

**CONSULTORÍA PARA ELABORAR ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y  
RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA, INUNDACIÓN, AVENIDA TORRENCIAL E  
INCENDIOS FORESTALES EN LOS MUNICIPIOS PRIORIZADOS EN LA JURISDICCIÓN DE  
LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA –CAR–  
CONTRATO 1185/13**

**INUNDACIONES MUNICIPIO ZIPAQUIRÁ**

**CONTRATANTE:**



**CONSULTOR:**



**BOGOTÁ, JUNIO DE 2015.**

## CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN .....	7
2	OBJETIVOS .....	8
2.1	OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	8
3	GENERALIDADES.....	9
4	ANTECEDENTES .....	10
5	ESTUDIO DE RIESGO POR INUNDACIÓN .....	11
5.1	ESTIMACIÓN DE LA AMENAZA POR INUNDACIÓN .....	12
5.1.1	Análisis de la cartografía .....	12
5.1.2	Delimitación de Cuencas .....	12
5.1.2.1	Modelo Digital de Elevación MDE .....	13
5.1.2.2	Subcuencas Rio Bogotá .....	16
5.1.2.3	Cuenca Río Bogotá hasta municipio de Zipaquirá .....	17
5.1.2.4	Delimitación hidrográfica municipio Zipaquirá .....	20
5.1.3	Cálculos morfométricos.....	22
5.1.3.1	Tiempo de concentración .....	23
5.2	ANÁLISIS HIDROCLIMATOLÓGICO .....	24
5.2.1	Estimación de caudales diferentes periodos de retorno .....	25
5.2.2	Hidrograma Unitario .....	26
5.2.3	Hidrograma Unitario Sintético .....	27
5.2.4	Precipitación Efectiva .....	28
5.2.5	Valores de Curva Número CN. ....	28
5.2.6	Curvas intensidad duración y frecuencia sintéticas .....	50
5.2.7	Diseño de la lluvia .....	52
5.3	CAUDALES MÁXIMOS .....	53
5.3.1	MODELO CON LA HERRAMIENTA HMS.....	53
5.3.1.1	Configuración del Proyecto .....	54
5.3.1.2	Basin Model .....	55
5.3.1.3	Meteologic Model.....	55
5.3.1.4	Control de especificaciones: .....	58
5.3.1.5	Calibración del modelo .....	59
5.3.2	Desarrollo de la metodología con la Herramienta ArcGIS 10. ....	60
5.4	AMENAZA HIDRODINÁMICA .....	65
5.4.1	Condiciones de contorno .....	66
5.4.2	Estimación del coeficiente de rugosidad de Manning .....	66
5.4.2.1	Método de Cowan.....	68
5.4.3	Modelo hidráulico .....	69
5.4.3.1	Análisis del modelo hidráulico .....	73
6	ESCENARIOS DE AMENAZA .....	76

6.1	Amenaza por precipitación .....	76
6.2	Amenaza Total.....	81
7	VULNERABILIDAD .....	84
7.1.	VULNERABILIDAD ZONA URBANA .....	84
7.2.	VULNERABILIDAD ZONA RURAL.....	94
8	RIESGO POR INUNDACIÓN.....	102
9	Conclusiones.....	108
10	BIBLIOGRAFÍA.....	109

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Valores tiempos de concentración.....	24
Tabla 2 Estaciones representativas de las cuencas .....	31
Tabla 3 Valores coeficientes curvas sintéticas .....	50
Tabla 4 Estaciones para cada cuenca.....	56
Tabla 5 Valores curva número y áreas de influencia .....	58
Tabla 6 Resumen caudales calculados HEC HMS. ....	59
Tabla 7 Comparación de caudales .....	65
Tabla 8 Valores de n metodología Cowan.....	68
Tabla 9 parámetros de entrada modelo hidráulico Rural y urbano del municipio Zipaquirá. ....	73
Tabla 10. Clasificación amenaza por precipitación .....	77
Tabla 11 Tipo de muros a analizar.....	85
Tabla 12 Tipo de techos a analizar .....	85
Tabla 13 Combinación de materiales de techos y muros.....	85
Tabla 14 Identificación tipo vivienda .....	86
Tabla 15. Vulnerabilidad por cota .....	94
Tabla 16. Vulnerabilidad por relieve.....	96
Tabla 17. Vulnerabilidad por suelos.....	98
Tabla 18. Vulnerabilidad rural Total .....	100
Tabla 19 Criterios de riesgos por Inundación .....	102



## LISTA DE FIGURAS

Figura1 Esquema de formato vectorial de presentación de cartografía base para estudio .....	13
Figura2 Esquema comparación formato raster de cartografía base para el estudio.....	14
Figura3 Municipio de Zipaquirá en cuenca Río Bogotá.....	15
Figura4 Mapa cuencas tercer ordenen .....	16
Figura5 Esquema de código de dirección de flujo.....	17
Figura6 Mapa de acumulación de Flujo.....	18
Figura7 Esquema de superposición acumulación de flujo con red hídrica IGAC .....	19
Figura8 Sistema hidrográfico municipio Zipaquirá.....	20
Figura 9 Mapa delimitación de cuencas Río Bogotá .....	21
Figura10 Hidrograma de crecientes.....	25
Figura11 Hidrograma unitario triangular .....	27
Figura12 Curva número cuencas municipio Zipaquirá .....	29
Figura13 Mapa coeficiente de escorrentía S cuencas municipio Zipaquirá.....	30
Figura14 Estaciones climatológicas cuencas hidrográficas Zipaquirá.....	32
Figura15 Software cálculos hidrológicos y estadísticos. Fuente. Software Hidroesta .....	38
Figura16 Precipitación máxima 24 horas TR 12.5 años.....	48
Figura17 Precipitación máxima 24 horas TR 50 años.....	49
Figura18 Mapa división de regiones para Colombia .....	51
Figura19 Curva IDF sintéticas para estación Acandy .....	52
Figura20 Hietogramas de diseño para estación Acandy.....	53
Figura21 Esquema de iniciación de un nuevo proyecto en HMS .....	54
Figura22 Modelo de cuencas para software HEC HMS.....	55
Figura23 Mapa áreas estaciones climatológicas cuencas hidrográficas Zipaquirá .....	57
Figura24 Esquema de Calibración del modelo.....	59
Figura25 Caudal pico m3/s cuencas municipio Zipaquirá .....	61
Figura26 Tiempo pico horas cuencas Municipio Zipaquirá .....	62
Figura27 Caudal de diseño TR 12.5 (m3/s)) cuencas Municipio Zipaquirá .....	63
Figura28 Caudal de diseño TR 50 (m3/s)) cuencas municipio Zipaquirá .....	64
Figura29 Interface HecGeoras en ArcGIS 10.....	66
Figura 30 Esquema modelo hidráulico municipio rural Zipaquirá .....	70
Figura 31 Esquema modelo hidráulico municipio urbano Zipaquirá .....	71
Figura32 Exportando datos al modelo hidrológico .....	72
Figura 33 Datos exportados al Hec Ras.....	72
Figura34 Amenaza rural por precipitación máxima en 24 horas.....	77
Figura35 Mapa amenaza rural por niveles municipio Zipaquirá. ....	79
Figura36 Mapa amenaza urbana por niveles municipio Zipaquirá. ....	80
Figura37 Mapa amenaza Total municipio Zipaquirá. ....	82
Figura38 Mapa amenaza rural Total municipio Zipaquirá. ....	83
Figura40 Vulnerabilidad Tipo I .....	87
Figura41 Vivienda Tipo II. ....	87
Figura41 Vivienda Tipo III .....	88
Figura42 Vivienda Tipo IV .....	88
Figura43 Vivienda Tipo V.....	89
Figura44 Vulnerabilidad sector urbano .....	93
Figura45 Vulnerabilidad rural por cota.....	95
Figura46 Vulnerabilidad rural por relieve .....	97
Figura47 Vulnerabilidad rural por suelos .....	99
Figura48 Mapa vulnerabilidad total zonas rurales.....	101
Figura49 Riesgo por inundación rural municipio Zipaquirá .....	105
Figura50 Riesgo por inundación urbana municipio Zipaquirá .....	106

## LISTA DE FOTOGRAFÍA

Fotografía 1.	Personal de apoyo recibiendo equipo en el municipio de Zipaquirá .....	90
Fotografía 2.	Vulnerabilidad municipio de Zipaquirá .....	92

## 1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo que ha tenido Colombia, especialmente por su crecimiento poblacional, ha provocado un preocupante cambio en el uso del suelo. Dicho cambio, sin el control conveniente, ha propiciado que los asentamientos humanos ocupen el lecho de los ríos al mismo tiempo que las alteraciones del cambio climático, la disminución de cobertura vegetal, entre otros, han favorecido para que las precipitaciones varíen abruptamente aumentando el caudal de las fuentes hídricas y el transporte de sedimentos. Es por esto que, en los últimos años, se han observado en el país grandes catástrofes provocadas por el fenómeno de inundación, afectando vidas humanas, vías, cultivos, etc.

La necesidad de generar un desarrollo sostenible hace necesario que el Estado busque alternativas para la planeación del territorio, siendo necesaria la identificación de las zonas que se ven afectadas o amenazadas por lo eventos naturales, sumándose a esto la identificación de áreas vulnerables para calcular el riesgo en el que se encuentran actualmente.

Por esta razón, en cumplimiento a la Ley 388 de 1997 en su décimo segundo artículo - párrafo 2.3- que exige “la determinación y ubicación en planos de las zonas que presenten alto riesgo para la localización de asentamientos humanos, por amenazas o riesgos naturales o por condiciones de insalubridad”, se considera prudente que se realice un estudio de la amenaza por desbordamiento, de la vulnerabilidad física y por consiguiente obtener los riesgos por inundación para el municipio Zipaquirá, Cundinamarca.

Los resultados del estudio serán deducidos de los patrones del clima, así como los niveles de precipitación y los registros de inundaciones de los últimos años. A su vez, se tendrán en cuenta otros factores como la composición del suelo valiéndose de subprocesos que se pueden resumir del análisis de la cartografía, estimación de los caudales para diferentes periodos de retorno y generación de escenarios de amenaza. También se evaluarán los materiales empleados en la construcción de las viviendas cercanas a las fuentes hídricas ya que estos representan una variable muy importante en la estimación de la vulnerabilidad. Como apoyo a la planeación del territorio, de los municipios de su jurisdicción, la autoridad ambiental CAR genera la formulación de los estudios de amenazas, vulnerabilidad y riesgo para el escenario de inundación.

Con ellos, se espera obtener en los resultados patrones que permitan conocer cuáles son las fuentes hídricas con mayor tendencia a inundarse, los periodos de tiempo en los que se presenta un índice elevado de desbordamientos y las viviendas posiblemente afectadas por este fenómeno, con el fin de diseñar un modelo eficaz que disminuya o anule los posibles daños.

## 2 OBJETIVOS

Analizar el escenario de inundación para la formulación del Plan de Gestión del Riesgo del Municipio Zipaquirá.

### 2.1 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Evaluar la amenaza por inundación generada por las fuentes hídricas que comprenden la zona rural y urbana del municipio Zipaquirá.
- Evaluar la amenaza por inundación que se genera por precipitaciones máximas en la zona rural y urbana del municipio Zipaquirá.
- Evaluar la vulnerabilidad física ante inundaciones de la zona urbana y rural del municipio Zipaquirá.
- Evaluar el riesgo por inundación mediante el cruce de la información cartográfica de amenaza y vulnerabilidad para la zona urbana y rural del municipio Zipaquirá.
- Estudiar modelos de precipitación y escorrentía para caudales máximos del municipio Zipaquirá.
- Revisar el desarrollo de modelos hidráulicos del municipio Zipaquirá.
- Realizar análisis estadístico de información Hidroclimatológica.
- Crear y transformar información cartográfica del municipio de Zipaquirá.
- Realizar simulaciones hidráulicas para periodos de retorno de 12.5 y 50 años para fuentes rurales a escala 1:25000 y urbana escala 1: 2000.
- Identificar zonas de amenaza, vulnerabilidad y riesgo (alta, media, baja) para el municipio Zipaquirá.

### 3 GENERALIDADES

El proyecto presenta a continuación una descripción de la información disponible para el análisis y comprensión de los principales procesos que se llevaron a cabo durante las diferentes etapas de la investigación.

Como primera medida, se realizó una serie de actividades por medio de la utilización de variadas herramientas de software y metodologías apropiadas, uso de modelos y cálculos morfométricos con el objetivo de incrementar las probabilidades de éxito de los resultados, orientadas a determinar el diagnóstico territorial del municipio Zipaquirá.

De manera general, a continuación se presenta el desarrollo de las actividades realizadas:

- Estimaciones de amenaza por inundación, realizada por medio de cartografía.
- Estimación de caudales para diferentes periodos de retorno.
- Generación de escenarios de amenaza.
- Análisis de vulnerabilidad del municipio. Se tomó como base los elementos expuestos, presentes en la zona.
- Evaluación del riesgo por inundación mediante interacción de los factores involucrados en el riesgo holístico.

Adicionalmente, las particularidades anteriores están contenidas en las figuras disponibles en el presente informe.

#### 4 ANTECEDENTES

Los escenarios adversos físico-ambientales que a diario presenta el planeta Tierra, han motivado al ser humano a ingeniar y poner en práctica diversas y variadas estrategias para afrontar, mitigar y planificar el embate de fenómenos naturales y antrópicos en lo que tiene que ver con riesgos y amenazas por inundación y vulnerabilidad física.

Colombia no es la excepción y dada la diversidad de condiciones físicas, geográficas y socioculturales, a través de la historia se ha evidenciado el ingenio, creatividad y un sinnúmero de estrategias para afrontar las hostilidades naturales y antrópicas que propician el riesgo y la vulnerabilidad.

No obstante los esfuerzos de unos y otros, para entidades gubernamentales del orden local, departamental, nacional e internacional han sido insuficientes. Los fenómenos recurrentes, las causas en crecida, la población aumentada, los recursos insuficientes, las amenazas y vulnerabilidad progresiva han hecho que propios y extraños, ambientalistas, planeadores políticos y estadistas hayan dirigido sus esfuerzos a este tema trascendental del desarrollo socioeconómico. De manera que la tecnología de diferentes esferas se ha puesto al servicio y atención para planificar y aplicar los correctivos de manera integral y holística en concordancia con cada unidad geográfica en particular.

Así, revisado el estado del arte de estudios y experiencias sobre riesgos y amenazas por inundación y vulnerabilidad física, se aprecia en el estudio de fecha julio de 2011 presentado ante el Centro Nacional de Prevención de Desastres del Gobierno Federal de México, Dirección de Investigación y Subdirección de Riesgos por Inundación, el trabajo “Metodología para la elaboración de mapas de riesgos por inundación” por Marco Antonio Salas Salinas, con el fin de diseñar un sistema eficaz para la disminución de los riesgos por inundación en México.

El trabajo en cuestión es una exposición sobre los riesgos por inundación, enfocado en conocer los peligros y amenazas para saber cuándo afectan; además en identificar y establecer las características, los niveles actuales de riesgo que implican estos fenómenos y diseñar acciones para mitigar oportunamente dichos riesgos.

En la recolección de datos se empleó un software de uso libre (e.g HecRAS) con el que se consigue delimitar las zonas inundadas a partir de simulaciones hidráulicas del fenómeno, auxiliadas por simulaciones virtuales del terreno. Respecto a la tipificación de la vivienda, los datos se extrajeron del censo de población y vivienda a nivel de registro junto con un mapa de las zonas urbanas a nivel de manzana. El análisis de resultados permitió la elaboración de detallados mapas de amenaza y de vulnerabilidad los cuales permitieron, a su vez, la elaboración de un mapa de riesgo por inundación de 100 años de periodo de retorno.

Esta investigación dio como resultado la estructuración de un sistema de recolección y manejo de datos, enfocada en la creación de herramientas que sean de utilidad a la hora de diseñar un plan para mitigar los riesgos por inundación en diferentes escenarios.

Adicional al anterior trabajo referente se examinaron otra serie de investigaciones proporcionadas por la CAR, el IDEAM, y el IGAC, realizadas con el fin de obtener mayor información acerca del terreno y los patrones de clima. El análisis de estos resultados permitió la identificación de posibles amenazas y la estimación de la vulnerabilidad, siendo ambas necesarias para hallar el riesgo por inundación de una región.

## 5 ESTUDIO DE RIESGO POR INUNDACIÓN

El análisis de la amenaza por inundación se mide en función de la frecuencia de ocurrencia. En áreas urbanas y rurales será posible evaluar la amenaza por inundación desde tres dimensiones:

- La amenaza pluvial (análisis hidrológico) debida a lluvias intensas o de gran duración, caídas a nivel de cuencas. Mediante este análisis se establece la relación entre la precipitación y la escorrentía.
- La amenaza hidrodinámica (análisis hidráulico) mediante la modelación de las crecientes que transitan por las fuentes hídricas.
- La amenaza en la llanura inundable mediante la modelación que permita simular la distribución de la lámina de agua en la llanura de inundación y sus características.

Para realizar el estudio hidrológico de las zonas a estudiar se hace indispensable la identificación de las fuentes hídricas presentes en el área de estudio, tomando como base la información cartográfica del municipio Zipaquirá, creando un DEM (modelo digital del terreno), y se realiza la identificación de las fuentes presentes. De esta manera se hace una comparación con las fuentes existentes en la cartografía general. Identificadas las fuentes a analizar en el estudio hidrológico, se realiza el cálculo del caudal por medio del método lluvia escorrentía; para esto es necesaria la información hidroclimatológica de las estaciones presentes en el área de estudio a fin de obtener información confiable y veraz.

## 5.1 ESTIMACIÓN DE LA AMENAZA POR INUNDACIÓN

Para obtener la amenaza por inundación es necesario desarrollar las siguientes sub actividades que, una vez cumplidas, permitirán la identificación de la amenaza en el municipio Zipaquirá. Así, el desarrollo del estudio se puede resumir en: análisis de la cartografía, estimación de los caudales para diferentes periodos de retorno y generación de escenarios de amenaza. En el presente contenido se explica cada uno de estos componentes.

### 5.1.1 Análisis de la cartografía

Para desarrollar un buen análisis de todo proyecto de amenaza, la cartografía es un insumo muy importante ya que, con ella, se determinan las características de las cuencas y el comportamiento de los caudales que se puedan proyectar. En este ejercicio se partió de la cartografía oficial suministrada por la CAR, la cual recibió un tratamiento para la obtención de modelos digitales. Se contó con herramientas ArcGIS 10, sus extensiones Spatial Analyst, Hydrology y en general todas las extensiones para álgebra de mapas.

#### Modelo Digital de Elevación:

Como primera herramienta en la generación del modelo hidrológico se cuenta con un modelo digital de la elevación del terreno el cual hace una aproximación real del mismo, siendo este la base para la utilización de la herramienta ArcHydro. Para generar un modelo hidrológico en un SIG es necesario contar con un algoritmo que permita que el flujo sea acumulativo con el área, por tal razón se cuenta con un modelo digital de elevación, en formato Raster de píxeles de 30 x 30 metros, para relacionarlo posteriormente con la precipitación y calcular los caudales máximos.

La cartografía insumo para el análisis del escenario de inundación para zonas rurales a escala 1: 25000 es suministrada en su totalidad por la autoridad ambiental CAR, la cual cuenta con información de curvas de nivel, drenajes primarios y secundarios de la jurisdicción, siendo la base para la generación de la temáticas de inundación. Adicionalmente, realizado el análisis de esta cartografía, se adquiere un modelo de sombras de la zona de estudio que permite una resolución de 12.5 metros; esta se utiliza para mejorar la información de aquellas zonas donde se observan nubes o alguna deficiencia en las curvas de nivel. Esta información se utiliza para mejorar los modelos hidrológicos e hidráulicos pero en ningún momento se modifica la información cartográfica oficial del IGAC y que es tomada como base para el estudio.

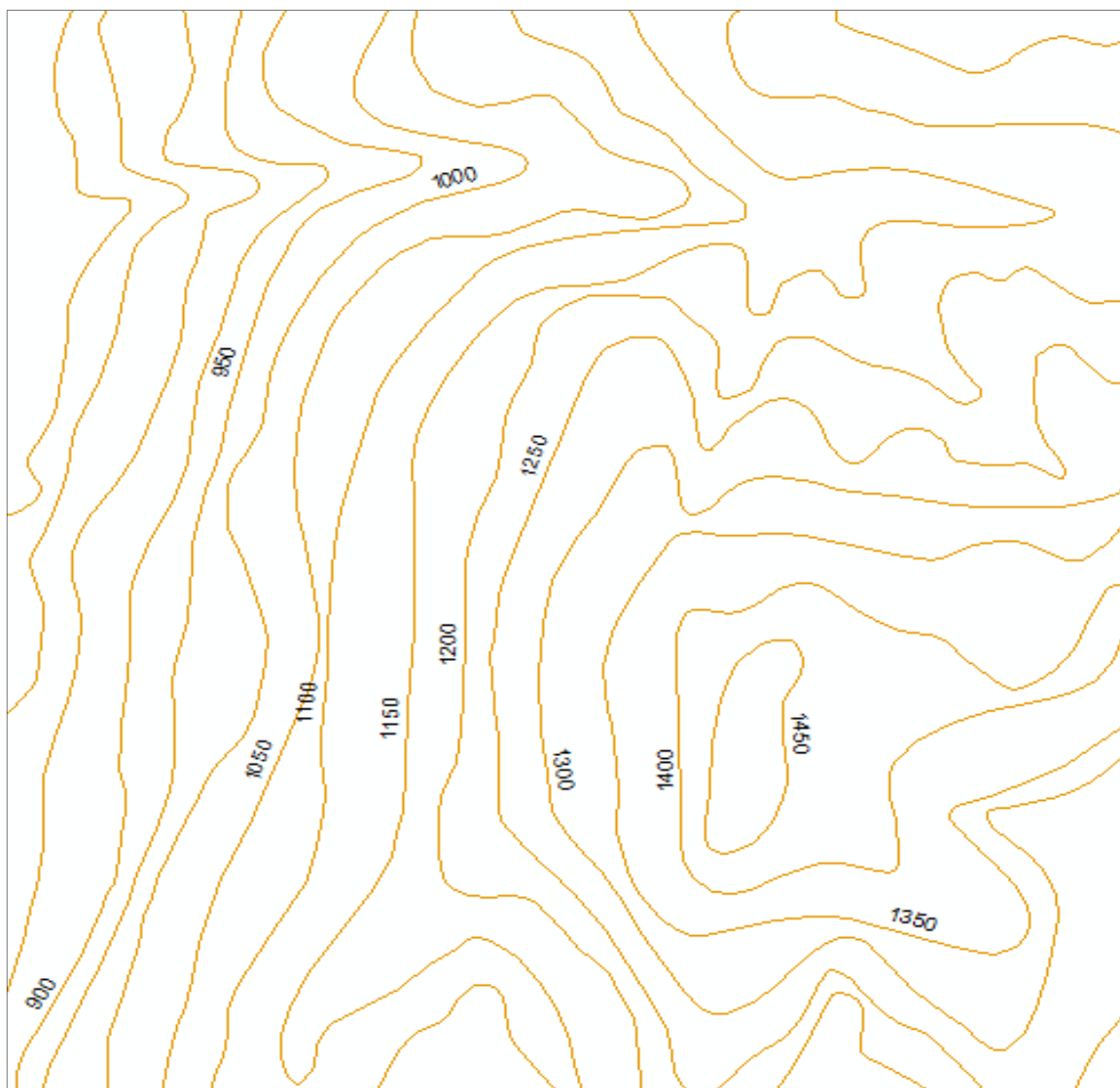
Para las zonas urbanas, adicionalmente a la información cartográfica suministrada, se adquirió cartografía generada a través de restitución a escala 1:2000. Dicha información fue adquirida dentro del proceso contractual, la cual ayuda a mejorar el nivel de detalle en las zonas urbanas.

### 5.1.2 Delimitación de Cuencas

El análisis cartográfico parte de un mapa en formato vectorial, conocido como shape. Este presenta líneas correspondientes a las curvas de nivel y se encuentran espaciadas cada 50 metros.



**Figura1 Esquema de formato vectorial de presentación de cartografía base para estudio**



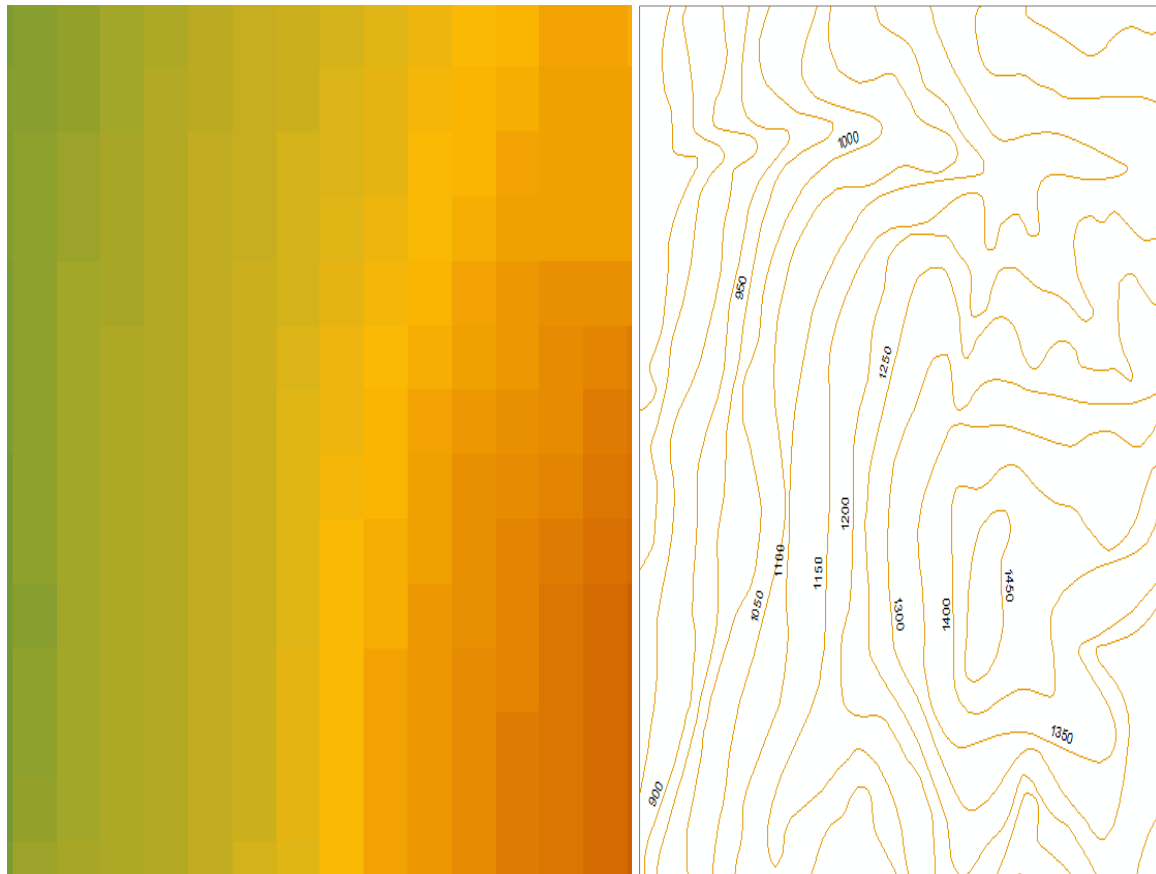
Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información IGAC (2010)

**5.1.2.1 Modelo Digital de Elevación MDE**

El primer tratamiento efectuado a la cartografía es el cambio de formato de vectorial a raster. El formato raster consiste en representación del terreno mediante pixeles, para este caso de 30x30 metros. Para llegar a este formato hay que realizar dos transformaciones, la primera una triangulación de punto de cada línea y la segunda la triangulación al formato de trabajo raster.

Una vez realizado el proceso se tendrá un mapa con las características que se observan a continuación en el esquema.

**Figura2 Esquema comparación formato raster de cartografía base para el estudio**

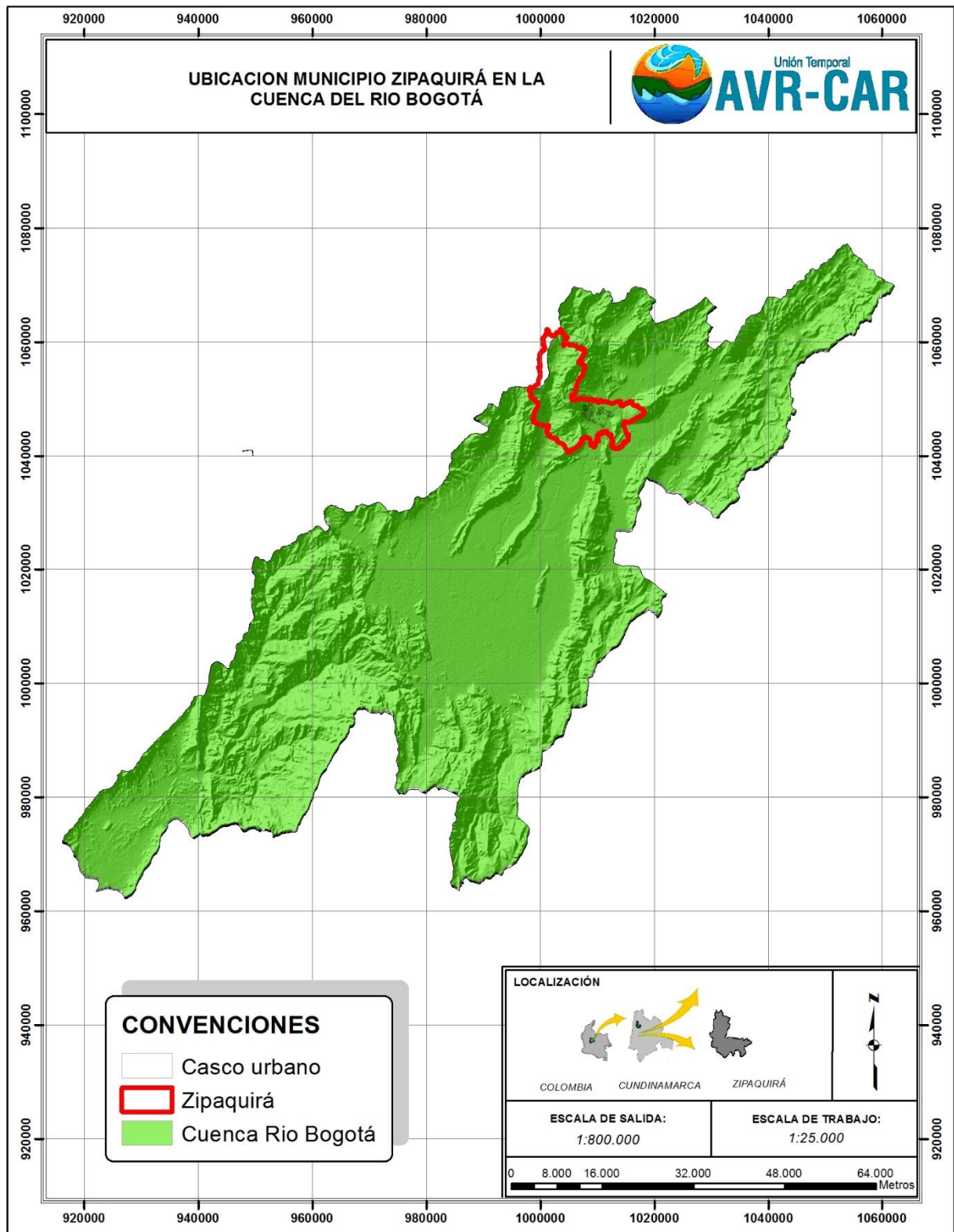


Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010)

En ambos esquemas se representa la variación de altitudes en la zona de estudio, el primero por medio de líneas y el segundo por pixeles.

La cuenca de influencia del municipio Zipaquirá es la del Rio Bogotá, por tal motivo se realiza el respectivo análisis de los componentes hidrológicos aguas arriba desde el municipio.

Figura3 Municipio de Zipaquirá en cuenca Río Bogotá



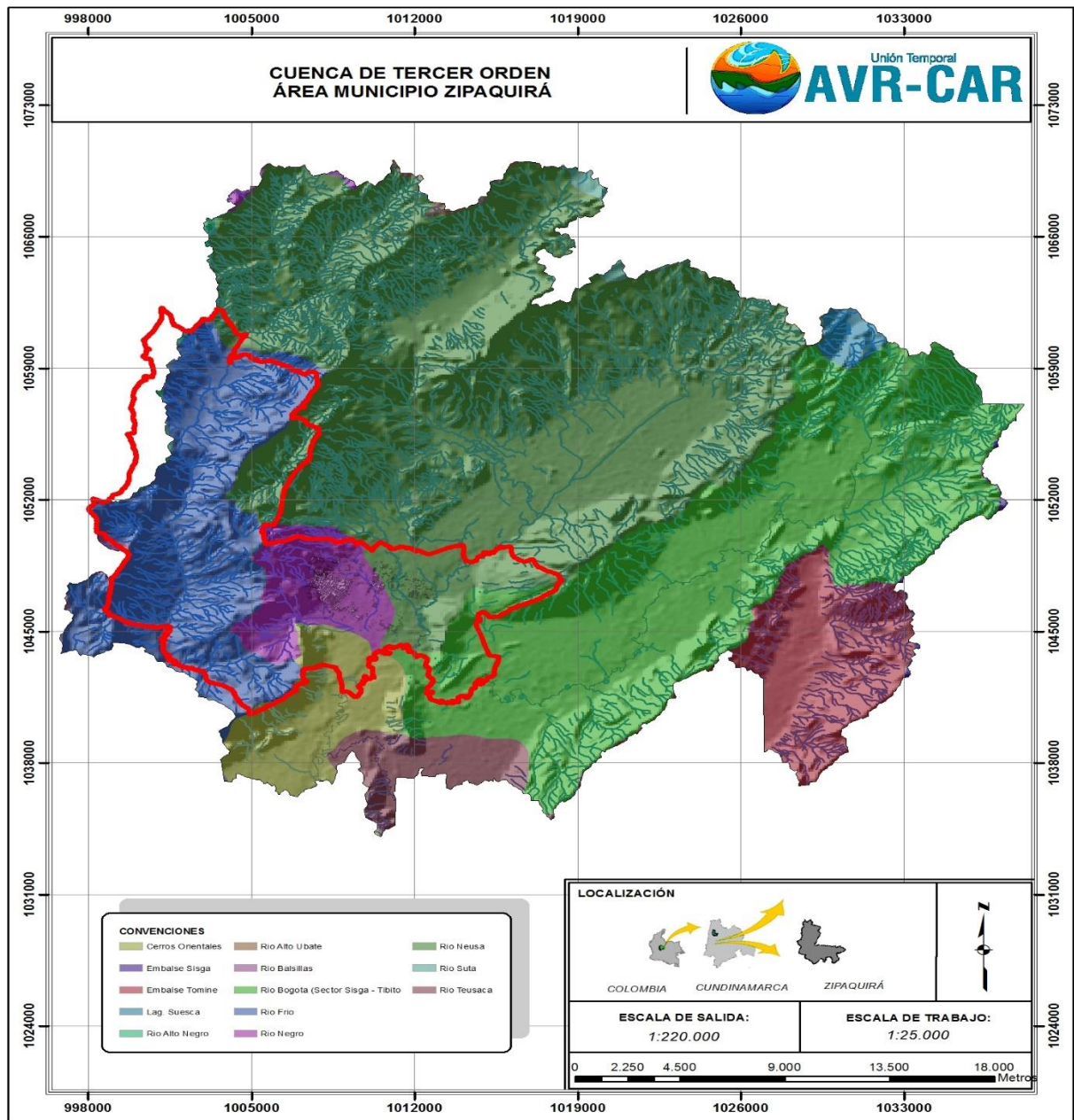
Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010)

### 5.1.2.2 Subcuencas Rio Bogotá

Para el desarrollo del estudio hidrológico como herramienta importante para la generación de caudales se debe contar con la debida clasificación de las cuencas hidrográficas, por tal motivo a partir del modelo digital de elevación se subdividen las áreas de drenaje de menor valor hasta el punto de interés, para este caso el municipio Zipaquirá

Es importante resaltar que la información principal es suministrada por la autoridad ambiental CAR, la cual apporto la cartografía de las cuencas de estudio; así, para el avance del mismo se toma la división de estas áreas hasta el nivel 3, estableciendo la subcuenca del Río Bogotá, como la de interés. Las demás subdivisiones se obtienen a partir de estas cuencas.

Figura4 Mapa cuencas tercer ordenen

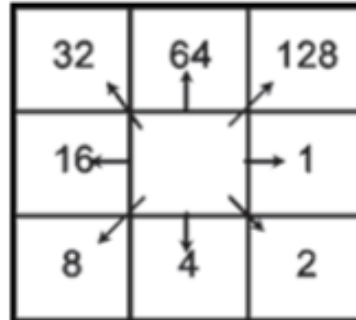


Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010)

### 5.1.2.3 Cuenca Río Bogotá hasta municipio de Zipaquirá

La subdivisión se obtiene con la ayuda de la herramienta ArcGIS 10 y la extensión Flow Direction. Esta herramienta toma como datos de entrada el modelo digital de elevación y los entrega como salida por medio de un mapa en formato raster con la dirección de flujo de cada celda relacionada, con las celdas adyacentes con las cuales el flujo puede trascurrir.

Figura5 Esquema de código de dirección de flujo



Fuente: UT AVR CAR., 2014, Manual ArcGIS 10.

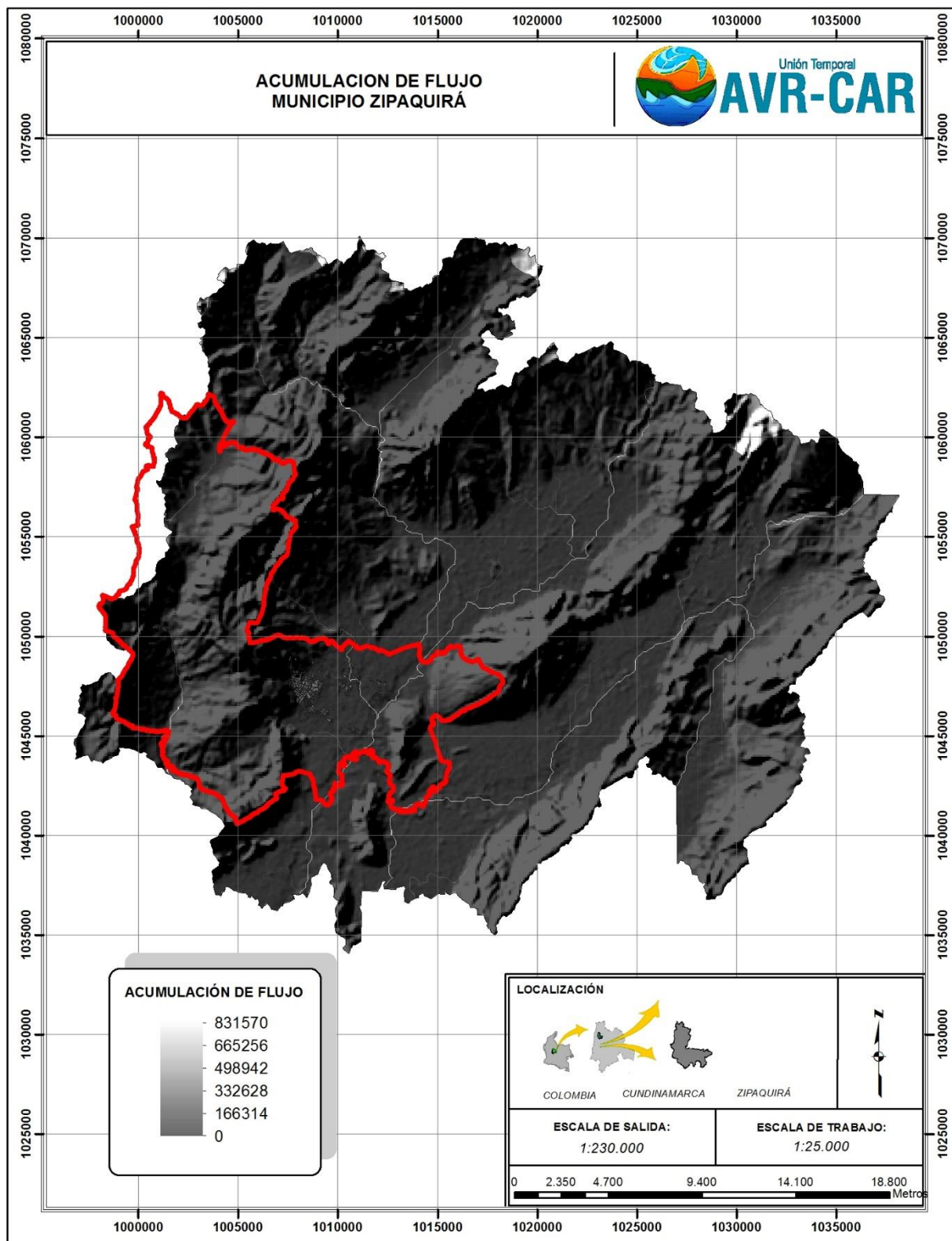
La distancia se calcula centro a centro de las celdas. Así, si el tamaño de la celda es 30 para este modelo, la distancia entre dos celdas ortogonales es 30 y entre dos celdas diagonales la raíz de 60 ( $30\sqrt{2}$ ). Si el desnivel respecto a todas las celdas adyacentes es el mismo, la vecindad se agranda hasta encontrar el mayor descenso. Cuando la dirección del máximo descenso es encontrada, la salida de la celda es codificada con el valor que representa esa dirección.

Con esta codificación de dirección de flujo se genera la acumulación de flujo que es de gran importancia esta acumulación corresponde al total acumulado de las celdas que confluyen hacia cada una de las celdas ubicadas aguas abajo. A cada celda se le aplica un peso unitario de tal forma que el valor de cada una en el raster de salida será el número de celdas que fluyen hacia cada celda.

Las celdas con grandes acumulaciones de flujo son áreas de gran concentración del flujo y pueden ser usadas para identificar corrientes y cursos de agua, mientras que las celdas con una acumulación de flujo de cero son elevaciones topográficas locales y pueden ser usadas para delimitar las subcuencas.



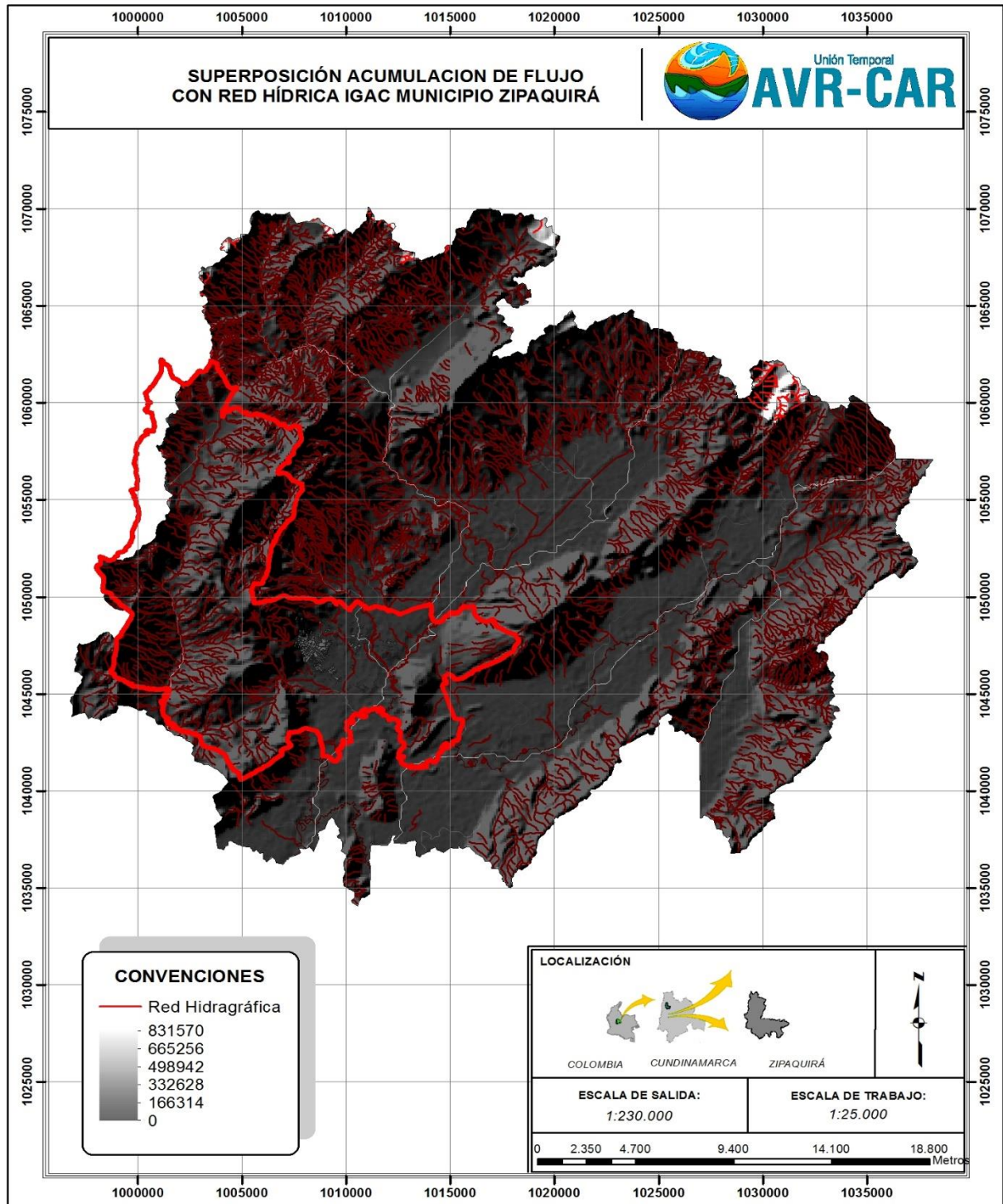
Figura6 Mapa de acumulación de Flujo



Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010)

La acumulación de flujo se aproxima a las corrientes hídricas, esto confirma que el modelo digital tiene una buena resolución para la escala analizada.

**Figura7 Esquema de superposición acumulación de flujo con red hídrica IGAC**



Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010)

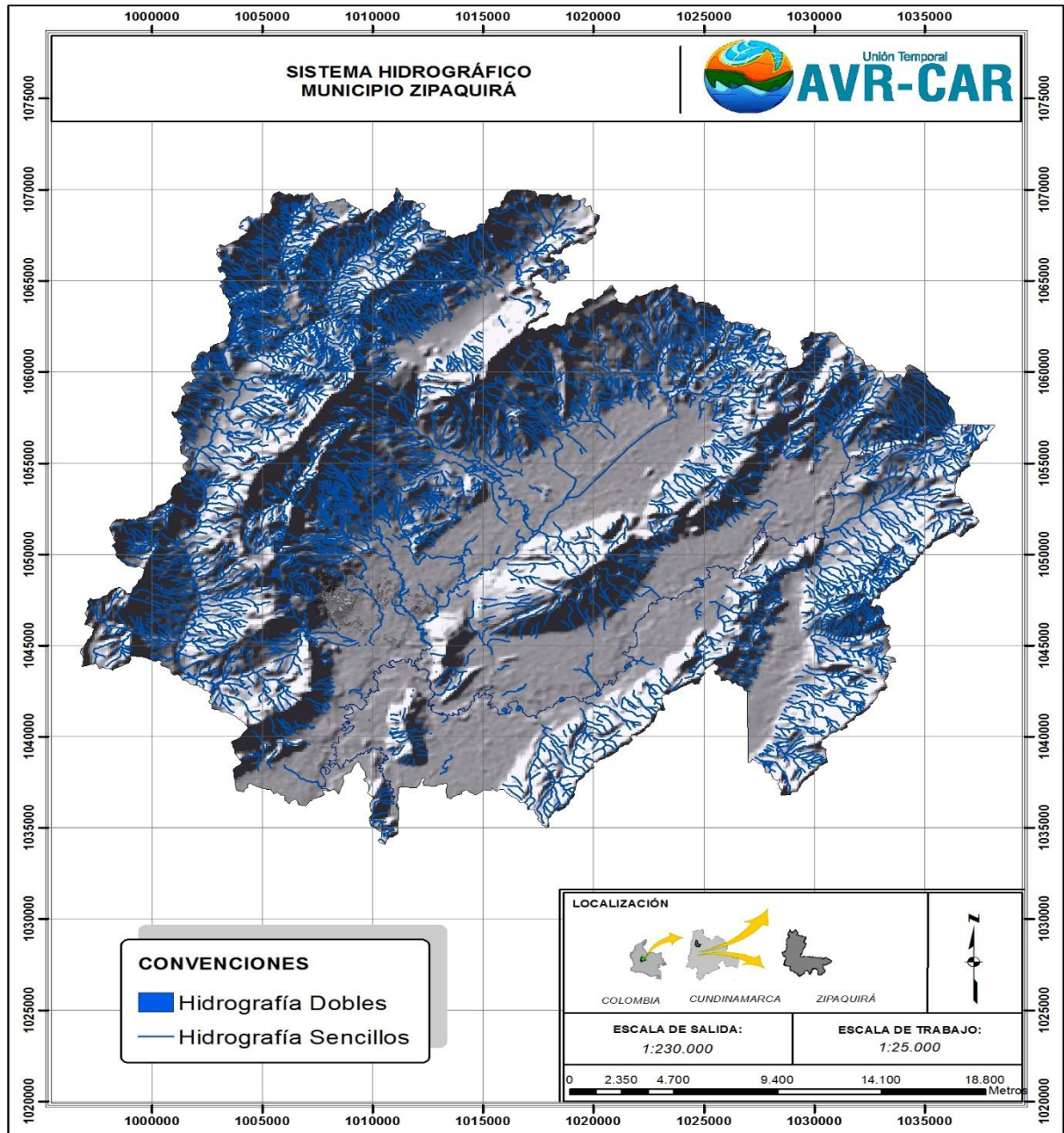


En el esquema se observa de color negro el límite municipal, de rojo la red del IGAC y de color blanco la red a partir del flujo acumulado. A partir de este mapa y como se indicó en el apartado anterior se delimitan las nuevas áreas de drenaje a partir de la división oficial presentada por el IGAC.

#### 5.1.2.4 Delimitación hidrográfica municipio Zipaquirá

Las fuentes hídricas que componen el municipio se conforma básicamente es el Rio Bogotá el cual es el que recibe las aguas del municipio.

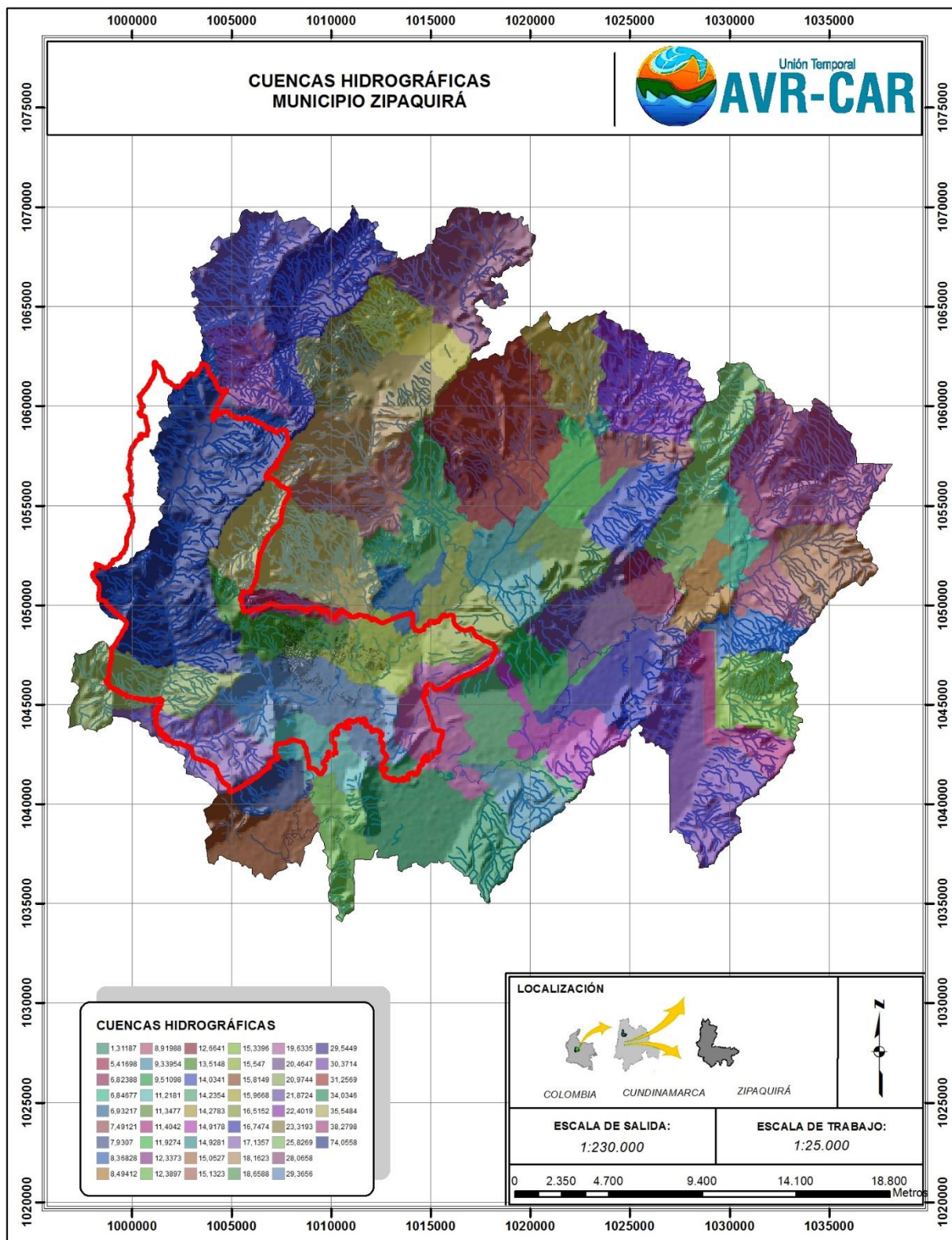
Figura8 Sistema hidrográfico municipio Zipaquirá



Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010)



Figura 9 Mapa delimitación de cuencas Río Bogotá



Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010)

El área de la cuenca es de gran importancia en la generación de caudales, por esta razón para la identificación de las cuencas que aportan sus aguas al municipio, se toma como punto de partida el mapa de acumulación de flujo, y utilizando tecnología informática se procede a la delimitación de estas zonas.

En esta delimitación podemos observar más de 25 cuencas que son de interés para el análisis del municipio. A pesar de que las cuencas delimitadas de algunas de las fuentes no hacen parte del municipio es necesario su análisis ya que las aguas recogidas por estas áreas sí llegarán al mismo.

Existen varias metodologías utilizadas para la obtención de caudales máximos las cuales se fijan dependiendo del área de la cuenca. Para la obtención de caudales de las cuencas anteriormente delimitadas se utiliza el modelo lluvia escorrentía Soil Conservation Service (SCS) codificado en el software HEC HMS (software para hidrología), dentro del cual se requieren datos de las características de las cuencas como morfometría, escurrimiento y comportamiento de las lluvias de diseño. Es importante tener en cuenta que este caudal calculado obedece al conseguido al cierre de la cuenca, analizando las fuentes hídricas en su conjunto; es por esta razón que la metodología mencionada anteriormente difiere de la información que debe ser analizada para el presente estudio, en la cual se requiere información de caudales máximos no sólo al cierre de la cuenca, si no en diferentes partes de ella.

Teniendo como referente esta condición de análisis, se toma como base la formulación la metodología desarrollada y utilizada en el software HEC HMS para generar un modelo rasterizado de los caudales máximos para diferentes periodos de retorno a nivel de cuencas, de tal manera que se pueda conocer los caudales de las fuentes en diferentes puntos.

La delimitación entonces de las cuencas obedece a un aspecto evidentemente estratégico para validar el modelo en formato raster, el cual permite comprobar que los caudales obtenidos al cierre de cada cuenca corresponde al generado por el formato raster en el mismo punto, verificando y validando los caudales obtenidos en otros puntos de la cuenca.

Los caudales que se tienen en cuenta para la modelación hidráulica de todas las fuentes del municipio, ya sea en su zona rural y urbana, así como la delimitación de las zonas de amenaza se realizan con el modelo rasterizado obtenido en el software ArcGIS bajo la implementación de la formulación HEC HMS.

A continuación se observa la metodología base para la validación del modelo ArcGIS, en la cual se especifica paso a paso los puntos analizados. En la Tabla 1 se observan los valores principales para cada cuenca, que serán básicos para el desarrollo del modelo hidrológico.

### 5.1.3 Cálculos morfométricos

Las características principales de la cuenca se definen como datos morfométricos, los cuales son de gran importancia en la obtención y generación de caudales de avenidas. Como parte de estas características se encuentra el área de drenaje, la longitud de la fuente hídrica, la pendiente y el tiempo de concentración.

**Área de la cuenca.** Es el área plana (proyección horizontal) incluida entre su divisoria topográfica. Identificadas las fuentes a analizar se determinaron los puntos y tramos de cada una de las fuentes.

**Longitud.** Se toma la longitud del cauce principal desde la parte más alta hasta la entrega o punto de interés.

**Pendiente.** Determina, de manera indirecta, la capacidad de concentración del agua y la producción de caudales pico de escorrentía superficial altos en la cuenca.

Dado que el cauce principal es el desagüe de la cuenca, este parámetro también determina la rapidez de producción del caudal pico de escorrentía superficial y la capacidad de concentración de la referida descarga.

### 5.1.3.1 Tiempo de concentración

Se define como el tiempo necesario, desde el inicio de la precipitación, para que toda la cuenca contribuya al sitio de la obra de drenaje en consideración, o, en otras palabras, el tiempo que toma el agua desde los límites más extremos de la cuenca hasta llegar a la salida de la misma.

En general el tiempo de concentración se calcula por medio de ecuaciones empíricas, entre las cuales se cuentan las siguientes (Manual de drenaje INVIAS).

#### Ecuación de Kirpich:

$$T_c = 0.06628 \left( \frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.77}$$

Dónde:

**T<sub>c</sub>:** Tiempo de concentración, en horas (h).

**L:** Longitud del cauce principal, en kilómetros (km).

**S:** Pendiente entre las elevaciones máxima y mínima del cauce principal, en (m/m).

#### Ecuación de Temez:

$$T_c = 0.30 \left( \frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.76}$$

Dónde:

**T<sub>c</sub>:** Tiempo de concentración, en horas (h).

**L:** Longitud del cauce principal, en kilómetros (km).

**S:** Pendiente total del cauce principal, en porcentaje (%).

#### Ecuación de Giadotti:

$$T_c = \frac{4A^{0.5} + 1.50L}{25.3(LS)^{0.5}}$$

Dónde:

**T<sub>c</sub>:** Tiempo de concentración, en horas (h).

**A:** Área de la cuenca, en kilómetros cuadrados (km<sup>2</sup>).

**L:** Longitud del cauce principal, en kilómetros (km).

**S:** Pendiente del cauce principal, en metros por metro (m/m).

Se estimará para cada cuenca el tiempo de concentración por los diferentes métodos y luego en el proceso de calibración y optimización se definirá el valor.

**Tabla 1 Valores tiempos de concentración**

Cuenca	Cota Mayor	Cota Menor	Longitud	Tc	Tp
0	3640	2563	14.31	2.09	2.70
1	3668	2551	27.46	3.91	4.32
2	4754	765	24.54	1.82	2.44
3	3222	2551	17.58	5.06	5.29
4	3220	2551	11.03	3.77	4.20
5	3622	647	4.72	1.25	1.87
6	2890	2551	10.06	3.38	3.87
7	3707	2551	28.23	4.42	4.76
8	3605	2551	8.77	2.98	3.52
9	2872	2551	8.40	2.70	3.26
10	2374	471	23.85	2.50	3.08
11	3610	2551	18.57	2.61	3.18
12	5410	454	45.57	2.64	3.21
13	1297	338	12.16	2.12	2.73
14	3793	251	15.47	1.53	2.15
15	1470	359	12.62	2.27	2.87
16	7263	522	15.75	1.21	1.83
17	1537	280	25.95	3.79	4.22
18	3904	2551	42.95	5.07	5.29
19	3658	2766	7.62	1.24	1.86
20	3864	3227	5.17	1.31	1.93
21	3267	2722	5.78	1.51	2.13
22	3537	3164	2.26	1.13	1.74
23	3794	3084	5.75	1.42	2.05
24	3181	2659	7.05	1.84	2.46
25	3152	2568	7.43	1.86	2.48
26	3193	2567	10.68	1.82	2.44
27	3689	2761	13.24	2.23	2.83
28	3661	2567	35.98	5.39	5.56
29	3465	2471	21.00	3.29	3.78
30	3787	2567	24.54	4.17	4.54
31	3695	2571	23.22	2.93	3.47

Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010)

## 5.2 ANALISIS HIDROCLIMATOLÓGICO

Definir la características climáticas del área de estudio es de gran importancia para conocer el comportamiento de la precipitación de la zona, para esto se realizó un estudio detallado del comportamiento climático del municipio (Ver Capítulo Climatología), en el cual se analizó la información de las estaciones climatológicas operadas por el IDEAM y la CAR.

Se realizó un filtro de las estaciones con información importante para el desarrollo del estudio en el cual se tuvo en cuenta aquellas con información en su serie de datos mínimo de 10 años. Analizada esta información se procedió a identificar todas las que contenían los datos con el mismo periodo con el fin de generar una coherencia en los años analizados.

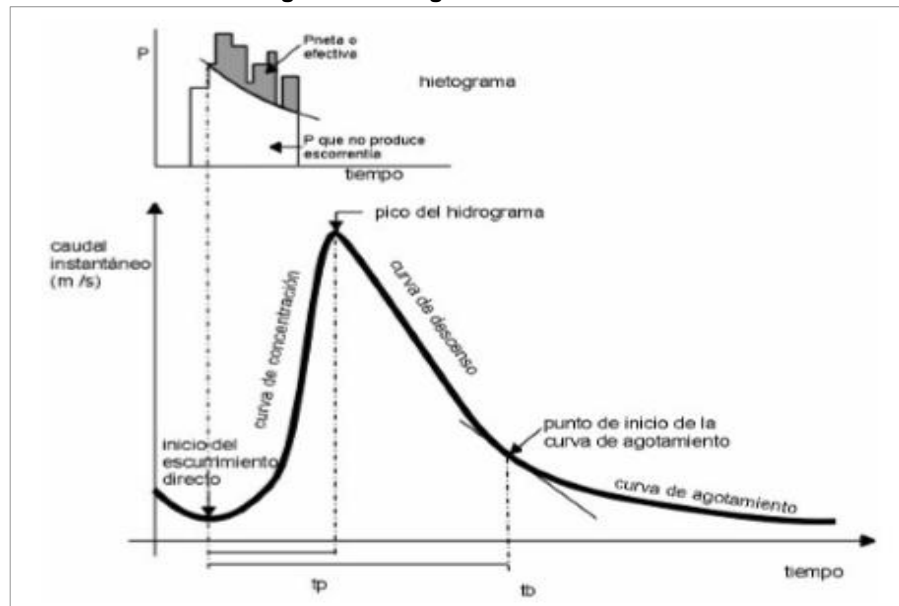
Con dichos datos, se realizó la debida homogenización y complemento de datos faltantes para realizar el análisis espacio-temporal de las variables. Para el análisis y cálculo de caudales máximos se utilizó como insumo de este análisis la precipitación máxima en 24 horas de las estaciones escogidas como representativas de las cuales se toman los valores reportados sin complemento de información por obedecer a eventos máximos. Es importante indicar que estaciones cercanas a la zona se debieron excluir del análisis por la poca información que contenían, como es el caso de las estaciones satelitales, las cuales cuentan con información desde el año 2005.

### 5.2.1 Estimación de caudales diferentes periodos de retorno

La metodología corresponde al hidrograma unitario. El hidrograma de una corriente es la representación gráfica de las variaciones del caudal con respecto al tiempo, arregladas en orden cronológico en un lugar dado de la corriente. En la Figura 10 se han representado los hidrogramas correspondientes a una tormenta aislada y a una sucesión de estas respectivamente.

En el hidrograma se distingue la precipitación que produce la infiltración de aquella que produce escorrentía directa. Esta última se denomina precipitación en exceso, precipitación neta o efectiva. El área bajo el hidrograma es el volumen de agua que ha pasado por el punto de aforo, en el intervalo de tiempo expresado en el hidrograma. Es muy raro que un hidrograma presente un caudal sostenido y muy marcado. En la práctica la forma irregular de la cuenca, la heterogeneidad espacial y temporal de la lluvia, la influencia de las infiltraciones, etc., conducen a hidrogramas de uno o muchos picos (caudal máximo).

Figura10 Hidrograma de crecientes



Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del manual INVIAS



**Curva de concentración**, es la parte que corresponde al ascenso del hidrograma.

**Pico del hidrograma**, es la zona que rodea al caudal máximo.

**Curva de descenso**, es la zona correspondiente a la disminución progresiva del caudal.

**Punto de inicio de la curva de agotamiento**, es el momento en que toda la escorrentía directa provocada por esas precipitaciones ya ha pasado. El agua aforada desde ese momento es escorrentía básica, que corresponde a escorrentía subterránea.

**Curva de agotamiento**, es la parte del hidrograma en que el caudal procede solamente de la escorrentía básica. Es importante notar que la curva de agotamiento comienza más alta que el punto de inicio del escurrimiento directo (punto de agotamiento antes de la crecida), debido a que parte de la precipitación que se infiltró está ahora alimentando el cauce.

### 5.2.2 Hidrograma Unitario

El método del hidrograma unitario fue desarrollado originalmente por Sherman en 1932 y está basado en las siguientes hipótesis:

**Distribución uniforme:** La precipitación en exceso tiene una distribución uniforme sobre la superficie de la cuenca y en toda su duración.

**Tiempo base constante:** Para una cuenca dada, la duración total de escurrimiento directo o tiempo base (tb) es la misma para todas las tormentas con la misma duración de lluvia efectiva, independientemente del volumen total escurrido.

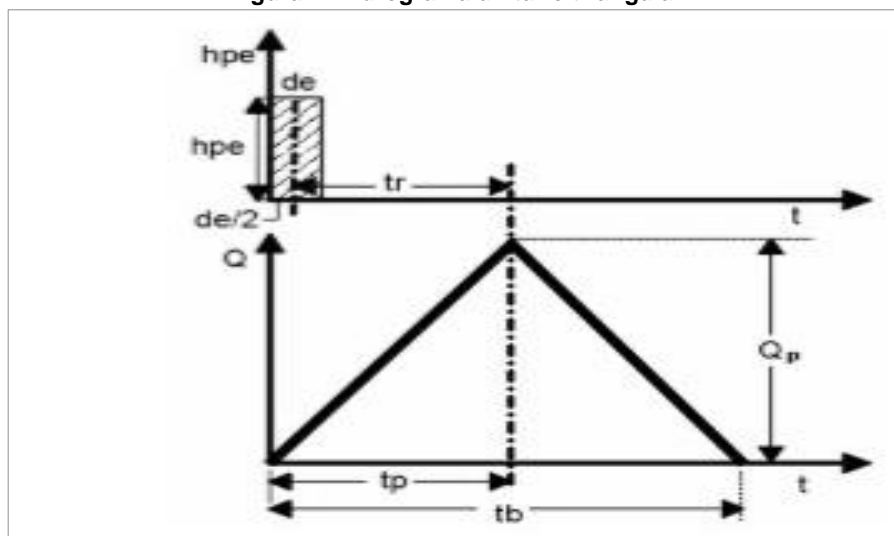
Todo hidrograma unitario está ligado a una duración en exceso (de).

### 5.2.3 Hidrograma Unitario Sintético

Para usar el método del hidrograma unitario siempre es necesario contar con al menos un hidrograma medido a la salida de la cuenca, además de los registros de precipitación. Sin embargo, la mayor parte de las cuencas no cuentan con una estación hidrométrica o bien con los registros pluviográficos necesarios. Por ello, es conveniente contar con métodos con los que se puedan obtener hidrogramas unitarios usando únicamente datos de características generales de la cuenca. Los hidrogramas unitarios así obtenidos se denominan sintéticos.

Para el estudio hidrológico del municipio Zipaquirá se utilizaron hidrogramas unitarios sintéticos en los cuales se utiliza inicialmente el software HEC HMS para generar la validación del modelo rasterizado. A continuación se observa la formulación que se tiene en cuenta para la construcción de los hidrogramas.

Figura11 Hidrograma unitario triangular



Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010)

Como se muestra en la Figura se debe contar con un caudal pico y un tiempo al pico, los cuales se calculan con las características morfométricas de las cuencas analizadas.

El caudal pico se obtiene como:

$$Q_p: 0.208 * A / t_p$$

Dónde:

Qp: Caudal pico (m<sup>3</sup>/s)

A: Área (km<sup>2</sup>)

Tp: Tiempo al pico (horas)

Este valor corresponde al caudal pico para una precipitación efectiva de 1 mm. Si se obtiene la precipitación efectiva de la zona de estudio se tendrá el caudal total.

El valor del tiempo al pico tp, se obtiene de la fórmula:

$$T_p: (T_c)^{0.5} + 0.6 T_c$$

Dónde:

Tp: Tiempo al pico (horas)

Tc: Tiempo de concentración (horas)

Los valores de tiempo de concentración para cada una de las cuencas de análisis del municipio Zipaquirá son ingresados en el HEC HMS el cual realiza el cálculo del tiempo al pico; adicionalmente se ingresa el área de la cuenca en km<sup>2</sup>, posteriormente calcula el caudal pico obteniendo así los hidrógrama unitarios sintéticos.

#### 5.2.4 Precipitación Efectiva

Para obtener la precipitación efectiva se ha empleado el método conocido como la curva número, en este método, la profundidad de escorrentía es una función de la profundidad total de precipitación y de un parámetro de abstracción referido al número de curva de escorrentía, denominado número de curva o CN. El número de curva varía en un rango de 1 a 100, existiendo una función de las siguientes propiedades productoras de escorrentía de la cuenca hidrográfica: (1) tipo de suelo hidrológico, (2) utilización y tratamiento del suelo, (3) condiciones de la superficie del terreno, y (4) condición de humedad antecedente del suelo.

El método del número de curva de escorrentía fue desarrollado a partir de datos de precipitación y escorrentía de 24 horas y, como tal, debe ser usado hasta esta última duración.

Para la tormenta como un todo, la profundidad de exceso de precipitación o escorrentía directa, Pe, es siempre menor o igual a la profundidad de precipitación P; de manera similar, después de que la escorrentía se inicia, la profundidad adicional del agua retenida en la cuenca es menor o igual a la retención potencial máxima denominada S.

Los valores de CN para cada una de las cuencas son ingresados al HEC HMS junto con la lluvia de diseño de las estaciones climatológicas. (Ver anexo lluvia de diseño)

Las fórmulas que se utilizan para el cálculo de la precipitación efectiva son las siguientes

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

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

Dónde:

CN: curva número

P: precipitación.

#### 5.2.5 Valores de Curva Número CN.

Para el análisis de la precipitación efectiva se indica, como valor importante, la curva número CN indicativo de la escorrentía de la cuenca. Para la obtención de este parámetro se recurrió a la información oficial de la autoridad ambiental CAR.

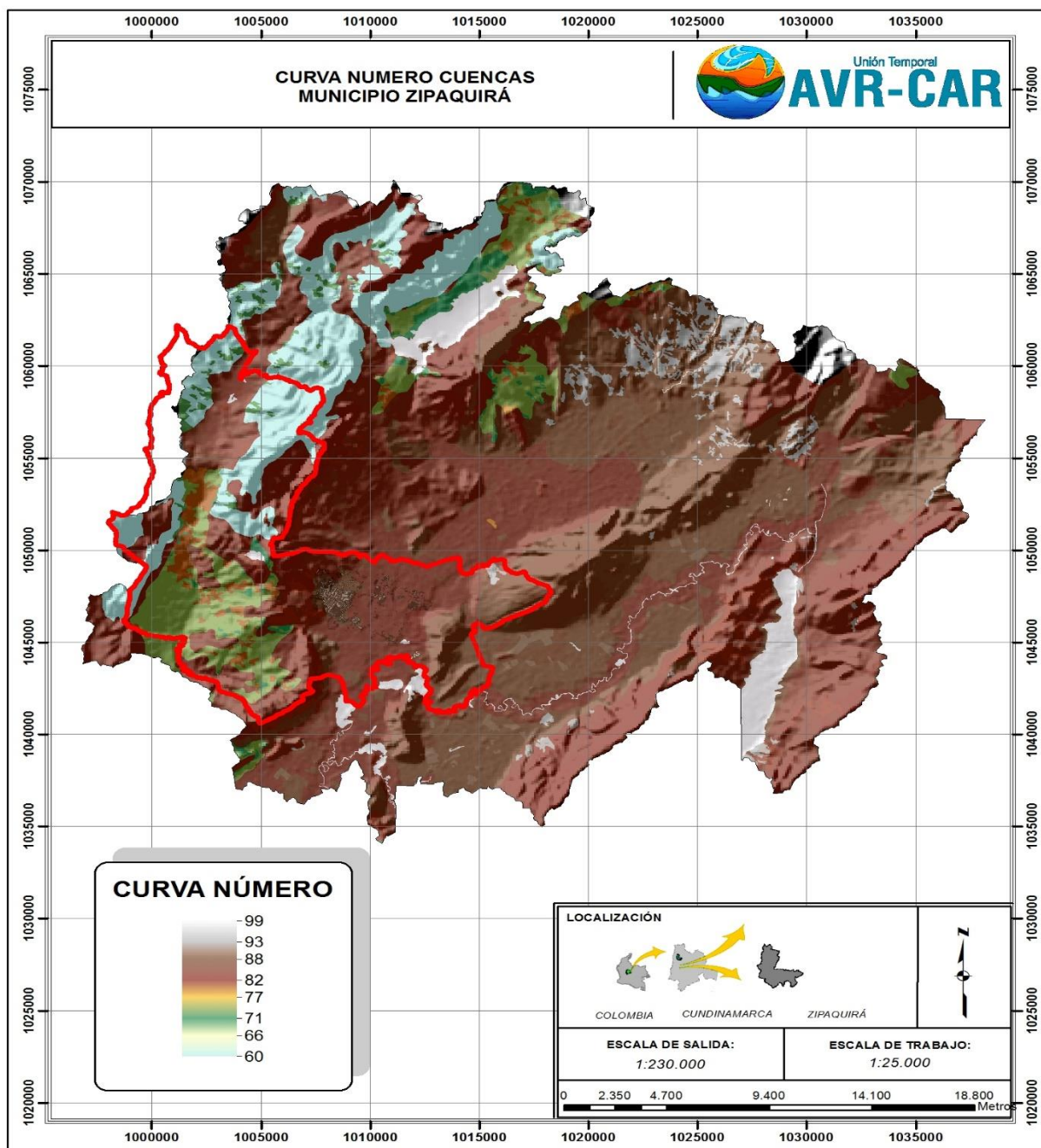


La estimación de los valores de la curva número, atendiendo las recomendaciones de la CAR, se tomó de un estudio realizado para esta corporación, dicho estudio los datos de curva número para diferentes condiciones de humedad y fueron suministradas en formato raster.

Con estas curvas se obtiene el valor del parámetro S, aplicando la fórmula arriba presentada, el cual se observa a continuación.

En la ilustración se observan los valores de CN para el área de las cuencas del municipio.

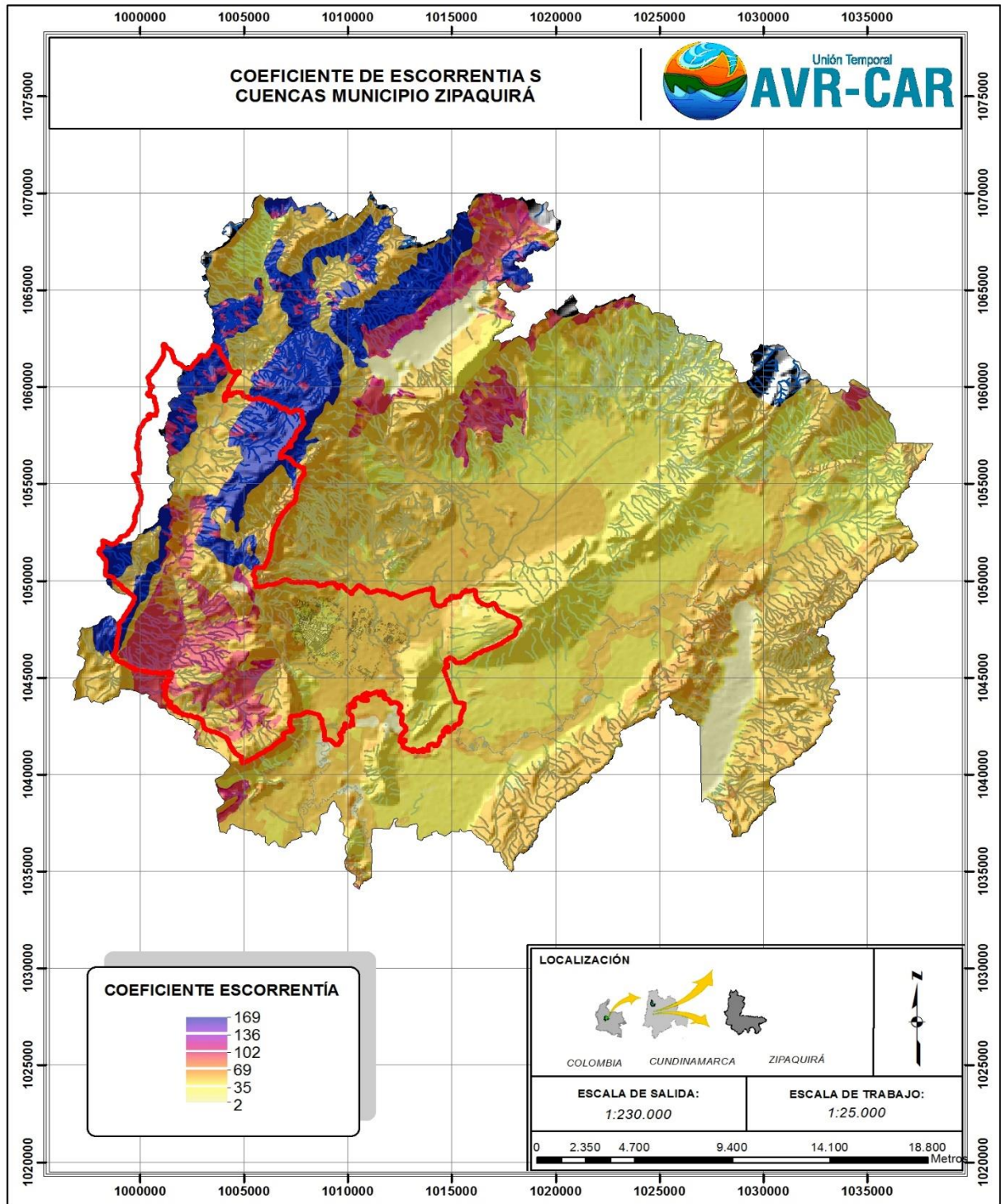
Figura12 Curva número cuencas municipio Zipaquirá



Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010)

Como se mencionó anteriormente se busca generar un modelo rasterizado de caudales; por esta razón se genera un modelo raster del coeficiente S, tomando como base el raster de CN suministrado por la CAR. El mapa que se observa en la Figura 13 corresponde al factor S el cual se calcula con el ingreso de la formulación al software ArcGIS

**Figura13 Mapa coeficiente de escorrentía S cuencas municipio Zipaquirá**



Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010)

- **Precipitación**

Para evaluar los efectos de la precipitación y su aporte en la crecida del caudal de los cauces se deben establecer sus características medibles, las cuales son determinadas mediante parámetros como duración de la lluvia, intensidad, volumen, frecuencia y tiempo entre precipitaciones y, adicionalmente, será de interés conocer la distribución espacial y temporal de la lluvia.

A continuación se describe el análisis para caracterizar las lluvias en las cuencas de aplicación, debido a que éstos serán parte de los insumos principales para la posterior modelación hidráulica.

Basados en la información de las estaciones climatológicas de las autoridades competentes para tal fin, como lo son el IDEAM y la CAR, se procede a ubicar las estaciones presentes en el área de estudio las cuales se identificaron con información homogénea las siguientes estaciones.

**Tabla 2 Estaciones representativas de las cuencas**

Estación	Código	Parámetros	Años	Periodo	Operada	msnm
Acandy	2120141	PT	15	1999-2013	CAR	2600
Al Encanto	2120138	PT	15	1999-2013	CAR	3150
Guanquica	2120193	PT	15	1999-2013	CAR	3000
El Hatillo	2401030	PT	15	1999-2013	CAR	2885
Hato 7	2401058	PT	15	1999-2013	CAR	3271
La Iberia	2120548	T HR EV BS PT	15	1999-2013	CAR	2760
Montecillos	2120195	PT	15	1999-2013	CAR	2810
El Pedregal	2401049	PT	15	1999-2013	CAR	2900
La Pradera	2120044	PT	15	1999-2013	CAR	2703
Paramo de Guerrero	2120214	PT	15	1999-2013	CAR	3200
Silos	2120574	T HR EV BS PT	15	1999-2013	IDEAM	2709
Tabio	2120565	EV PT	15	1999-2013	CAR	2620
Zipaquirá	2120074	PT	15	1999-2013	CAR	2655

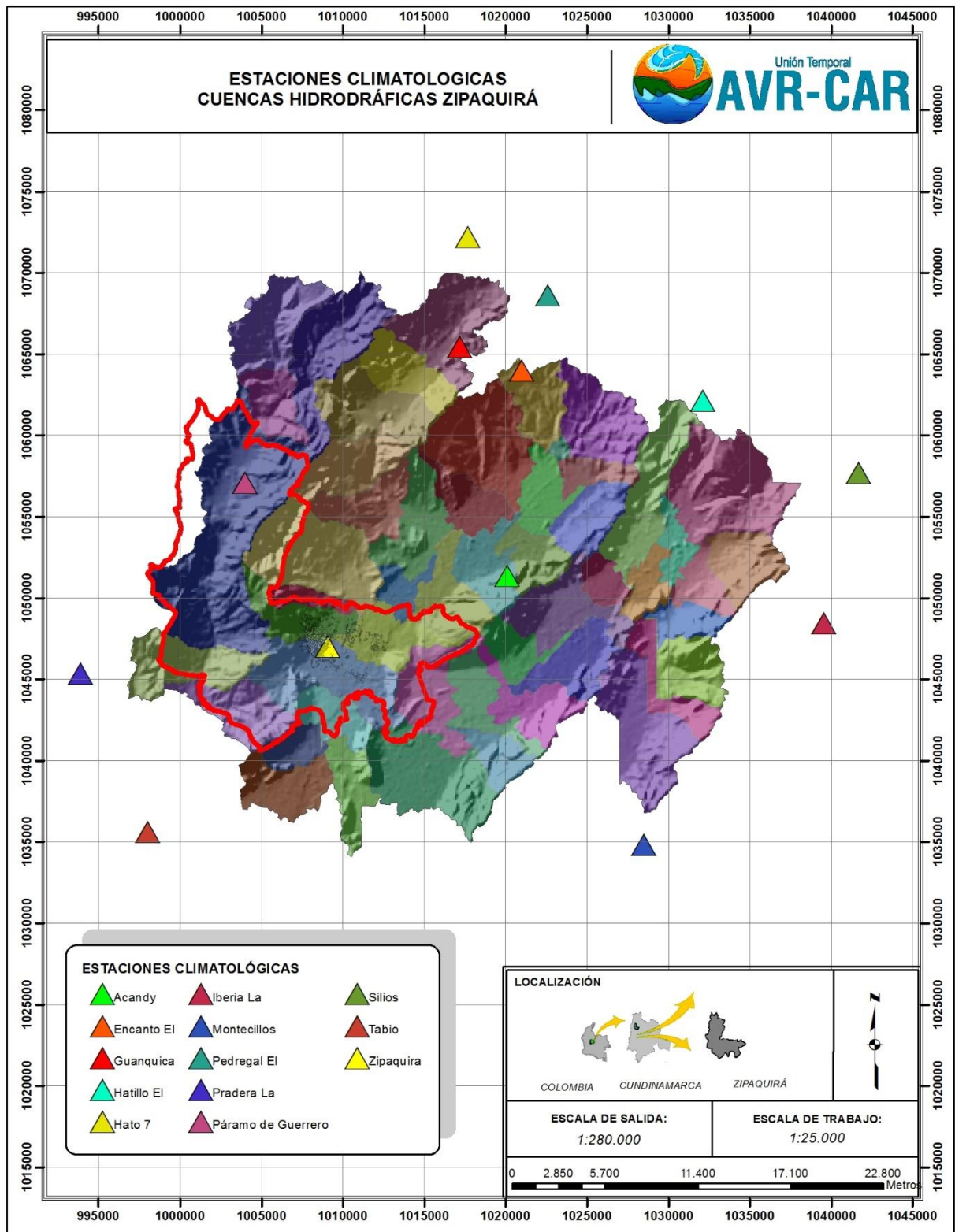
Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010)

En la tabla 2 se observa la ubicación de las estaciones tenidas en cuenta en el análisis de la precipitación de área de drenaje del municipio Zipaquirá.

Se puede observar que el área de estudio se ve representada por 13 estaciones, de las cuales 2 se encuentra ubicada dentro de las cuencas, por el contrario las restantes se ubica por fuera de las cuencas. La información de precipitación de las estaciones más lejanas no presenta la misma representatividad, que la información que se encuentra dentro del área de estudio la cual puede ser más acertada.



Figura14 Estaciones climatológicas cuencas hidrográficas Zipaquirá



Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010)

Análisis probabilísticos de datos: En estudios hidráulicos se exige la determinación de la magnitud de las características hidrológicas que pudieran ocurrir con cierta frecuencia para valores máximos durante un período determinado. Para esto, se deben analizar estadísticamente las observaciones realizadas en los puestos de medida, verificando con qué frecuencia tomaría cada una de ellas determinado valor. Posteriormente, se pueden evaluar las probabilidades teóricas.

Los estudios hidrológicos requieren partir de valores extremos (máximos). Para la determinación de éstos se conocen dos distribuciones comúnmente usadas: la distribución de Gumbel tipo I y la distribución Normal.

En el presente estudio se utilizó la distribución de valores extremos Gumbel tipo I, normal, log normal y log gumbel, comúnmente utilizados y de bastante aceptación en el medio, que es un caso especial de la distribución GEV de tres parámetros descrita por el British Flood Studies Report en 1975. A continuación se presenta la formulación utilizada en cada una de las distribuciones analizadas.

La distribución acumulada viene dada por la ecuación:

$$F(X) = \exp^{-\exp\left(-\frac{x-u}{\alpha}\right)}$$

Dónde:

$$\alpha = \frac{S\sqrt{6}}{\pi}$$

$$u = 0,5772\alpha$$

Definiendo la variable reducida,

$$\delta = \frac{x-u}{\alpha}$$

Se tiene entonces que,

$$P(X \leq x) = \frac{1}{T} = e^{-e^{-b}}$$

Dónde:

x = Variable en estudio (Precipitación)

$\bar{x}$  = Media de la variable en estudio

S = Desviación estándar de la variable en estudio

La probabilidad de ocurrencia de un evento con un valor igual o mayor que un valor dado x se expresa con la ecuación, la cual permite determinar la magnitud de la variable hidrológica correspondiente a un periodo de retorno dado.

$$P(X \leq x) = \frac{1}{T} = e^{-e^{-b}}$$

### Ajuste de serie de datos a una distribución Normal

Función densidad

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}s} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\bar{x}}{s}\right)^2}$$

Para  $-8 < x < 8$

Dónde:

f(x) = función densidad normal de la variable x

$x$  = variable independiente  $38X$

$S$  = parámetro de escala, igual a la desviación estándar de  $x$

Función densidad de la distribución normal estándar

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}}$$

Para  $-8 < Z < 8$

Dónde:

$$Z = \frac{x - \bar{X}}{S}$$

Función de distribución acumulada

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-X}{S}\right)^2} dx \quad \text{ó} \quad F(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^Z e^{-\frac{z^2}{2}} dz$$

Cálculo de la función de distribución acumulada

Abramowitz y Stegun (1965), han dado varias aproximaciones para la F.D.A. de la variable normal estandarizada  $Z$ . Una aproximación polinomial con un error menor que  $10^{-5}$  es:

$$F(Z) \sim 1 - f(Z) (0.4361836 t - 0.1201676 t^2 + 0.9372980 t^3)$$

Dónde:

$F(Z)$  = es la función de distribución acumulada

$f(Z)$  = es la función densidad de la variable estandarizada

$t$  = es definido para  $Z = 0$ , como:

$$t = \frac{1}{1 + 0,2316419|Z|}$$

Si  $Z < 0$ , la F.D.A. se calcula como:

$$1 - F(Z)$$

Cálculo de la inversa de la normal estándar

Una aproximación para el cálculo de la inversa de la distribución normal estándar, válida para  $10^{-7} < F(Z) < 0.5$ , es:

$$Z = \sqrt{\frac{y^2[(4y + 100)y + 205]}{[(2y + 56)y + 192]y + 131}}$$

Dónde:

$$y = -\ln(F(Z))$$

Estimación de parámetros método de momentos y máxima verosimilitud

$$\bar{X} = \mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad s = \sigma = \left[ \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Estimación de parámetros método de momentos lineales

$$\bar{X} = \mu = \lambda_1$$

$$S = \sqrt{\pi \lambda_2}$$

Dónde:

$\lambda_1$  = primer momento lineal

$\lambda_2$  = segundo momento lineal

- **Ajuste de serie de datos a una distribución Log Normal**

Función densidad

$$f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi}\sigma_y} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln x - \mu_y}{\sigma_y}\right]^2}$$

Para  $0 < x < 8$

Donde  $\mu_y$ ,  $\sigma_y$ , son la media y desviación estándar de los logaritmos naturales de  $x$ , es decir de  $\ln x$ ,  $y$  representan respectivamente, el parámetro de escala y el parámetro de forma de la distribución.

Función de la distribución acumulada

$$F(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi}\sigma_y} \int_0^x e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln x - \mu_y}{\sigma_y}\right]^2} dx$$

Si

$$Z = \frac{\ln x - \mu_y}{\sigma_y}$$

se tiene la distribución normal estándar:

$$F(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^Z e^{-\frac{Z^2}{2}} dZ$$

Estimación de parámetros método de momentos

$$\mu_y = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{\bar{X}^2}{1 + C_v^2}\right) \quad \sigma_y = \sqrt{\ln(1 + C_v^2)}$$

Dónde:

$\bar{X}$  = media aritmética de  $x$

$C_v$  = Coeficiente de variación

$$C_v = \frac{S}{\bar{X}}$$

Estimación de parámetros método de máxima verosimilitud

$$\mu_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i \quad \sigma_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\ln x_i - \mu_y)^2$$

Estimación de parámetros método de momentos lineales

$$\mu_y = \lambda_1 \quad \sigma_y = \sqrt{\pi} \lambda_2$$

Dónde:

$\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  = primer y segundo momento lineal calculados con los  $y_i = \ln x_i$

- **Ajuste de serie de datos a una distribución Gumbel**

Función densidad

$$f(x) = \frac{1}{a} e^{-\frac{x-\mu}{a}} - e^{-\frac{x-\mu}{a}}$$

Para:

$$-8 < x < 8$$

Dónde:

$0 < a < 8$  , es el parámetro de escala

$-8 < \mu < 8$  , es el parámetro de posición, llamado también valor central o moda

Función de la distribución acumulada

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{(x-\mu)}{a}}}$$

La variable aleatoria reducida Gumbel, se define como:

$$y = \frac{x - \mu}{a}$$

Con lo cual, la función acumulada reducida Gumbel es:

$$G(y) = e^{-e^{-y}}$$

Estimación de parámetros método de momentos

$$a = \frac{\sqrt{6}}{\pi} S = 0,78S \quad \mu = \bar{X} = 0,45S$$

Dónde:

$$\bar{X} = \mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$$

$$s = \sigma = \left[ \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Estimación de parámetros método de momentos lineales

Los parámetros de la distribución Gumbel, por el método de los momentos lineales se encuentran con las siguientes ecuaciones:

$$a = \frac{\lambda_2}{\ln 2} \quad \mu = \lambda_1 - 0,577215664901532861a$$

Dónde:

$\lambda_1$ = primer momento lineal

$\lambda_2$ = segundo momento lineal

- **Ajuste de serie de datos a una distribución Log Gumbel**

Función de la distribución acumulada

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{(\ln x - \mu)}{a}}}$$



La variable aleatoria reducida Log-Gumbel, se define como:

$$y = \frac{\ln X - \mu}{a}$$

Con lo cual, la función acumulada reducida Log-Gumbel es:

$$G(y) = e^{-e^{-y}}$$

Proceso de cálculo

Para el cálculo de los parámetros de la serie de datos:

$x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$

Se convierte a sus logaritmos, luego se calcula la media y desviación estándar, con las siguientes ecuaciones:

Media:

$$\bar{X} \ln x = \frac{\sum \ln x}{N}$$

Desviación estándar:

$$S_{\ln x} = \sqrt{\frac{\sum (\ln x - \bar{X} \ln x)^2}{N - 1}}$$

Estimación de parámetros método de momentos

$$a = \frac{\sqrt{6}}{\pi} S_{\ln x} = 0,78 S_{\ln x} \quad \mu = \bar{X} \ln 0,57721 a = \bar{X} \ln x 0,45 S_{\ln x}$$

Estimación de parámetros método de momentos lineales

Los parámetros de la distribución Log-Gumbel, por el método de los momentos lineales se encuentran con las siguientes ecuaciones:

$$a = \frac{\lambda_2}{\ln 2} \quad \mu = \lambda_1 - 0,577215664901532861a$$

Dónde:

$\lambda_1$ = primer momento lineal

$\lambda_2$ = segundo momento lineal

Nota: para calcular los momentos lineales  $\lambda_1, \lambda_2$ , trabajar con los  $y_i = \ln x_i$ .

Para este cálculo se utiliza el software HidroEsta que se alimenta con los datos de precipitación máxima en 24 horas. Primero el programa verifica la bondad de ajuste escogido y determina su confiabilidad de acuerdo al número de datos y valores. Este software fue desarrollado por Villon Bejar, Maximo. Es un software para cálculos hidrológicos y su uso es libre. Para observar los resultados ver anexo distribución de probabilidades.

**Figura15 Software cálculos hidrológicos y estadísticos. Fuente. Software Hidroesta**



Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información Hidroesta Máximo Villon

Realizada la prueba de bondad para cada una de las estaciones se despliega una nota donde informa que el delta teórico es menor que el delta tabular ajustándose los datos a una distribución.

Definida la confiabilidad de la distribución para la estación procedemos a calcular el valor máximo para los diferentes períodos de retorno, con la ayuda del mismo software.

Periodo de retorno o tiempo de recurrencia: Se define como periodo de retorno “T” de eventos hidrológicos máximos, el tiempo promedio, expresado en años, en que el valor del caudal pico de una creciente determinada es igualado o superado una vez.

El periodo de retorno “T” está ligado a la probabilidad de una distribución probabilística mediante la siguiente expresión:

$$T = \frac{1}{P(x \geq xi)} = \frac{1}{1 - P(x < xi)}$$

Para obtener la precipitación se diseñó una tormenta a partir de curvas sintéticas de intensidad, duración y frecuencia, siguiendo la metodología de Díaz Granados y presentada en el manual de drenaje del Instituto Nacional de Vías INVIAS.

El diseño de la lluvia se proyectó por método del bloque alterno que de manera general sigue los siguientes pasos.

Con base en los datos de las curvas intensidad-duración-frecuencia para la estación analizada, representativa de la cuenca hidrográfica hasta el sitio de interés, se calcularon las curvas de masas de los aguaceros puntuales para duraciones entre 0 y 180 minutos y los periodos de

retorno seleccionados, en intervalos de tiempo congruentes con la duración de la lluvia efectiva del hidrograma de escorrentía superficial seleccionado, igual a  $t_r$ .

Posteriormente, con las curvas de masas, se calcularon los hietogramas de los aguaceros puntuales respectivos.

Para dar una secuencia más crítica del aguacero, como es usual en este tipo de análisis, y por medio del método del Bloque Alterno, los incrementos de lluvia de los hietogramas mencionados previamente se deben arreglar de la siguiente manera: el valor más bajo se colocará en el primer lugar, el segundo valor en orden creciente se colocará en último lugar, el tercer valor en tal orden se ubicará en segundo lugar, el cuarto valor en el penúltimo lugar, y así sucesivamente. El resultado corresponde con los hietogramas de lluvia puntual de los aguaceros de diseño.

Una vez realizado este proceso para todas las estaciones de la cuenca del Río Bogotá, hasta el sitio de interés se interpola por métodos de inverso de la distancia y Kriging, obteniendo así la precipitación para el sector de interés, en este caso parte de la cuenca del Río Bogotá.

Los valores se proyectaron para periodos de retorno de 12.5, 50 años.

- **Espacialización de la precipitación**

Antes de comenzar un estudio geoestadístico se deben discutir todos los elementos que aporten conocimientos del problema a resolver, el fenómeno en estudio, organización y verificación de la información disponible y finalmente realizar el análisis de los datos (Armstrong y Carignan, 1997).

Una vez obtenido los datos, es necesario que se controlen integralmente a fin de verificar de una parte su exactitud y de otra su representatividad.

Interpolación geoestadística: El análisis geoestadístico se basa en la obtención de un semivariograma experimental. Se trata de obtener información intermedia, espacialmente, con los datos en diferentes direcciones.

El cálculo del semivariograma experimental es la herramienta geoestadística más importante en la determinación de las características de variabilidad y correlación espacial del fenómeno estudiado (Chica, 1987), es decir, tener conocimiento de cómo la variable cambia de una localización a otra (Lamorey y Jacobsom, 1995; Issaks & Co., 1999), representando el útil más importante del cual dispone el geoestadístico para el análisis de la variable de distribución espacial en estudio (Sahin et al., 1998; Genton, 1998a). Este análisis tiene como condicionantes: la distribución estadística, la existencia de valores aberrantes o anómalos, la presencia de zonas homogéneas o posibles zonaciones en la distribución de las leyes.

Puede ser calculado inicialmente el semivariograma medio, global u "omnidireccional", proporcionando una idea inicial de la variabilidad espacial de los datos, siendo el más idóneo para representar u obtener una estructura clara y definida. Posteriormente deben ser calculados los semivariogramas en diferentes direcciones. Puede ser calculado en 4 direcciones separadas  $45^\circ$  con tolerancia angular de  $22.5^\circ$ , comenzando por  $0^\circ$  hasta encontrar la dirección de máxima o mínima variabilidad. Pueden ser calculados también, más específicamente, en 8 direcciones separadas por  $22.5^\circ$ .

Una forma rápida y práctica de visualizar la existencia de anisotropía es mediante el cálculo del "Mapa de Variogramas" (Frykman y Rogon, 1993; Homand-Etienne et al., 1995; Isaaks & Co., 1999) el cual, además, permitirá obtener la dirección inicial aproximada para el cálculo de los semivariogramas direccionales, permitiendo un análisis adecuado de anisotropía. Posteriormente, dependiendo de la continuidad espacial, es suficiente sólo calcular dos semivariogramas separados 90°.

Ahora, el semivariograma experimental obtenido no es utilizado en el proceso de estimación. Debe ser ajustado a éste uno a varios modelos teóricos obteniéndose un modelo o función analítica que caracteriza la continuidad espacial de la variable estudiada. Los modelos de variograma teórico utilizado en el proceso de estimación o simulación deben satisfacer ciertas condiciones, es decir, tienen que ser "definido positivo" o de "tipo positivo" (Deutsch, 1994; Myers, 1992; Cressie y Grondona, 1992) de lo contrario puede existir el riesgo de encontrar varianzas negativas que no tienen sentido (Armstrong y Carignan, 1997). En general el ajuste a modelos teóricos para la determinación de los parámetros del semivariograma se realiza de forma visual.

En ocasiones se efectúan ajustes polinomiales por el método de los mínimos cuadrados u otras variantes que, aunque se encuentra el mejor ajuste, no siempre se verifica la condición de que el variograma obtenido sea siempre de tipo positivo, siendo insatisfactorio (Genton, 1998b), por lo que se recomienda el uso de modelos autorizados. Finalmente debe obtenerse uno o varios modelos de variogramas con los correspondientes valores de meseta y alcance. El modelo de variograma seleccionado debe representar fielmente los aspectos que se suponen importantes del variograma experimental (Wackernagel, 1995) que serán usados posteriormente en el proceso de estimación o simulación.

El semivariograma experimental: El variograma se define como la media aritmética de todos los cuadrados de las diferencias entre pares de valores experimentales separados una distancia  $h$  (Journel y Huijbregts, 1978), o lo que es lo mismo, la varianza de los incrementos de la variable regionalizada en las localizaciones separadas una distancia  $h$ .

$$\text{Var}\{Z(x+h)-Z(x)\} = 2g(h)$$

La función  $g(h)$  se denomina semivariograma, la cual puede ser obtenida por la expresión.

$$r(h) = \frac{1}{2Np(h)} \sum_{i=1}^{Np(h)} [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2$$

Dónde:

$Np(h)$  es el número de pares a la distancia  $h$ .

$h$  es el incremento.

$Z(x_i)$  son los valores experimentales.

$x_i$  localizaciones donde son medidos los valores  $z(x_i)$ .

Esta expresión de  $g(h)$  representa el útil más importante en todo estudio geoestadístico (Armstrong y Carignan, 1997; Weerts, y Bierkens, 1993; Chica, 1987). Su cálculo no consiste en una simple evaluación de su expresión, según se plantea en (Krajewski y Gibbs, 1993; Journel y Huijbregts, 1978; David, 1977; Xie y Myers, 1995a; Pannatier, 1993). Esta operación está relacionada con los elementos siguientes:

- La dirección en la que será calculado el semivariograma, uno o dos ángulos que definen una dirección en el espacio a  $y$  o  $b$  con tolerancias angulares  $da$   $y$  o  $db$ . El

semivariograma calculado usando tolerancia angular de  $90^\circ$  se denomina "semivariograma medio", "global" u "omnidireccional" como ya se indicó.

- El incremento o paso en el cálculo del semivariograma  $h$  y su tolerancia lineal  $dh$ . Se recomienda que el valor de  $dh$  sea la mitad del incremento inicial.
- Una distancia que representa la distancia máxima a que pueden estar alejados los segundos puntos del par con respecto a la línea que define la dirección de cálculo, conocido como ancho de banda.
- La distancia  $L_{max}$  hasta la cual será calculado del semivariograma. Se recomienda que ésta sea la mitad de la distancia entre las muestras más alejadas (Armstrong y Carignan, 1997; Krajewski y Gibbs, 1993), aunque dependiendo de la geometría del fenómeno regionalizado en algunos casos puede ser calculado hasta una distancia superior.

Definido los elementos anteriores, se evalúa la expresión del semivariograma para todos los pares de localizaciones separadas a la distancia  $h$  que cumplan las siguientes condiciones:

- La distancia entre las localizaciones  $x_i$  y  $x_i+h$  sea mayor que  $h-dh$  y menor que  $h+dh$ , o lo que es lo mismo, el segundo punto del par esté incluido en el espacio definido por  $h-dh$  y  $h+dh$  encontrándose el primer punto del par en el origen o este origen se mueve entre las muestras a analizar.
- Finalmente se representan gráficamente los valores de  $g(h)$  en función de  $h$ .

Es en general una función creciente de  $h$ . En la mayor parte de los casos  $g(h)$  crece hasta cierto límite llamado meseta, en otros casos puede crecer indefinidamente. El comportamiento en el origen puede tener diferentes formas, según Journel y Huijbregts (1978), Armstrong y Carignan (1997), Chica (1987):

Parabólico: Caracteriza a una variable muy regular, siendo continua y diferenciable.

Lineal: Caracteriza a una variable continua, pero no diferenciable, es decir menos regular.

Discontinuidad en el origen: "Efecto de pepita". Es el caso en que  $g(h)$  no tiende a cero cuando  $h$  tiende a cero. Representa a una variable muy irregular.

Discontinuo puro: Llamado también ruido blanco. Representa el caso de mayor discontinuidad, siendo el caso límite de ausencia de estructura donde los valores de dos puntos cualesquiera no tienen correlación alguna.

Construcción del semivariograma experimental en 2D: A continuación se presentan ocho pasos para la construcción del semivariograma experimental para datos distribuidos en dos dimensiones, resultado del análisis realizado en la bibliografía consultada.

Sea  $Z(x)$  una función aleatoria con  $N$  variables aleatorias regionalizadas  $Z(x_i)$  donde  $x = \{x, y\}$  es la localización y  $Z(x_i)$  es el valor medido correspondiente. Dados una dirección a través de un ángulo  $\alpha$  en la cual se desea calcular el semivariograma, da una tolerancia angular,  $dh$  una tolerancia lineal y el ancho de banda.

Se proponen los siguientes pasos:

1. Calcular la cantidad de pares de datos posibles por:  $N_p = N(N-1)/2$
2. Para cada par, calcular la distancia entre las localizaciones correspondientes por:  
 $i = 1, \dots, N_p$   
Almacenando para cada  $i$ :  
- P1: Número del primer punto del par,  
- P2: Número del segundo punto del par,

- d: Valor de la distancia entre los dos puntos del par.
- Angulo al que fija la dirección de la recta que pasa por los dos puntos del par.
- 3. Ordenar ascendentemente el grupo de datos anteriores por la distancia.
- 4. Calcular la amplitud máxima del semivariograma  $L_{max}$  como  $L_{max} = D_{max}/2$ , donde  $D_{max}$  es la distancia a que están separadas las localizaciones más lejanas. Esto es la máxima distancia calculada en el paso (2), o lo que es lo mismo, el último valor después del ordenamiento del paso anterior.
- 5. Fijar una distancia  $h$  inicial conocida como paso o incremento del semivariograma. Se recomienda la distancia promedio entre las muestras contiguas. Para los múltiplos de esta distancia será calculada  $g(h)$ , por la expresión del semivariograma. Esto indica la cantidad de puntos a procesar en el semivariograma, el cual se puede obtener como  $L_{max} / h$ .
- 6. Calcular la expresión del semivariograma para todos los pares almacenados en el paso (2) que cumplan las condiciones siguientes:
  - La distancia  $d$  sea mayor que  $h-dh$  y menor que  $h+dh$ , es decir,  $h-dh \leq d \leq h+dh$ . Si esta condición se cumple examinar la condición b, de lo contrario continuar con la distancia siguiente.
  - El ángulo al formado entre las líneas que parten del primer punto del par en la dirección  $0_0$  y la que pasa por los dos puntos del par en la dirección positiva, es decir, en contra de las manecillas del reloj, sea mayor que  $a - da$  y menor que  $a + da$ , es decir,  $a - da \leq a' \leq a + da$ . Si esta condición se cumple examinar la condición c, de lo contrario continuar con la distancia siguiente. La distancia entre el segundo punto del par y la línea que pasa por el primer punto en la dirección que no supere el ancho de banda.

Observaciones: Note que como los datos almacenados en el paso (2) están ordenados ascendentemente por la distancia, este paso se interrumpe cuando la distancia siguiente sea mayor que  $h+dh$ , y aquí precisamente, comienza la próxima iteración. Al interrumpir este paso calcular el semivariograma con los pares que cumplieron las condiciones a, b y c, así se obtiene un valor de  $g(h)$  correspondiente al incremento  $h$  actual.

7. Incrementar la distancia  $h$  en su propio valor, es decir,  $h$  será el próximo múltiplo del  $h$  inicial. Si el nuevo valor de  $h$  no supera el valor de  $L$ , regresar al paso (6) de lo contrario continuar el siguiente pasó.

8. Al finalizar el paso (7) debemos tener para cada valor transitado por  $h$  un valor calculado de  $g(h)$ , los cuales serán representados en un gráfico X-Y donde en la abscisa representan los valores de  $h$  y en la ordenada los de  $g(h)$ . Obteniendo así el semivariograma experimental o empírico para una dirección, incremento y tolerancias definidas.

Para la construcción del semivariograma 3D es necesario incorporar a la dirección del cálculo un nuevo ángulo  $b$  que permita fijar unido al ángulo  $a$  una dirección en el espacio tridimensional. El ángulo  $b$  debe variar entre  $-90^\circ$  y  $90^\circ$ , teniendo en cuenta que los valores extremos coinciden con la dirección vertical y son independientes de la dirección del ángulo  $a$ . La construcción del semivariograma 3D es similar al 2D con cambios en dos de sus pasos presentados anteriormente:

En el paso 2 el cálculo de la distancia se sustituye por:

Almacenar para cada  $i$  además: Otro ángulo  $b'$  que fija junto al ángulo  $a'$  la dirección de la recta que pasa por los dos puntos del par en tres dimensiones.

En el paso 6 puntos b, la dirección que contiene a los dos puntos del par debe estar incluida en el ángulo sólido formado por la dirección del cálculo del semivariograma y la tolerancia  $da$ , con centro en el primer punto del par. En el caso del cálculo del semivariograma en tres dimensiones, aun cuando teóricamente pueden ser calculados, en la práctica se encontró una



dirección que juega un rol diferente a la del resto (Armstrong y Carignan, 1997). En el caso minero las variaciones a través de los estratos es diferente a su comportamiento a lo largo de un estrato, esto unido a la forma en que se realiza la exploración, varios pozos distanciados decenas de metros y cada uno contiene un conjunto de muestras mineralizadas con una longitud del orden de 1 m. Es recomendable entonces analizar esta dirección por separado y desarrollar un análisis de variabilidad espacial en la dirección vertical, es decir, perpendicular a la estructura geológica y otro análisis en la dirección horizontal, a lo largo de la estructura geológica, utilizando en este caso compósitos de la zona de interés, realizando además, un análisis de anisotropía, elementos que permitirán describir la variabilidad en tres dimensiones.

Construcción del semivariograma en tres dimensiones 3D: Problemas más comunes encontrados en el cálculo de semivariograma de lo expresado hasta aquí, además de lo planteado en muchos textos de geoestadística, se puede obtener la impresión de que es fácil el cálculo del semivariograma experimental (Armstrong y Carignan, 1997). La fuente de problemas que se pueden presentar en la realización de un análisis estructural es muy variada, lo que está en correspondencia con la variedad de casos que se presentan en la naturaleza. Algunos de los problemas más comunes discutidos en Armstrong y Carignan (1997) son:

El valor idóneo del incremento h: Una inadecuada selección de h puede proporcionar un semivariograma errático, aunque no se puede dar un criterio exacto o aproximado sobre cual el mejor valor de h, es recomendable recalcular g (h) para distintos valores de h, hasta encontrar una forma suavizada del mismo.

Distribuciones con valores extremos: La existencia de valores extremos, altos o bajos, en una distribución puede conducir a la obtención de un variograma fuertemente errático. En este caso la solución puede ser simple, eliminar los datos extremos, porque pueden ser ocasionados por errores. En otros casos pueden encontrarse en zonas geográficamente distintas y pueden ser tratados de manera separada.

Una herramienta útil para la detección de valores extremos y encontrar el incremento adecuado puede ser calculado la "Nube de Variogramas" (Armstrong y Carignan, 1997), el cual consiste en representar los valores de  $[Z(x_i+h)-Z(x_i)]^2/2$  contra h para cada par posible de la información inicial.

La existencia de poblaciones mixtas: Existen datos que pueden mostrar diferentes poblaciones, los cuales pueden estar estadísticamente diferenciados. En muchos casos las poblaciones están geográficamente diferenciadas y es donde se recomienda tratar las zonas por separado. En otros casos las poblaciones se presentan mezcladas geográficamente. En este caso una solución puede ser un cambio de escala, con lo que se logra reducir la diferencia de los valores extremos.

En Krajewski y Gibbs (1993) se presentan otras razones por los que los semivariogramas son erráticos, las cuales son: 1.- No hay suficientes muestras, 2.- Las muestras no son representativas del fenómeno, 3.- Las clasificaciones de las muestras no son válidas, 4.- El área estudiada es no homogénea, 5.- Pequeños o largos conjuntos de datos son necesarios, 6.- Pequeñas o largas distancias deben ser calculadas, 7.- Más o menos distancias deben ser calculadas, 8.- Pequeñas tolerancias son necesarias, 9.- Las muestras pueden tener localizaciones incorrectas, 10.- Los valores muestreados pueden ser erróneos.

El problema fundamental en la obtención de un semivariograma correcto es, la elección adecuada de los intervalos de distancias para los cuales será calculado el semivariograma, de

modo que en éstos la cantidad de pares encontrados sea suficiente desde el punto de vista estadístico.

El modelado de semivariogramas incluye dos etapas fundamentales (Xie y Myers, 1995a). Una vez construido el semivariograma experimental o empírico es necesario ajustar a este un modelo teórico, con el objetivo de determinar los parámetros descriptivos del semivariograma que posteriormente serán usados en la estimación (ASCE Task, 1990; Journel y Huijbregts, 1978; David, 1977; Lamorey y Jacobsom, 1995; Pannatier, 1993; Arik, 1990; Dubrule, 1994). Los parámetros del semivariograma caracterizan tres elementos importantes en la variabilidad de un atributo que son: la discontinuidad en el origen (existencia de efecto de pepita), el valor máximo de variabilidad (meseta), y el área de influencia de la correlación (alcance). Como se presentan en Krajewski y Gibbs (1993), Journel y Huijbregts (1978), David (1977), Echaabi (1995), Lamorey y Jacobsom (1995), Wallace y Hawkims (1994), Pannatier (1993), Arik (1990), Pitard (1994), y se describen a continuación.

- La Meseta (Sill): Es el valor de  $g(h)$  para el cual con el aumento de  $h$  su valor permanece constante, se representa como  $(CT = C + Co)$  y se denomina meseta. Puede obtenerse trazando una línea paralela a la abscisa y que se ajuste a los puntos de mayor valor del semivariograma y su valor se lee en la intersección de esta línea con la ordenada.
- El Alcance (Range): La distancia  $h$  para la cual las variables  $Z(x)$  y  $Z(x+h)$  son independientes, se denomina alcance y se representa por  $(a)$ , es decir, las distancias para la cual los valores de la variable dejan de estar correlacionados, o lo que es lo mismo, la distancia para la cual el semivariograma alcanza su meseta.
- El alcance siempre tiene valor positivo y puede ser obtenido a partir de la intersección de las líneas descritas en los puntos anteriores, ese punto leído en la abscisa es una fracción del propio alcance, fracción que se detallará posteriormente en la explicación de los modelos teóricos.

Parámetros del semivariograma: Los modelos teóricos de semivariogramas admisible o autorizados más utilizados en la práctica se presentan en Journel y Huijbregts (1978) en los que coinciden Krajewski y Gibbs (1993), Deutsch y Journel (1998), Bacchi y Kottegoda (1995), Wackernagel (1995), Armstrong y Carignan (1997), Myers (1991c), Kiyono y Suzuki (1996). Atendiendo a las dos características más importantes en el modelado de semivariogramas que son según Journel y Huijbregts (1978): 1.- Su comportamiento en el origen, el cual puede ser lineal, parabólico y con Efecto de Pepita y 2.- La presencia o ausencia de meseta. Estos modelos son:

Efecto de Pepita: Corresponde a un fenómeno puramente aleatorio (ruido blanco), sin correlación entre las muestras, cualquiera sea la distancia que las separe, donde  $C$  representa el valor de la meseta.

$$g(h) = 0 \quad h = 0$$

$$= C \quad |h| > 0$$

Modelo Exponencial: Este modelo a diferencia del esférico crece inicialmente más rápido y después se estabiliza de forma asintótica. Como la meseta no se alcanza a una distancia finita, se usa con fines prácticos el "alcance efectivo" o "alcance práctico"  $a'$ , valor que se obtiene en el punto de abscisa para el cual el modelo obtiene el 95% de la meseta, con un valor  $a' = 3a$ , donde  $a$  es el parámetro de escala. La tangente en el origen encuentra a la meseta en el punto  $a = (1/3)a'$ .

$$g(h) = C [1 - \text{Exp}(-|h|/a)] \quad |h| > 0$$

Modelo Gaussiano: Este es un modelo extremadamente continuo, inicialmente presenta un comportamiento parabólico en el origen, después al igual que en el modelo Exponencial se alcanza la meseta de forma asintótica. El alcance práctico tiene un valor de  $a' = 1.73a$ , que es el valor de la abscisa donde se alcanza el 95% de la meseta. Modelo con función potencia: Este es un modelo sin meseta, para valores de  $a$  correspondientes a 0.5, 1.0 y 1.5.

$$(h) = |h|^a \text{ con } a \in ]0, 2[.$$

Para el valor de  $a = 1$  en el modelo anterior se obtiene el modelo Lineal, al cual no tiene ni meseta ni alcance. Ahora por efectos prácticos, sin embargo, muchos programas informáticos denotan la pendiente del modelo lineal con la relación  $C/a$ .

$$g(h) = (C/a) |h|$$

Se han presentado los modelos más usados en la práctica, aunque se debe señalar, existen otros modelos que son ampliamente descritos en el manual de referencias del sistema geoestadístico Isatis. Estos modelos pueden ser ajustados individualmente, aunque es posible encontrar en la práctica aplicaciones donde a los semivariogramas experimentales se les debe ajustar más de un modelo teórico, es decir, a través de superposición, nombrándose estructuras imbricadas (Krajewski y Gibbs, 1993; Journel y Huijbregts, 1978; David, 1977).

La selección del modelo y los parámetros apropiados a las características del semivariograma empírico, para ser usados en la interpolación geoestadística que veremos posteriormente es el punto más importante en el proceso planteando (Arik, 1990), además, esta selección es fundamental en el caso particular de la minería donde se presentan yacimientos: con irregularidad en la densidad de barrenos; sin una adecuada perforación; con alta asimetría en la distribución o que carecen de un modelado geológico propio. Al respecto se refieren muchos autores sobre el efecto negativo que puede tener en la estimación el uso del krigeaje sin un estudio de estructura espacial y la selección adecuada del modelo de semivariograma y sus parámetros.

Modelos teóricos de semivariogramas: Como el ajuste de los modelos teóricos al semivariograma experimental, se realiza de forma visual o interactiva, variando los valores  $C_0$  (efecto de pepita),  $C + C_0$  (meseta) y  $a$  (alcance), hasta coincidir con los parámetros que mejor se ajustan, es conveniente validar el modelo seleccionado y los parámetros meseta y alcance escogidos. Al respecto se discute la validación cruzada en Journel y Huijbregts (1978), Armstrong y Carignan (1997), Bacchi y Kottegoda (1995), Myers (1991b), Deutsch y Journel (1998), Xie y Myers (1995b), Kiyono y Suzuki (1996), Host (1995), Lajaunie (1997), Madani (1998), Carr (1994).

El método de validación cruzada ha sido ampliamente utilizado para evaluar el grado de bondad de un modelo de semivariograma y reconocido como un método óptimo de estimación de sus parámetros. La operación de validar un semivariograma teórico ajustado a uno experimental siempre toma mucho tiempo, éste se considera como el último de los pasos importantes del análisis de variabilidad, debido a que una vez obtenido este resultado será utilizado en la estimación por krigeaje en cualquiera de sus variantes.

Modelado de semivariogramas: Sea  $Z(x)$  una función aleatoria estacionaria con semivariograma  $g(h)$ , su función de covarianza  $C(h)$  viene dada por  $C(h) = s^2 - g(h)$  donde  $s^2$  es la varianza de  $Z(x)$ . Sea  $Zx_1, Zx_2, \dots, Zx_n$  los valores de  $Z(x)$  en  $n$  puntos medidos. La validación cruzada consiste en suprimir el  $i$ -ésimo valor medido  $Z(x_i)$  y estimarlo a partir del resto de los datos. El valor estimado  $Z^*(x_i)$  se calcula por krigeaje, procedimiento explicado más adelante.

Si se repite este proceso para los N puntos, se pueden calcular n errores de validación:

$$E(x_i) = Z^*(x_i) - Z(x_i) \quad i = 1, 2, \dots, N.$$

Así se van probando diferentes valores de los parámetros del semivariograma hasta que los errores de validación cumplen los siguientes criterios estadísticos: (Journel y Huijbregts, 1978; David, 1977; Armstrong y Carignan, 1997).

- El error medio, dado por  $T1 = (1/n) \sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z^*(x_i)]$ , debe ser aproximadamente igual a cero.
- El error medio cuadrado, dado por  $T2 = (1/n) \sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z^*(x_i)]^2$ , debe ser pequeño.
- La medida,  $T3 = (1/n) \sum_{i=1}^n \{ [Z(x_i) - Z^*(x_i)]/s \}^2$ , debe ser igual a uno.
- La medida,  $T4 = \text{Corr}\{ [Z(x_i) - Z^*(x_i)]/s, Z^*(x_i) \}$ , debe ser cero.
- La medida,  $T5 = \text{Corr}\{ Z(x_i), Z^*(x_i) \}$ , debe ser uno.

Otros autores sólo plantean que las medidas fundamentales son la indicada por T1 y T3, (Lamorey y Jacobsom, 1995; Bacchi y Kottegoda, 1995).

**Ajuste automático:** El ajuste de modelos de semivariogramas se puede realizar también de forma automática. Esta ha sido presentada por varios autores, en la que se sugieren una forma particular de aplicar el método de los mínimos cuadrados y así obtener el modelo y sus parámetros, teniendo en cuenta que el modelo obtenido sea definido positivo, como ya se ha indicado. La efectividad de estos se describe y argumenta en Gotway (1991) y Zhang (1995). Una comparación generalizadora se presenta en Zimmerman y Zimmerman (1991) donde se comparan varios métodos para estimar los parámetros del semivariograma entre visuales y automáticos.

Ahora, el ajuste realizado de forma automática no tiene por qué reportar mejores resultados en el proceso de estimación, recomendándose en Journel y Huijbregts (1978) y Lantuéjoul (1997) y otros validar el modelo seleccionado de acuerdo al estimador a utilizar. Un criterio decisivo, independiente de la forma utilizada en la elección del modelo teórico y sus parámetros, es sin lugar a dudas, emplear el método de la validación cruzada con el estimador a utilizar en el proceso de estimación, discutido anteriormente.

Conviene aquí realizar un análisis sobre el comportamiento de la variabilidad del atributo en estudio. Se conoce que el semivariograma describe las características de continuidad espacial de la variable regionalizada en una dirección, pero este comportamiento pueden variar según la dirección que se analice, como se discute en Journel y Huijbregts (1978), David (1977), Zimmerman (1993), Krajewski y Gibbs (1993). Se exige por este motivo un análisis del comportamiento de la continuidad en distintas direcciones, el Análisis de Anisotropía. Cuando el semivariograma calculado en diferentes direcciones (norte-sur, este-oeste, y en direcciones intermedias de 45° o de 22.5°, con tolerancia de 22.50), muestra similar comportamiento, se dice que el fenómeno es Isotrópico, cuando muestran diferentes comportamientos es Anisotrópico (Krajewski y Gibbs, 1993). Los tipos de anisotropías más comunes son la Geométrica y la Zonal. (Krajewski y Gibbs, 1993; Journel y Huijbregts, 1978; Armstrong y Carignan, 1997)

**Anisotropía Geométrica:** Está presente cuando los semivariogramas en diferentes direcciones tiene la misma meseta pero distintos alcance.

**Anisotropía Zonal:** Está presente cuando los semivariogramas en diferentes direcciones tiene diferentes mesetas y alcances.

Al respecto en (Zimmerman, 1993), se hace un estudio profundo de los tipos de anisotropía, proponiendo una nueva terminología. En estos casos conviene realizar transformaciones de

coordinadas con el objetivo de obtener modelos Isotrópicos (Journel y Huijbregts, 1978; Chica, 1987; Armstrong y Carignan, 1997).

Cuando en el cálculo del semivariograma se detecta que existe una relación lineal entre el valor medio de las muestras usadas en el cálculo de cada  $g(h)$  y la desviación estándar correspondiente, se dice que existe un efecto proporcional (heterosedasticidad). Este efecto se puede detectar planteando los valores de  $X_m$  contra  $s$ , es decir, que el coeficiente de variación ( $s/X_m$ ) sea aproximadamente constante, ocurre cuando los datos presentan una distribución lognormal (Journel y Huijbregts, 1978).

La solución a este problema propuesta por David (1977) consiste en dividir cada valor del semivariograma local por el cuadrado de la media local, y obtener lo que se conoce como semivariograma relativo (David, 1977).

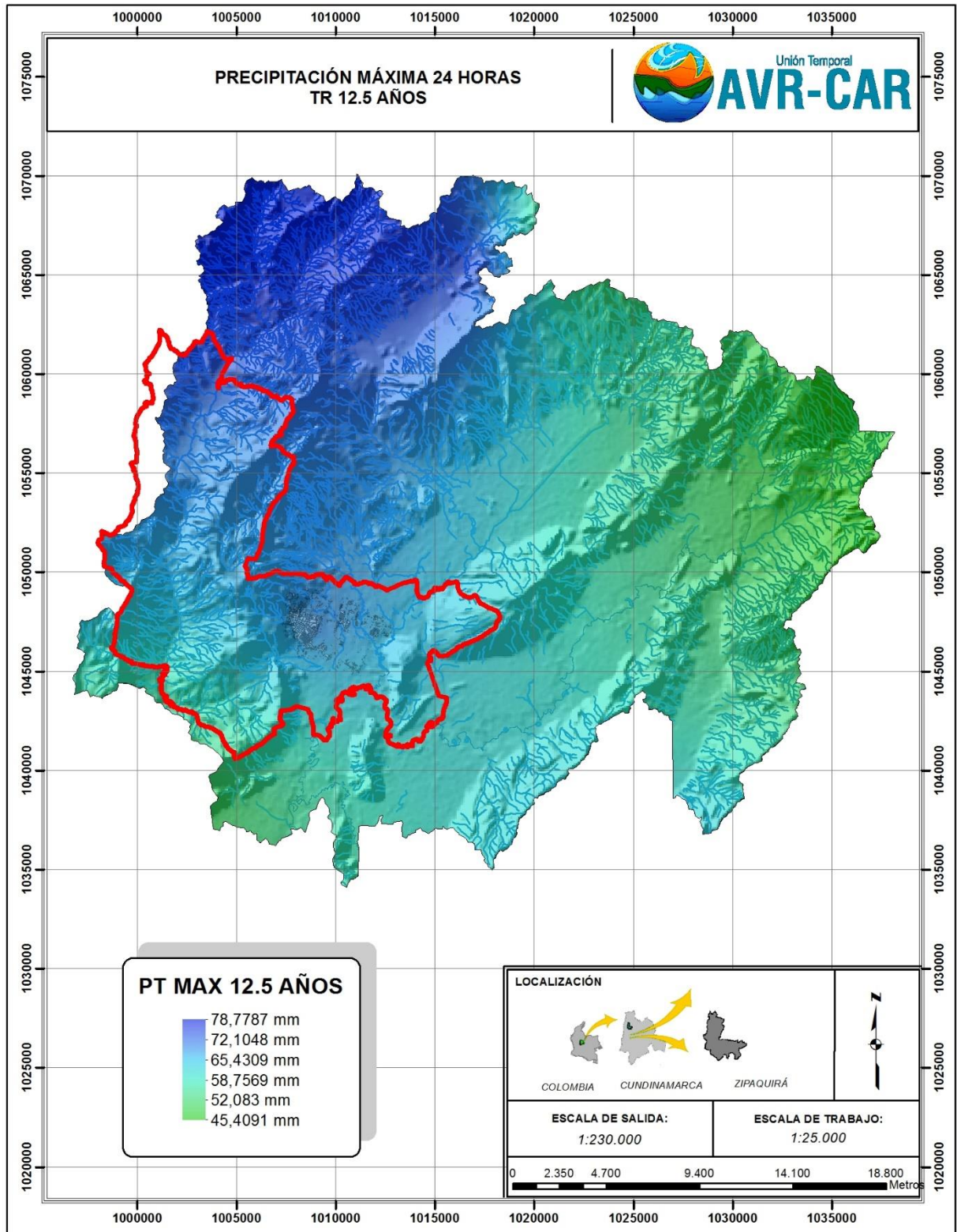
$$F(h) = g(h)/X_m^2(h)$$

Puede ser calculado usando los pasos anteriormente presentados para el cálculo de los semivariogramas tradicionales.

Toda la formulación presentada se implementa en una herramienta del ArcGIS 10, para la obtención de los mapas continuos que se presenta a continuación.



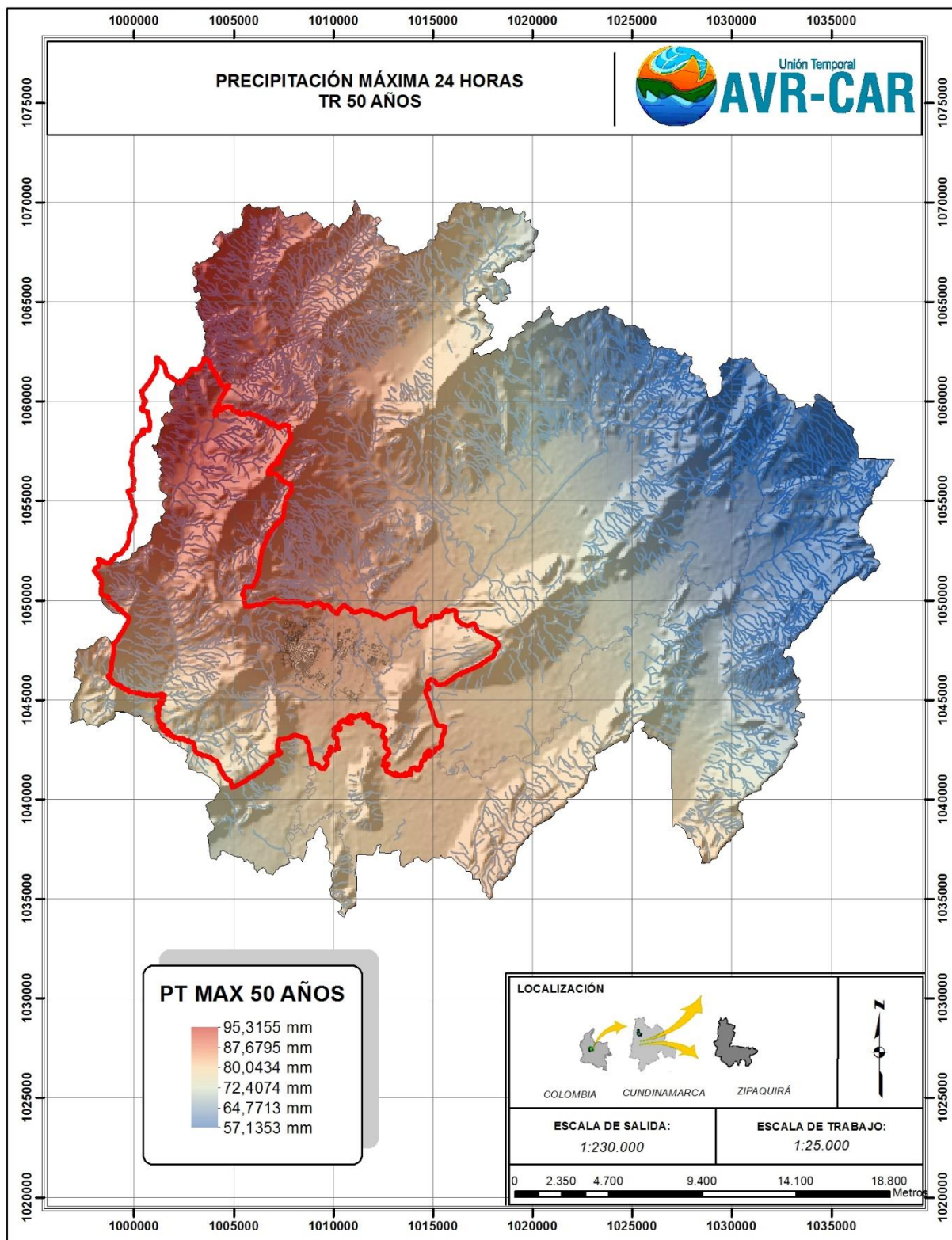
Figura16 Precipitación máxima 24 horas TR 12.5 años



Fuente: UT AVR CAR. 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010)



Figura17 Precipitación máxima 24 horas TR 50 años



Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010).

### 5.2.6 Curvas intensidad duración y frecuencia sintéticas

Se adoptaron curvas sintéticas, el procedimiento se toma del manual de drenaje de INVIAS y se resume a continuación.

La metodología simplificada de cálculo de las curvas intensidad – duración – frecuencia se debe llevar a cabo siempre y cuando no se disponga de datos históricos de precipitación de corta duración. En este estudio se dedujeron curvas intensidad – duración - frecuencia por correlación con la precipitación máxima promedio anual en 24 horas, la precipitación total media anual y la elevación de la estación.

La mejor correlación obtenida, sin embargo, fue la que se obtuvo con la precipitación máxima promedio anual en 24 horas en una estación, y es la que se propone para los estudios, además de que es la más sencilla de utilizar. La expresión resultante está dada por:

$$i = A \cdot T^b \cdot M^d / (tc/60)^c$$

Dónde:

i: Intensidad de precipitación, en milímetros por hora (mm/h).

T: Periodo de retorno, en años.

M: Precipitación máxima promedio anual en 24 h a nivel multianual

t: Duración de la lluvia, en minutos (min).

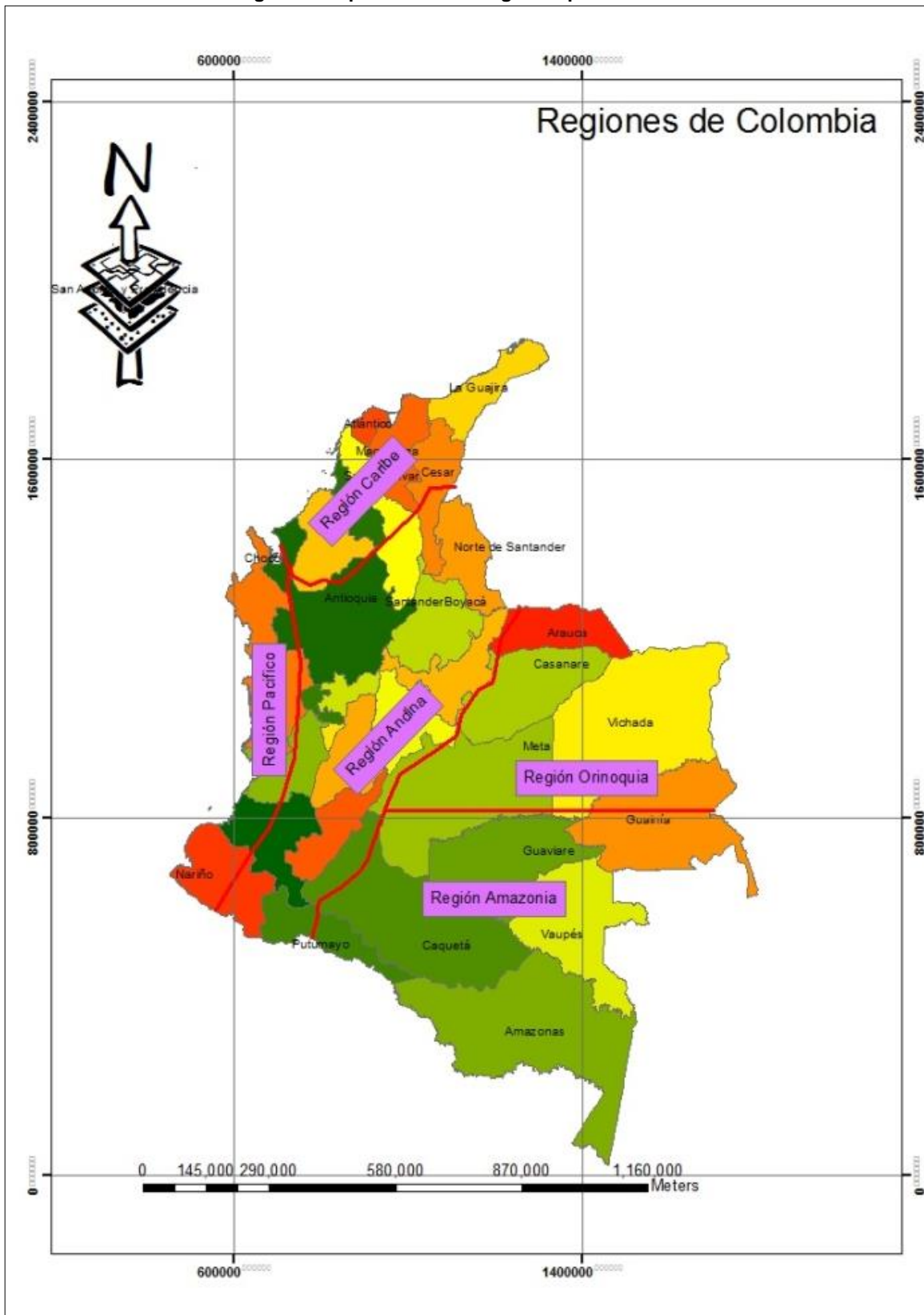
a, b, c, d: Parámetros de ajuste de la regresión. Estos parámetros fueron regionalizados como se presenta en la tabla siguiente:

**Tabla 3 Valores coeficientes curvas sintéticas**

Región	a	b	c	d
Andina	0.94	0.18	0.66	0.83
Caribe	24.85	0.22	0.50	0.10
Pacífico	13.92	0.19	0.58	0.20
Orinoquía	5.53	0.17	0.63	0.42

Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del manual de INVIAS

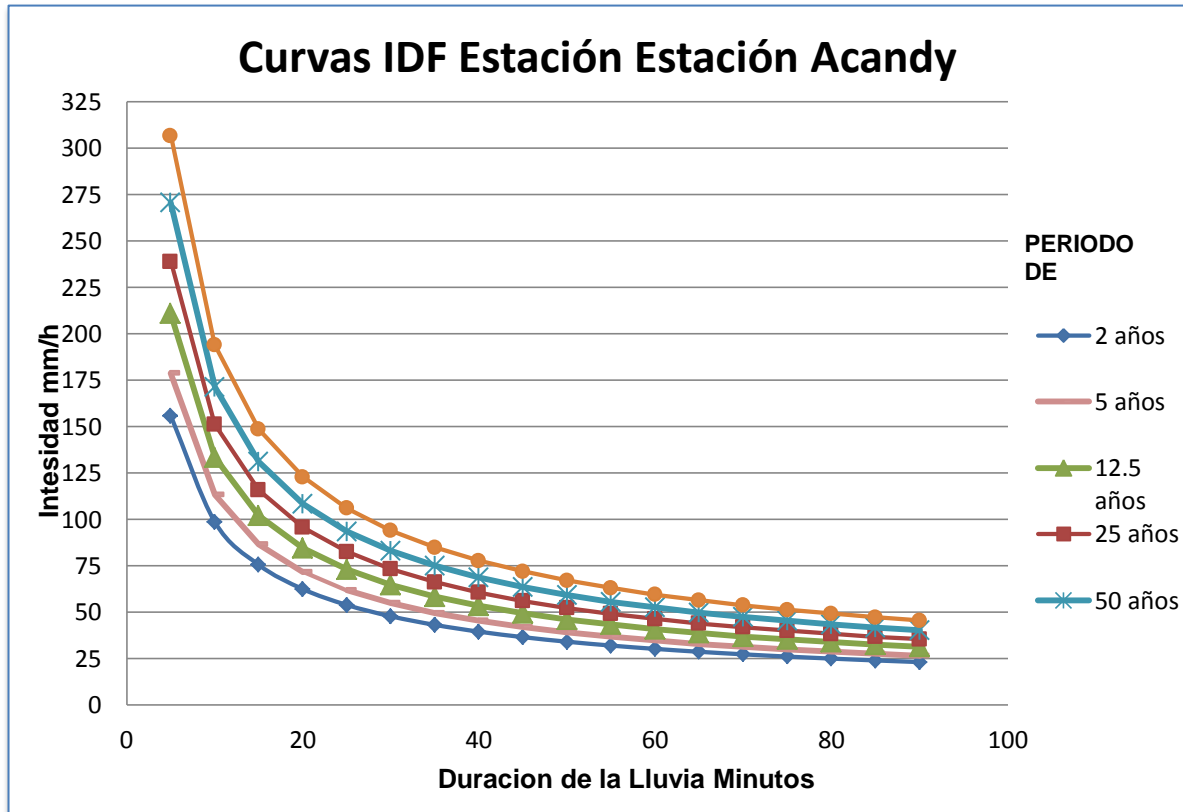
Figura18 Mapa división de regiones para Colombia



Fuente: Manual INVIAS

Con los datos de las precipitaciones máximas en 24 horas se construyen las curvas IDF para cada una de las estaciones tenidas en cuenta en el proyecto (ver anexo Curvas IDF). En la Figura 19 se observa un ejemplo de las curvas obtenidas.

Figura19 Curva IDF sintéticas para estación Acandy



Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014)

### 5.2.7 Diseño de la lluvia

Para obtener la precipitación se diseñó una tormenta a partir de curvas sintéticas de intensidad, duración y frecuencia, siguiendo la metodología de Díaz Granados y presentada en el manual de drenaje del Instituto Nacional de Vías INVIAS.

El diseño de la lluvia se proyectó por método del bloque alterno que de manera general sigue los siguientes pasos.

Con base en los datos de las curvas intensidad – duración - frecuencia para la estación analizada, representativa de la cuenca hidrográfica hasta el sitio de interés, se calcularon las curvas de masas de los aguaceros puntuales para duraciones entre 0 y 180 minutos y los períodos de retorno seleccionados, en intervalos de tiempo congruentes con la duración de la lluvia efectiva del hidrograma de escorrentía superficial seleccionado, igual a tr.

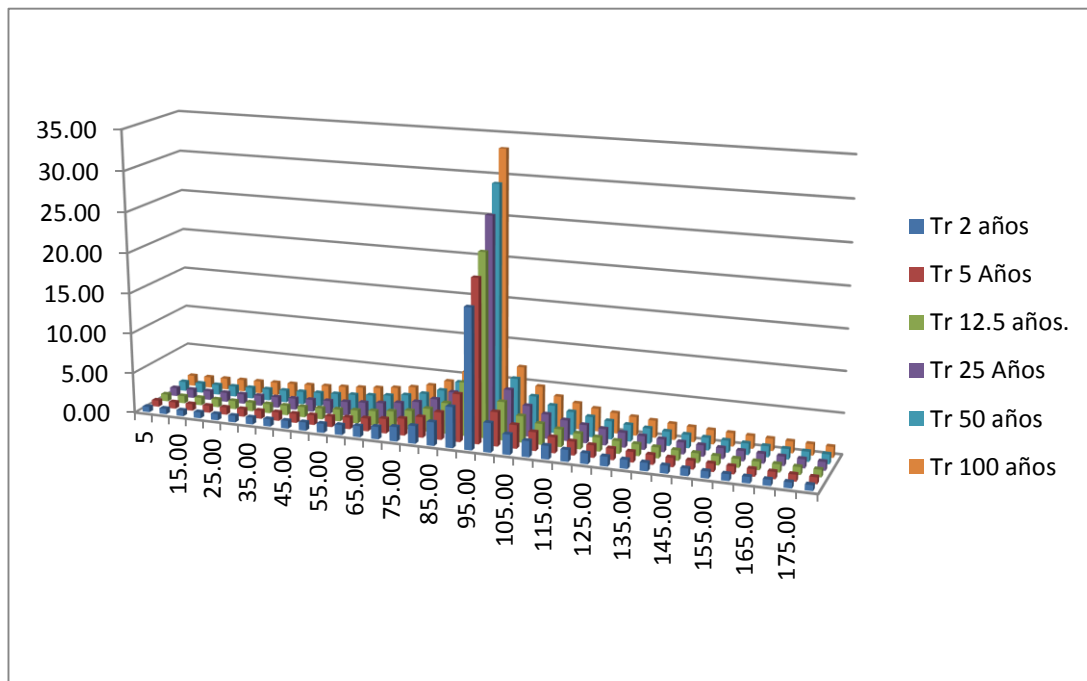
Posteriormente, con base en estas curvas de masas, se calcularon los hietogramas de los aguaceros puntuales respectivos.

Para dar una secuencia más crítica del aguacero, como es usual en este tipo de análisis, y por medio del método del Bloque Alterno, los incrementos de lluvia de los hietogramas

mencionados previamente se deben arreglar de la siguiente manera: el valor más bajo se colocará en el primer lugar, el segundo valor en orden creciente se colocará en último lugar, el tercer valor en tal orden se ubicará en segundo lugar, el cuarto valor en el penúltimo lugar, y así sucesivamente. El resultado corresponde con los hietogramas de lluvia puntual de los aguaceros de diseño.

Una vez realizado este proceso para todas las estaciones de la cuenca del Río Bogotá, hasta el sitio de interés se interpola por métodos de inverso de la distancia y Kriging, obteniendo así la precipitación para el sector de interés, en este caso parte de la cuenca del Río Bogota.

**Figura20 Hietogramas de diseño para estación Acandy**



Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010)

### 5.3 CAUDALES MÁXIMOS

Determinación de caudales máximos: Se reconocen dos tipos de técnicas para la estimación de caudales máximos probables en una cuenca. Los primeros son métodos estadísticos basados en el ajuste de datos históricos de caudales y los segundos son métodos o modelos conceptuales basados en ecuaciones obtenidas del estudio de cuencas.

Debido a la carencia de datos históricos de caudales, se utilizó para la obtención de los caudales el método expuesto a continuación.

#### 5.3.1 MODELO CON LA HERRAMIENTA HMS

El cálculo del caudal de validación a emplear se utiliza la herramienta HEC HMS la cual se explica a continuación: Este programa está indicado para la modelación de los procesos hidrológicos más habituales que se dan en una cuenca. Asimismo este programa es de

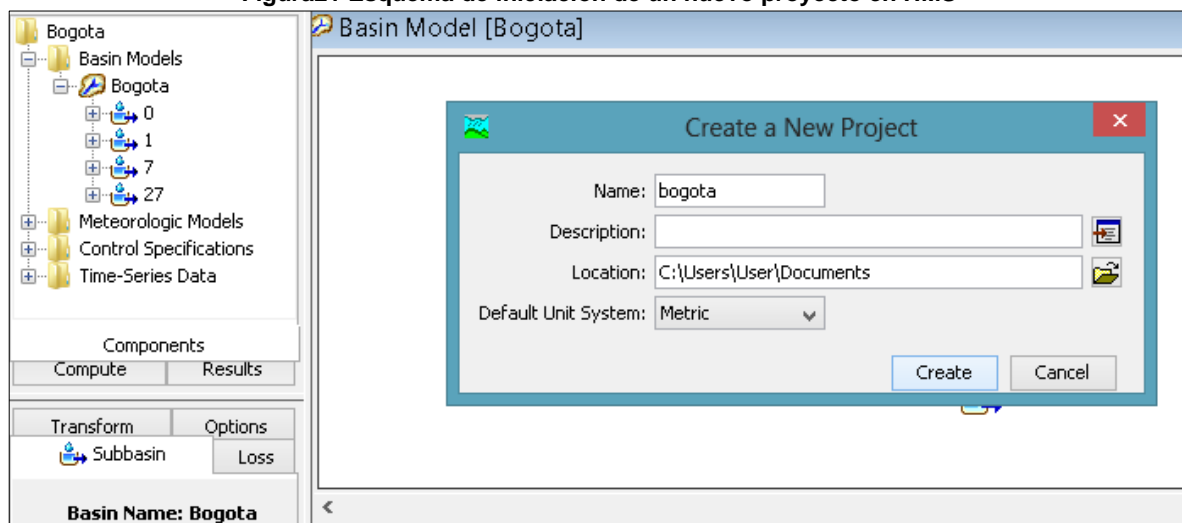


distribución gratuita y, a continuación, presentamos los pasos que se deben seguir y se seguir para una utilización del software.

### 5.3.1.1 Configuración del Proyecto

HEC HMS utiliza una estructura de trabajo que se denomina proyecto (Project) a la agrupación de un modelo de cuenca, un modelo de lluvias (modelo meteorológico) y un modelo de datos de control. Cuando se abre el programa se pueden realizar dos acciones indistintamente: la primera es crear un nuevo proyecto y la segunda es abrir un proyecto para continuar una sesión de trabajo anterior. Para el caso de interés se mostrará desde la creación del proyecto para el municipio Zipaquirá.

**Figura21 Esquema de iniciación de un nuevo proyecto en HMS**



Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información Software Hec Hms

El esquema se observa la creación de un nuevo proyecto llamado Zipaquirá con las unidades del sistema métrico.

En el modelo hidrológico para el municipio Zipaquirá, a partir de unas IDF sintética y con la ayuda del método de los bloques alternados, se obtiene la precipitación bruta de las cuencas a tratar. Para realizar el paso a precipitación neta se aplica alguno de los métodos que evalúe las pérdidas por infiltración, retención en depresiones o interceptación. En el caso del estudio realizado se aplicó el método de pérdidas del SCS.

Una vez obtenida la lluvia neta, se debe realiza una transformación lluvia- escorrentía mediante un hidrograma unitario. A falta de tener como dato el hidrograma unitario real de la cuenca se han elaborado unos sintéticos como se explicó en capítulos anteriores. Por sencillez de definición y a falta de más datos, utilizó el hidrograma unitario sintético propuesto por el SCS.

Los hidrogramas obtenidos a la salida de las cuencas circulan a través de cauces. Por lo tanto, se debe aplicar un método que evalúe la propagación y laminación de dichos hidrogramas. El método utilizado en el estudio es el de Muskingum.

Ahora con estos antecedentes de aplicación es necesario definir tres modelos:



### 5.3.1.2 Basin Model

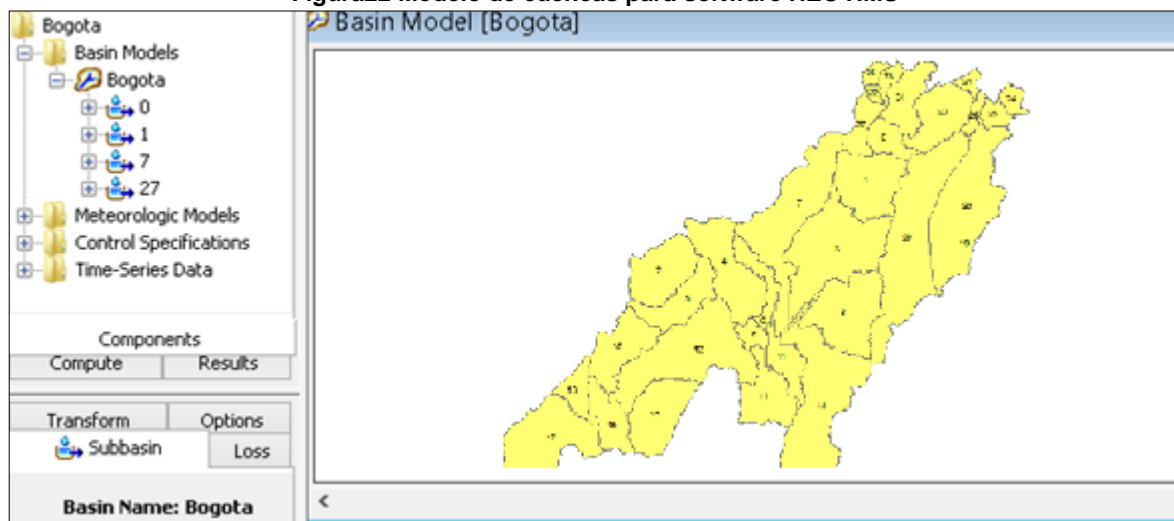
Para crear un nuevo Basin Model: pulsar Components > Basin Model >New. Aparece entonces el formulario donde se da un nombre al modelo de cuencas y su descripción. Al presionar “OK” se definirán los parámetros necesarios para la modelización de las cuencas.

Entonces se crea un modelo con el nombre Zipaquirá, donde se desarrollará el componente hidrológico.

En este momento es necesario definir la conformación del modelo de cuencas, como está funcionando actualmente en sistema, de las seis cuencas que definimos en la delimitación.

Las cuencas de la parte alta generan un caudal que van a un punto común, estas son Barrancas, Quebrada Amolador y Quebrada Hospital. El tramo genera un caudal el cual aportan al Río Bogotá.

Figura22 Modelo de cuencas para software HEC HMS



Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010)

### 5.3.1.3 Meteorologic Model

Una vez realizado el modelo de cuencas se debe dotar al programa de un modelo meteorológico que debe incluir como mínimo una lluvia. Esta lluvia es la estimada a partir de los Bloques Alternados, ya calculados y explicados.

La introducción de lluvias en HMS se realiza a partir de unos hipotéticos registros pluviométricos en el software que corresponde a “Gages” el cual contendrá cada una de las lluvias. Para introducir una estación se debe ir a “Components” > “Times series data manager” > “New”. Tal y como lo muestra la figura, aparecerán, entonces, unos formularios para rellenar datos de lluvia hasta definir la lluvia del proyecto. Normalmente se trabaja con un hietograma incremental y se introducen los datos en milímetros de lluvia.

Por defecto el modelo está preparado para recibir datos de lluvia en mm. No hace falta definir las coordenadas geográficas para cada estación y tan solo hay que indicar la fecha y hora de

inicio de la lluvia. Si se trabaja con lluvias sintéticas (no reales) de proyecto, se elige un inicio de tiempo cualquiera.

Las estaciones para esta parte de la cuenca son:

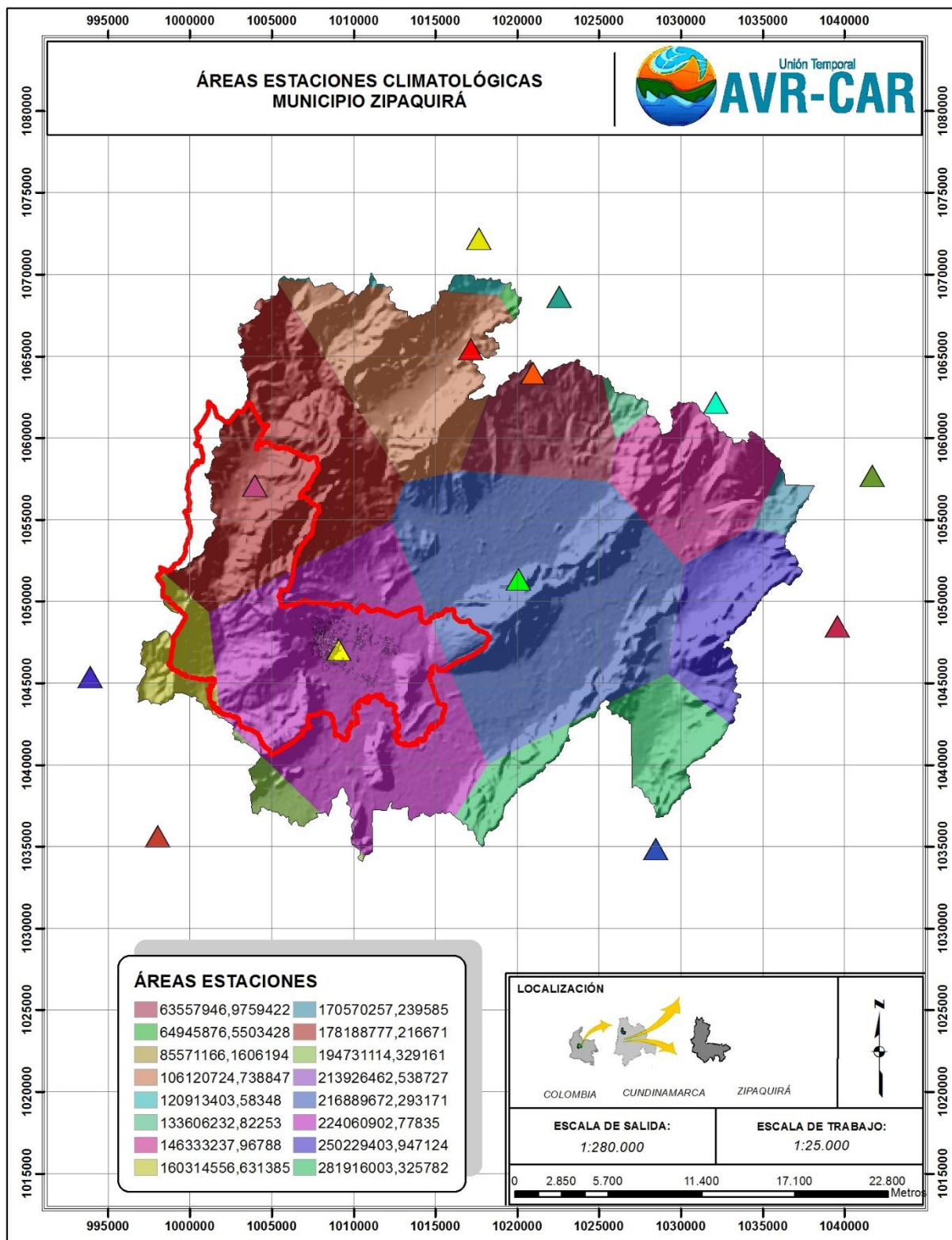
**Tabla 4 Estaciones para cada cuenca**

<b>Cuenca</b>	<b>Estación</b>
Barrancas	El Encanto
Amolador	E Hato
Hospital	El Hato 7
Honda	Montecillos
Santa Librada	Zipaquirá
La Moya	Acandy

Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010)

Para la distribución en el modelo se utilizó el método de polígonos de Thiessen. Sus áreas de influencia se presentan en figura 23, en la cual se observa que la parte norte del municipio se ve influenciada por la estación El Encanto, teniendo la menor proporción, por la zona central y con mayor representación Acandy.

Figura23 Mapa áreas estaciones climatológicas cuencas hidrográficas Zipaquirá



Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010)

Para obtener el valor de la curva número se utilizó el mapa en formato el raster suministrado por la CAR. Se trabajó con la condición de humedad más desfavorable, o sea la tres. Se acumuló el número de curva y posteriormente se dividió en el número de pixeles acumulados en cada salida de las cuencas.

**Tabla 5 Valores curva número y áreas de influencia**

Cuenca	CN
Barrancas	86
Amolador	85
Hospital	82
La Venta	80
Honda	87
Turbia	86

Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010)

#### 5.3.1.4 Control de especificaciones:

Por último, se deben definir las especificaciones de cálculo para así determinar la cantidad de puntos en que se 'discretan' los hidrogramas. Se obtienen los hidrogramas, no en forma continua sino discreta, con datos cada cierto intervalo de tiempo que se definen (time interval). HEC HMS da la opción al usuario de definir estas especificaciones. Para acceder a estas opciones se ingresa a Components>Control Specifications manager> New. Una vez tenemos abierto el control 1 se determina la fecha de inicio/final de lluvia y la hora de inicio/final de la misma.

Es importante aclarar que el periodo establecido para el control deberá tener el mismo inicio, pero el fin tiene que ser un poco mayor (recordemos que la respuesta es posterior). En la tabla se relacionan los caudales obtenidos con el software HEC HMS al cierre de la cuenca los cuales serán utilizados para validación del modelo rasterizado de caudales para toda la cuenca de estudio.

**Tabla 6 Resumen caudales calculados HEC HMS.**

Cuenca	Q m <sup>3</sup> /seg (HMS)
Susagua	359,4
Rio Bogotá	915,3
Rio Subachoque	588,1
Rio Frio	202,5

Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010)

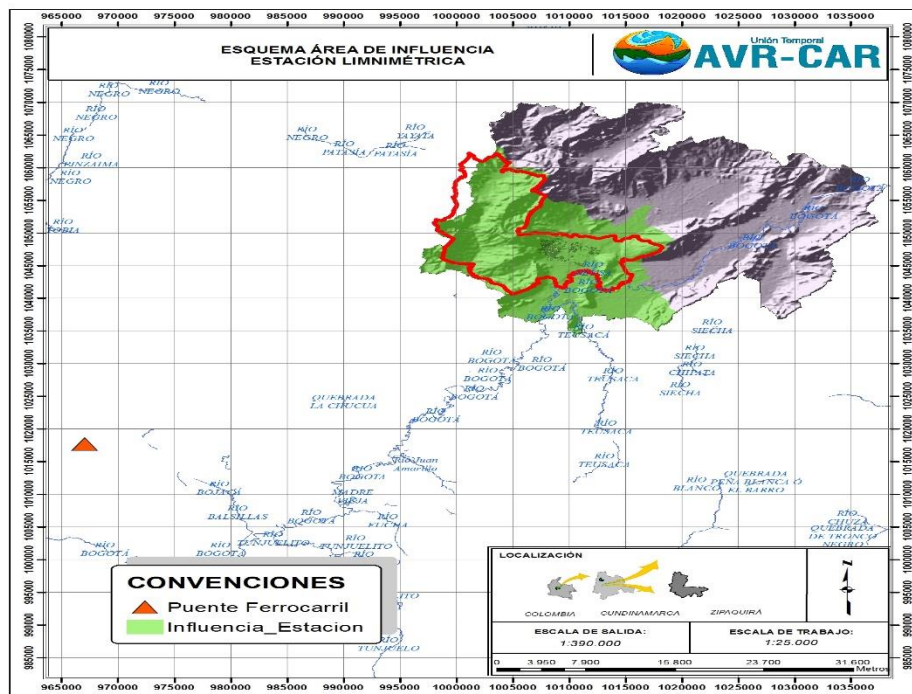
### 5.3.1.5 Calibración del modelo

Para la calibración del modelo es necesario tener datos de caudal y datos de precipitación para la misma fecha. Como esta situación no se tiene, lo que se hace es una optimización de los parámetros de cálculo, para este caso específico el tiempo de concentración.

La optimización se realizará a nivel de cuenca, donde se encuentre registros. Para el caso de la cuenca del Río Bogotá, se utilizarán las estaciones limnimétricas, El procedimiento es el siguiente:

Definir el área hasta el sitio de la estación Ferrocarril. Esto se realizó con la herramienta de acumulación definiendo el área hasta este punto.

**Figura24 Esquema de Calibración del modelo**



Caudal Puente Ferrocarril	Caudal SIG
6.74	6.78

Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010)

Para valorar el caudal de la metodología, se calcula el caudal para 2\_33 de periodo de retorno y se compara con los caudales medios presentados en la estación Puente ferrocarril.

Se aplica la fórmula de transposición de caudales propuesta en el manual de drenaje de INVIAS. Aquí se menciona que es posible transferir caudales máximos instantáneos anuales de diferentes periodos de retorno de esta estación hasta el sitio del proyecto, mediante relaciones de áreas de drenaje, así:

$$Q_{SP} = Q_{EH} \times (A_{SP} / A_{EH})^x$$

$Q_{SP}$  = Caudal en el sitio del proyecto (m3/seg).

$Q_{EH}$  = Caudal en la estación (m3/seg).

$A_{SP}$  = Área hasta el sitio del proyecto. (km<sup>2</sup>)

$A_{EH}$  = Área hasta la estación. (Km<sup>2</sup>)

El exponente x es un valor que fluctúa usualmente entre 0.5 y 0.75. A falta de datos de investigación, se acostumbra a tomar un valor igual a 0.5.

### 5.3.2 Desarrollo de la metodología con la Herramienta ArcGIS 10.

Analizada la información y calculados los caudales por medio de la herramienta HEC HMS se procede a realizar el cálculo de los caudales en el modelo raster para todas las cuencas. Para el desarrollo de la metodología se utiliza la herramienta ArcGIS, es necesario aplicar las formula de tiempo al pico y caudal pico, y hacer un algebra de mapas considerando los de curva número, precipitación efectiva y tiempo al pico.

$$Q_p: 0.208 * A / t_p$$

Dónde:

$Q_p$ : Caudal Pico (m<sup>3</sup>/s)

A: Área (km<sup>2</sup>)

$T_p$ : Tiempo al pico (horas)

Este valor corresponde al caudal pico para una precipitación efectiva de 1 mm. Si se obtiene la precipitación efectiva de la zona de estudio tendremos el caudal total.

El valor del tiempo al pico  $t_p$ , se obtiene de la fórmula:

$$T_p: (T_c)^{0.5} + 0.6 T_c$$

Dónde:

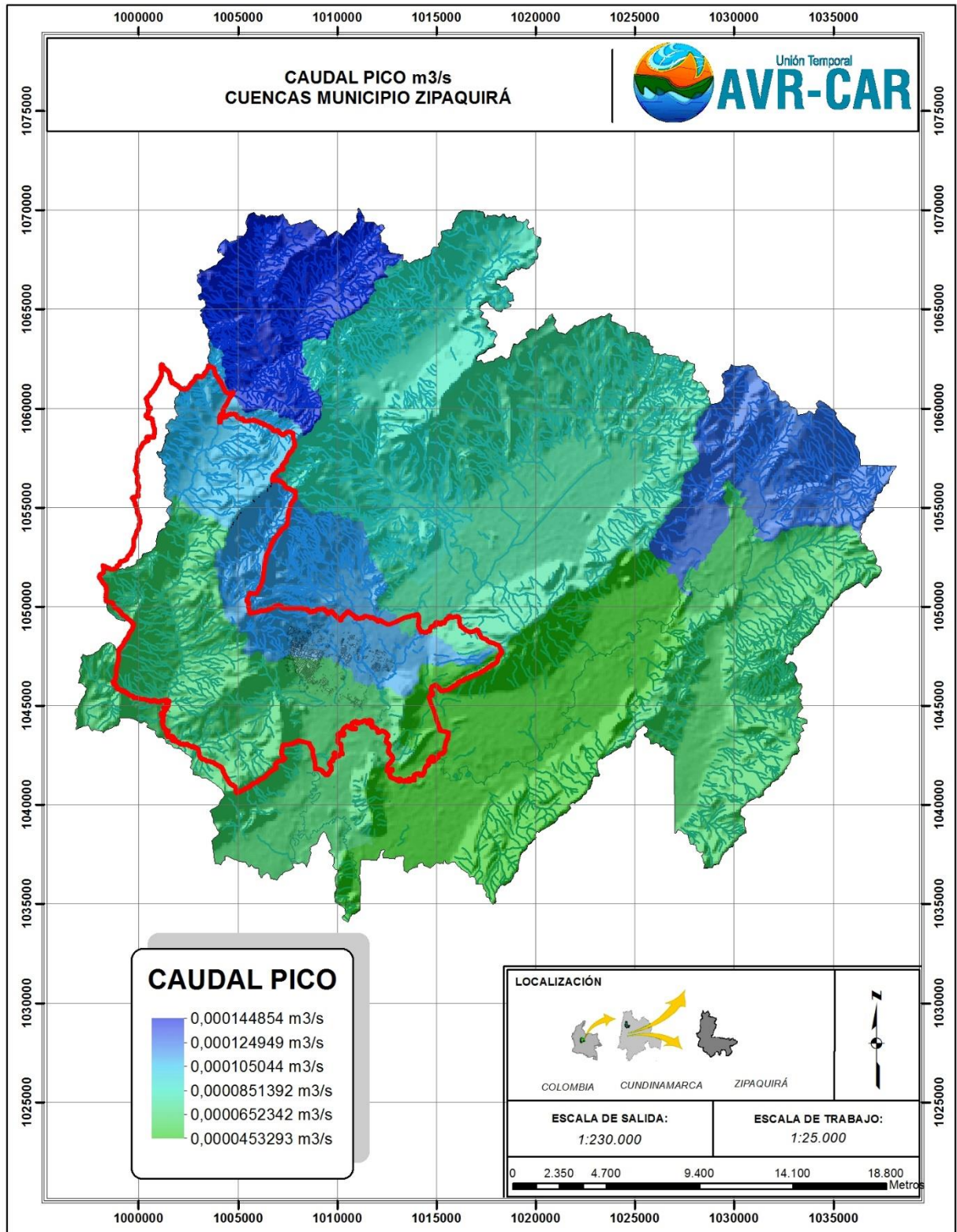
$T_p$ : Tiempo al pico (horas)

$T_c$ : Tiempo de concentración (horas)

En las figuras 25 y 26 se observa la aplicación de las formulas enunciadas, plasmadas en formatos raster insumo importante en la generación del caudal.

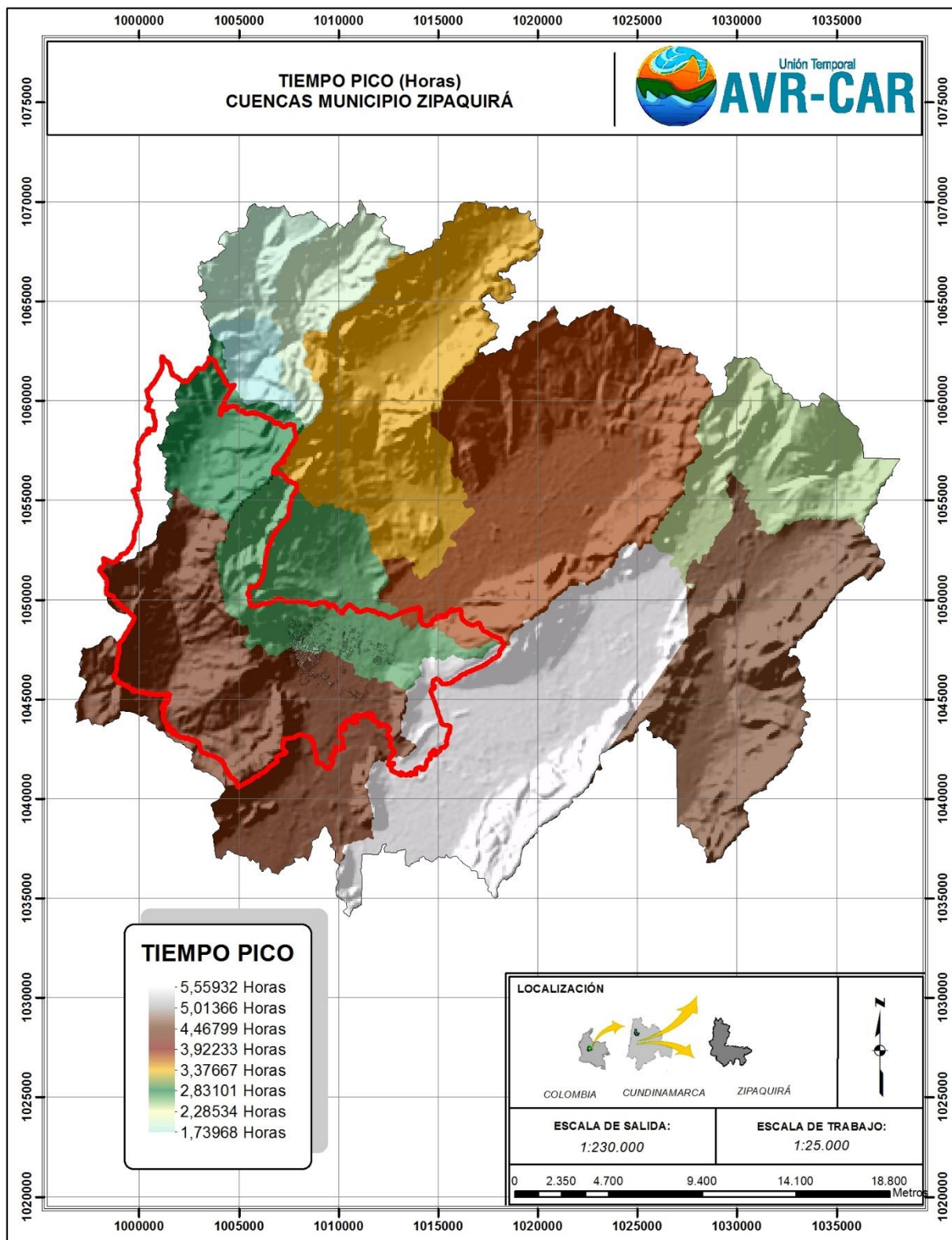


Figura25 Caudal pico m3/s cuencas municipio Zipaquirá



Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010)

Figura26 Tiempo pico horas cuencas Municipio Zipaquirá



Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010)

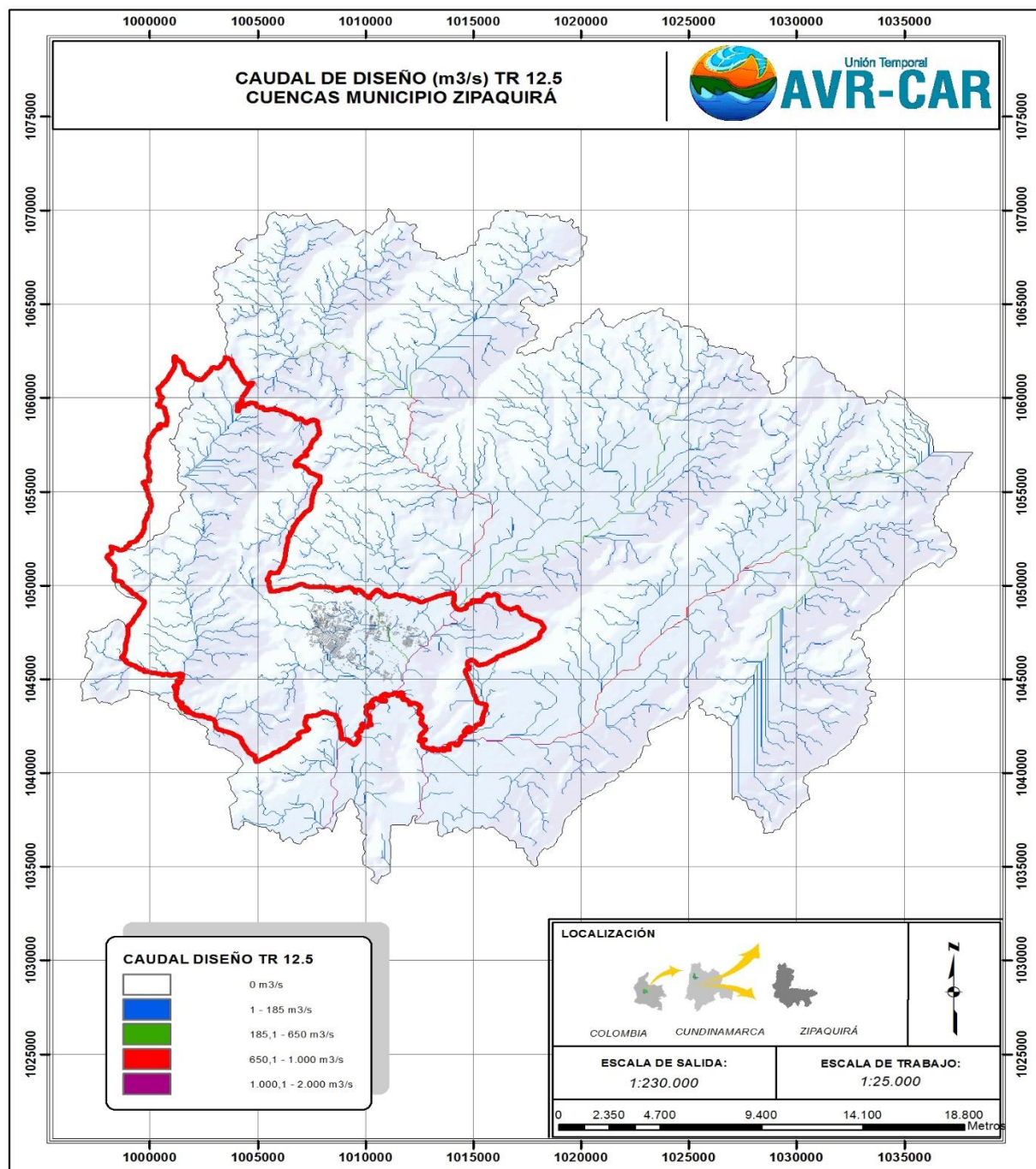


Se obtendrá un caudal pico por pixel que luego se acumulará hasta los puntos de interés y se compararán con los resultados del modelo HMS.

Los resultados se muestran en las siguientes figuras:

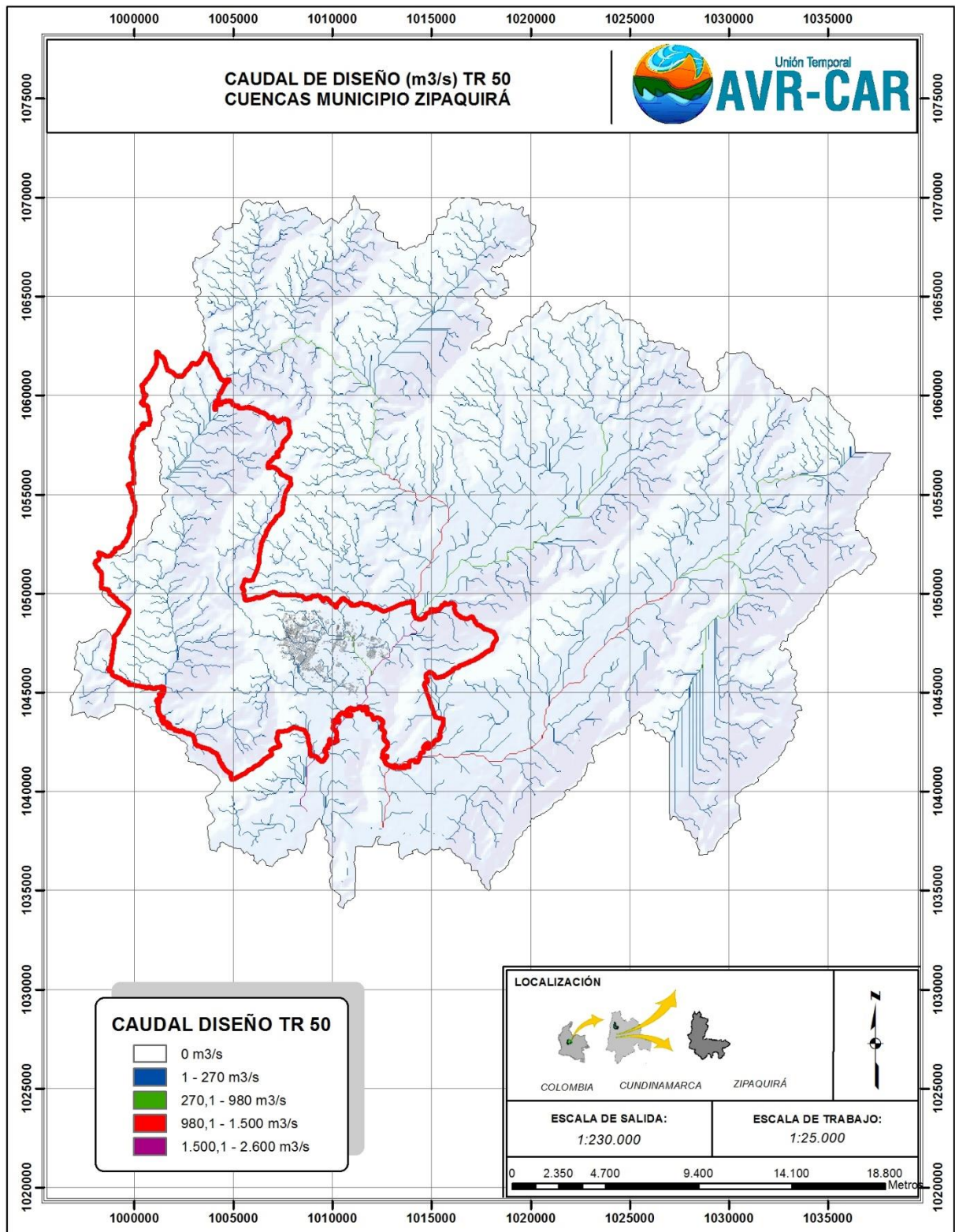
Con los raster de tiempo al pico, caudal pico, el factor de escorrentía S, y la precipitación efectiva se obtiene un caudal pico por pixel que luego se acumula hasta los puntos de interés y los compararemos con los resultados del modelo HMS.

**Figura27 Caudal de diseño TR 12.5 (m3/s) cuencas Municipio Zipaquirá**



Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010)

Figura28 Caudal de diseño TR 50 (m3/s) cuencas municipio Zipaquirá



Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010)

En la tabla 7 se observan los caudales obtenidos por medio de la herramienta HEC HMS al cierre de la cuenca, los cuales se comparan con los caudales obtenidos en el modelo rasterizado de caudales en los puntos identificados en el cierre de la cuenca, se puede observar que se ve que los valores presentados no varían significativamente, validando de esta manera el modelo utilizado para la generación de la amenaza por inundación.

**Tabla 7 Comparación de caudales**

Cuenca	Q m <sup>3</sup> /seg (HMS)	Q m <sup>3</sup> /seg (Acumulación)
Susagua	359,4	360.35
Rio Bogotá	915,3	925.14
Rio Subachoque	588,1	587.46
Rio Frio	202,5	195.58

Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010)

#### 5.4 AMENAZA HIDRODINÁMICA

Para conocer los cambios que ocurren sobre una corriente o una planicie de inundación (profundidad del agua, velocidad de la corriente, zona inundada, etc.) durante el paso de una crecida, se debe llevar a cabo el tránsito de la avenida. Para ello se cuenta con diferente software y metodologías.

Para simular una inundación existen diferentes modelos que son producto de las hipótesis aceptadas para resolver las ecuaciones que definen el comportamiento del fenómeno. De acuerdo con lo anterior, se cuenta con modelos hidráulicos y modelos hidrológicos, siendo los primeros los que mejores resultados obtienen. Dentro de los hidráulicos se tienen modelos que analizan el comportamiento del flujo en una, dos y tres dimensiones; obviamente su precisión mejora en función de las dimensiones usadas para su análisis; sin embargo, también los requerimientos de información son mayores.

Los programas empleados en esta parte de la metodología han sido seleccionados debido a su facilidad de uso y la escala de análisis, aunque son software libre, cuentan con un buen soporte técnico. El modelo hidráulico para ser usado es HecRAS, propuesto por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (USACE, 2002). Este modelo se escogió teniendo en cuenta que:

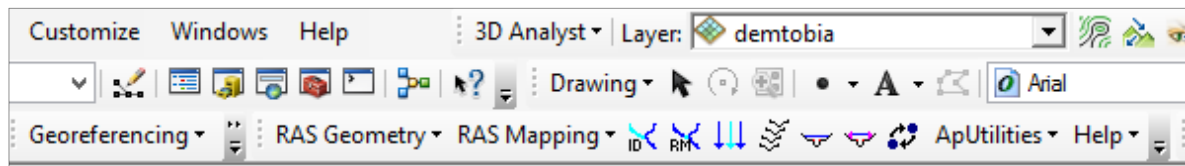
Es un modelo ampliamente reconocido y por ende está validado, además es público, lo que significa que no tiene ningún costo y pese a que es un modelo unidimensional, en la mayoría de los casos esta hipótesis no tiene mayores repercusiones.

Para el desarrollo de la metodología se requiere del software ArcGIS 10, HecRAS 3.1.3 ó mayor y la extensión Spatial Analyst. Adicionalmente se tomará la extensión GeoRAS que permite extraer las características topográficas del modelo digital de elevación.

Cuando se carga la extensión Hec GeoRAS, la barra de herramientas añadida a la interface de ArcGIS es la que se muestra en la Figura 29.



**Figura29 Interface HecGeoras en ArcGIS 10**



Fuente: UT AVR CAR., 2014 Software ArcGIS

El pre procesamiento de los datos geométricos desde ArcGIS, para su posterior exportación hacia HecRAS, se realiza con el menú RAS Geometry.

La información será extraída del modelo digital de elevación conocido como TIN, y generado a partir de la curvas de nivel.

#### 5.4.1 Condiciones de contorno

Para la definición de las condiciones de contorno se ha tenido en cuenta que es posible definir cuatro condiciones dentro del modelo:

1. Nivel de agua: si tenemos algún dato del calado de la sección, normalmente dado por un limnómetro. El dato a introducir es el nivel, es decir, una cota sobre el nivel del mar. Para el caso de este proyecto no se disponía de dicha información, por tal motivo se descartó.
2. Calado crítico: se define cuando en la sección existe un elemento de control de calado/caudal basado en el calado crítico (vertedero, aforador, presa, azud). La característica de esta opción es que no hay que entrar datos ya que el programa toma como dato el cálculo del calado crítico en la sección. Opción descartada.
3. Curva de caudal: se usa cuando se posea la curva de caudal de la sección, es decir los datos que relacionan calado con caudal. Si poseemos datos de aforador, es la condición de contorno a definir. De igual manera no se tiene la información por tal motivo se descartó esta opción.
4. Para el resto de casos, definir como condición de contorno el calado normal: es el más habitual ya que es el caso en el que el flujo se aproxima al uniforme. El dato a entrar es la pendiente del tramo de influencia, en tanto por uno. Esta opción es la seleccionada para el corrimiento del programa en el presente proyecto.

#### 5.4.2 Estimación del coeficiente de rugosidad de Manning

La mayor dificultad en la aplicación de la Ecuación de Manning para estimar el caudal de una corriente está en la determinación del coeficiente de rugosidad "n", ya que no existe ningún método exacto para la selección de éste término. Seleccionar un valor de "n" significa estimar la resistencia al flujo en un canal determinado lo cual demanda experiencia del ingeniero para evitar que el problema se limite a un proceso de aproximaciones.

En tal sentido, para el proyecto del municipio Zipaquirá, se estima el coeficiente de rugosidad "n" de Manning utilizando la información de suelos, cobertura y/o por observación de las condiciones geométricas de río.



Ven Te Chow en su libro “Hidráulica en Canales Abiertos” estudia tres métodos para evaluar el coeficiente de Manning.

1. Consultar una tabla de valores típicos de  $n$  para varios tipos de canales.
2. Examinar y comparar el canal en estudio con la apariencia de ciertos canales típicos cuyos coeficientes de rugosidad son conocidos.
3. Considerar el valor de  $n$  como el resultado de la acción combinada de una serie de factores que lo afectan. Esta forma es llamada como el método de Cowan.

Para estimar el valor se evaluarán el primer método, consulta de la tabla y el tercer método conocido como Cowan. El método de Cowan tiene en cuenta varios factores que se evalúan de la siguiente manera:

- **Material:** se estima el valor con ayuda del mapa de textura de los suelos suministrados por la CAR, en este caso se observa el material predominante en el tramo de análisis. Las opciones presentadas para este coeficiente son tierra, roca, grava fina, grava gruesa y arenas. De acuerdo a las texturas se observa cuál se acerca más a las opciones presentadas. Es importante tener en cuenta que este factor hace referencia a una situación de una canal recto y uniforme, como es bien sabido esta condición es difícil de encontrar en la realidad, por esto es necesario complementarla con el grado de irregularidad.
- **Grado de irregularidad:** este factor es un complemento a las condiciones del terreno, al no presentarse información primaria de la totalidad de las fuentes se toma como referencia que las partes altas son terrenos más regulares y las partes medias y bajas terrenos con mayores irregularidades.
- **Variación en la sección transversal del canal:** con la información de las secciones extraídas del modelo digital de elevación, se asume este valor identificando la forma y tamaño que presentan.
- **Efecto relativo de obstáculos:** en las zonas altas de las fuentes hídricas se presume existen menos efectos de obstáculos debido a la poca intervención antrópica y mayor conservación de las franjas protectoras; a medida que las fuentes se acerca a las zonas habitadas este efecto incrementa.
- **Vegetación:** con la ayuda del mapa de cobertura vegetal se identifica el valor referente a este parámetro.
- **Grado de sinuosidad:** este factor depende del desarrollo geométrico del recorrido de la fuente en planta, se asume teniendo en cuenta esta característica general.

Los valores obtenidos para cada uno de los tramos de las zonas rurales y urbanas se indican en el respectivo capítulo del modelo hidráulico.

### 5.4.2.1 Método de Cowan

Reconociendo varios factores primarios que afectan el coeficiente de rugosidad, Cowan desarrolló un procedimiento para la evaluación de  $n$ . Según este procedimiento el valor de  $n$  puede ser calculado por la ecuación:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) + n_5$$

$n_0$ = Valor básico de  $n$  para un canal recto y uniforme de un material dado.

$n_1$ =Se determina para corregir el efecto por irregularidades de la superficie.

$n_2$ = Se considera las variaciones en la forma y tamaño de la sección transversal del canal.

$n_3$ = Se considera el efecto de obstrucción u obstáculos al flujo.

$n_4$ = Depende de la vegetación.

$n_5$ = Depende de la sinuosidad longitudinal del canal.

Tabla 8 Valores de  $n$  metodología Cowan

no	0.02	Tierra	Material
	0.025	Roca	
	0.024	Grava Fina	
	0.028	Grava Gruesa	
n1	0	Ligero	Grado irregularidad
	0.005	Menor	
	0.01	Moderado	
	0.02	Severo	
n2	0	Gradual	Variación sección
	0.005	Ocasional	
	0.010-0.015	Frecuente	
n3	0	Despreciable	Obstáculos
	0.010-0.015	Menor	
	0.020-0.030	Apreciable	
	0.040-0.0060	Severo	
n4	0.005-0.010	Baja	Vegetación
	0.0100.025	Media	
	0.0250-0.050	Alta	
	0.050-0.1	Muy Alta	
n5	1	Menor	Sinuosidad
	1.15	Apreciable	
	13	Menor	

Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información Ven Te Chow

### 5.4.3 Modelo hidráulico

La consideración para el manejo de la amenaza en las zonas rurales va a tener una escala de desarrollo de 1:25.000. Con estos parámetros a seguir, los modelos hidráulicos tendrán esta escala.

El resultado principal de un modelo de amenaza de inundación es la delimitación de las áreas factibles de inundación para un determinado periodo de retorno. De acuerdo con las modelaciones previas (i.e. precipitación y sistema integrado de drenaje), y una vez la lámina de agua se encuentra fuera del sistema, ésta empieza a dispersarse por la llanura inundable, en donde la intensidad de la amenaza se mide en términos de la frecuencia de la inundación, duración de la inundación y velocidad del flujo.

En el presente proyecto se emplea el software HEC RAS Modelización de Canales Abiertos, el cual es un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen no permanente y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial.

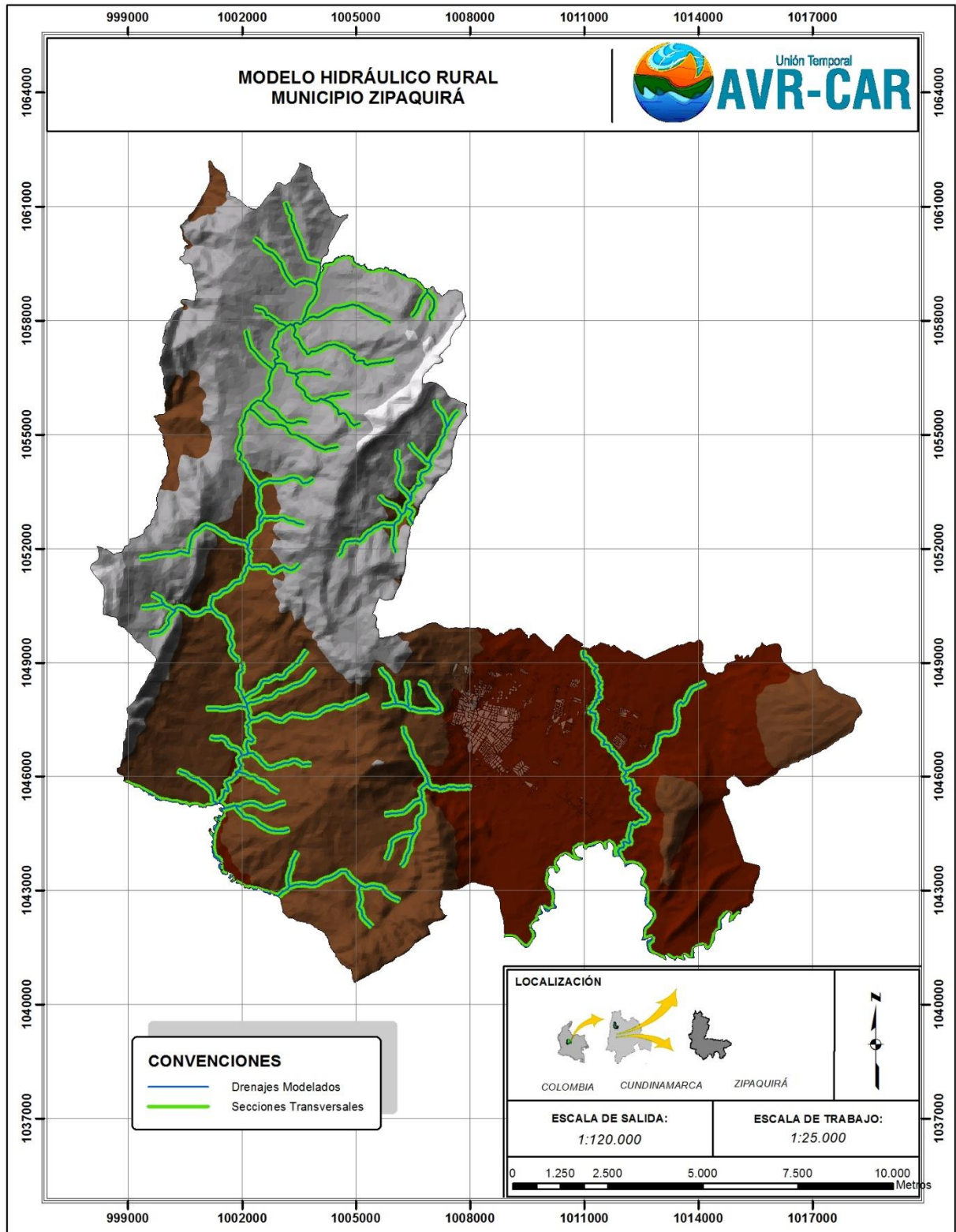
Para el modelo de tránsito de caudales, a través de las secciones transversales, se aplicaron los conceptos técnicos de la hidráulica de canales abiertos. Para el desarrollo matemático fue utilizado el software HEC RAS y la extensión GEO RAS para ejecutarlo en un pequeño sistema de información geográfica. En las siguientes figuras se puede observar las secciones trazadas en las diferentes fuentes objeto de estudio.

Con la cartografía base a escala 1:25.000, del municipio Zipaquirá, se extraen las curvas de nivel de las cuales se genera el modelo de elevación digital del terreno, insumo importante para la generación del modelo hidráulico donde se trazan los ríos de interés y sus bancas. Esta información es luego exportada al modelo HEC RAS para el desarrollo del modelo hidráulico.

En la Figura 30 se observan las fuentes analizadas en el modelo hidráulico para la zona rural, una vez realizado el proceso en el HEC RAS donde son incluidas las condiciones de frontera y las características hidráulicas como el caudal y coeficiente de Manning; el resultado es exportado al ArcGIS para la visualización de la llanura inundable clasificada en diferentes periodos de retorno. Esto permite su visualización de forma general.

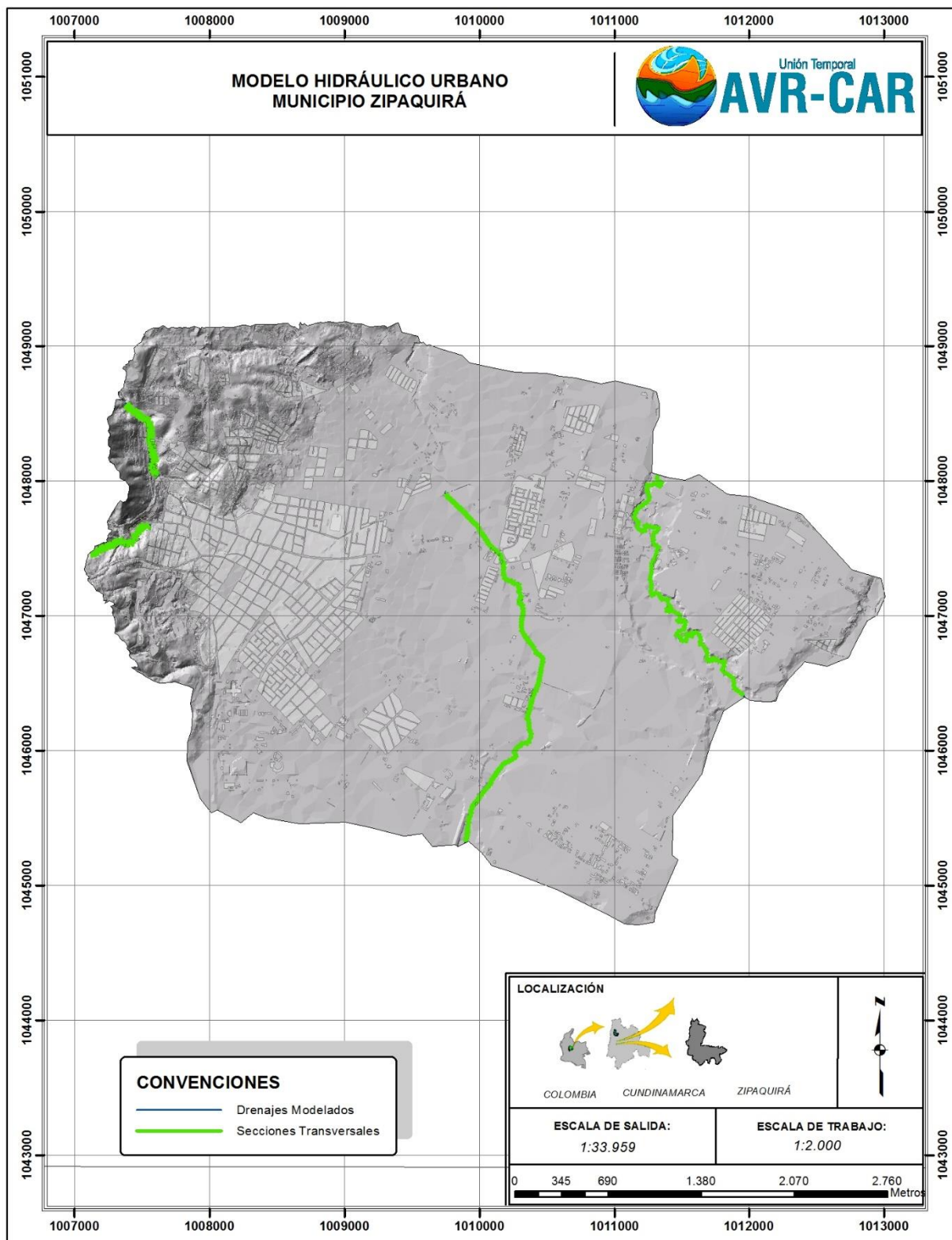
En este proceso se trazan los drenajes de interés, de acuerdo al modelo digital de trabajo. Es importante aclarar que se debe realizar con este insumo para evitar diferencias, o sea que la línea trazada no concuerde con la zona de drenaje. Teniendo en cuenta que la normatividad vigente para estudios de riesgo en zonas rurales propone el análisis a escala 1:25000 para zonas rurales y escala 1:2000 para zonas urbanas, el procedimiento para la obtención del modelo hidráulico se adopta con la ayuda de la extensión HecGeRas para lo cual se procede de la siguiente manera: se trazan los drenajes coincidiendo con las zonas marcadas en el mapa de acumulación de flujo, esto garantiza que el canal natural proyectado corresponda al generado con la cartografía base utilizada; las zonas de Banks se definen observando los cambios de pendiente que se pueden observar en el detalle del relieve que presenta la cartografía.

Figura 30 Esquema modelo hidráulico municipio rural Zipaquirá



Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010).

Figura 31 Esquema modelo hidráulico municipio urbano Zipaquirá



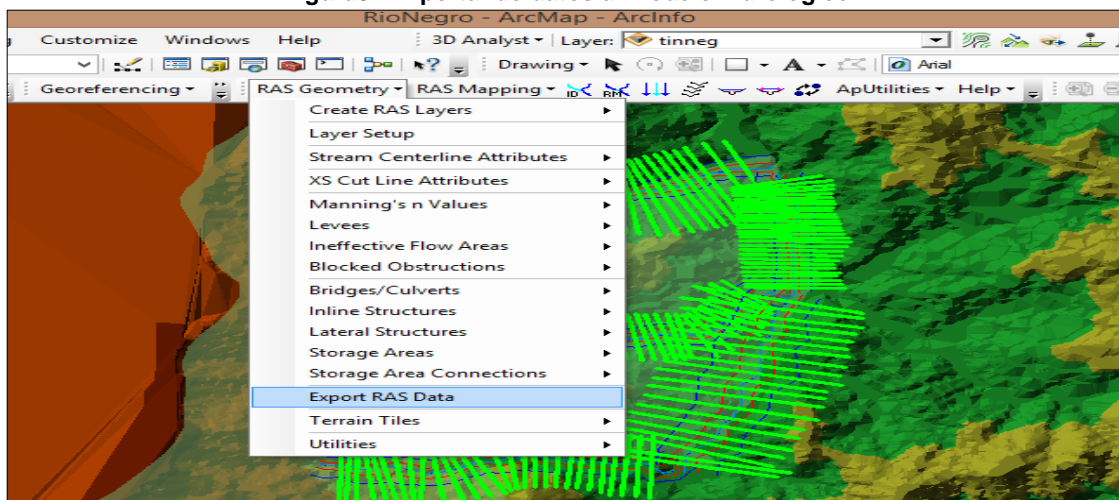
Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010).



Las secciones se trazaron cada 30 metros y el modelo digital se ajustó a formato raster de 2x2 metros. Lo anterior ofrece una mejor presentación sin mejorar el detalle, este seguirá siendo dado por la escala. El formato mejora su resolución teniendo en cuenta que, con este, no se va a realizar ningún tipo de operaciones.

Una vez obtenida la información se exporta con la herramienta Ras Geometry del ArcGIS. Abajo se muestra la ubicación en el menú (Ver anexo hidráulico).

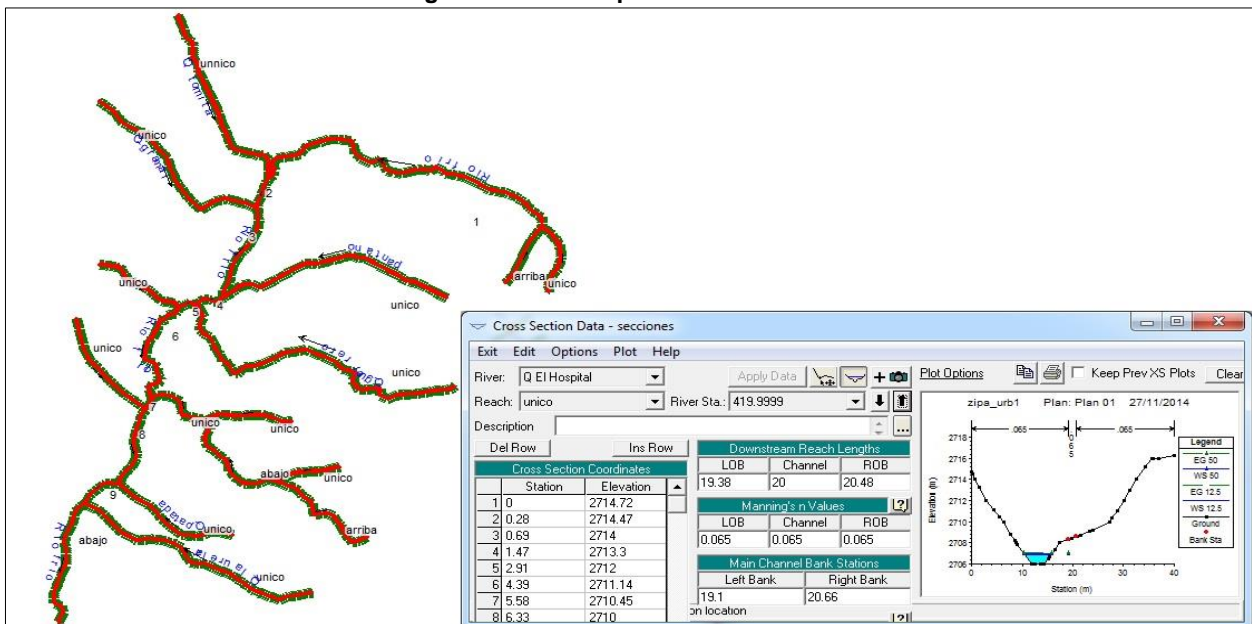
**Figura32 Exportando datos al modelo hidrológico**



Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010).

Una vez definidas las características de los modelos urbano y rural, se obtienen los niveles de inundación para los periodos de retorno de 12.5 y 50 años, con los cuales se zonificará la amenaza; a continuación se observan los resultados obtenidos de los modelos hidráulicos en la zona rural y urbana.

**Figura 33 Datos exportados al Hec Ras**



Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010).

### 5.4.3.1 Análisis del modelo hidráulico

Una vez exportados los datos al software HEC RAS se debe tener en cuenta los aspectos a modelar. Estos corresponden a caudal, pendiente, coeficiente de manning, etc. En la siguientes tablas se indican los valores utilizados para la modelación hidráulica en cada uno de los tramos; se observan los caudales para los periodos de retorno de 12.5 y 50 años a partir de los cuales se zonificará la amenaza; los valores de caudal consignados corresponden a los calculados en el modelo rasterizado, explicado en capítulos anteriores.

La columna correspondiente a la pendiente se obtiene de promediar las pendientes entre cada sección. Este valor se ingresa al modelo para definir las condiciones de contorno explicado en el aparte (condiciones de contorno); para el valor de n adoptará la metodología de Cowan.

Basados en el modelo digital de elevación, se toman las cotas de fondo en cada sección y la diferencia se divide en la distancia entre secciones, luego se promedia y se obtiene el valor de la pendiente para cada una de las fuentes y tramos a modelar.

**Tabla 9 parámetros de entrada modelo hidráulico Rural y urbano del municipio Zipaquirá.**

FUENTE	TRAMO	Caudal 12_5	Caudal 50.00	PENDIENTE	n
Q tomita	único	7.04	9.04	0.037500448	0.07
Rio frio	arriba	12.46	15.58	0.164015529	0.065
Q hupadero	único	2.74	3.51	0.129201346	0.065
Rio frio	tramo1	39.26	50.37	0.027327002	0.07
Rio frio	tramo2	39.39	50.54	0.00120707	0.05
Q gramal	único	8.58	11.01	0.048711052	0.062
Rio frio	tramo3	56.77	72.27	0.006797991	0.052
pantano	único	10.56	13.63	0.091430338	0.06
Rio frio	tramo4	66.61	85.59	0.007141682	0.07
Q guerrero	único	18.74	24.67	0.060920274	0.06
Rio frio	tramo5	84.11	107.71	0.012199771	0.06
innominada1	único	2.67	3.43	0.077944652	0.05
Rio frio	tramo6	109.1	139.93	0.009830139	0.07
Q corraleja	arriba	4.22	5.26	0.140792398	0.07
innominada2	único	3.85	4.94	0.11141375	0.07
Q corraleja	abajo	9.47	12.64	0.057574081	0.07
innominada3	único	2.12	2.81	0.10319216	0.065
innominada4	único	3.74	4.78	0.0269569	0.065
Rio frio	tramo7	110	140.94	0.010497166	0.065
Q casa verde	único	4.16	5.5	0.059174916	0.07
Rio frio	tramo8	116.3	149.56	0.003194783	0.06
Q patada	único	1.35	1.72	0.066126596	0.08
Rio frio	tramo9	122.1	156.63	0.001630083	0.07
Q laurelal	único	13.42	17.05	0.088108355	0.07
Rio frio	abajo	159.8	205.08	0.02856656	0.08
Rio Frio	arriba	3.65	5.10	0.085124698	0.06
innominada1	único	4.12	5.16	0.157351877	0.07
Rio Frio	tramo1	12.06	15.39	0.060903846	0.06

innominadda2	único	1.48	1.97	0.275362879	0.06
Rio Frio	tramo2	21.85	28.04	0.048865202	0.05
Q grande	único	4.31	5.53	0.136186121	0.07
Rio Frio	tramo3	28.54	36.71	0.030046641	0.07
innominadda3	único	3.25	4.51	0.171081513	0.07
Rio Frio	tramo4	34.52	44.29	0.043153436	0.07
innominadda5	arriba	2.20	2.96	0.197967923	0.065
innominadda4	único	1.96	2.52	-1.88495254	0.065
innominadda5	tramo1	7.93	10.18	0.284668178	0.065
innominadda6	único	3.47	4.45	0.212765345	0.07
innominadda5	abajo	14.04	18.01	0.202091351	0.06
Rio Frio	abajo	58.97	75.68	0.056404264	0.08
Rio frio	arriba	77.31	98.62	0.033258871	0.07
Q borahero	único	8.91	11.40	0.093064248	0.07
Rio frio	tramo1	94.33	109.48	0.09524952	0.06
innominada1	único	2.79	3.58	0.11604191	0.07
Rio frio	tramo2	94.33	121.06	0.036623539	0.07
innominada2	único	3.13	4.12	0.124243083	0.07
Rio frio	tramo3	97.99	121.17	0.023610442	0.07
innominada3	único	12.98	16.66	0.078764713	0.07
Rio frio	tramo4	#####	134.27	0.010096719	0.07
innominada5	único	9.56	12.27	0.081155569	0.05
Rio frio	tramo5	#####	169.08	0.015773025	0.07
innominada4	único	5.43	7.11	0.090969101	0.07
Rio frio	tramo6	132	169.36	0.009261529	0.06
innominada6	único	1.87	2.41	0.124350741	0.06
Rio frio	tramo7	141.6	183.71	0.003919328	0.07
Q la palma	único	29.93	43.29	0.094386816	0.06
innominada7	único	3.41	4.38	0.09656939	0.07
Q hornillo	único	33.99	43.66	0.017923036	0.07
Rio frio	tramo8	143.7	184.45	0.010776902	0.07
innominada8	único	2.29	3.05	0.134727738	0.06
innominada9	arriba	4.63	6.1	0.11769905	0.06
innominada9	abajo	5.61	7.34	0.045892821	0.07
Rio frio	tramo9	191.1	238.2	0.0117244	0.08
Q santa lib	arriba	5.17	6.64	0.032713379	0.07
innominada10	único	6.08	7.79	0.064538882	0.07
Q santa lib	tramo1	18.40	23.48	0.034143581	0.08
innominada11	único	3.42	4.39	0.08988196	0.06
Q santa lib	abajo	38.58	49.52	0.045415685	0.08
Rio frio	abajo	237.1	304.23	-0.00150897	0.06

innominada1	único	4.26	5.6	0.150989204	0.07
Rio susagua	arriba	1.13	1.45	0.190611297	0.06
Rio susagua	tramo1	8.77	12.07	0.112253031	0.06
innominada2	único	3.42	4.31	0.192451259	0.07
Rio susagua	tramo2	17.45	22.30	0.114372365	0.06
innominada3	único	7.61	9.62	0.180617184	0.07
Rio susagua	tramo3	25.43	32.65	0.26911771	0.07
innominada6	arriba	9.15	12.56	0.123897897	0.07
innominada4	único	2.97	3.78	0.210840526	0.06
innominada6	tramo1	17.05	21.85	0.005169309	0.06
innominada5	único	7.1	9.11	0.162941987	0.07
innominada6	abajo	17.5	22.45	0.131752194	0.08
Rio susagua	abajo	52.01	66.73	0.085952197	0.07
Rio Susagua	único	291.3	372.07	0.006827312	0.08
Rio neusa	arriba	630.5	809.54	0.000946087	0.06
Rio neusa	abajo	1614	2070.87	5.1036E-06	0.08
Rio bogota	arriba	1091	1400.54	-0.0003831	0.064
Rio bogota	abajo	2003	2484.07	0.001692156	0.067
innpminada1	único	19.94	25.45	0.164067573	0.06
innpminada2	único	2.26	2.91	76.36476299	0.07
innpminada3	único	1.36	1.92	0.320754144	0.06
innpminada6	único	28.38	34.55	0.121947482	0.06
innpminada5	único	1.58	2.03	0.270036259	0.05
innpminada7	único	30.93	39.53	0	0.07
innpminada4	único	24.52	28.75	0.164657445	0.07
innominada4	único	4.86	6.23	0.114341589	0.07
innominada2	arriba	3.48	6.06	0.085817429	0.07
innominada1	único	1.14	1.46	0.079026505	0.065
innominada2	tramo1	7.91	10.69	0.044484232	0.065
innominada3	único	7.54	9.63	0.089226502	0.065
innominada2	tramo2	17.08	21.92	0.101613076	0.07
innominada2	abajo	25.15	33.85	0.04408976	0.06

Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010)

## 6 ESCENARIOS DE AMENAZA

Una vez desarrollados los modelos hidrológicos e hidráulicos se procede a generar los escenarios de amenaza, los cuales se integran para generar la amenaza total del municipio Zipaquirá.

Este estudio contempla dos escenarios de amenazas: el primero corresponde a la amenaza por precipitación que evalúa las zonas con valores de precipitación máxima en 24 horas para un tr de 100 años, independiente de las condiciones topográfica y físicas del terreno.

El segundo escenario corresponde a los niveles máximos alcanzados en las fuentes hídricas para los periodos de retorno de 12.5 y 50 años. Este escenario considera que las zonas que alcanzan inundaciones con caudales en periodos de retornos cortos tienen amenazas más altas y, por el contrario, las zonas que se inundan con periodos de retorno más altos disminuyen el grado de amenaza.

### 6.1 AMENAZA POR PRECIPITACIÓN

En un escenario de amenaza por inundación es necesario tener en cuenta los valores extremos para la zonificación. Para este caso de amenaza por precipitación se tienen los valores de precipitación máxima en 24 horas. Esta información se obtiene del estudio de climatología del municipio donde se toman los valores presentados para un periodo de tiempo de 10 años y los valores extremo del año independientes del mes; luego con las distribuciones de probabilidades se proyecta para un tr de 100 años.

Con este procedimiento se garantiza unas condiciones extremas para dicho parámetro. Es así como, una vez generado un mapa continuo del parámetro de precipitación máxima en 24 horas, se procede a zonificar la caída de precipitación de acuerdo al rango de valores obtenidos.

Una amenaza que se considera como muy importante es la precipitación, independiente del flujo de los drenajes, y se toma la precipitación que cae en el municipio. Las precipitaciones que se presenten entre los valores menores de 43 mm, para un periodo de retorno de 100 años, se considerará como baja (es la zona donde se presentan los valores más bajos), luego los valores estimados entre 43 y 48 mm se clasifican como sectores con amenaza media y, finalmente, los valores superiores se consideran amenaza alta. La Figura 34, muestra los sectores para el municipio de Zipaquirá de acuerdo a las clasificaciones descritas.

Es importante tener en cuenta que la amenaza por precipitación considerada es independiente de las características físicas de municipio ya que se considera como un valor atmosférico que llega a la superficie de la tierra. Esta descripción en ningún caso corresponde a una clasificación climática ya que para esto, como se mencionó anteriormente, son valores externos que se presentan un día del año, independientes del mes.

Los valores máximos extremos de precipitaciones diarias no siempre van a coincidir con el periodo lluvioso, por consiguiente se puede presentar un valor extremo en un periodo de baja precipitación.

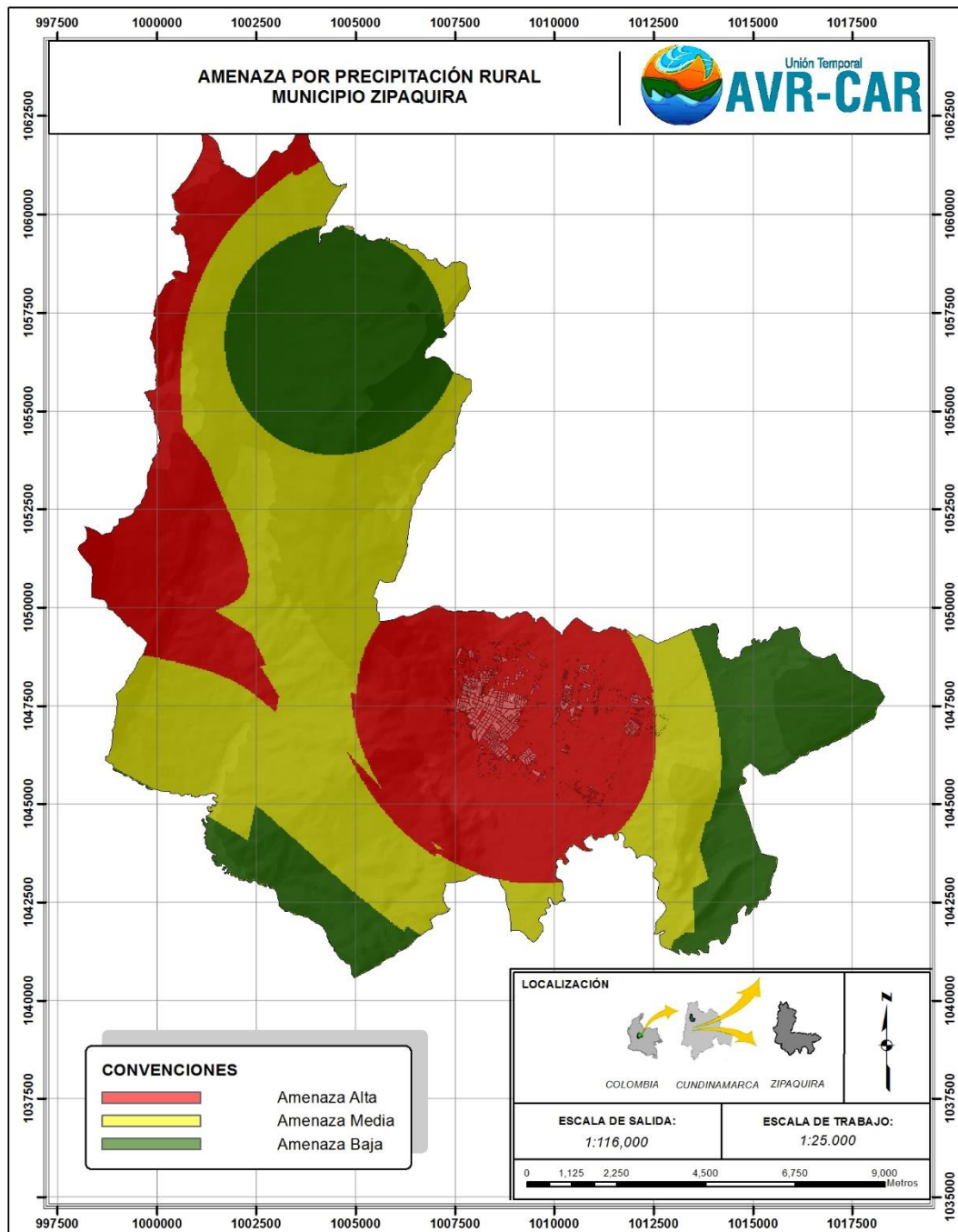


**Tabla 10. Clasificación amenaza por precipitación**

AMENAZA	RANGO PRECIPITACION (mm)	IDENTIFICACIÓN
Alta	Mayor de 48	
Media	45 a 48	
Baja	Menor 45	

Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010).

**Figura34 Amenaza rural por precipitación máxima en 24 horas**



Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010).

## Amenaza por niveles de fuentes hídricas

La mayoría de los municipios presentan inundación cuando los niveles de los ríos se aumentan súbitamente; estos niveles alcanzan las viviendas y causan daño económico y social. Por tal motivo todos los análisis que se han realizado tienen como fin determinar los niveles de inundación. La amenaza por niveles zonifica las áreas indudables por las fuentes hídricas.

Dentro de las principales causas de los problemas de inundación se pueden tener en cuenta las siguientes:

- Falta de conservación de las cuencas: existe un control natural que es generado por las coberturas vegetales y en general por la conservación de los ecosistemas. La ampliación de las fronteras agrícolas y el desarrollo no sostenible hace que los tiempos de concentración disminuyan y, por lo tanto, los caudales aumenten.
- Desarrollos urbanísticos en inmediaciones de las fuentes hídricas: la creencia de las poblaciones de construir sus viviendas cerca de las fuentes hídricas y sin el debido conocimiento de las características de las fuentes hacen que exista una variación en la zona del cauce.

De lo anterior se concluye que la amenaza por inundación es un proceso dinámico. Las condiciones que se presentan hoy, como los de niveles y caudales, pueden variar en un futuro. Para la clasificación de la amenaza por niveles alcanzados por las fuentes hídricas se tendrá en cuenta dos periodos de retorno. Los sectores que se inundan con un caudal para un Tr de 12,5 años se consideran amenaza alta, los sectores que alcancen los niveles presentados entre los caudales para Tr 12,5 y 50 años se consideran con amenaza media, y los sectores de niveles superiores a caudales para un Tr de 50 años se consideran como amenaza baja.

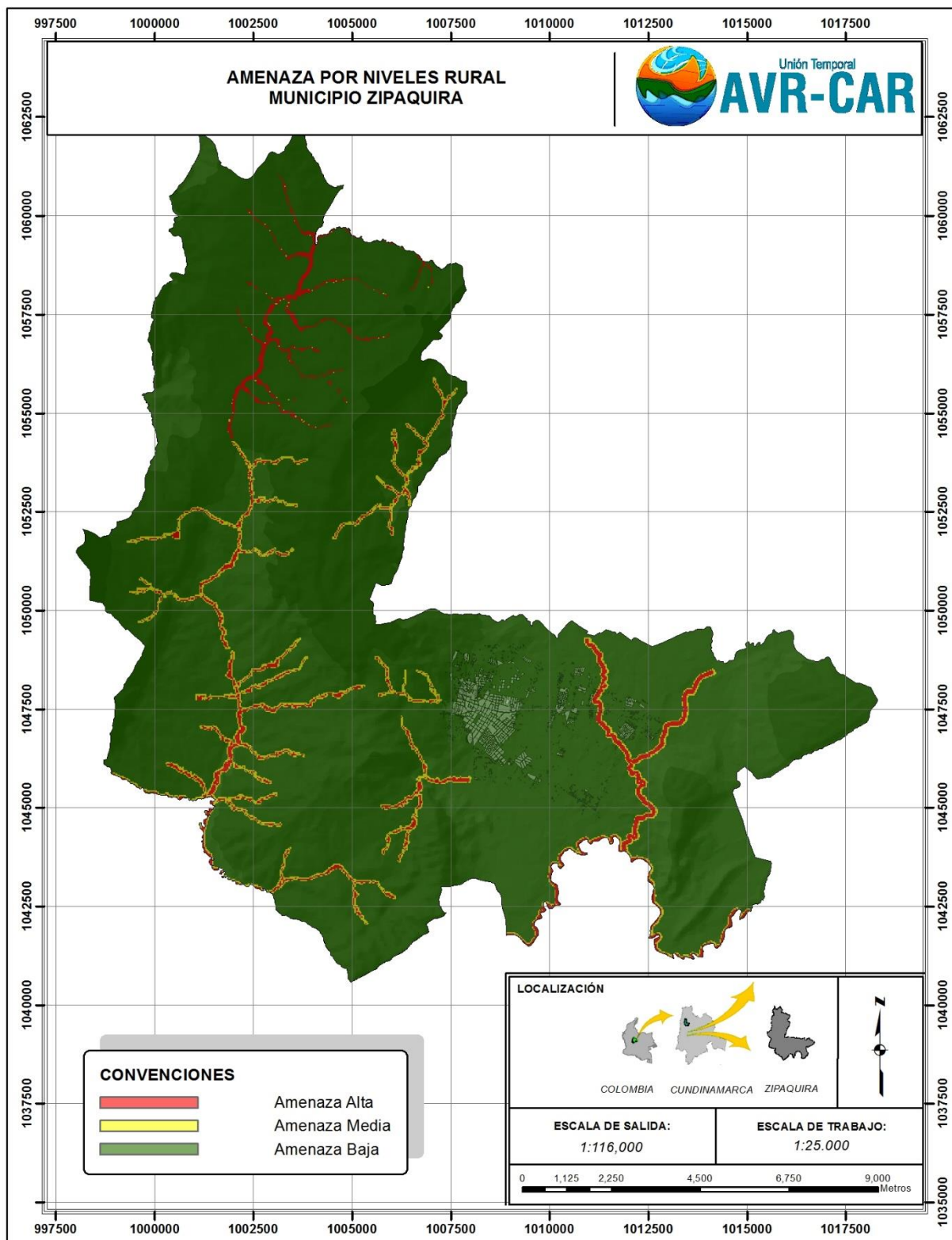
### AMENAZA URBANA

Para determinar la amenaza urbana se tiene en cuenta la cartografía a escala 1:2000, desarrollada de la restitución, adicionalmente sobre la fuente Quebrada Amolador se realizó un trabajo de campo adicional detallando un poco más el canal natural.

Tomando como base la cartografía a escala 1:2000 se georeferenció un punto arcifinio y se niveló en campo el canal, tomando la sección transversal en el tramo de la zona urbana, las secciones fueron detalladas teniendo en cuenta la variación geométrica de canal. En zonas regulares se detallaron cada 50 metros y para zonas con topografía más irregular el detalle se tomó más cercano, hasta 20 metros.

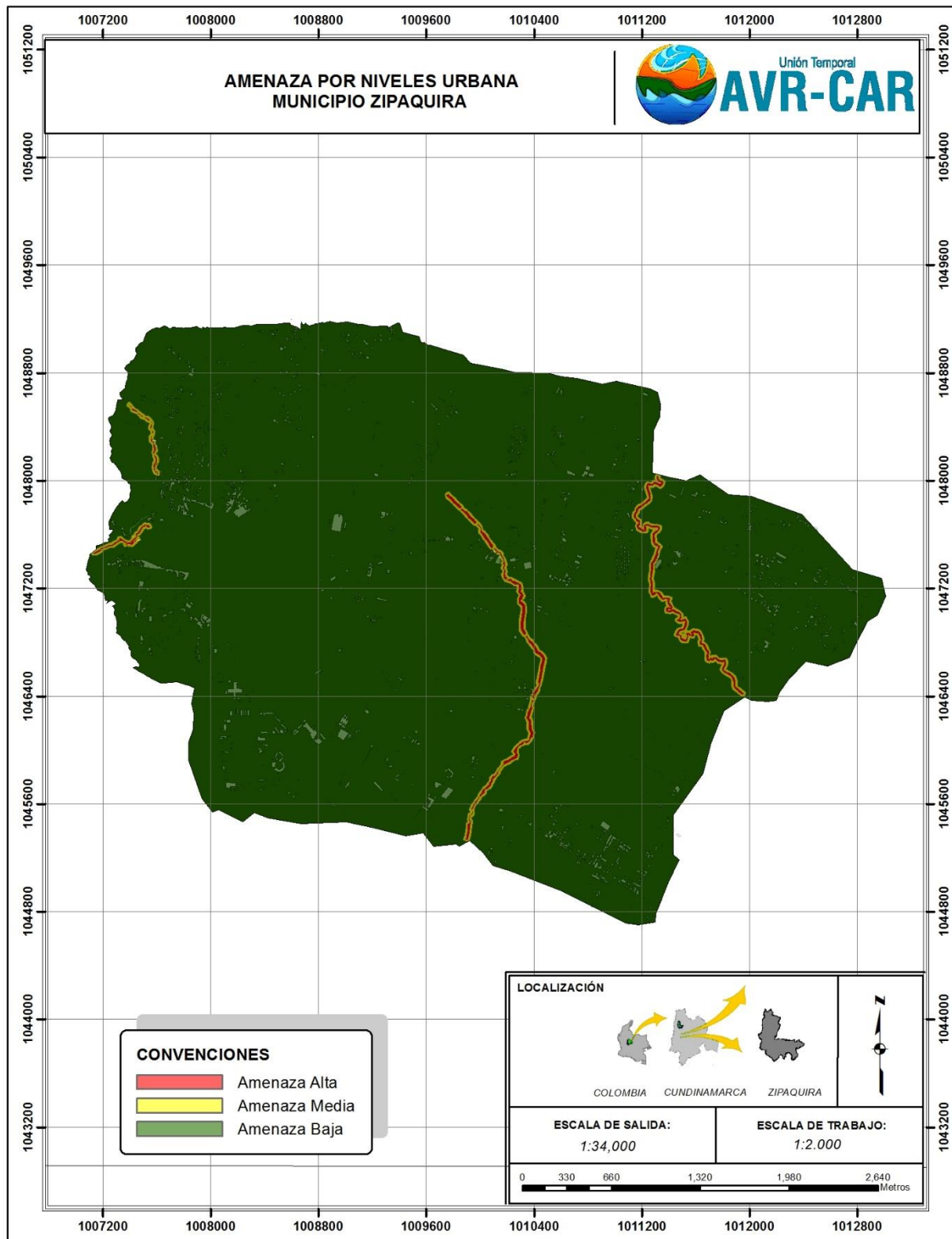
Luego con la ayuda de los datos registrados en las estaciones cercanas, se obtiene las proyecciones para 12,5 y 50 años, esto permite ser consecuentes con los valores de los caudales estimados en otras fuentes. Se generaron los mapas correspondientes en formato raster y se unieron, esto permitió tener un solo mapa pero con un mejor detalle en la zona urbana.

Figura35 Mapa amenaza rural por niveles municipio Zipaquirá.



Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010).

Figura36 Mapa amenaza urbana por niveles municipio Zipaquirá.



Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010).

## 6.2 AMENAZA TOTAL

Una vez analizada las amenazas (precipitación niveles), se obtiene la amenaza total como la suma de estos dos resultados, aplicando la siguiente formula:

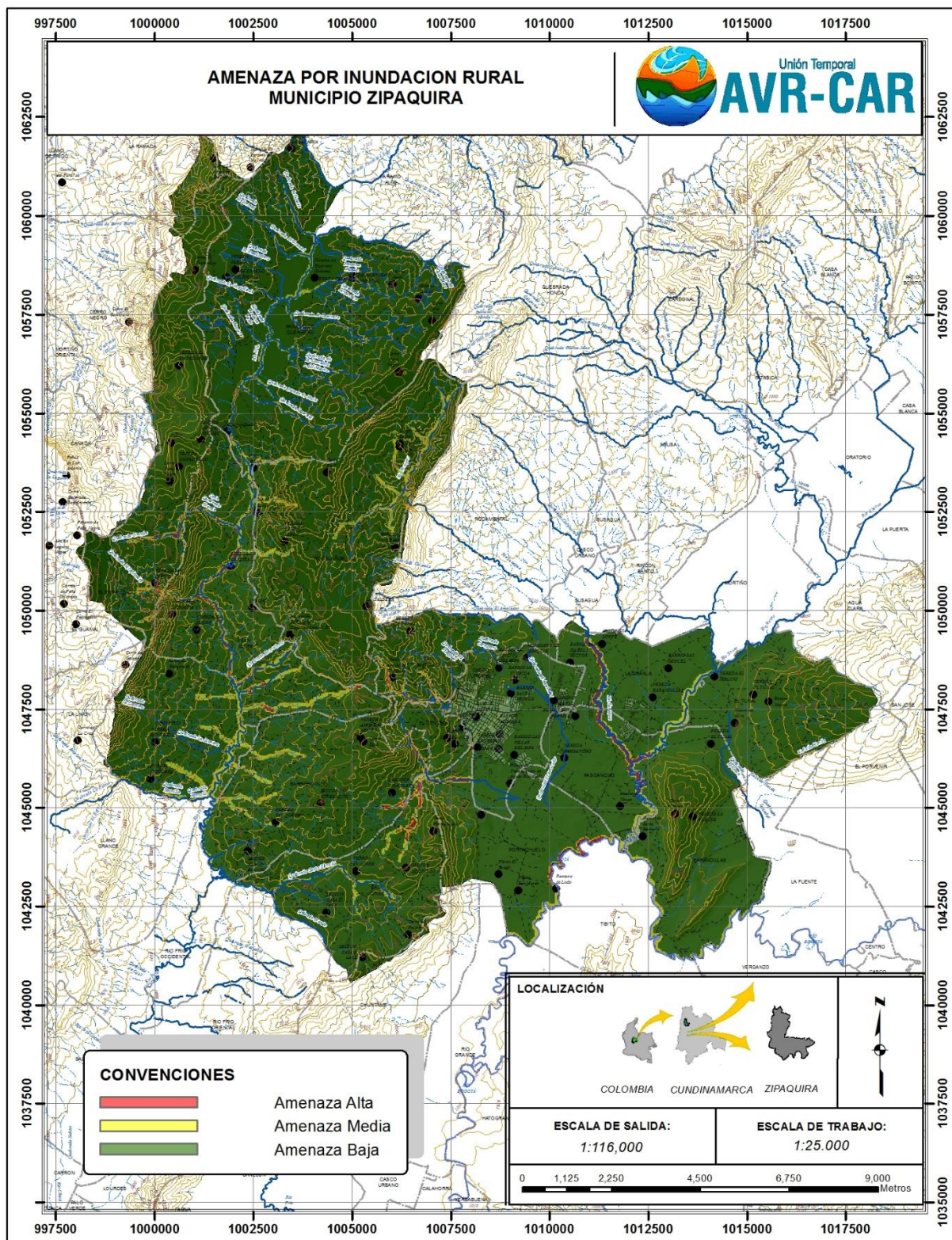
$$\text{Amenazas total: } (0.8 * \text{amenaza niveles}) + (0.2 * \text{Amenaza precipitación})$$

El mayor peso de la amenaza es asociado a los niveles de inundación obtenidos, ya que estos representan más inconveniente en los eventos de inundación. Este aspecto contempla las características físicas de la cuenca y la fisiometría de las fuentes hídricas, mientras que la precipitación es un aspecto atmosférico que presenta una influencia menor a la ya descrita amenaza por niveles. Teniendo en cuenta que se maneja formato raster se realiza la debida multiplicación de mapas utilizando el extensión de la herramienta de ArcGIS denominada algebra de mapas.

Realizada la operación, esta amenaza total se reclasifica en tres valores (1, 2 y 3) siendo 1 el valor que representa las zonas con amenazas más altas.



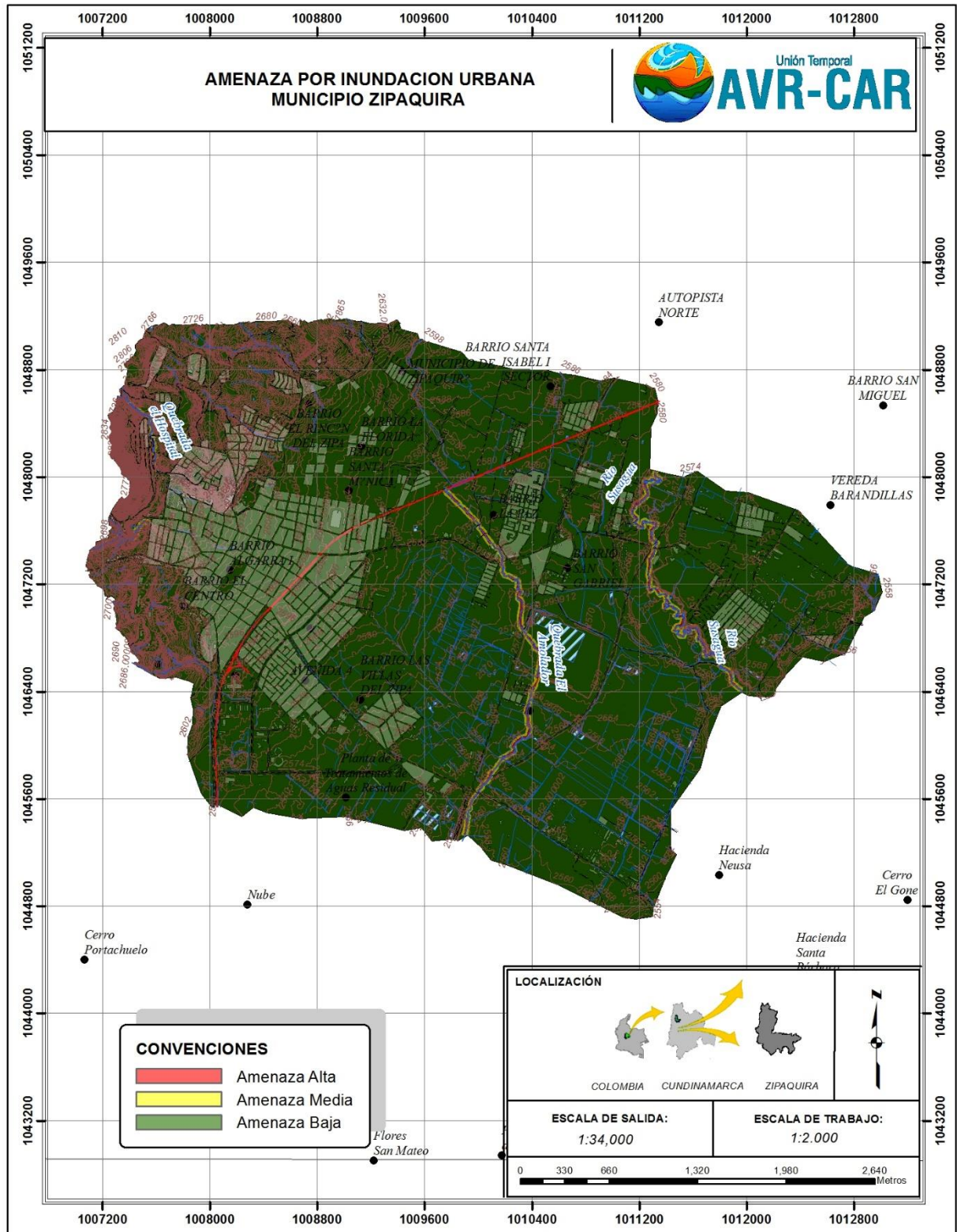
Figura37 Mapa amenaza Total municipio Zipaquirá.



Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010).



Figura38 Mapa amenaza rural Total municipio Zipaquirá.



Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010).

## 7 VULNERABILIDAD

Para el análisis de la vulnerabilidad en el municipio Zipaquirá se tiene en cuenta los elementos expuestos presentes en la zona, los cuales deben analizarse para determinar el grado de exposición que tiene ante la materialización de un evento por inundación.

La metodología propuesta para el análisis de la vulnerabilidad ha sido utilizada en amplios proyectos de Gestión del Riesgo en países de Centro América, focos importantes de eventos de inundación; identificada la amenaza con sus respectivas probabilidades de ocurrencia, son incorporados en un plano el cual será multiplicado con el resultado final de vulnerabilidad determinado por los análisis realizados a los elementos expuestos de la zona. La metodología se realiza a nivel de manzanas, determinando un valor de vulnerabilidad para cada una de ellas.

La vulnerabilidad analizada se refiere a vulnerabilidad física, y corresponde al análisis de las viviendas en la localidad de estudio para conocer qué tan susceptibles son a las inundaciones.

La Subdirección de Riesgos Hidrometeorológicos del Gobierno de México realizó una metodología para definir la vulnerabilidad de la vivienda en localidades rurales, a nivel de predio, la cual se basa en la inspección física de cada una de las viviendas que conforman la localidad, para este caso se tomarán el municipio Zipaquirá (Eslava, 2006).

Este informe presenta una metodología para identificar y cuantificar la vulnerabilidad de una población urbana, ante la ocurrencia de una inundación. Aunque las ideas usadas en una y otra metodología son similares, la principal diferencia consiste en que la primera (para zonas rurales) determina la vulnerabilidad para cada vivienda mediante una inspección física de la misma, en cambio para la segunda (para zonas rurales) la vulnerabilidad se obtiene a través de la información del Censo General y, con la información cartográfica que se tenga, puede plasmarse a nivel de vivienda o manzana. La metodología que se propone se aplicó, a nivel de manzanas, para el municipio Zipaquirá, en la cabecera municipal.

Como parámetro importante para la determinación de la vulnerabilidad física se cuenta como elemento expuesto a las viviendas.

### 7.1. VULNERABILIDAD ZONA URBANA

Los materiales usados para la construcción de una vivienda representan una variable muy importante en la estimación de la vulnerabilidad de la misma. Por ello, primero se enlistan los diferentes tipos de materiales que se utilizan en el país y, posteriormente, las combinaciones que resultan entre los materiales de construcción usados en los muros o en el techo de la vivienda serán tipificadas y evaluadas en función de su comportamiento ante una inundación.

A continuación se presenta un listado de los posibles materiales a encontrar, las cuales se relacionarán con los materiales encontrados en la visitas de campo para ser evaluadas en función de su comportamiento ante una inundación.

En las siguientes tablas se tienen en cuenta los tipos de muros y techos encontrados comúnmente en las zonas cercanas y con características similares al área de estudio.

**Tabla 11 Tipo de muros a analizar**

MUROS	
M1	Material de desecho
M2	Láminas de cartón
M3	Laminas metálicas
M4	Bahareque
M5	Madera
M6	Adobe
M7	Concreto, Mampostería
M8	Otros

Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del CENAPRED México

**Tabla 12 Tipo de techos a analizar**

TECHOS	
T1	Material de desecho
T2	Láminas de cartón
T3	Laminas metálicas
T4	Palma o Bambú
T5	Teja
T6	Concreto o Víguetas
T7	Otros

Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del CENAPRED México

Una vez definidos los materiales usados tanto en techo como en muros, el siguiente paso es identificar las posibles combinaciones para generar el tipo de vivienda. En la siguiente figura se puede observar las posibles combinaciones que se pueden identificar, dando un color representativo, asociándolo al grado de vulnerabilidad dependiendo de la combinación que se realiza.

**Tabla 13 Combinación de materiales de techos y muros**

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
T1	1							
T2		2	4	5	7	10	12	16
T3		3		6	8	11	13	17
T4					9		14	18
T5							15	19
T6								20

Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010).

Aunque las potenciales combinaciones son 48, varias de ellas no son posibles (por ejemplo, el caso extremo corresponde a una vivienda con muros tipo M1, material de desecho, con techo tipo T6, losa de concreto). Por lo anterior, el número de combinaciones se reduce quedando sólo las 20.

Estas combinaciones las agrupamos en cuatro tipos de vivienda. Las combinaciones más desfavorables corresponderán a vulnerabilidades mayores y el tipo cuatro será de las combinaciones menos vulnerables.

**Tabla 14 Identificación tipo vivienda**

<b>Combinación</b>	<b>Tipo Vivienda</b>
1	I
2	I
3	I
4	II
5	II
6	II
7	II
8	II
9	II
10	II
11	III
12	II
13	III
14	III
15	III
16	II
17	III
18	III
19	III
20	IV

Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010).

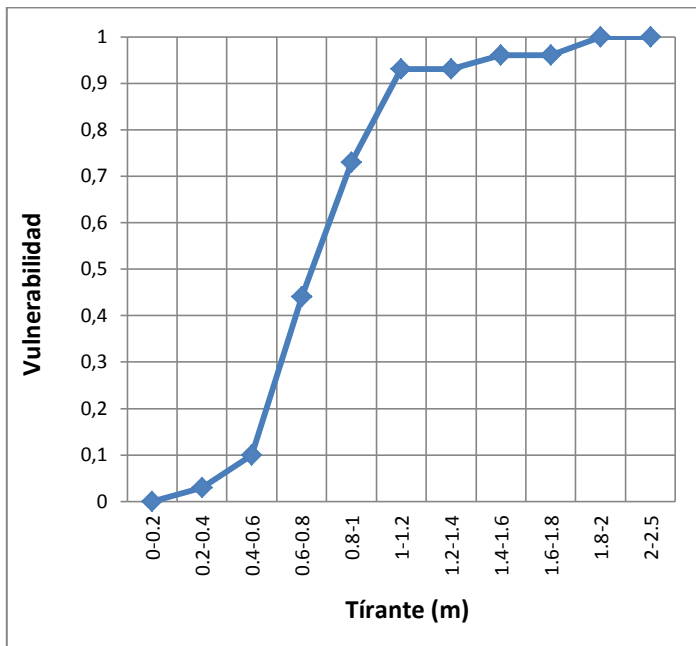
Como un punto adicional y con el fin de determinar vulnerabilidad a los elementos presentes dentro de las viviendas se tiene en cuenta el nivel que alcance el agua que entra en la casa. Ese porcentaje de daños es, finalmente la vulnerabilidad de la vivienda ante inundaciones.

Este nivel se tomó en campo a las viviendas identificadas dentro de las zonas de inundación de los diferentes periodos de retorno y así calcular el nivel que podría alcanzar. Aquí se mostrará la función de vulnerabilidad para cada tipo de vivienda, así como su tabla correspondiente.

Estos daños se han cuantificado de acuerdo a la pérdida de enseres característicos de cada vivienda, y utilizaremos las curvas ya realizadas.



**Figura39 Vulnerabilidad Tipo I**

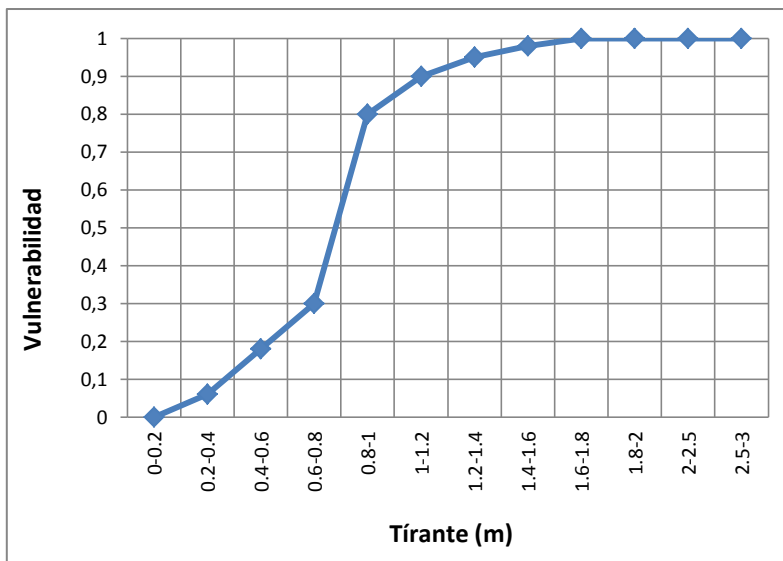


Elevación (m)	% de pérdida
0-0.2	0
0.2-0.4	3
0.4-0.6	10
0.6-0.8	44
0.8-1	73
1-1.2	93
1.2-1.4	93
1.4-1.6	96
1.6-1.8	96
1.8-2	100
2-2.5	100

Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del CENAPRED

La Figura correspondiente a la vivienda tipo 1 muestra claramente que el rango donde ocurre la mayoría de las pérdidas, para la vivienda Tipo I, está entre los 0.60 m y los 1.20 m.

**Figura40 Vivienda Tipo II.**

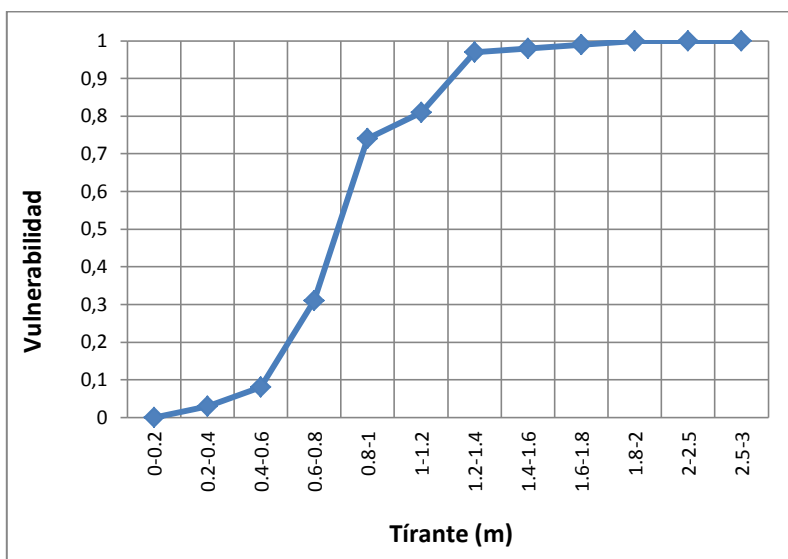


Elevación (m)	% de pérdida
0-0.2	0
0.2-0.4	6
0.4-0.6	18
0.6-0.8	30
0.8-1	80
1-1.2	90
1.2-1.4	95
1.4-1.6	98
1.6-1.8	100
1.8-2	100
2-2.5	100
2.5-3	100

Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del CENAPRED

En la Figura 41, correspondiente al tipo de vivienda II, se observa que la mayor pérdida de los bienes ocurre cuando el tirante de agua en la inundación alcanza de 0.60 m a 1.00 m.

Figura41 Vivienda Tipo III

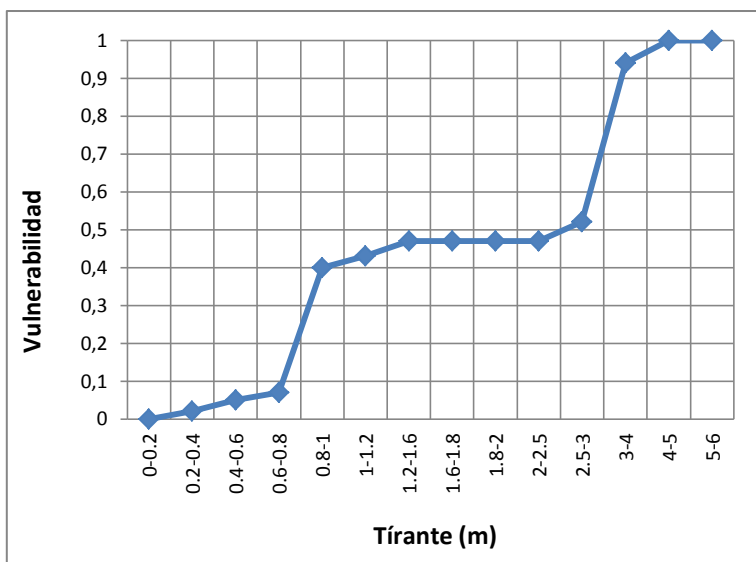


Elevación (m)	% de pérdida
0-0.2	0
0.2-0.4	3
0.4-0.6	8
0.6-0.8	31
0.8-1	74
1-1.2	81
1.2-1.4	97
1.4-1.6	98
1.6-1.8	99
1.8-2	100
2-2.5	100
2.5-3	100

Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del CENAPRED

Para el caso de la vivienda Tipo III, el rango que provoca las mayores pérdidas está comprendido de los 0.40 m a los 1.00 m.

Figura42 Vivienda Tipo IV

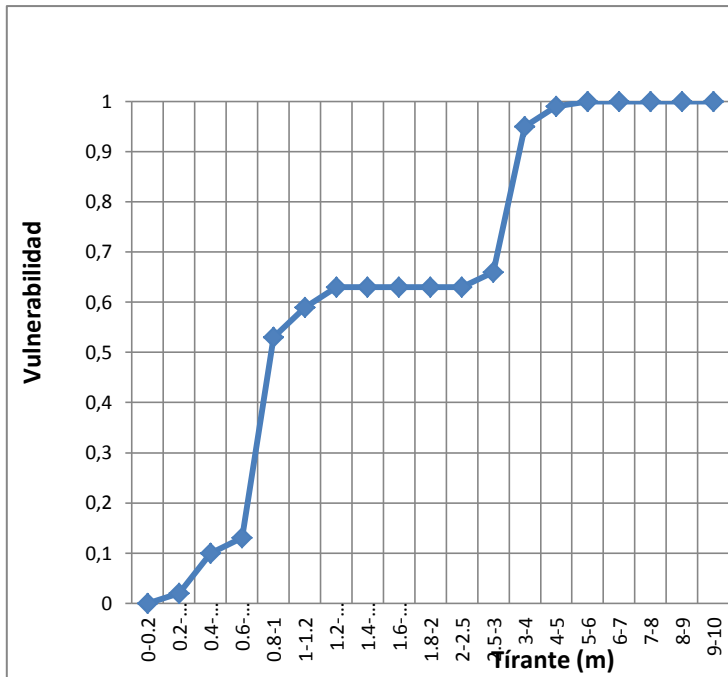


Elevación (m)	% de pérdida
0-0.2	0
0.2-0.4	2
0.4-0.6	5
0.6-0.8	7
0.8-1	40
1-1.2	43
1.2-1.6	47
1.6-1.8	47
1.8-2	47
2-2.5	47
2.5-3	52
3-4	94
4-5	100
5-6	100

Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del CENAPRED

En el caso de las viviendas Tipo 4, se observa que más allá del primer metro de inundación, el porcentaje de pérdida en estas viviendas es mínimo, hasta que alcanza el segundo piso de la misma y, nuevamente vuelve a dispararse.

Figura43 Vivienda Tipo V.



elevación (m)	% de pérdida
0-0.2	0
0.2-0.4	2
0.4-0.6	10
0.6-0.8	13
0.8-1	53
1-1.2	59
1.2-1.4	63
1.4-1.6	63
1.6-1.8	63
1.8-2	63
2-2.5	63
2.5-3	66
3-4	95
4-5	99
5-6	100
6-7	100
7-8	100
8-9	100
9-10	100

Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del CENAPRED

Para cada caso se presenta sobre el eje de las abscisas (x) el nivel alcanzado por el agua, en metros, mientras que en el eje de las coordenadas (y) el valor corresponde al porcentaje de daños esperados en la vivienda.

Para adelantar el proceso de evaluación Zipaquirá, se trabajó coordinadamente con la administración municipal. Teniendo en cuenta la amenaza se identificaron los barrios con mayor problemática de inundación y se procedió a la visita de identificación de los factores de análisis explicados anteriormente.

Para tal efecto se desarrolló una plantilla de recolección de información, se puso a consideración de la supervisión y luego de manera coordinada se procedió al trabajo de campo. El formato de campo incluyó información, identificación de cada predio, una verificación de la cota de inundación presentada en el sitio, habitantes, conservación principalmente

Para obtener las características de los techos y los muros se procedió de la siguiente manera:

- Se realizó un inventario predio a predio con las características de los techos y muro ya definidos en el aparte anterior.
- Luego se definió para cada vivienda el tipo, I, II, III o IV.
- Se revisó el tipo de vivienda para cada manzana y se generalizó cada una teniendo en cuenta las viviendas que forman parte de una manzana. tomando el 40% de las de la condición más desfavorable, por ejemplo si de 10 viviendas 4 son tipo I y 6 tipo III, la manzana se considera con viviendas tipo I.

Para el levantamiento de la información se tomó la información de las manzanas suministradas por la CAR, en su cartografía general. Estas se numeraron para realizar el recorrido.

Para cada manzana se tomaron las coordenadas para poder verificar la información, para el desarrollo de esta actividad se procedió así:

- Se contactó personal del municipio.
- Con el apoyo de este funcionario se contrató a habitantes del sector con conocimiento del municipio para que realicen la actividad.
- Estas personas recibieron capacitación básica para el manejo del GPS, y se recalco la importancia del proceso.

El personal encargado de levantar la información recibió por parte del consorcio, un GPS, una cámara fotográfica, un plano de ubicación de las manzanas y un formato para el registro de la información. En el formato se consignó la dirección, la ubicación en la manzana, las características de los techos y de los muros, también el nivel alcanzado en eventos de inundación en algún momento.

**Fotografía 1. Personal de apoyo recibiendo equipo en el municipio de Zipaquirá**



**Fuente: Personal en capacitación, Municipio Zipaquirá (Cundinamarca)**

Se diseñó un formato para la toma de la información de una manera fácil y lo más rápidamente posible. Este formato se encuentra dentro del anexo de vulnerabilidad.

Una vez levantada la información de los barrios, predio a predio, se procedió a realizar la espacialización de los datos y la clasificación de estos aplicando la metodología explicada. Para este fin se llevó la información a una plantilla en Excel que permitió, de una manera ágil mediante un algoritmo, crear una rutina que automáticamente clasificó las manzanas en los diferentes niveles ya definidos.

Esta información se mapeó por manzanas y se elaboró un formato raster, con resolución de 30x30 metros consecuente con los formatos de los raster de amenaza, esto con el fin de poder realizar las combinaciones para la elaboración del riesgo.

Para la obtención de la vulnerabilidad física y riesgo por inundación para el municipio Zipaquirá Cundinamarca, se tuvo en cuenta información primaria y secundaria.

Se diseñaron los siguientes formatos tenidos en cuenta durante las salidas de campo (Ver anexo Vulnerabilidad)

- Toma de datos en campo.
- Recolección de información para análisis de vulnerabilidad escenario de inundación.
- Material de campo para comisiones de toma de información.
- Inducción para comisiones de toma de información.
- Códigos sobre tipología de información a coleccionar.
- Cronograma de actividades en salidas de campo.
- Inventario de materiales a entregar a comisiones de toma de información.

Del mismo modo se utilizaron formatos de actas de visita e información de contactos de alcaldes, jefes de planeación y funcionarios de la administración municipal.

Con la información dispuesta se preparó el respectivo cronograma de visita, en concertación previa, vía telefónica con el Jefe de Planeación.

Inicialmente se efectuó la visita de reconocimiento a los sensibles inconvenientes contemplados en el objeto del contrato UT AVR CAR visibilizados por la comunidad y la administración municipal.

Se proporcionó capacitación sobre la obtención de información para el análisis de vulnerabilidad física y riesgo de inundación a personal del municipio Zipaquirá, por parte de UT AVR CAR las veces que fuese necesario (tanto teórica como práctica). Se verificó la calibración del equipo y, gracias a la colaboración de cada uno de los funcionarios, se tomó la información requerida.

La información fue capturada para su respectivo análisis, durante los meses previstos de ejecución.

A continuación algunas fotografías de calles y tipos de vivienda que testimonian la captura de información relacionada con clase de muros, techos y nivel de inundación asumida por la delegación comisionada para este propósito y que sirvió como base para la concreción del análisis, espacialización, resultados, conclusiones y recomendaciones.

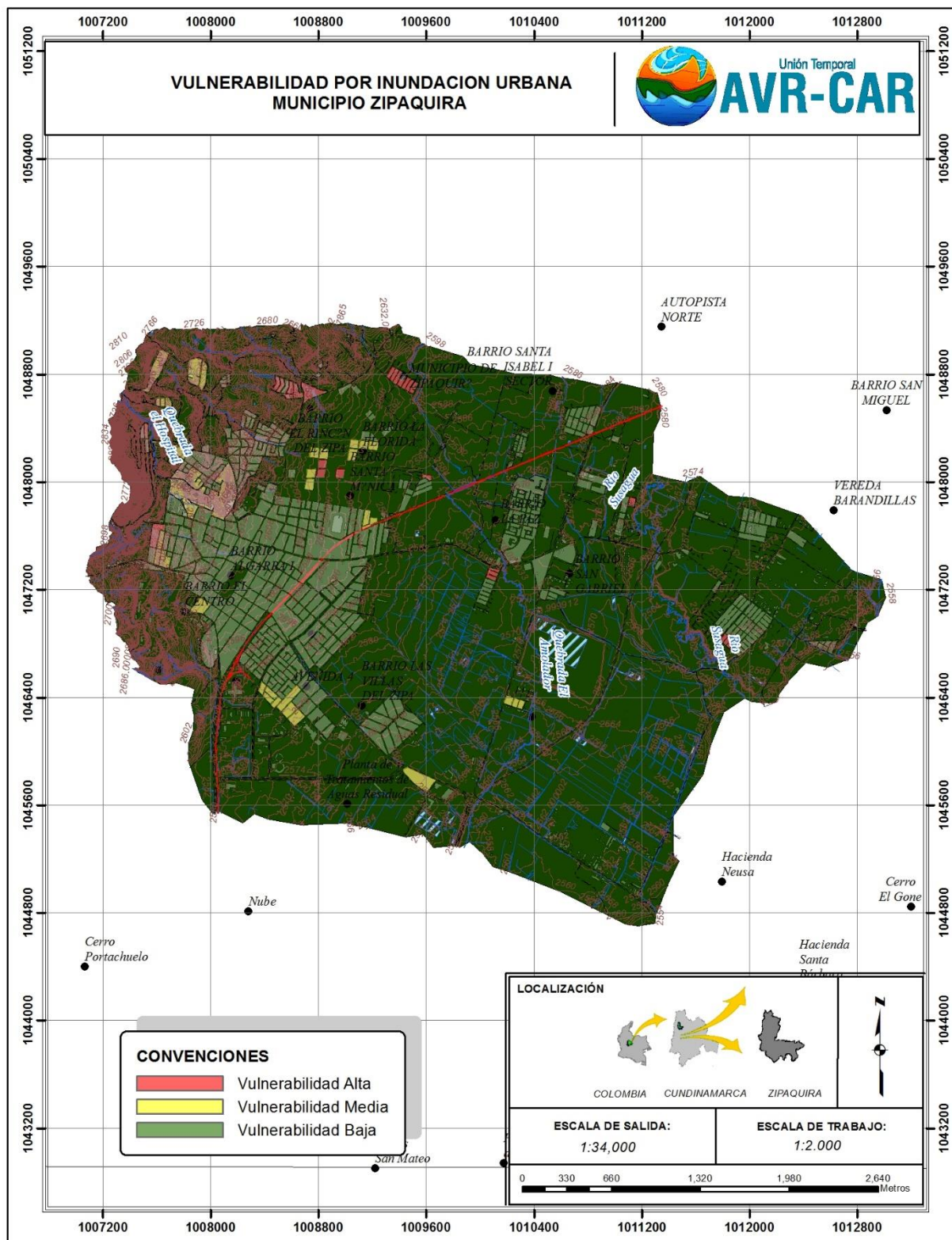


**Fotografía 2. Vulnerabilidad municipio de Zipaquirá**



Fuente: Municipio Zipaquirá (Cundinamarca)

Figura44 Vulnerabilidad sector urbano



Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010).

## 7.2. VULNERABILIDAD ZONA RURAL

Para estimar la vulnerabilidad rural es necesario tener en cuenta varios aspectos que para el sector son muy importantes: la producción de la tierra es de prioridad en el sector; desde esta óptica, se analiza cómo se puede abordar el escenario de tal forma que sea significativa la zonificación y se tengan en cuenta varios aspectos que puedan ser sensibles.

Para la realización de los mapas rurales, se trabajó con cartografía a escala 1:25.000, ubicando el casco urbano a manera de orientación y no se tuvo en cuenta en el análisis, ya que este se realiza de manera independiente a escala 1:2.000.

Se analizaron tres aspectos que se presentan a continuación:

- Vulnerabilidad por cota.
  - Vulnerabilidad por relieve.
  - Vulnerabilidad por las condiciones de textura y cobertura del suelo.
- Vulnerabilidad por cota.

En esta vulnerabilidad se considera que, por la condición altitudinal que presenta una vulnerabilidad a los fenómenos de inundación. Por efectos de gravedad las zonas con valores más bajos de altitud tendrán de hecho una vulnerabilidad a este fenómeno, para ello se dispone de la cartografía a escala 1:25000 con un detalle en zonas urbanas a escala 1:2000. Lo anterior permite tener una mejor resolución para la zonificación.

Se genera la cartográfica en formato *raster* con resolución de pixel 30x30. A partir de esta información se clasifican las altitudes en tres categorías.

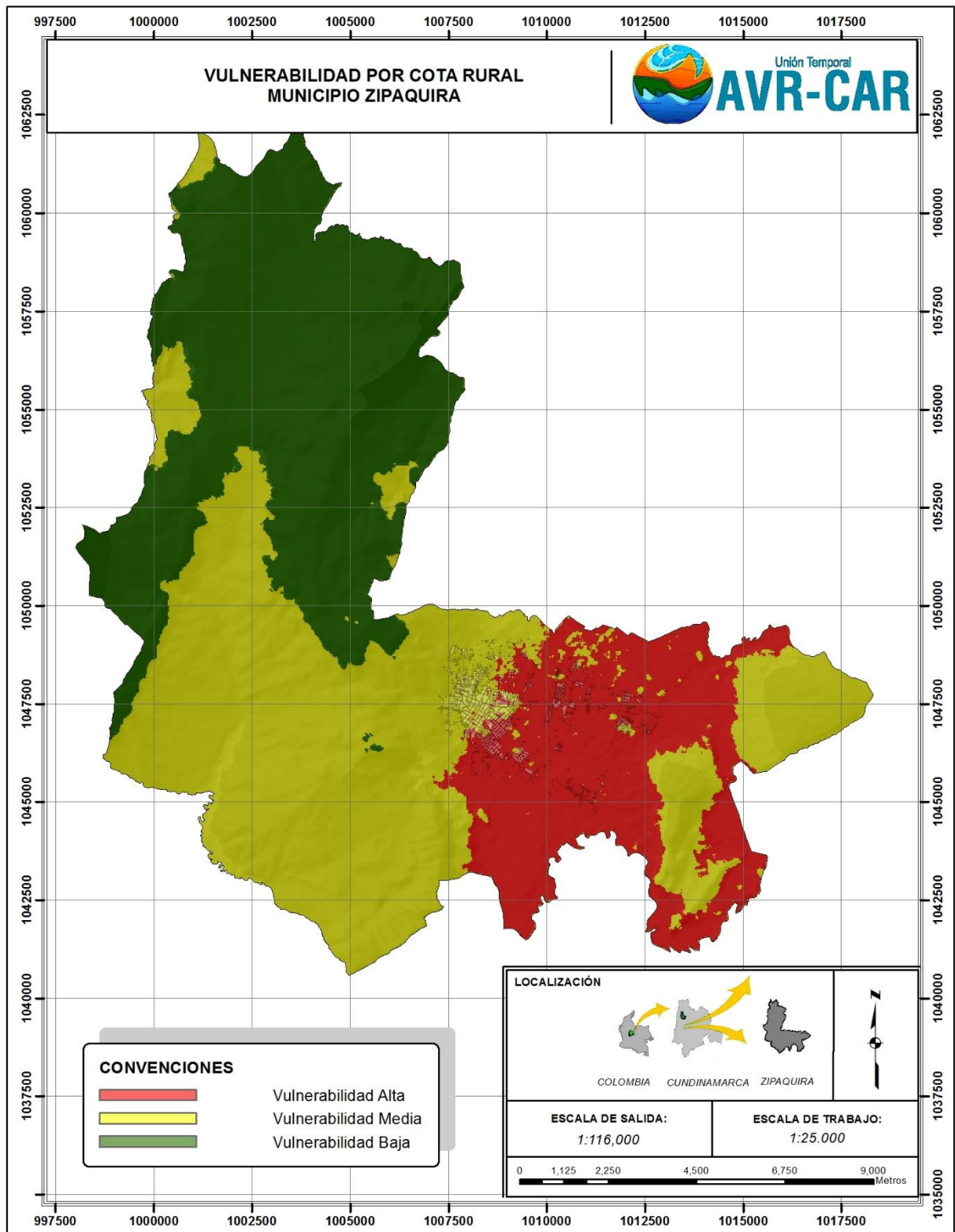
**Tabla 15. Vulnerabilidad por cota**

Rango (MSNM)	Vulnerabilidad	Símbolo
2600 - 2780	Alta	
2780 - 3000	Media	
Mayor a 3000	Baja	

Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010).



Figura45 Vulnerabilidad rural por cota






Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010).

➤ Vulnerabilidad por relieve.

La condición de vulnerabilidad desde el punto de vista de relieve se realizó tomando la pendiente presentada en el municipio.

En las zonas rurales el problema que más daño causa al terreno es el encharcamiento el cual genera da en zonas de pendiente baja. Dicha condición no permite un drenaje natural en zonas de baja pendiente por lo que es necesario adelantar obras de drenaje que permitan que los cultivos se desarrollen en unas condiciones óptimas. De igual forma, los predios por esta condición pueden variar su precio, así como los predios con pendientes altas presentan inconvenientes con procesos de remoción en masa y erosión pero, viéndolos desde el punto de vista de inundación, las pendientes altas permiten el flujo y evacuación de agua. En ese orden de ideas presentarían vulnerabilidad baja a inundación. Con esta conceptualización se zonifica la vulnerabilidad y a partir del mapa raster de cotas se elabora un mapa de pendientes y se zonifica de la siguiente manera:

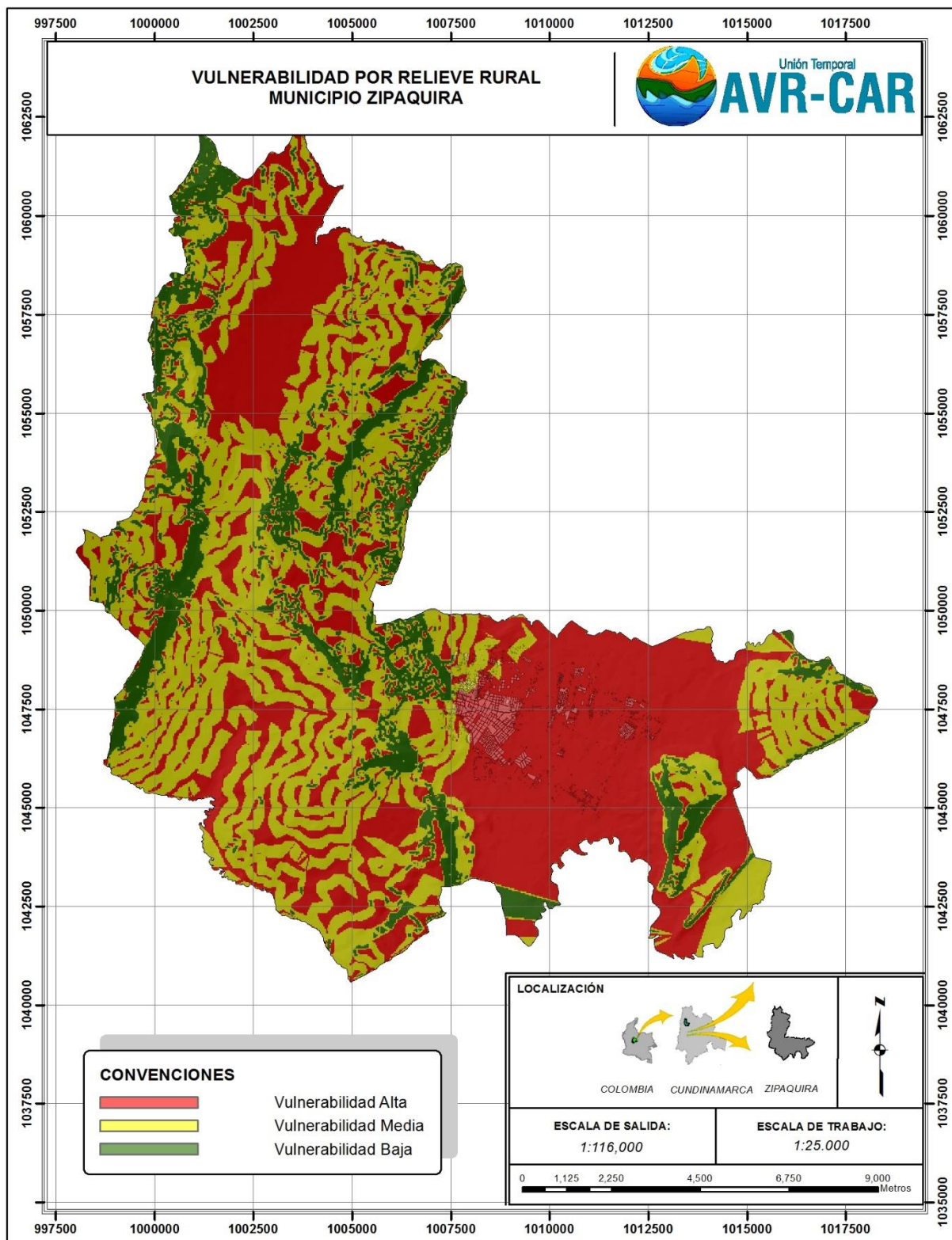
**Tabla 16. Vulnerabilidad por relieve**

Rango (Grados)	Vulnerabilidad	Símbolo
0 - 10	Alta	
10 - 25	Media	
Mayor 25	Baja	

Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010).



Figura46 Vulnerabilidad rural por relieve






Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010).

➤ Vulnerabilidad por las condiciones de textura y cobertura del suelo.

La vulnerabilidad de un predio rural depende de las condiciones de suelo. Cuando se presentan suelos con texturas gruesas y poca vegetación existen las condiciones para que exista una infiltración natural y se pueda decir que el predio presenta una vulnerabilidad baja a inundaciones. En caso contrario la vulnerabilidad estará en aumento, o sea un suelo de textura fina tendrá una condición ideal para la inundación por tanto será muy vulnerable a este fenómeno.

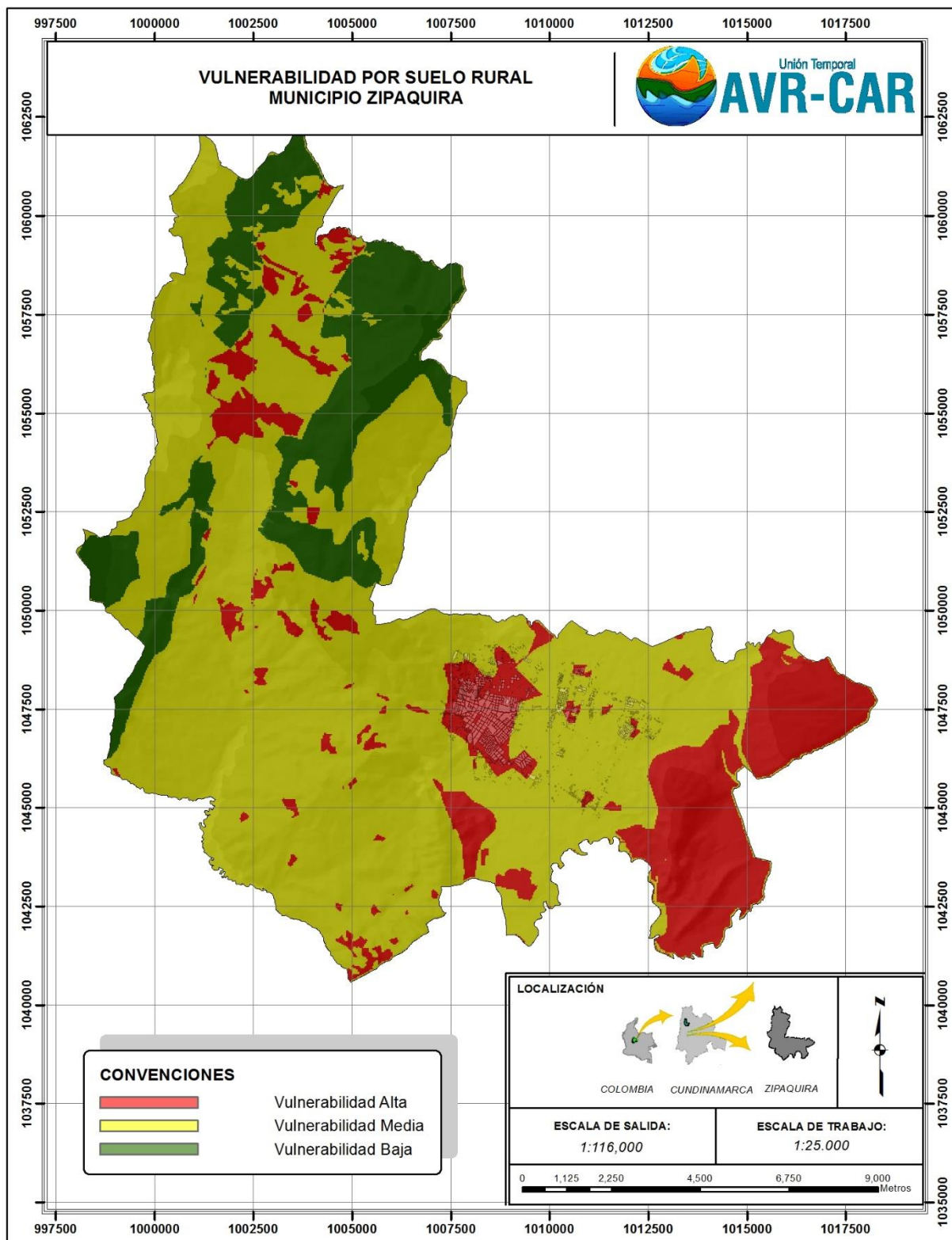
Para ver reflejada esta condición se utilizó el mapa en formato raster del coeficiente de infiltración S. Éste se clasifica de la siguiente manera:

**Tabla 17. Vulnerabilidad por suelos**

Rango (Valores de S)	Vulnerabilidad	Símbolo
88 – 99	Alta	
83 - 88	Media	
Mayor 83	Baja	

Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010).

Figura47 Vulnerabilidad rural por suelos



Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010).

➤ Vulnerabilidad total sector rural.




Para obtener la vulnerabilidad se tiene en cuenta las anteriores clasificaciones sumándolas aplicándoles un peso a cada una de ellas:

$$\text{Vul. Total} = 0.2 * \text{Vul. Por cota} + 0.4 * \text{Vul. Relieve} + 0.4 * \text{Vul. Condiciones del suelo}.$$

Se considera más sensible las vulnerabilidades por relieve y condiciones de suelo, en la práctica de aprovechamiento de los suelos esos factores priorizados son siempre los más relevantes.

Para obtener el valor final se clasifican los valores de las vulnerabilidades en formato numérico, esto para permitir la multiplicación y poder espacializar, los valores considerados se presentan a continuación:

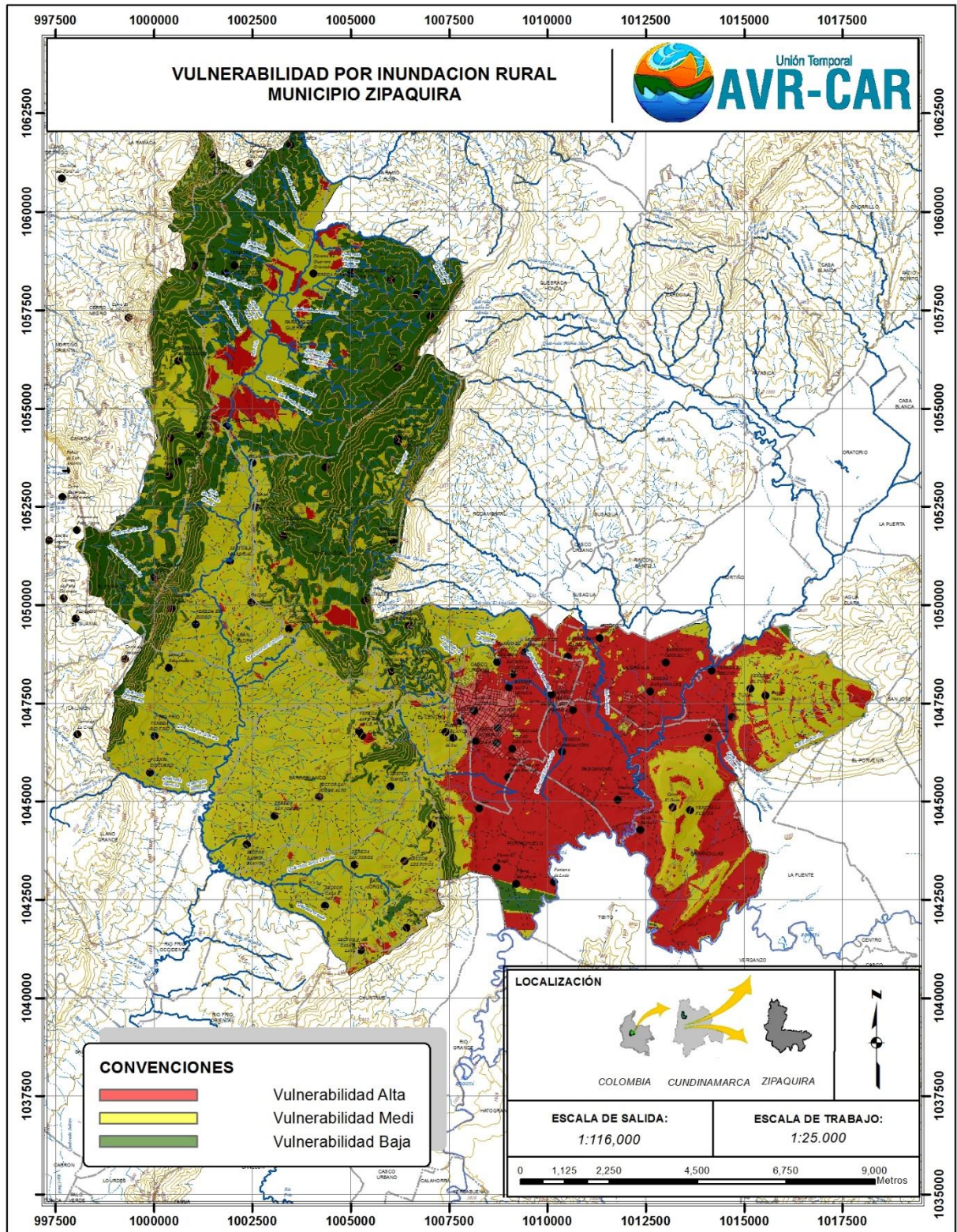
**Tabla 18. Vulnerabilidad rural Total**

Valor numérico adoptado	Vulnerabilidad	Símbolo
1	Alta	
2	Media	
3	Baja	

Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010).



Figura48 Mapa vulnerabilidad total zonas rurales



Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010).



## 8 RIESGO POR INUNDACIÓN

La evaluación del riesgo por inundación para el municipio Zipaquirá se establece mediante la interacción de los factores involucrados en el riesgo holístico: la amenaza por inundación, la vulnerabilidad física del área de estudio.

De acuerdo con las metodologías de evaluación de riesgos en diversas áreas del conocimiento a nivel mundial, una forma óptima de afrontar la valoración del riesgo es considerarlo como el riesgo debido a la probabilidad de la ocurrencia del evento amenazante y su impacto o consecuencias probables sobre las personas y elementos vulnerables expuestos.

La combinación de la probabilidad de ocurrencia de la amenaza y el impacto que causa sobre los elementos vulnerables determinan el peso de cada factor de riesgo, como se muestra en la Tabla 19, en donde el color rojo expresa un riesgo potencial alto, el color amarillo un riesgo potencial medio y el verde un riesgo potencial bajo.

**Tabla 19 Criterios de riesgos por Inundación**

VULNERABILIDAD	AMENAZA		
	Alta 1	Media 2	Baja 3
Alta 1	Alto (1)	Alto (2)	medio (3)
Media 2	Alto (2)	medio (4)	Baja (6)
Baja 3	medio (3)	Baja (6)	Baja (9)

Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información CENAPRED México.

Una vez establecida la afectación potencial que puede sufrir un elemento vulnerable expuesto a la amenaza, se procede a la especialización de dicho riesgo dentro del municipio.

Se debe tener en cuenta que a la hora de la materialización de un evento de inundación, se ejecuta la capacidad de resiliencia la cual manifiesta un nuevo nivel de riesgo, el cual se verá disminuido al implementar medidas mitigadoras que sean eficientes a corto, mediano y/o largo plazo.

Estas medidas mitigadoras actuarán sobre el riesgo que no es posible enfrentar por medio de la resiliencia, siendo éste el que en últimas afectará realmente al elemento vulnerable. En la presente figura se muestra la identificación del riesgo por inundación del municipio de Zipaquirá.

El riesgo tiene influencia en el daño potencial que genere sobre la población y sus bienes que pueda causarse por la ocurrencia de amenazas de inundación. Es por esta razón que se generan planes de contingencia los cuales se hacen necesarios en un proceso de gestión que involucre al Estado y a la sociedad.

Una vez identificadas, descritas y analizadas las amenazas y desarrollada la captura y el análisis de vulnerabilidad, se procede a determinar el nivel de riesgo que para esta metodología es la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad.

La metodología descrita anteriormente corresponde a una adaptación con cambios apropiados a las amenazas por inundaciones, basada en el Programa de Concientización y Preparación para Emergencias a Nivel Local (APELL) el cual fue dado a conocer en 1988 por el Centro de

Actividades del Programa de Industria y Medio Ambiente (UNEP IE/PAC) del Programa de las Naciones Unidas, en cooperación con los gobiernos y la industria química.

Con el presente estudio, se pretende obtener un análisis primario que permita conocer de manera general y anticipada los principales riesgos generados en el municipio por eventos naturales en este caso inundaciones. El énfasis se realiza en las probabilidades de eventos de inundaciones que representen una amenaza potencial para las personas, la propiedad y el ambiente, para que a través de este conocimiento las autoridades tengan mayores elementos de juicio para establecer y mejorar la preparación para situaciones de emergencia.

El análisis de riesgo busca medir las consecuencias de un evento contra las probabilidades de este llegue a ocurrir. La probabilidad que suceda un evento y sus consecuencias raramente puede llegar a calcularse en forma exacta (matemática). Sin embargo, con frecuencia se pueden estimar con la precisión suficiente para poder establecer una base que permita tomar medidas prácticas para contener los riesgos.

El término “riesgo” incluye dos aspectos:

1. La probabilidad de que un evento ocurra dentro de cierto período de tiempo.
2. Las consecuencias para la población, las propiedades y el ambiente.

La probabilidad de que un evento ocurra y cause daños se reduce si la amenaza o peligro es reconocido por quienes se pudieran ver afectados, y si son comprendidas sus causas y sus efectos. Asimismo, es importante estudiar las consecuencias de efectos combinados.

En el desarrollo del análisis es importante tomar en cuenta lo siguiente:

- El potencial de la amenaza.
- La ubicación de la amenaza, la vulnerabilidad de los elementos amenazados en las inmediaciones.

Una vez realizados los análisis de amenaza y vulnerabilidad, se proyecta el riesgo. Tomando la teoría de los textos y las definiciones de riesgo se tiene que el riesgo es el producto de la amenaza y la vulnerabilidad.

### **Riesgo= Amenaza x Vulnerabilidad**

En ese orden de ideas se clasificaron los dos parámetros con los números 1, 2 y 3. El número 1 representa los valores críticos o clasificados altos, tanto amenaza como vulnerabilidad, el número 2, representa las zonas con valores medios y finalmente el número 3 corresponde a los valores bajos. La multiplicación arroja valores de 1 hasta 9 y las combinaciones se presentan a continuación:

#### ✓ **Amenaza alta vulnerabilidad alta.**

Esta condición se considera la más crítica y desde el punto de vista de zonificación no tendría problema y el resultado es lógico. Estas zonas tendrán un resultado de multiplicación igual a 1. Las condiciones desfavorables hacen de estas zonas de especial cuidado por lo que es necesario tomar decisiones definitivas para el desarrollo en estos sectores.

#### ✓ **Amenaza alta vulnerabilidad media.- Vulnerabilidad alta amenaza media.**

Esta multiplicación dará como resultado 2, la condición presentan dos situaciones alta: la amenaza y la vulnerabilidad, sin embargo si analizamos las consideraciones para el desarrollo de la amenaza y la vulnerabilidad se observa que el valor de 2 será más marcado por la

amenaza que por la vulnerabilidad; difícilmente se encontrarán zonas de vulnerabilidad media con amenaza alta, pero sí podemos encontrar zonas de amenaza alta con vulnerabilidad media.

Lo expuesto anteriormente justifica la adopción del número 2 como riesgo alto, la zonificación alta corresponderá a resultados 1 y 2.

✓ **Amenaza alta – vulnerabilidad baja. Vulnerabilidad alta amenaza baja.**

El resultado de la multiplicación es 3 en ambos casos por lo que se considera situación de riesgo medio. De esta manera permite trabajar con algunos de los dos parámetros, realizar obras de contención para mejorar la situación de amenaza o mejorar la condición de vulnerabilidad para disminuir el riesgo. Éstas son zonas consideradas de desarrollo dentro de las cuales es posible trabajar a nivel municipal y además permite a las autoridades el mencionado desarrollo.

✓ **Vulnerabilidad media – amenaza media.**

Es otra de las condiciones lógicas, las dos zonas clasificadas como medio el resultado es 4 y la condición será media.

✓ **Amenaza media vulnerabilidad baja. Amenaza baja vulnerabilidad media.**

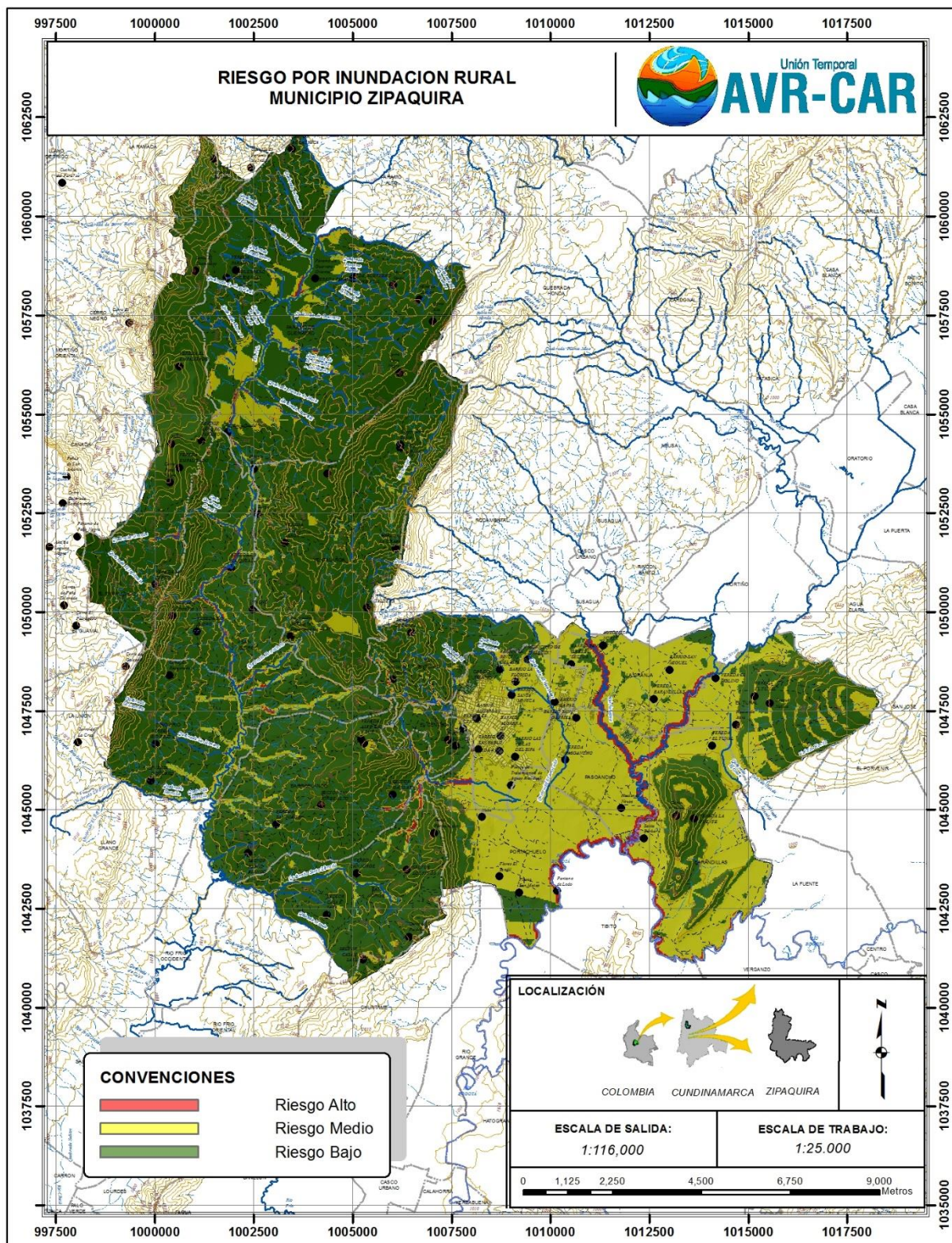
Estos dos resultados tiene el valor 6, es decir ambos escenarios tienen una condición baja; en el caso de vulnerabilidad se tendrá pendientes grandes y buen drenaje, esto combinado con niveles de inundación para periodos de retorno ente 12,5 y 50 años. Para el caso de amenaza baja se tendrán valores de inundación superiores a 50 años, ésta se zonificará como riesgo bajo.

✓ **Amenaza baja – vulnerabilidad baja.**

Matemáticamente, esto corresponde a un valor de 9, y la zonificación es también muy lógica, sectores con amenaza baja cruzado con sectores con una vulnerabilidad baja. Este valor se zonifica como riesgo bajo.



Figura49 Riesgo por inundación rural municipio Zipaquirá



Fuente: UT AVR CAR., 2014, a partir de información del IDEAM (2014) e IGAC (2010).







Para analizar el resultado del estudio es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

✓ **Escala.**

El estudio consideró una escala de 1:25000, con un detalle adicional a escala 1:2000 para la zona urbana. Es necesario adelantar estudios de precisión en sectores específicos, para ello se recomienda a las autoridades municipales adoptar una medición de niveles permanente que permita valorar la información proyectada en el sector.

✓ **Amenaza.**

La amenaza se proyectó con la estimación de niveles a periodos de retorno de 12,5 años y 50 años, esto significa que el evento extremo se presentará por lo menos una vez en 12,5 o 50 años. El periodo de retorno técnicamente se puede asimilar al inverso de la probabilidad. En resumen, la probabilidad de ocurrencia de un evento que cause amenaza alta es de aproximadamente 8%.

✓ **Vulnerabilidad.**

La vulnerabilidad consideró situaciones naturales del municipio frente a eventos de inundación, lo cual no coincide con la vulnerabilidad zonificada para otros fenómenos analizados en otros capítulos. Es exclusiva para este componente.

Los resultados nos arrojan poca problemática por inundación en gran parte de la zona urbana, adicionalmente,

Se considera un municipio con una problemática grande en componente por inundación en la zona adyacente al río Bogotá.

## 9 CONCLUSIONES

De acuerdo con la información base para la generación de los productos, tales como cartografía, información climatológica, y mapas temáticos, los parámetros estimados tales como caudal y niveles críticos de aguas y otros se proyectaron con un enfoque de riesgo para la planificación del territorio a escala 1:25.000, es necesario aclarar que no deberá usarse para la proyección o diseño de estructuras. Para estos fines es necesario hacer un estudio de detalle con información en campo y actualización de los parámetros, sobre todo topografía.

De acuerdo con la zonificación, el municipio de Zipaquirá la problemática asociada a fenómenos de inundación, se ubica en la zona adyacente al río Bogotá

Las precipitaciones máximas en 24 horas, estimadas para un periodo de retorno de 100 años se encuentran entre 43 y 48 mm, presentando los valores máximos en la parte más baja de la cuenca.

La calibración como tal del modelo no se realizó por limitaciones de información en los puntos de interés, sin embargo se realizó una optimización de parámetros, principalmente tiempo de concentración, es importante resaltar que este deberá optimizarse con la adopción de puntos de control.

Las viviendas del municipio de Zipaquirá se clasificaron como tipo II y III, respecto a vulnerabilidad en su mayoría, estas se categorizaron como medias y bajas en un alto porcentaje.

Las zona relacionadas por el IGAC, coinciden con los valores estimados en el presente estudio valorando la metodología aplicada.

## 10 BIBLIOGRAFÍA

SALAS, Marco. 2011. Metodología para la elaboración de mapas de riesgo por inundación. Ciudad de México, Estados Unidos Mexicanos [en línea] <<http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/index.php/biblioteca/category/9-iii-riesgos-hidrometeorologicos?download=42:metodologia-para-la-elaboracion-de-mapas-de-riesgo-por-inundaciones-en-zonas-urbanas>> [Citado el 9 de julio de 2014]

VARGAS, Richard. 2012. Formulación del plan nacional de riesgo. Versión 1. Bogotá, República de Colombia [en línea] <[http://www.sigpad.gov.co/sigpad/archivos/FormulariosPMGRD2012/Guia\\_PMGRD\\_2012\\_v1.pdf](http://www.sigpad.gov.co/sigpad/archivos/FormulariosPMGRD2012/Guia_PMGRD_2012_v1.pdf)> [Citado el 9 de julio de 2014]

VARGAS, Richard. 2012. Guía municipal para la gestión de riesgo. Primera edición. Bogotá, Colombia: Grupo Emfor. 150p.

SÁNCHEZ, Javier. 2012. HecHMS manual elemental. Universidad de Salamanca, España [en línea] <<http://hidrologia.usal.es/Complementos/Hec-hms3.pdf>> [Citado el 9 de julio de 2014]

BREÑA, Agustín y JACOBO, Marco. 2006. Principios fundamentales de la hidrología superficial. Universidad Autónoma de Metropolitana, Estados Unidos Mexicanos [en línea] <[http://www.uamenlinea.uam.mx/materiales/licenciatura/hidrologia/principios\\_fundamentos/libro-PFHS-05.pdf](http://www.uamenlinea.uam.mx/materiales/licenciatura/hidrologia/principios_fundamentos/libro-PFHS-05.pdf)> [Citado el 9 de julio de 2014]

Hidrograma Unitario. Universidad Politécnica de Cataluña, España [en línea] <[http://ocw.camins.upc.edu/materials\\_guia/250144/2013/Hidrograma\\_Unitario.pdf;jsessionid=A7E7B3F248723452CAB3E7BA8EE8B82](http://ocw.camins.upc.edu/materials_guia/250144/2013/Hidrograma_Unitario.pdf;jsessionid=A7E7B3F248723452CAB3E7BA8EE8B82)> [Citado el 9 de julio de 2014]

VILLÓN, Máximo. 2012. Hidroesta 2. Cálculos hidrológicos. Manual del usuario. Primera edición. Lima, Perú: Ediciones Villon. 380p.

VILLÓN, Máximo. 2013. HEC HMS ejemplo. Tercera edición. Cartago, Costa Rica: Editorial Maxsoft. 620p.

Ministerio de transporte e Instituto nacional de vías. 2009. Manual de drenajes para carretera. Bogotá, República de Colombia: FLÓREZ, Jorge y BOLAÑOS, Andriana. 420p.

CHOW, Ven Te. 2010. Hidráulica de canales abiertos. Bogotá, República de Colombia. McGraw. 337p.