2012. *Aguas subterráneas*. Cali, Colombia: Universidad del Valle.
- FAO, 1998. *Evapotranspiración del cultivo, Guías para la determinación de los requerimientos de agua en los cultivos*, s.l.: s.n.
- FAO, 2005. *Shaxson, F., & Barber, R. (2005). Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal. El significado de la porosidad del suelo*. Roma: Boletín de suelos 79..
- Fetter, C. W., 2000. *Applied hydrogeology*, s.l.: Prentice hall.
- García, M. C., Piñeros, A., Bernal , F. A. & Ardila, E., 2012. *Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia*. *Revista de Ingeniería*, Issue 36.
- Garcia, M., Peters-Lidard, C. & Goodrich, D., 2008. *Spatial interpolation of precipitation in a dense gauge network for monsoon storm events in the southwestern United States*. *Water Resources Research*, Volumen 44.
- Gaspari , F., 2007. *Plan de ordenamiento territorial en cuencas serranas degradadas utilizando sistemas de información geográfica (SIG)*. Buenos Aires: s.n.

- Gaspari, F., Rodriguez, A. & Senisterra, G., 2012. *Morphometric characterization of the upper watershed of the Sauce Grande river*. AUGM DOMUS, Volumen 4.
- Guilarte, R., 1978. *Hidrología básica. Facultad de ingeniería, UCV. Caracas-Venezuela, 1978..* Caracas, Venezuela.: Facultad de ingeniería, UCV..
- Horton, R. E., 1933. *The role of infiltration in the hydrologic cycle*. s.l.:Eos, Transactions American Geophysical Union.
- Ibáñez, S., Moreno, H. & Gisbert, J., 2011. *Morfología de las cuencas hidrográficas..* s.l.:Universidad Politécnica de Valencia.
- IDEAM, 2014. *Estudio Nacional del Agua*, Bogotá D. C.: s.n.
- INAB, 2003. *Metodología para la determinación de áreas críticas de recarga hídrica natural*. Manual Técnico Guatemala, p. 106 .
- INGEOMINAS, 2002. *Memoria explicativa levantamiento geológico de la plancha 323 Neiva*. Bogotá: Ingeominas.
- Jarvis, N. J., 2007. *A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: Principles, controlling factors and consequences for water quality*. s.l.:European Journal of Soil Science.
- Loague, K. & Gander, G. A., 1990. *LOAGUE, Keith; GANDER, Gene A. R-5 revisited: 1. Spatial variability of infiltration on a small rangeland catchment*. s.l.:Water Resources Research.
- Londoño, L., Restrepo, C. & Marulanda, E., 2014. *Distribución espacial del dengue basado en herramientas del Sistema de Información Geográfica, Valle de Aburrá, Colombia*. Investigaciones, Issue 32, pp. 7-15.
- López Canteñs, G. y otros, 2010. *Aplicación de modelos matemáticos para la obtención de la curva de retención de humedad del suelo*. Revista Latinoamericana de Recursos Naturales, I(6), pp. 44-50.
- Lopez Geta, Juan Antonio; Fornés Azcoiti, Juan María;, 2009. *La geología e hidrogeología en la investigación de humedales*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- MADS, M. d. A. V. y. D. T., 2010. *Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación*, Bogotá: s.n.
- Manso, J. M., 2007. *Desarrollo y aplicación de una metodología destinada al dimensionado de sistemas de recolección de agua para la restauración forestal en zonas áridas*. s.l.:s.n.
- Marín Valencia, V., 2010. *Evaluación de la relación entre la evapotranspiración potencial teórica y la evaporación registrada en los departamentos de Cundinamarca y Valle del Cauca*.
- Martínez Alfaro, P. E., Martínez Santos, P. & Castaño Castaño, S., 2006. *Fundamentos de Hidrogeología*. Madrid: Mundi-Prensa.

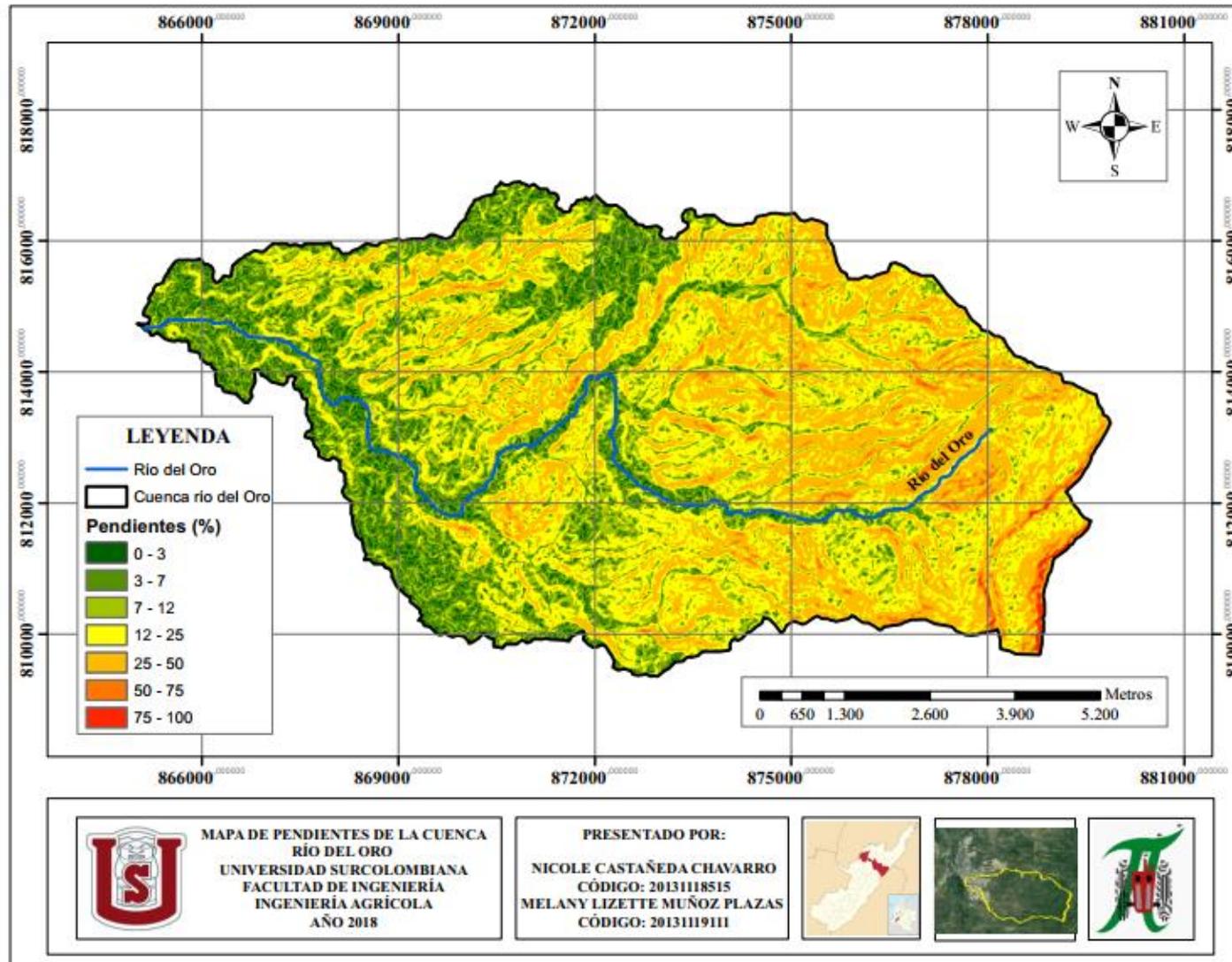
- Matus Silva, O. D., 2007. *Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicada a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa Nicaragua, Costa Rica*: s.n.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible MADS, 2014. *Guía metodológica para la formulación de planes de manejo ambiental de acuíferos.*, Bogotá, D.C.: s.n.
- Monsalve, G., 1995. *Hidrología en la Ingeniería*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Moros Vivas, A. M., 2010. *Caracterización de señales de precipitación mediante la transformada de Fourier y transformada Wavelet*, Bogotá: s.n.
- Murillas R, A. & Londoño C, E. A., 2014. *Estimación de la evapotranspiración en cultivos de arroz con sensores remotos*, Santiago de Cali: s.n.
- NASA, 2018. *Modelo de elevación digital, servidor ALOS PASAR, resolución 12.5 metros*. s.l.:s.n.
- Núñez Solís, J., 2001. *Manejo y conservación de suelos*. s.l.:s.n.
- Orozco B, C. y otros, 2003. *Contaminación Ambiental, una visión desde la química*. Madrid: Ediciones Paraninfo.
- Orson, I. & Vaughn, H., 2003. *Principios y aplicaciones del riego*. s.l.:Reverté.
- Oyarzún M, J., 2009. *Léxico sobre procesos y estructuras geológicas*. s.l.:Universidad de la Serena.
- Perdomo, V. M. & Rojas, C. A., 2017. *Modelo hidrogeológico conceptual a partir de información secundaria, en los alrededores del centro urbano del municipio de Chiquinquirá*.
- Ponce, V. M., 1989. *Engineering hydrology: Principles and practices*. s.l.:Prentice Hall.
- Poveda, G., 2004. *La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna*. s.l.:s.n.
- Reyes Trujillo, A., Barroso, F. U. & Carvajal Escobar, Y., 2010. *Guía Básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas*. s.l.:Programa Editorial UNIVALLE.
- Schosinsky, G., 2006. *Calculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos*. Revista Geológica de América Central, pp. 34-35.
- Servicio Geológico Colombiano, 2015. *Notas explicativas: Mapa Geológico de Colombia*. Bogotá: Republica de Colombia.
- Silva, V. A. G., 2015. *Identificación y selección de una o mas fórmulas empíricas de evapotranspiración potencial para el departamento del Huila*.
- Soil Survey Staff, 2006. *Claves para la taxonomía de suelos.* s.l.:Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Servicio de Conservación de los Recursos Naturales..

- Sokolov, A. A. & Chapman, T., 1981. *Métodos de cálculo del balance hídrico. Guía internacional de métodos de investigación (versión en Español)*. s.l.:Instituto de Hidrología de España-UNESCO..
- Sutton IV , J. C., 2011. *Groundwater Recharge Areas: Identification and Protection within the Central Coast Regional Water Quality Control Board Jurisdiction*.
- Telford, W. M., Geldart, L. P. & Sheriff, R. E., 1990. *Applied geophysics*. s.l.:Cambridge university press.
- Toro Trujillo, A. M., Arteaga Ramírez, R., Vásquez Peña, M. A. & Ibañez Castillo, L. A., 2015. *Relleno de series diarias de precipitación, temperatura mínima, máxima de la región norte del Urabá Antioqueño*. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, pp. 577-588.
- Universidad Nacional de Colombia UNAL. Sede Medellín., 2009. *Geología, Geofísica, Hidrogeoquímica e Isótopos, como herramientas para definir un modelo conceptual hidrogeológico, caso de aplicación: acuífero costero del municipio de turbo..*
- Universidad Nacional de Colombia, 2000. *Investigación de Aguas Subterráneas Región Valles de San Nicolás*. Medellín: s.n.
- Valencia, V. M., 2010. *Evaluación de la relación entre la evaporación potencial teórica y la evaporación registrada en los departamentos de Cundinamarca y Valle del Cauca*.
- Van Genuchten, M. T., Leij, F. J. & Yates, S. R., 1991. *The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils*, Oklahoma: Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory .
- Van Mullem, J. A., Woodward, D. & Hawkins, R., 2002. *Runoff curve number method: Beyond the handbook. In Proceedings of Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference..* Las Vegas, Nevada: s.n.
- Vargas Martínez, N. O., Campillo Pérez, A. K., García Herrán, M. & Jaramillo Rodríguez, O., 2013. *Aguas Subterráneas en Colombia Una Visión General*. Bogotá D. C.: s.n.
- Vélez Otálvaro , M. V., Otálvaro Hoyos, D. L. & Navarro Cuervo, L. F., 2014. *Guía metodológica para la formulación de planes de manejo ambiental de acuíferos.*, Bogotá, D.C.: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Grupo de divulgación de conocimiento y cultura ambiental.
- Velez, J. I., Poveda, G. & Mesa, O., 2000. *Balances Hidrológicos de Colombia*. Medellín: U. Nacional.
- Williams, J. R., 1995. *Computer models of watershed hydrology. The EPIC Model, Water Resources Publications, Highlands Ranch..* s.l.:s.n.

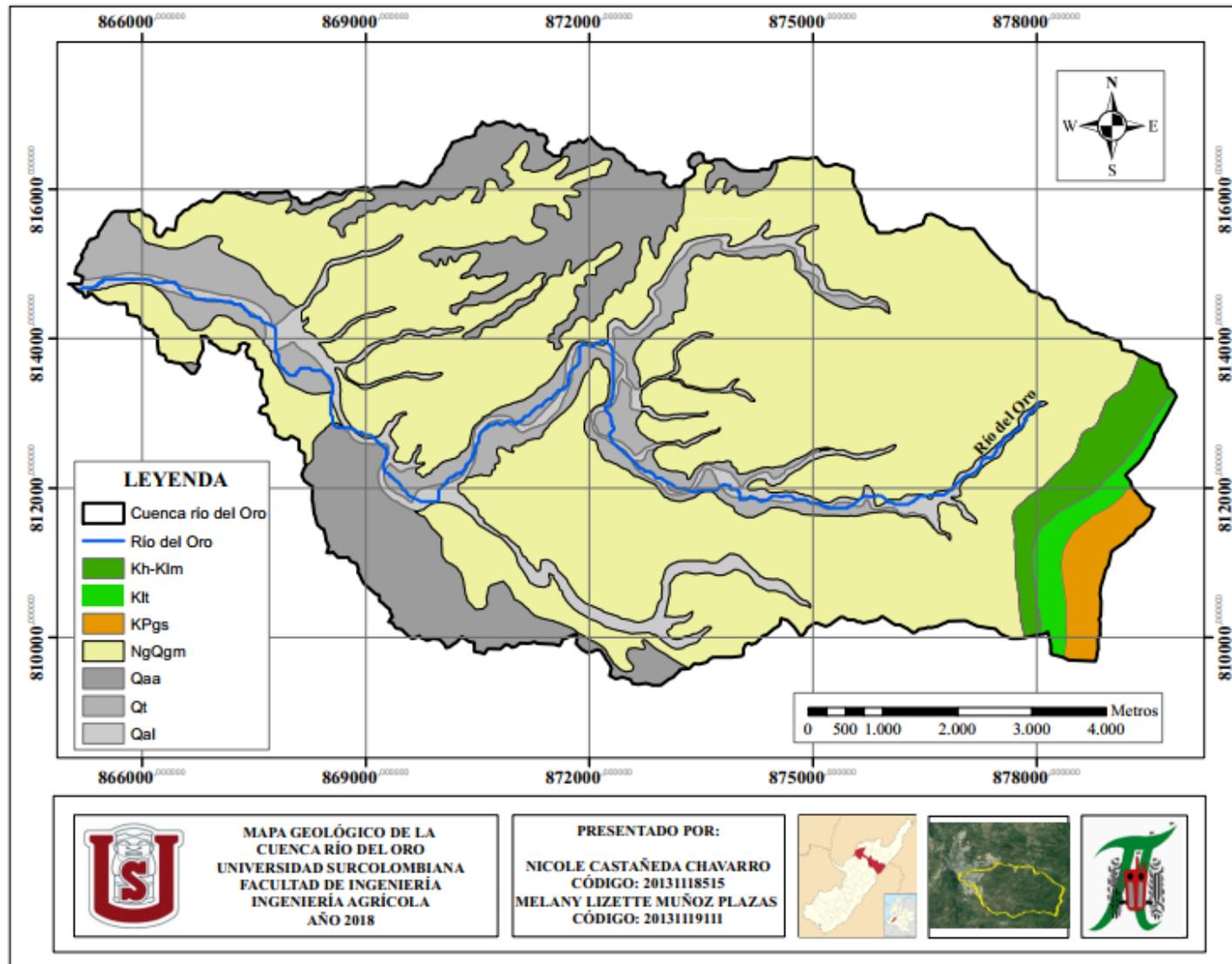
## Anexos



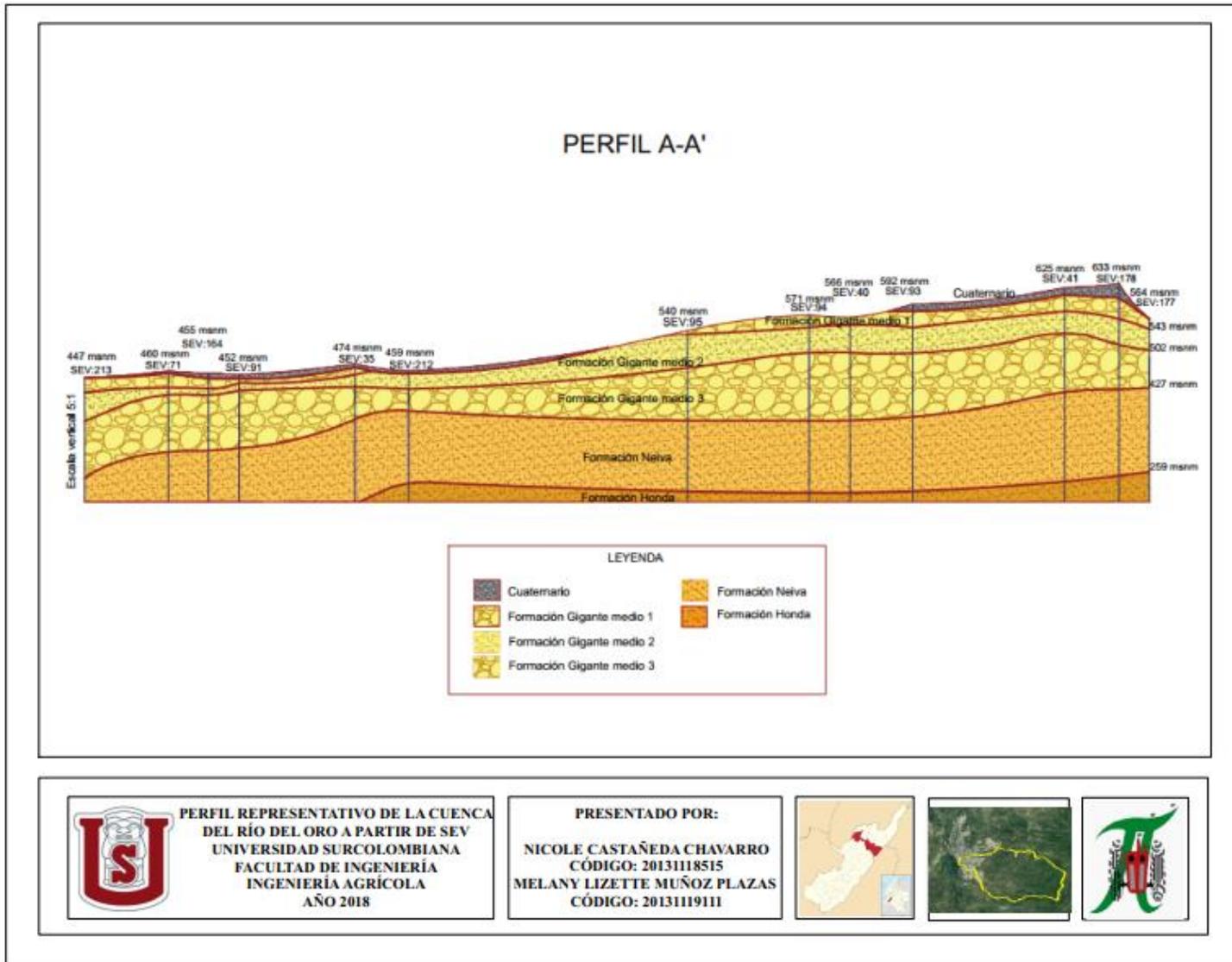
Anexo A. Mapa delimitación cuenca del río del Oro



Anexo B. Mapa de pendientes de la cuenca río del Oro



Anexo C. Mapa geológico de la cuenca río del Oro

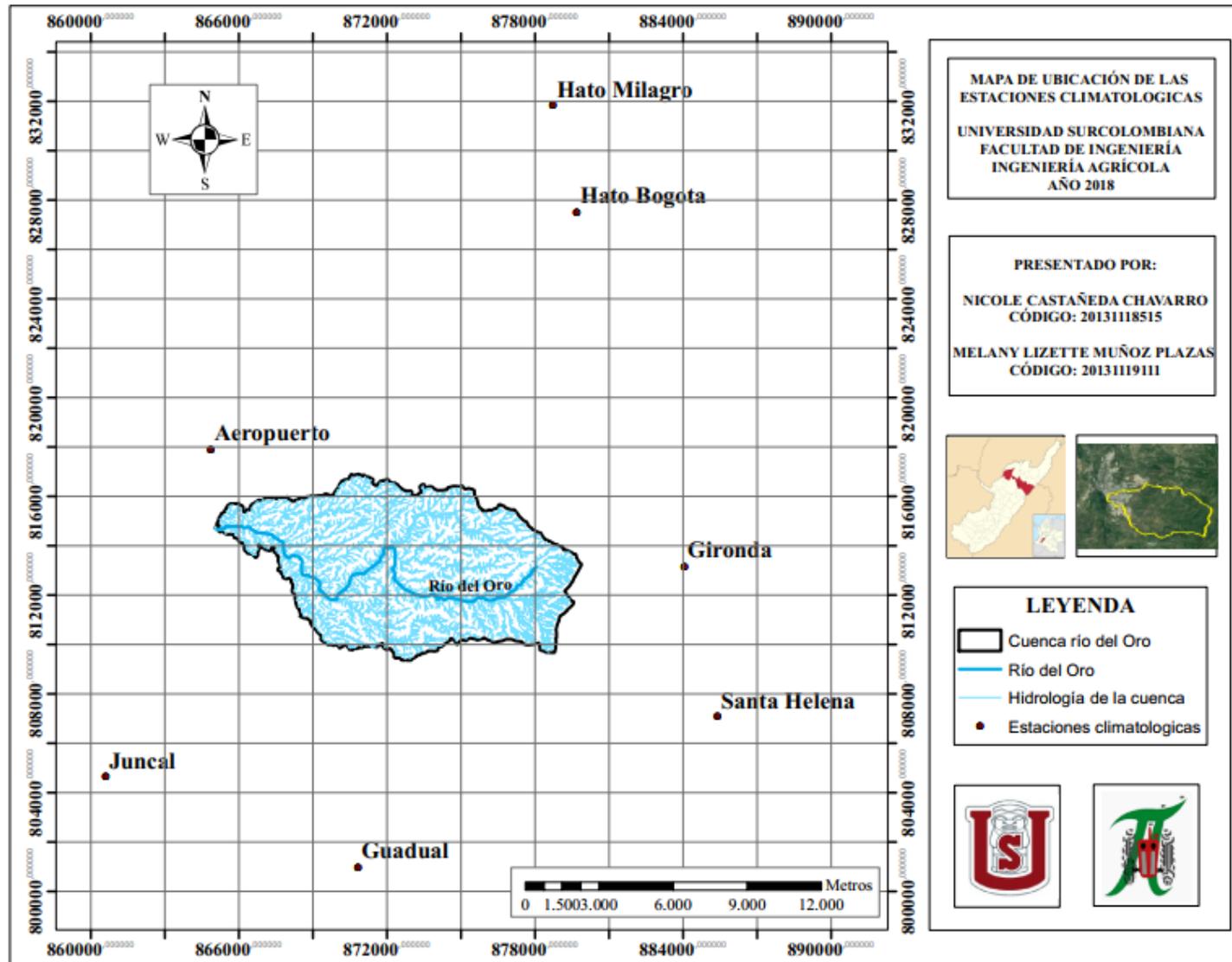


**PERFIL REPRESENTATIVO DE LA CUENCA DEL RÍO DEL ORO A PARTIR DE SEV**  
**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**INGENIERÍA AGRÍCOLA**  
**AÑO 2018**

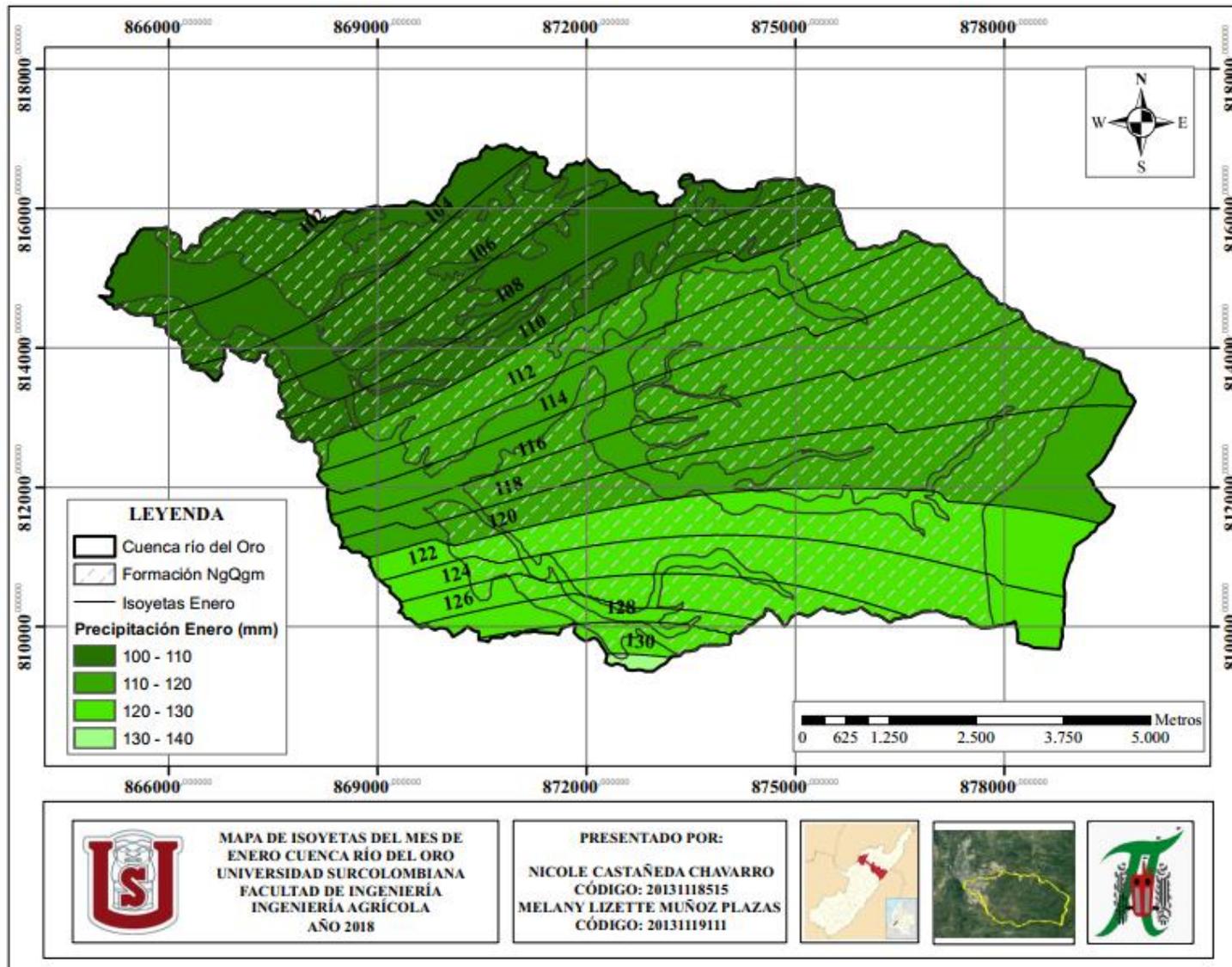
**PRESENTADO POR:**  
**NICOLE CASTAÑEDA CHAVARRO**  
**CÓDIGO: 20131118515**  
**MELANY LIZETTE MUÑOZ PLAZAS**  
**CÓDIGO: 20131119111**



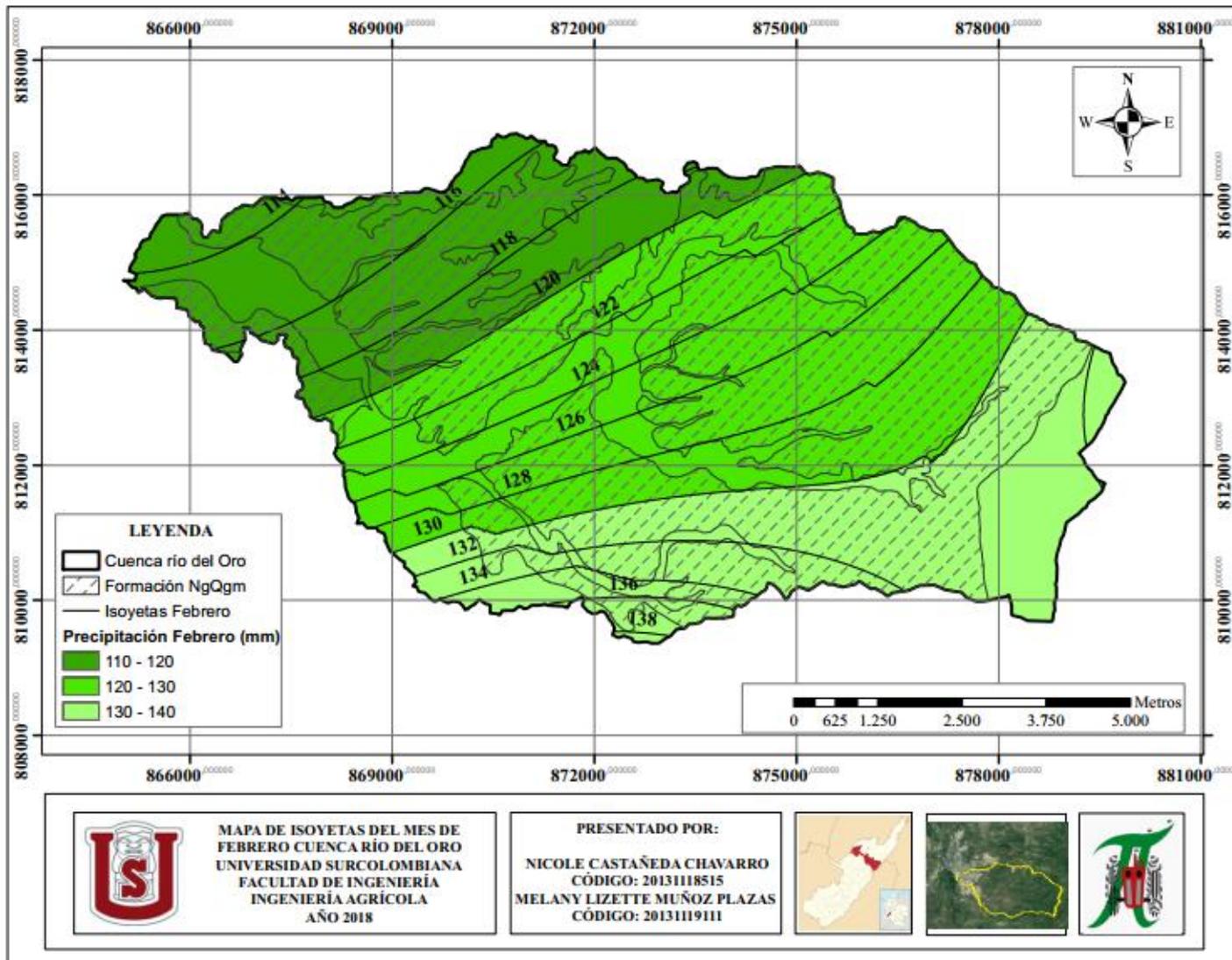
*Anexo D. Perfil representativo de la cuenca del río del Oro a partir de SEV*



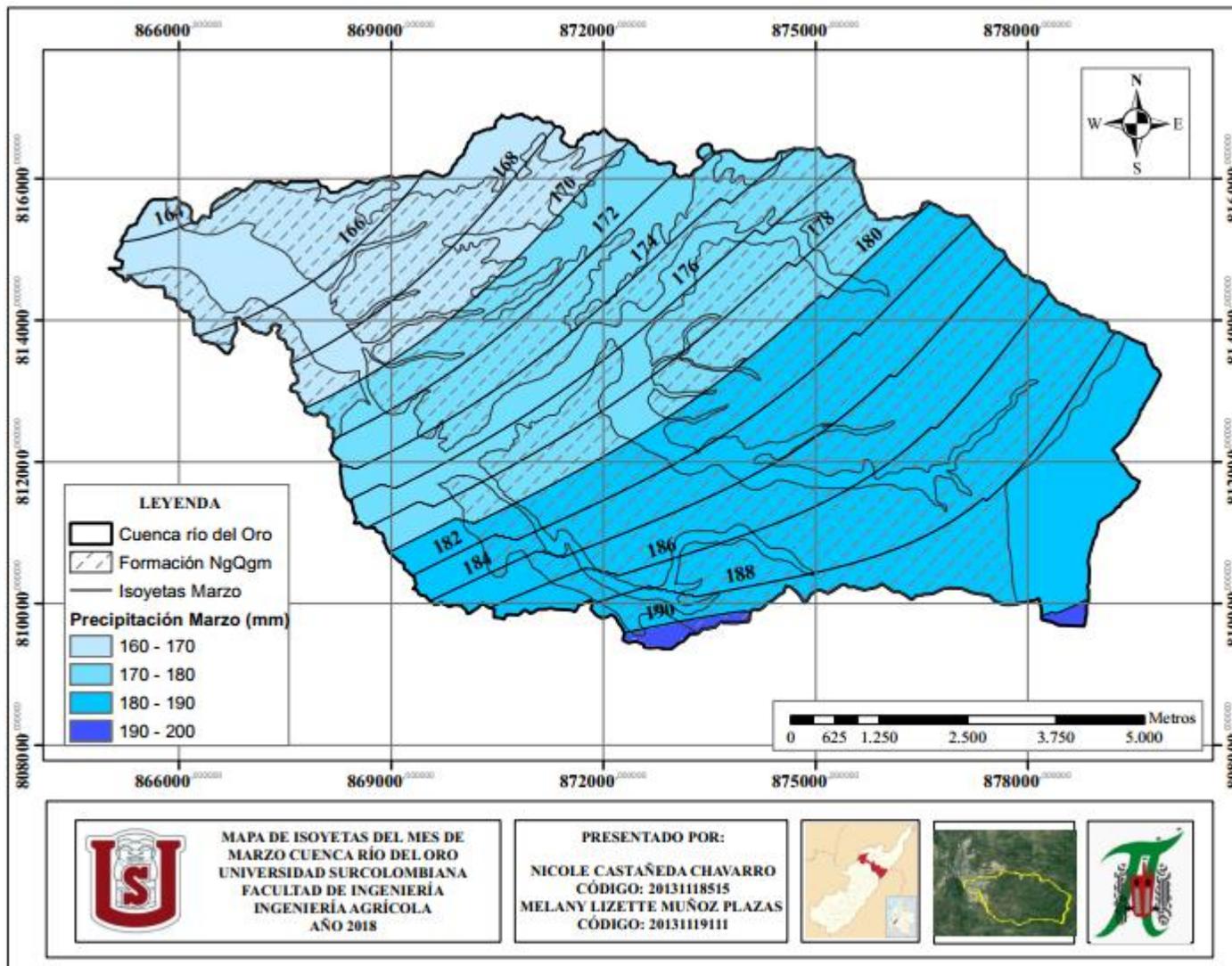
Anexo E. Mapa de ubicación de las estaciones climatológicas



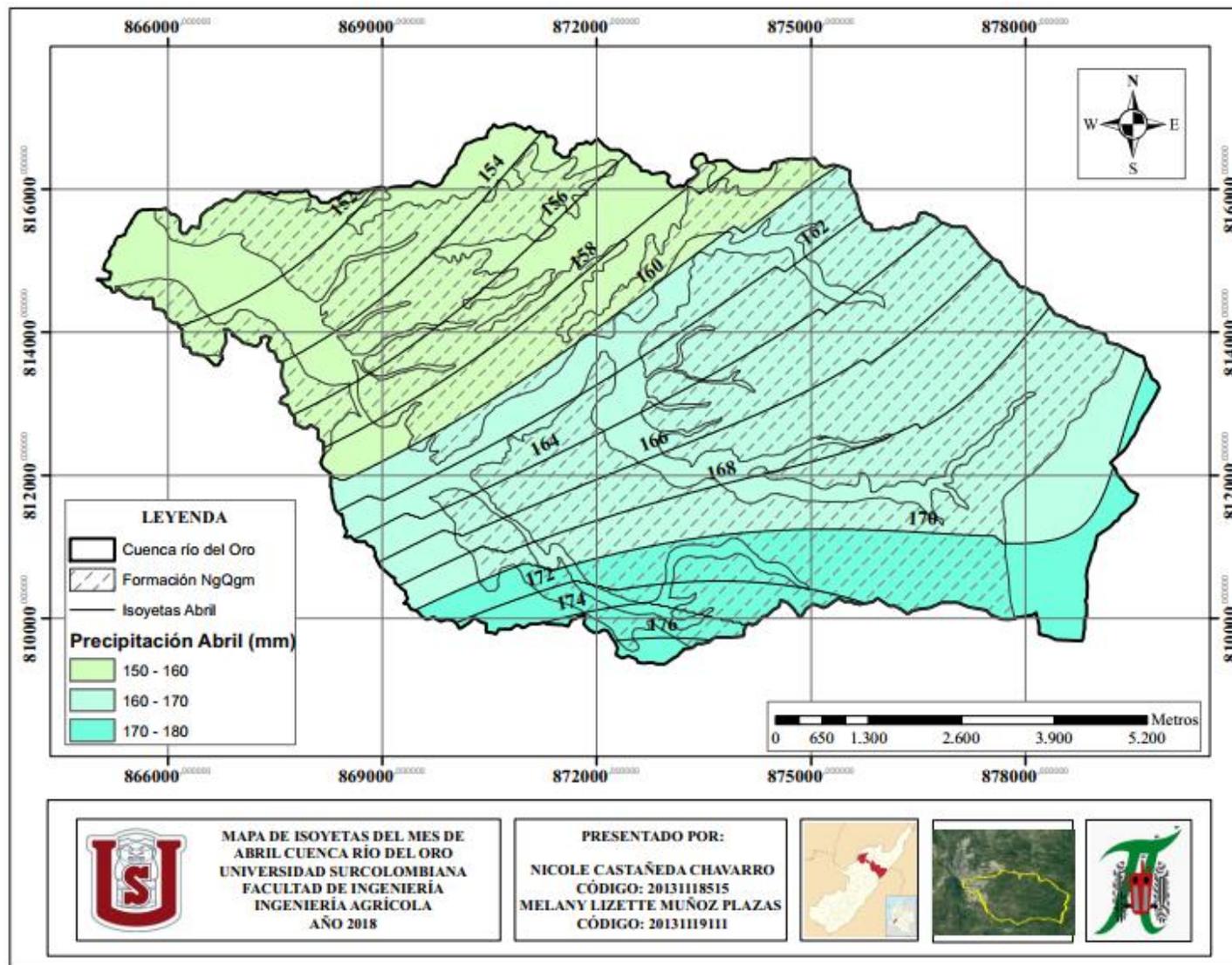
Anexo F. Mapa de isoyetas del mes de enero-cuenca río del Oro



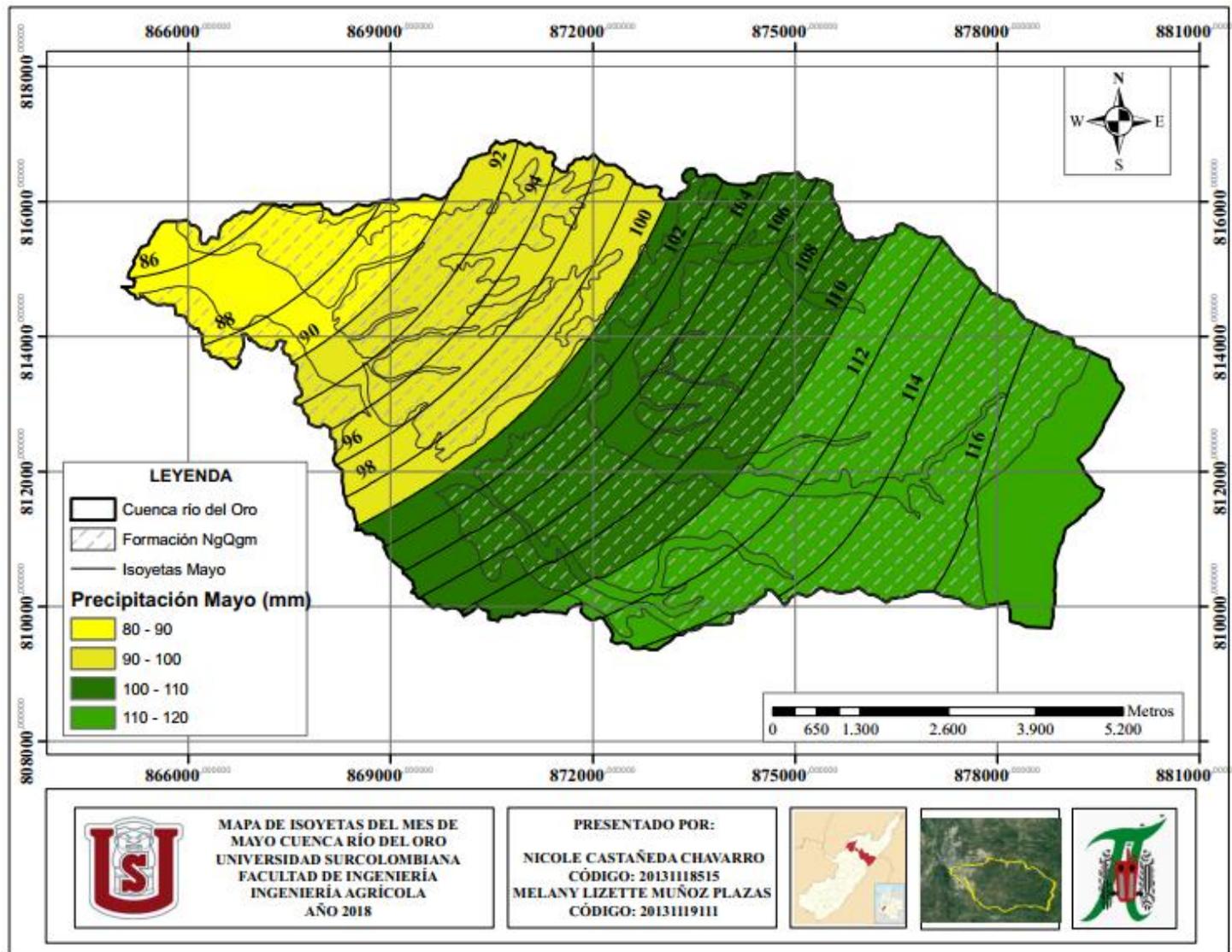
Anexo G. Mapa de isoyetas del mes de febrero-cuenca río del Oro



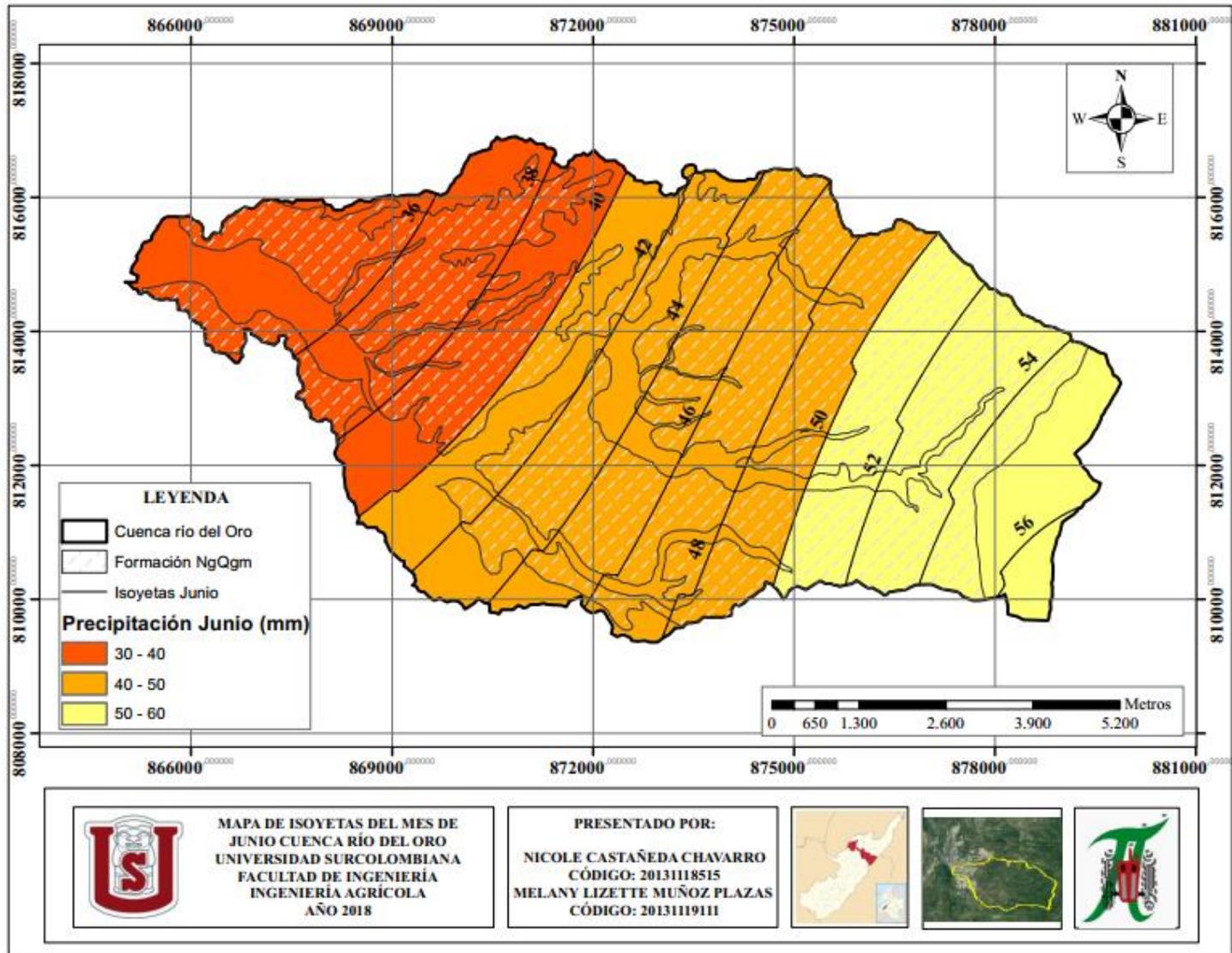
Anexo H. Mapa de isoyetas del mes de marzo-cuenca río del Oro



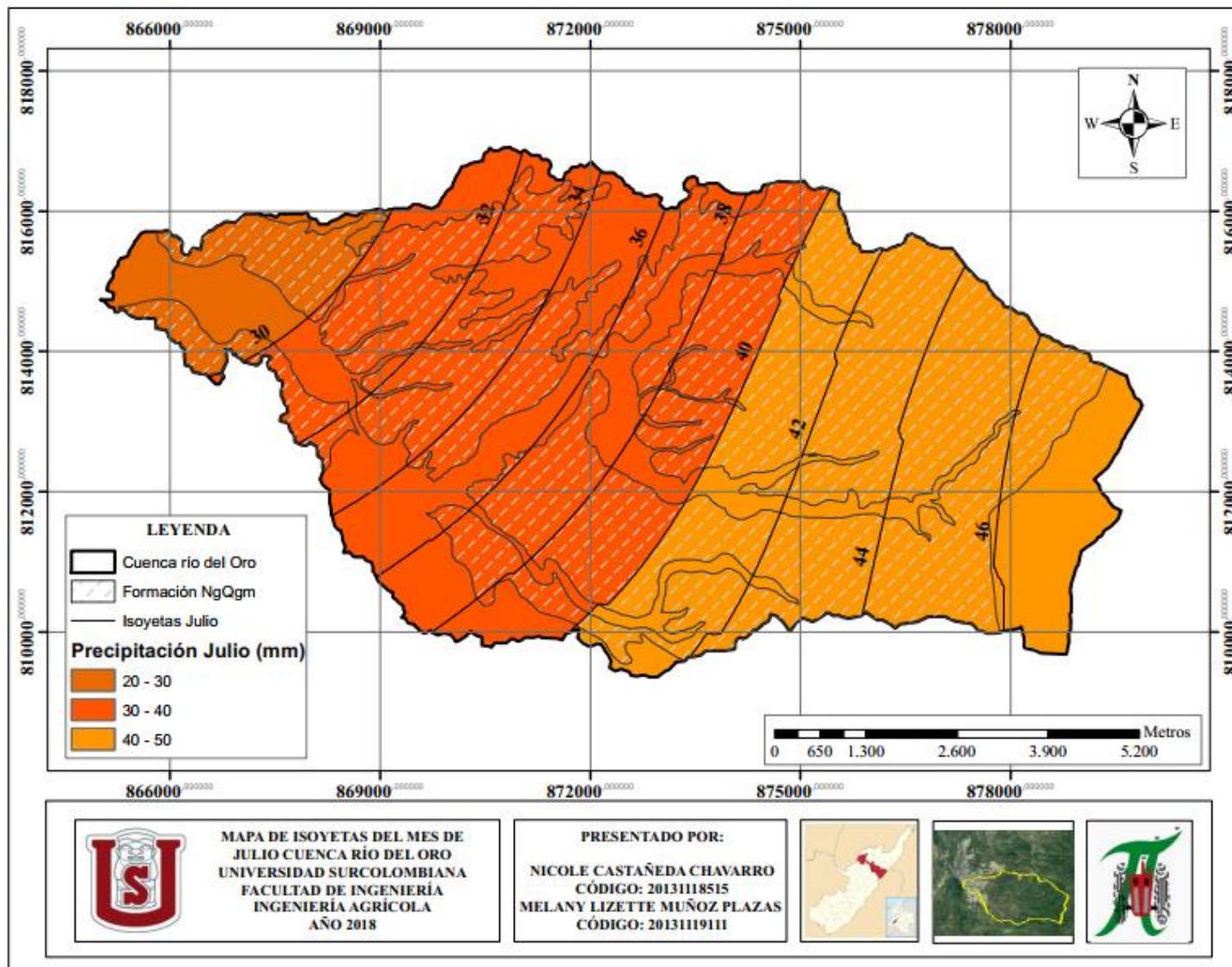
Anexo I. Mapa de isoyetas del mes de abril-cuenca río del Oro



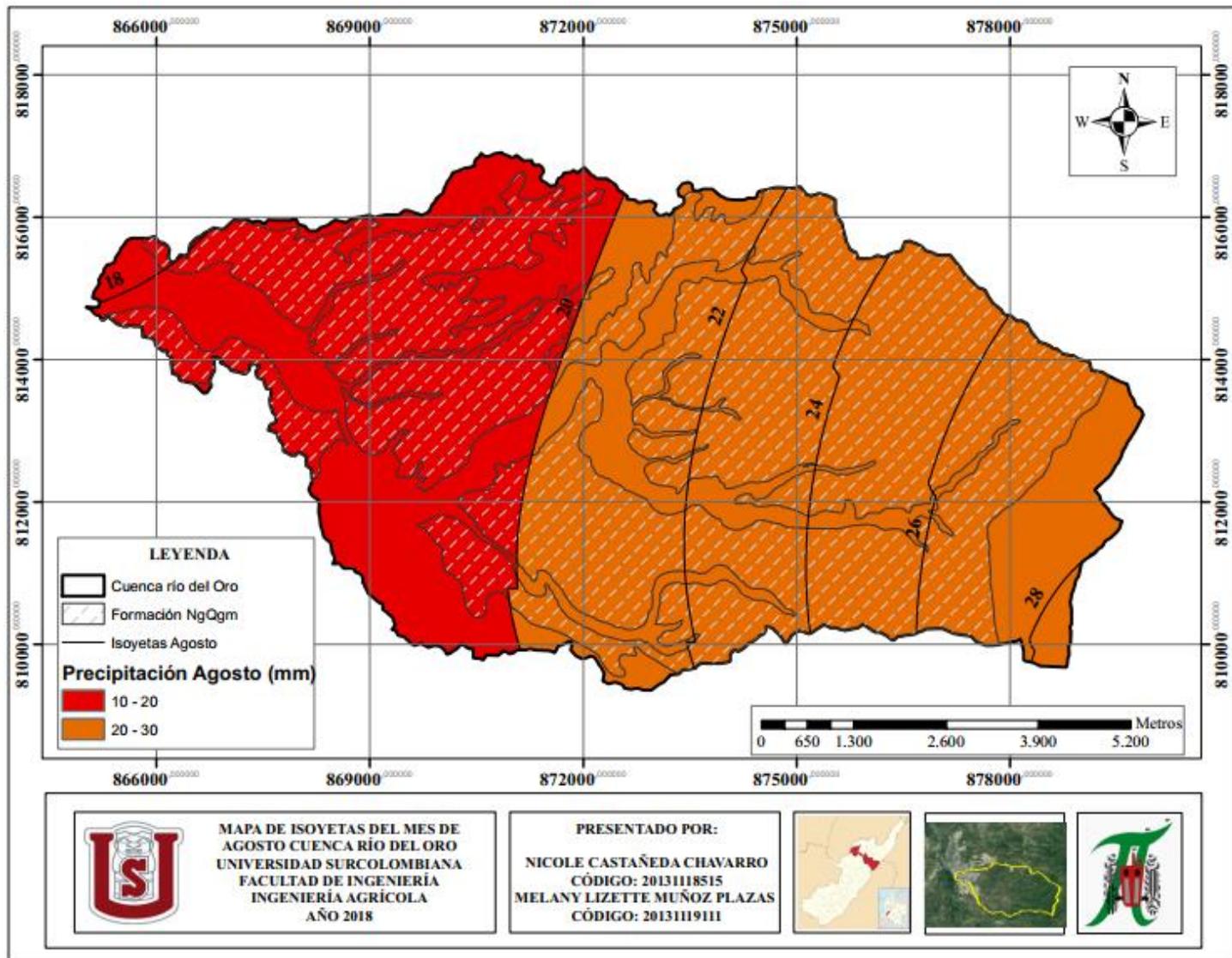
Anexo J . Mapa de isoyetas del mes de mayo-cuenca río del Oro



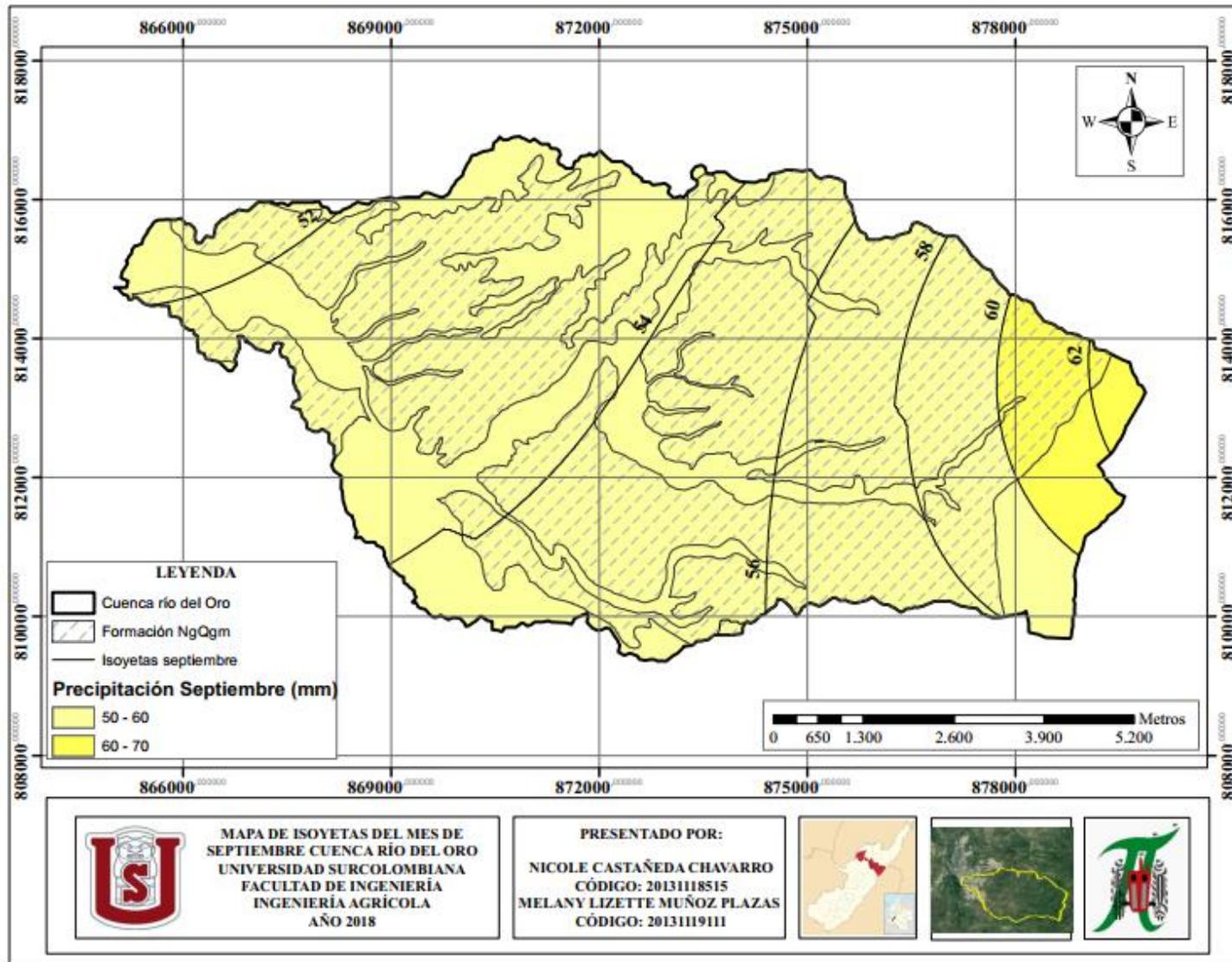
Anexo K. Mapa de isoyetas del mes de junio-cuenca río del Oro



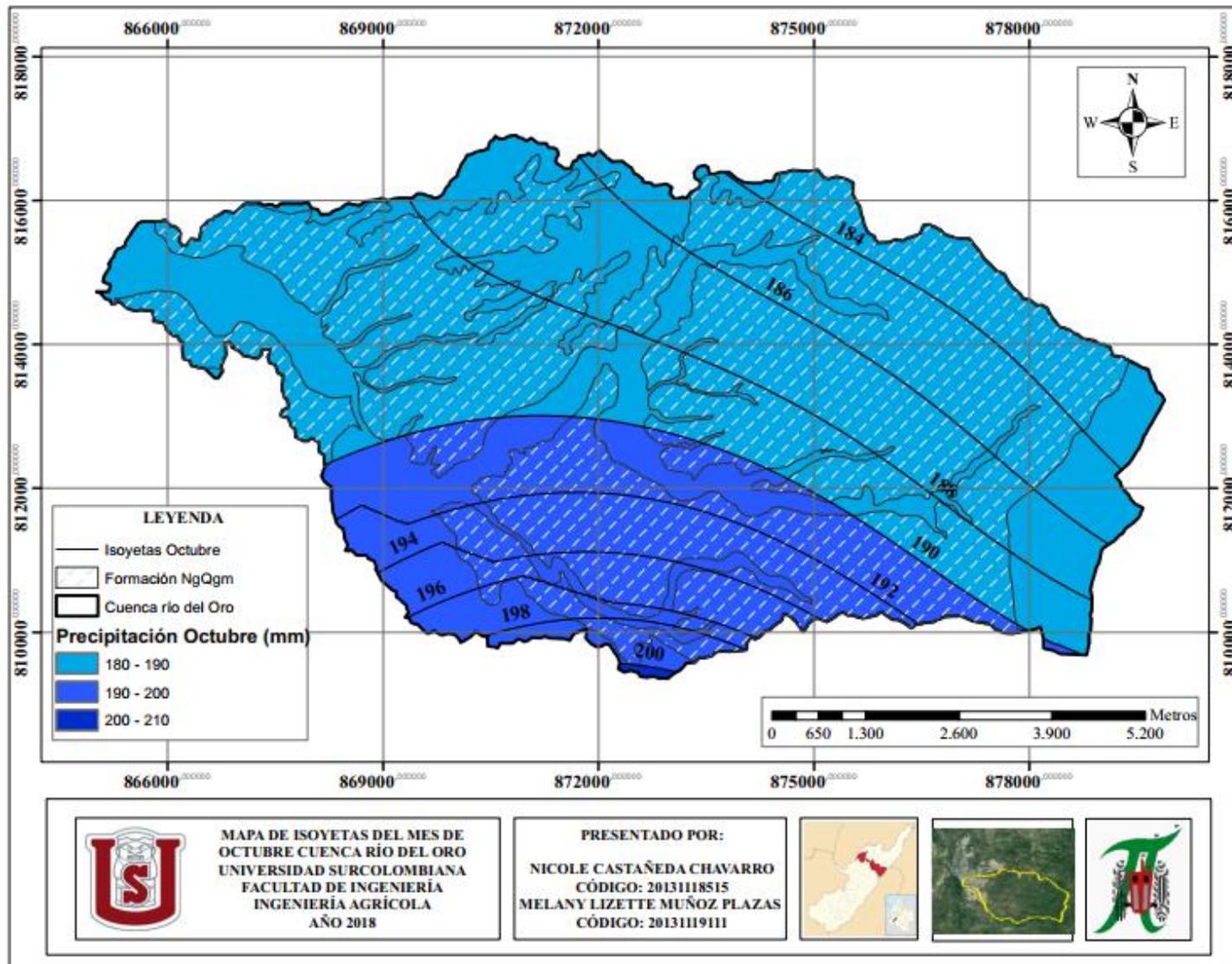
Anexo L. Mapa de isoyetas del mes de julio-cuenca río del Oro



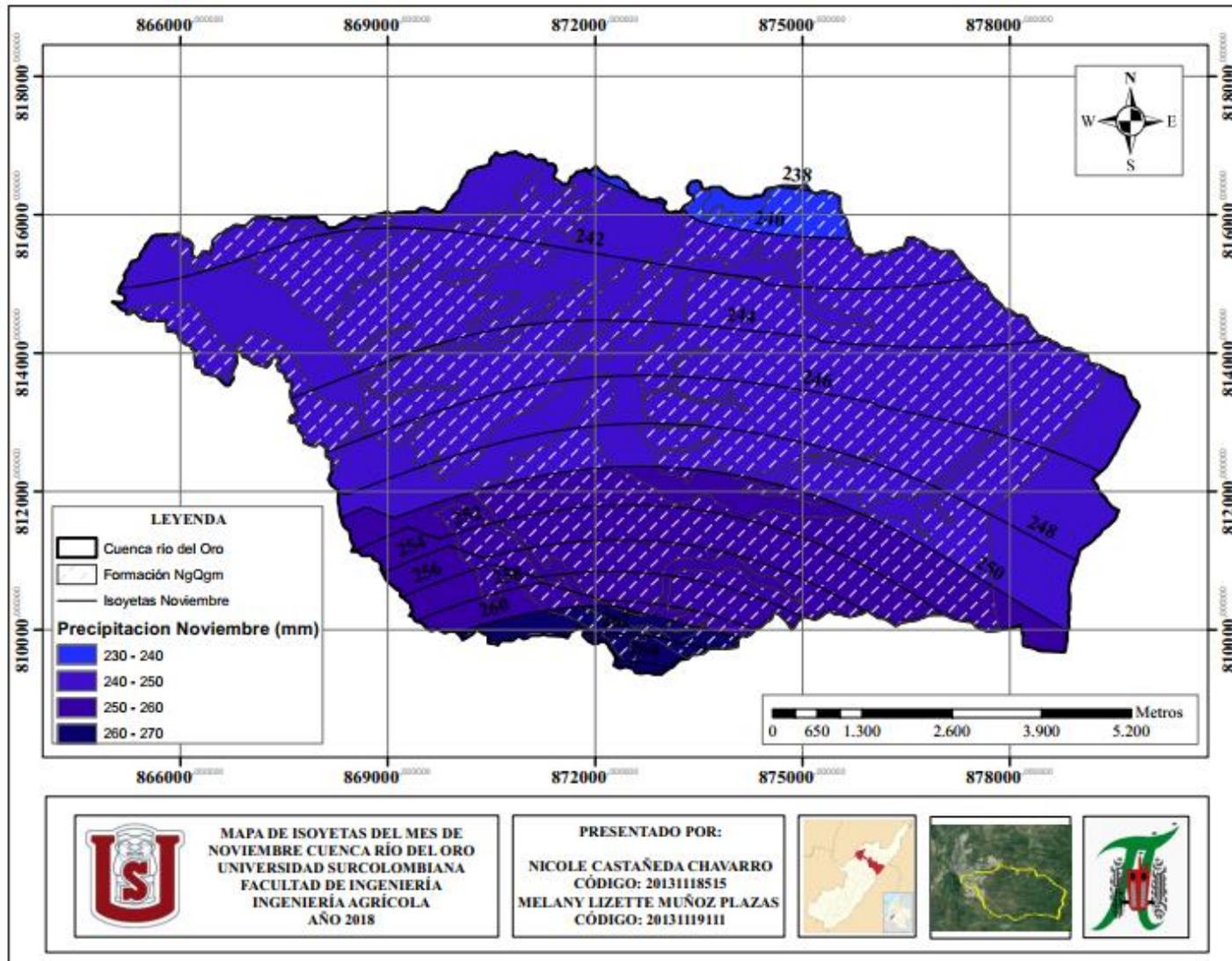
Anexo M. Mapa de isoyetas del mes de agosto-cuenca río del Oro



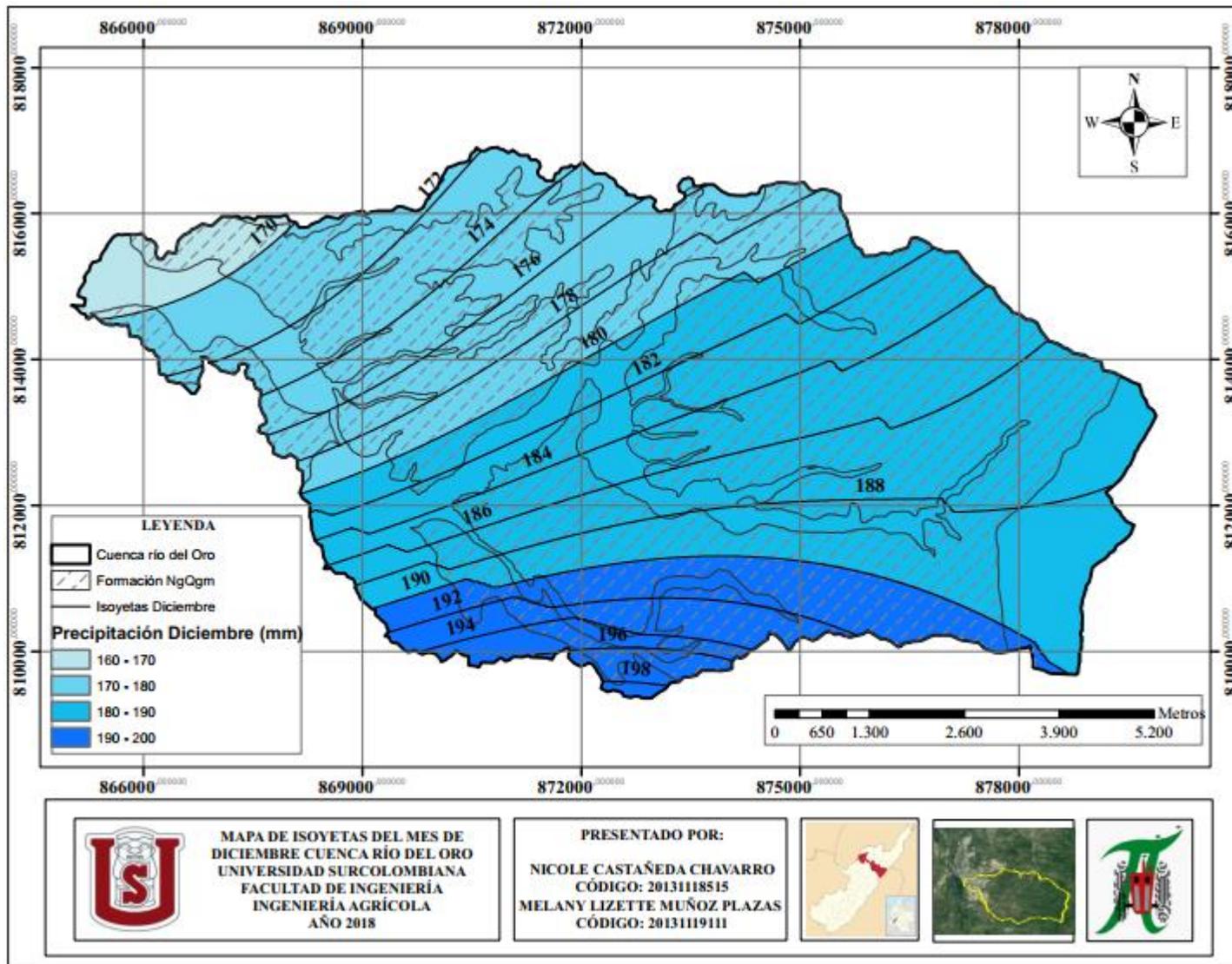
Anexo N. Mapa de isoyetas del mes de septiembre-cuenca río del Oro



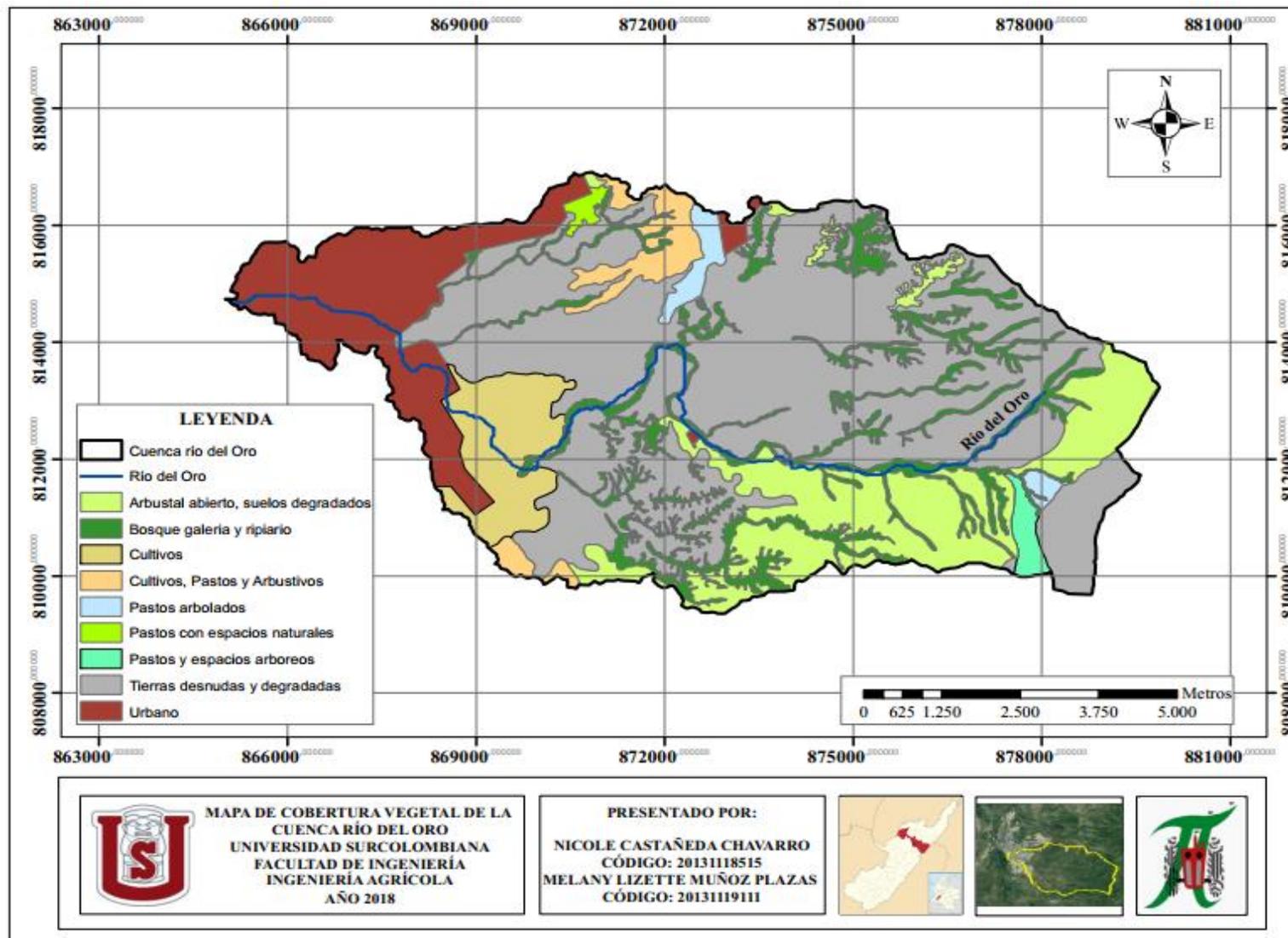
Anexo O. Mapa de isoyetas del mes de octubre-cuenca río del Oro



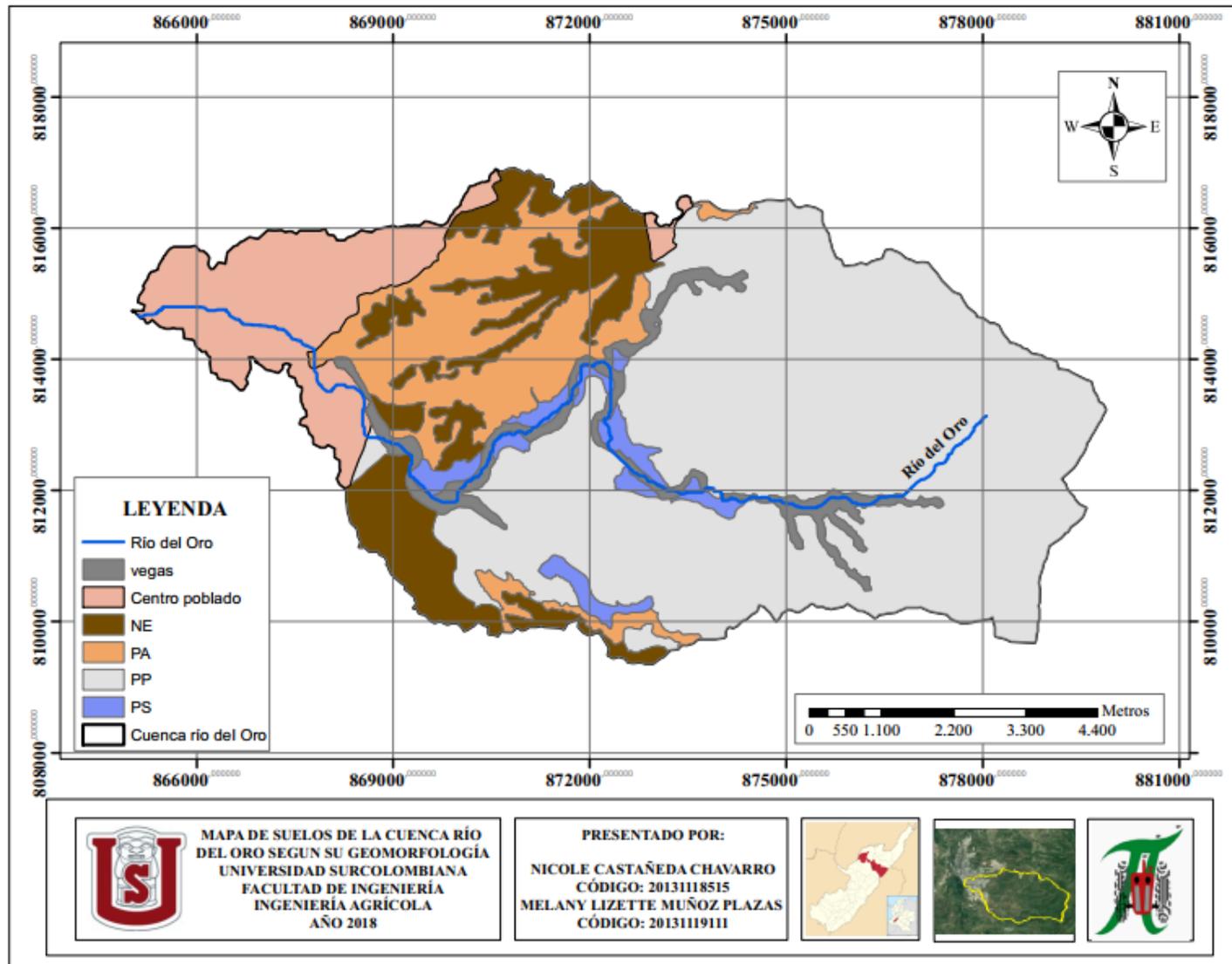
Anexo P. Mapa de isoyetas del mes de noviembre-cuenca río del Oro



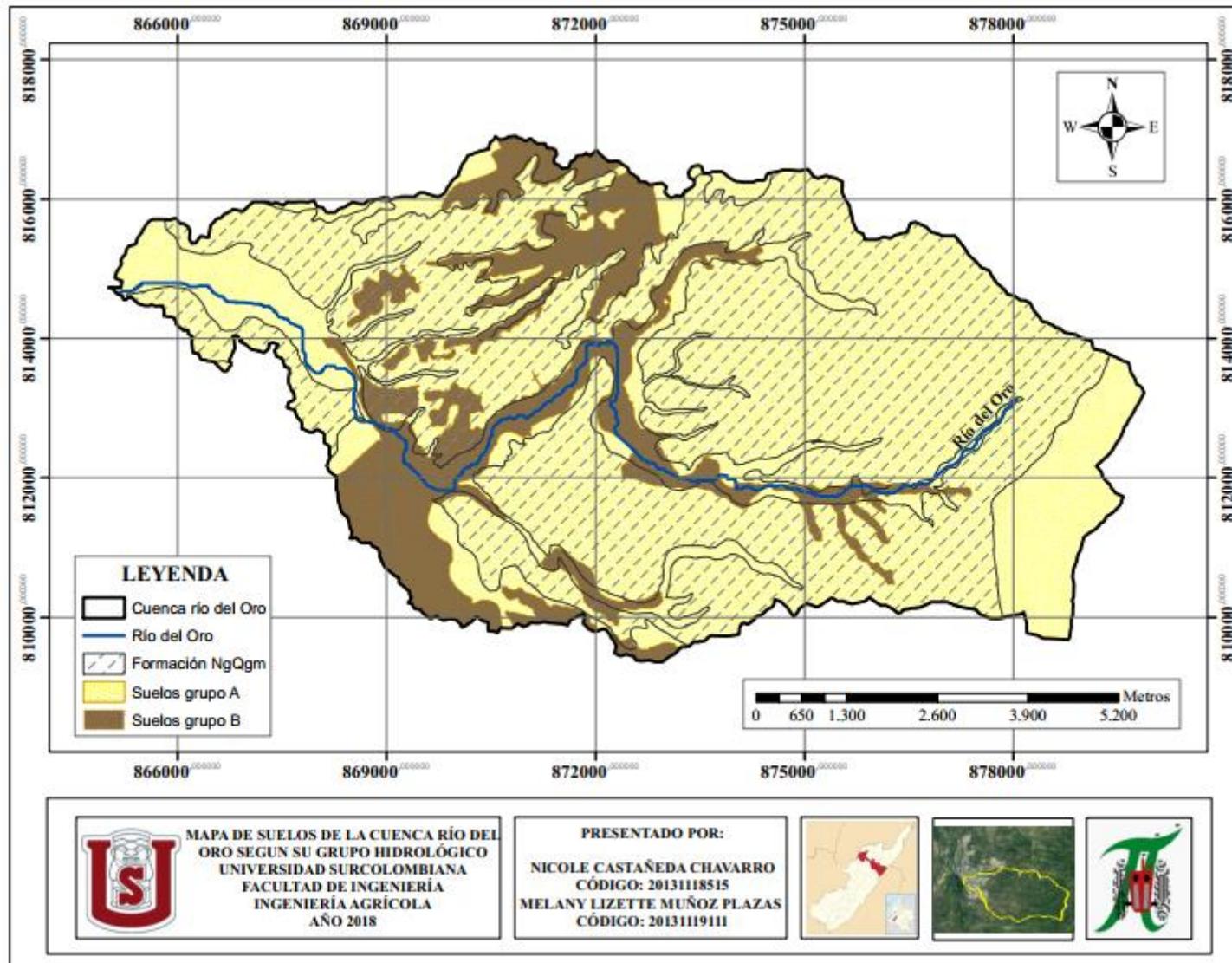
Anexo Q. Mapa de isoyetas del mes de diciembre-cuenca río del Oro



Anexo R. Mapa de cobertura vegetal de la cuenca río del Oro



Anexo S. Mapa de suelos de la cuenca río del Oro



*Anexo T. Mapa de suelos de la cuenca río del Oro según su grupo hidrológico*