

**Monografía**  
**Seminario II**  
**Especialización Medio Ambiente y Geoinformática**



**ANÁLISIS MULTI-TEMPORAL DE LA VARIACIÓN DE LOS CAUDALES  
MÁXIMOS PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS DE ACUERDO CON  
LOS DIFERENTES ESCENARIOS DE COBERTURA PARA LOS AÑOS 2008 Y  
2018. CASO DE ESTUDIO: QUEBRADA LAS PALMAS -ORIENTE ANTIOQUEÑO.**

Paola Andrea Vergara Henao  
Julián David Montoya Barrera

**Asesor:**

Juan Carlos Valdés Quintero

**Universidad de Antioquia**  
**Medellín**  
**Junio de 2019**

## Tabla de contenido

1. Introducción-----	4
2. Objetivos -----	5
2.1 Objetivo General -----	5
2.2 Objetivos Específicos -----	5
3. Estado del Arte -----	6
4. Marco de Referencia -----	9
4.1 Sistemas de información geográfica SIG:-----	9
4.2 Modelo digital de elevación MDE:-----	10
4.3 Análisis de imágenes satelitales: -----	10
4.4 Periodo de Retorno:-----	10
4.5 Cobertura vegetal:-----	11
5. Metodología-----	11
5.1 Consolidación de la información base -----	11
5.1.1 determinación de Modelo de Elevación digital MED: -----	11
5.1.2 Datos de precipitación:-----	13
5.1.3 Cartografía Base:-----	14
5. 2 Procesamiento de imágenes raster. -----	14
5. 3 Análisis de Cuenca -----	18
5.3.1 Parámetros Morfométricos y Morfológicos -----	18
5.3.2 Tiempo de Concentración. -----	21
5.3.3 Curva de Intensidad, Duración y Frecuencia. -----	21
5.3.4 Lluvia de Diseño. -----	22
5.3.5 Cálculo de Numero de Curva -----	23
5.3.6 Cálculo de Caudales Simulación HEC-HMS-----	25
6. Resultados y discusión: -----	27
7. Conclusiones y recomendaciones. -----	28

8. Revisión Bibliográfica .....	29
---------------------------------	----

## Índice de Ilustraciones

<b>Figura 1.</b> Proceso de elección datos MED .....	12
<b>Figura 2.</b> Comparativa datos de Elevación .....	13
<b>Figura 3.</b> Ciclo Anual mensual estación Santa Helena. ....	14
<b>Figura 4.</b> Imagen Satelital LANDSAT 5 para el año 2008. ....	16
<b>Figura 5.</b> Imagen Satelital SENTINEL 2 para el año 2018 .....	16
<b>Figura 6.</b> Coberturas para el año 2008.....	16
<b>Figura 7.</b> Coberturas para el año 2018.....	16
<b>Figura 8.</b> Variación de Coberturas entre los años 2018 y 2018.....	18
<b>Figura 9.</b> Modelo hidrológico para obtención de la Cuenca Las Palmas .....	19
<b>Figura 10.</b> Variación altitudinal Cuenca Las Palmas y Orden red de drenaje.....	20
<b>Figura 11.</b> Pendientes Cuenca Las Palmas.....	20
<b>Figura 12.</b> Tiempo de Concentración de la Cuenca.....	21
<b>Figura 13.</b> Curva IDF, Estación Santa Helena.....	22
<b>Figura 14.</b> Distribución temporal de la lluvia.....	23
<b>Figura 15.</b> Perfil de Suelo Vía las Palmas.....	24
<b>Figura 16.</b> Caudales Máximos para cada uno de los métodos.....	26

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Áreas de coberturas para los años 2008 y 2018.....	17
<b>Tabla 2.</b> Datos morfológicos y morfométricos de la cuenca.....	20
<b>Tabla 3.</b> Parámetros Región Andina.....	22
<b>Tabla 4.</b> Determinación de CN para el año 2008.....	25
<b>Tabla 5.</b> Determinación de CN para el año 2018.....	25
<b>Tabla 6.</b> Aumentos presentados en los caudales hallados.....	27

## 1. Introducción

La población en Colombia para el año 2008 era de aproximadamente 44 millones de habitantes. Dicha población demanda para su subsistencia diferentes actividades que están directamente relacionadas con el entorno que las rodea ya que se deben suplir necesidades de alimentación, vivienda, transporte, recreación, entre otras. Entender la dinámica del espacio que ocupamos, nos brinda valiosa información la cual permite desarrollar una planificación más acertada en cuanto al establecimiento de diferentes sistemas que demandan estas actividades, por lo tanto, la consecución, análisis, procesamiento e interpretación de datos en el tiempo, junto con los sistemas de información geográfica (SIG) se convierten en una poderosa herramienta que nos permiten modelar fenómenos para lograr una aproximación sobre lo expresado por el territorio en busca de una correcta planificación.

El análisis del efecto de la variación de coberturas sobre el recurso hídrico ha sido de gran relevancia debido a la presión de diferentes sectores sobre este; la dinámica de las cuencas ha tenido grandes variaciones debido a las actividades antrópicas, lo cual puede generar cambios en aspectos como los caudales que son de gran importancia en funciones como el abastecimiento de acueductos, el diseño de obras hidráulicas y el sostenimiento de los ecosistemas; los caudales son muestra del comportamiento hidrológico de las cuencas como resultado de su interacción con el medio ambiente, los factores bióticos, abióticos y los procesos asociados a estos.

Un factor determinante que influye directamente en este análisis corresponde a la cobertura de la superficie, cada tipo de cobertura cumple una función diferente dependiendo de sus características. Grandes cambios de cobertura provocan alteraciones importantes en cuanto al comportamiento hidrológico. En los últimos tiempos se evidencia un acelerado proceso de modificación de las coberturas terrestres por las diferentes actividades antrópicas. Particularmente la zona de estudio seleccionada para este trabajo presenta una de las mayores tasas de crecimiento urbanístico en el país, el oriente antioqueño viene desarrollando diferentes proyectos

en los últimos años relacionados con la construcción de viviendas y demás obras de acceso a las mismas, lo cual pronostica una importante tasa de crecimiento a futuro.

El presente trabajo se propone desarrollar un modelo de análisis geoespacial que parte de la recolección y procesamiento de información disponible sobre diferentes variables en la cuenca hidrográfica de la Quebrada Las Palmas del Oriente Antioqueño, al ser esta una zona que presenta mayor intervención del territorio. Apoyados en herramientas SIG y sensores remotos, se busca obtener los parámetros morfológicos y morfométricos de la cuenca, además de la determinación de las coberturas presentes en esta, entre los años (2008-2018), con el fin de conocer y analizar las variaciones que ocurren en esta cuenca hidrográfica en cuanto a los caudales máximos para periodo de retorno de 100 años.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Desarrollar un modelo de análisis geoespacial que permita analizar la variación de los caudales máximos para un periodo de retorno de 100 años, considerando los diferentes escenarios de cobertura para los años 2008 y 2018, basado en Sistemas de Información Geográfica, para la cuenca de la Quebrada Las Palmas en el Oriente Antioqueño en zona rural.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Determinar los insumos, herramientas, y procedimientos, que serán involucrados en el desarrollo del modelo, teniendo en cuenta los tamaños de celda y las resoluciones de diferentes fuentes de información.
- Identificar los parámetros y metodología definidas para la estandarización de los tipos de cobertura a considerar en los escenarios 2008 y 2018.

- Calcular los parámetros morfológicos y morfométricos de la cuenca hidrográfica empleando la información escogida para ello.
- A partir de una metodología existente estimar los caudales máximos en el sitio determinado como cierre del perímetro tributario, teniendo en cuenta diferentes variables como los escenarios de cobertura lo cual permitirá calcular los caudales para el periodo de retorno de 100 años.
- Realizar un análisis comparativo de acuerdo con las variaciones entre los caudales máximos para cada uno de los escenarios de cambio de cobertura.

### **3. Estado del Arte**

Actualmente ha aumentado la importancia del conocimiento de la respuesta hidrológica de las cuencas hidrográficas, frente a diversos cambios en sus factores más representativos, y se ha indicado en (Avilés, Solera, & Paredes, 2016), que se pueden desarrollar trabajos que incorporen la variación del régimen hidrológico por cambios en el uso de la tierra o cambios climáticos, para lograr predecir los cambios mencionados en el comportamiento hidrológico de la cuenca. Además, en relación con lo que se pretende analizar en el presente estudio, se dice en (Burbano-Girón, Domínguez, & Barón-Ruiz, 2016) que generar información relacionable a la hidrología de Colombia, es clave para describir las características probabilísticas de los elementos del ciclo hidrológico, y en (Vélez et al., 2004), que mediante el análisis de modelos digitales del terreno y la herramienta para realizar balances hidrológicos en cuencas, se pueden tener buenas aproximaciones en la cuantificación de la escorrentía a diferentes escalas espaciales y temporales.

La importancia de realizar este tipo de trabajos se ha justificado por (Galeana-Pizaña et al. 2009), quienes afirman que conocer la distribución de las diferentes coberturas del suelo y su relación con las variables ambientales, ayuda a vislumbrar los elementos limitantes o determinantes que permiten tomar en cuenta acciones para desarrollar estrategias de planeación del territorio, encaminadas al manejo de los recursos naturales, y ayuda a identificar áreas susceptibles de sufrir procesos

asociados a la transformación del paisaje por el crecimiento de la mancha urbana, cambio climático y pérdida de servicios ambientales que de allí se deriva.

Frente a la resolución de los Modelos de Elevación Digital (MED) a utilizarse en el desarrollo del trabajo, o la distancia entre las curvas de nivel empleadas para construirlo, (Sahoo & Jain, 2018) mencionan que los MED no representan completamente las características naturales de una área, debido a que los fenómenos naturales presentan una variación de carácter continuo, y que a pesar de que en su estudio particular, en el que se realizó la simulación hidrológica bajo el modelo GIUH, el aumento en la precisión de la representación del terreno no afectó significativamente los resultados de los análisis morfométricos e hidrológicos; los datos de MED de resolución más fina proporcionarán una representación más precisa de las propiedades del terreno, y por consiguiente una mayor facilidad para conocer en detalle las formas de los flujos en la cuenca que se desee estudiar.

Respecto a los aspectos específicos que se pretenden evaluar en el actual informe, se han realizado diversos estudios como el de (Miranda-Aragón, L., Ibáñez-Castillo, L. A., Valdez-Lazalde, J. R., & Hernández-de la Rosa, P., 2009), en el cual se concluyó que el cambio en los usos del suelo no generaba efectos significativos sobre el caudal máximo con periodo de retorno de 100 años, sin embargo, se aclara que las coberturas cambiaron pero se mantuvieron como cobertura vegetal; y el realizado por (Pérez et al., 2018) en el cual se evidenciaron disminuciones en los caudales asociados a la escorrentía por el aumento de las coberturas boscosas;. Los anteriores estudios presentan cambios en las coberturas, pero se han mantenido bajo condiciones de superficies con vegetación, diferente a las condiciones del área de estudio del presente estudio, en la cual, según revisión preliminar de imágenes satelitales, ha padecido fenómenos de impermeabilización asociados al aumento de asentamientos humanos. Si bien en otras regiones ha sido importante al cambio o aumento de cobertura vegetal, el presente estudio se centrará en el impacto por el aumento de áreas impermeabilizadas.

De manera similar, en estudios antiguos, como el realizado por (García-Ruiz, J. M., Puigdefábregas-Tomás, J., & Creus-Novau, J, 1980), se concluyó que las

variables físicas en las cuencas tenían muy poca influencia sobre los caudales máximos en fuentes hídricas, sin embargo no se evaluó específicamente la cobertura del suelo, lo cual, tanto por la antigüedad del estudio, como por la no inclusión de la variable Cobertura del Suelo, motiva aún más la evaluación de la mencionada variable en el presente estudio.

Un estudio realizado por (Javier Cancelo-González, Manuel Álvarez Enjo, Francisco Díaz-Fierros, 2013) permitió realizar un análisis hidrológico comparativo de dos cuencas donde se produjo un cambio de coberturas en una de ellas debido a un incendio ocurrido en el verano del 2007 en la cuenca del NO de España con una afectación del 50%. El análisis comparativo muestra que, durante los dos primeros años de estudio en los meses de mayor precipitación, las láminas de escorrentía mensuales son mayores en la cuenca que sufrió el cambio de cobertura. Durante el tercer año estas se igualan lo cual se puede justificar debido a la regeneración de la vegetación tras el incendio.

En Colombia, el tema de determinación de coberturas ha sido liderada por diferentes instituciones del Sistema Nacional Ambiental (SINA), en cabeza del IDEAM con la participación de entidades como el IGAC, PNN las cuales conforman el Comité Nacional de Coberturas de la tierra, quien es el encargado de establecer los lineamientos y directrices para el estudio y monitoreo a nivel regional y local.

La metodología empleada ha sido la CORINE LAND COVER la cual es una metodología desarrollada en Europa y ha sido adaptada para Colombia. Por sus características permite asociar y comparar la información a nivel internacional y facilita los análisis multitemporales de las coberturas del territorio. Inicialmente fue aplicada a la cuenca Magdalena – Cauca (2000– 2002) y a partir de esta experiencia el IGAC produjo la información de coberturas de la región Pacífica colombiana (2007 – 2008), correspondiente a los departamentos de Nariño, Cauca, Chocó y Valle del Cauca en una escala de 1:100.000. Los principales resultados han sido la elaboración de los mapas de cobertura de la tierra para los periodos 2000 – 2002, 2005 – 2009 y 2010 – 2012.

Parques Nacionales Naturales, estuvo a cargo de la interpretación de las áreas de su jurisdicción en todo el territorio nacional. Finalmente, la integración del mapa y la elaboración de la cartografía estuvieron a cargo del IDEAM el cual asume la custodia de la información general. En el 2014 se generó el mapa de coberturas de la tierra escala 1:25.000 en 1'400.000 ha de 21 complejos de páramos priorizados, junto con 77 fichas de patrones de coberturas debidamente documentadas y georreferenciadas con información de campo (IDEAM, 2019).

Con el objetivo de obtener una información de salida confiable, se pretende evaluar información satelital para determinar la variación en las coberturas del suelo en cada uno de los años incluidos en los periodos a estudiar, y como se concluyó en el estudio de (Peña, 2007), la aplicación de procedimientos de orto corrección es de principal importancia si se pretende contribuir a caracterizar y monitorear las coberturas mediante el uso de imágenes satelitales, debido a que se deriva información más fidedigna en relación con la información que se puede observar en campo. De manera similar (Díaz, A. Mercado T, 2017) en el estudio realizado en el departamento de Córdoba Colombia en la Subcuenca de Betancí, indica que la correcta determinación del comportamiento espacial de un parámetro específico como el número de curva, depende de la calidad de los insumos cartográficos empleados y para utilizar el método de número del curva se parametrizó el potencial de escorrentía en la cuenca hidrográfica, según el tipo de suelo y la cobertura, mediante el uso de teledetección, según el cual se estableció que los pastos ocupaban un 85% del área total de la cuenca y que el 83% de los suelos tiene un alto potencial de escorrentía lo cual favorecía los procesos erosivos, inundaciones y desertificación del territorio.

#### **4. Marco de Referencia**

**4.1 Sistemas de información geográfica SIG:** es una integración organizada de hardware, software, datos geográficos y personal, diseñado para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión. El propósito de los sistemas de información geográfica es proporcionar un entorno adecuado para permitir el análisis de datos geográficos, que facilite el proceso de toma

de decisiones en aquellos casos en el que el componente geográfico es determinante. (Castro A., Durango C,2009).

**4.2 Modelo digital de elevación MDE:** Son arreglos bidimensionales que representan la variación altitudinal en una región mediante una malla regular (Forkuor; G., Maathuis, B., 2012). Las funcionalidades y técnicas computacionales de las herramientas SIG han permitido el uso eficaz de los MDE para establecer parámetros geomorfométricos relevantes en cuencas hidrográficas tales como pendientes, orientación curvatura entre otros (Schumann, G., Matgen, P., Cutler, M. E. J., Black, A., Hoffmann, L., & Pfister, L., 2008).

**4.3 Análisis de imágenes satelitales:** Las imágenes satelitales registran el comportamiento de la superficie terrestre a través de diferentes regiones del espectro electromagnético (ello depende de la resolución espectral de la imagen, es decir, del número de bandas o rangos de longitudes de onda discriminados en ésta), proporcionando una gran cantidad de datos espacialmente contiguos entre sí y distribuidos a lo largo de extensas áreas geográficas. Estas propiedades les confieren la capacidad de detectar, reconocer e identificar coberturas de suelo, así como medir numerosas propiedades biofísicas y bioquímicas asociadas a ellas, ofreciendo ventajas en comparación con métodos in situ, que muchas veces requieren de mediciones en terreno que pueden resultar prohibitivas a amplias escalas, debido a limitantes de accesibilidad, tiempo y recursos (Lillesand et al. 2004, Aronoff 2005, Eastman 2006).

**4.4 Periodo de Retorno:** Los periodos de retorno se definen como el intervalo de tiempo para el retorno de eventos hidrológicos máximos, expresado en años, en el que el caudal pico de una creciente determinada es iguala o superado una vez (Ministerio de Transporte-Instituto Nacional de Vías, 2009), Por ello en el caso de hablar de periodos de retorno de 100 años, se entiende que es el evento máximo que se planea sucederá en un rango de 100 años .Estos caudales suelen ser de gran importancia en el diseño de obras hidráulicas como alcantarillas, Box Culvert y puentes.

**4.5 Cobertura vegetal:** La "Cobertura" de la tierra, es la cobertura (bio) física que se observa sobre la superficie de la tierra (Di Gregorio, 2005), en un término amplio no solamente describe la vegetación y los elementos antrópicos existentes sobre la tierra, sino que también describen otras superficies terrestres como afloramientos rocosos y cuerpos de agua. En términos puntuales se describe la cobertura como la unidad delimitable que surge a partir de un análisis de respuestas espectrales determinadas por sus características fisionómicas y ambientales, diferenciables con respecto a la unidad próxima (IDEAM, 1997).

## **5. Metodología**

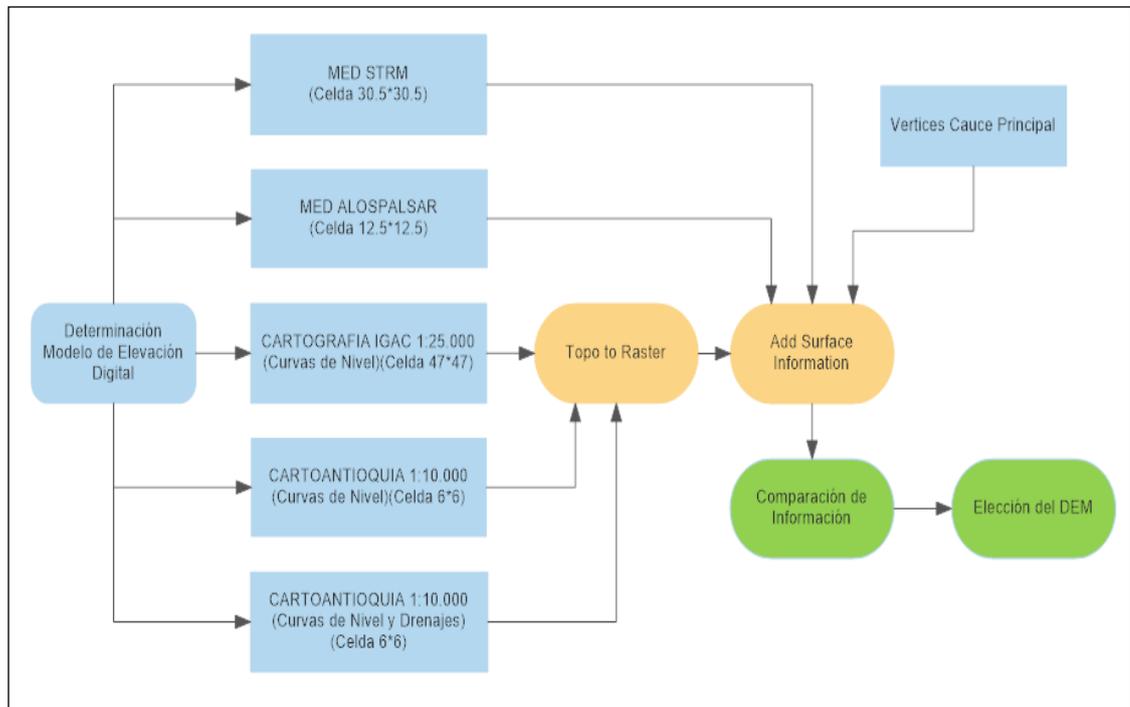
### **5.1 Consolidación de la información base**

#### **5.1.1 determinación de Modelo de Elevación digital MED:**

La modelación espacial de las condiciones del entorno hidrológico e hidrogeológico se desarrolla a partir de la información cartográfica básica que permite en principio la generación del MDE y a partir de él, se derivan los diferentes procesos asociados a la delimitación de cuencas superficiales y subterráneas. (González Maya, 2012). Por ello para la elección de los datos para generar el MDE del terreno en la zona de estudio, se analizaron diferentes fuentes como lo realizó el (Instituto Antioqueño de Inviestengación, 2017) a través de la cual se toman los vértices del cauce principal de la cuenca y los datos de elevación de cada una de las fuentes mediante la herramienta Add Surface Information y se analiza cuál de los modelos representa el mejor comportamiento altitudinal para la red de drenaje como se muestra en la Figura 1.

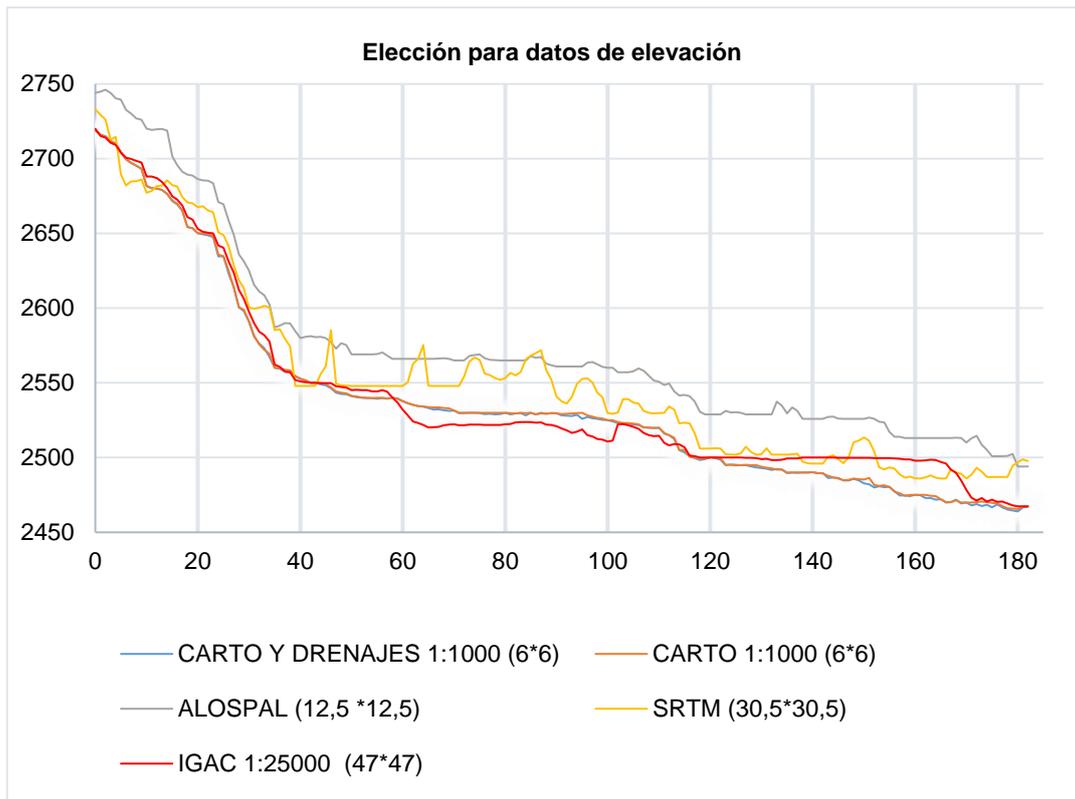
Para las fuentes de datos que poseían curvas de nivel se procedió a generar con la herramienta Topo to Raster el MED, el cual es un método para interpolar los valores de elevación mientras se imponen restricciones que aseguran una estructura de drenaje conectado y la correcta representación de crestas y arroyos a partir de los datos de entrada en contornos (Valdés Quintero, 2018); para la misma zona de estudio y determinando un tamaño de celda de acuerdo a la ecuación  $\Delta s = A/2\sum L$  (Hengl &

Evans, 2009), donde el área de estudio posee un valor de: 42,25 Km<sup>2</sup> y la sumatoria de la longitud de las curvas era el valor variable.



**Figura 1.** Proceso de elección datos MED.

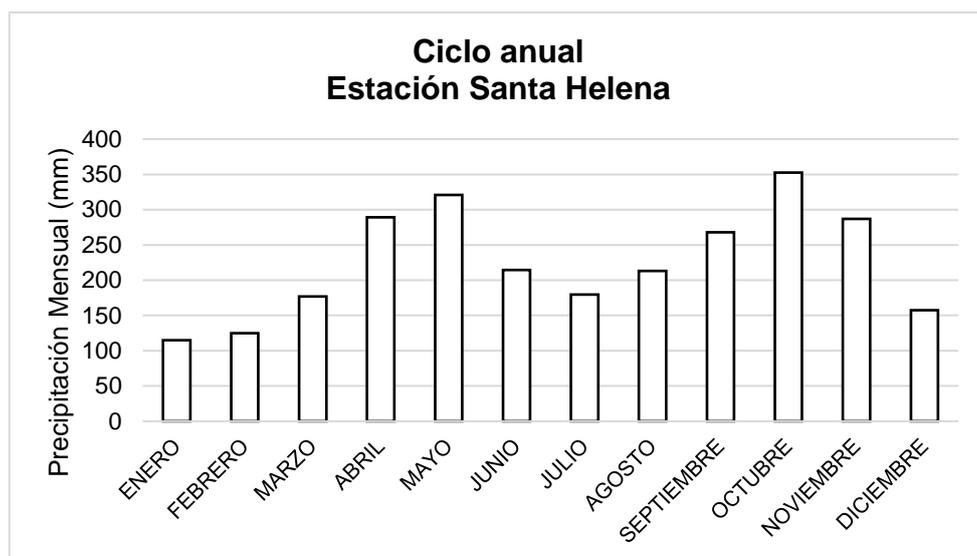
El modelo de elevación generado a partir de la fuente de datos Cartoantioquia, 2010 1:10000 con curvas de nivel y la red drenajes, fue el que produjo la representación más acorde y suavizada del terreno. Siendo la fuente del SRTM, la que presentó la mayor cantidad de irregularidades y peor modelación del drenaje principal, el Alos Palsar fue la fuente con los valores de altura más alejado del promedio, mientras que la fuente del IGAC 1:25000, a pesar de tener el tamaño de celda más grande (47m), generó una de las representaciones con menor cantidad de irregularidades, aunque con desfases en ciertos sectores respecto a los valores de altura, finalmente la fuente de datos Cartoantioquia 1:10000 solo con las curvas de nivel genera un adecuado trazo del drenaje principal, que es solo mejorado en la versión con el dato de las polilíneas de la red de drenaje, ya que suaviza aún más estas irregularidades del terreno (Figura 2).



**Figura 2.** Comparativa datos de Elevación.

### **5.1.2 Datos de precipitación:**

Para la obtención de los datos de precipitación es necesario determinar las estaciones de medición de influencia, con datos disponibles dentro del catálogo del IDEAM, para la cuenca que tiene como punto de cierre la zona identificada como las palmas (X:838955,12 y Y: 1172467,01); se empleó la herramienta de polígonos Thiessen y Allocation mediante la cual se determinó que la cuenca tenía como única estación con datos de precipitación, la estación STA HELENA [27010810] a 2550 msnm, la cual fue entregada con una serie de tiempo de septiembre de 1970 hasta septiembre de 2017, debido a que el IDEAM posee un atraso en el procesamiento de su información. El dato solicitado posee información de precipitación mensual máxima de 24 H, valores número de días mensuales de precipitación y precipitación total mensual.



**Figura 3.** Ciclo Anual mensual estación Santa Helena.

A partir del dato de precipitación total mensual es posible observar que se tiene una precipitación promedio mensual de 225 mm y anual de 2541 mm (Figura 3), que los periodos en los cuales se presentan los mayores picos de pluviosidad son abril-junio y agosto-noviembre, siendo la época más seca el periodo de diciembre-febrero, información que sirvió de insumo base para la búsqueda inicial de las imágenes satelitales que tuvieran la menor cantidad de nubosidad posible.

### **5.1.3 Cartografía Base:**

Se empleó como cartografía base la que se encuentra despoblada en el IGAC con escala 1:25000, en la cual se pueden obtener elementos como cabeceras municipales, límites y demás cartografía necesaria para el análisis y mapas.

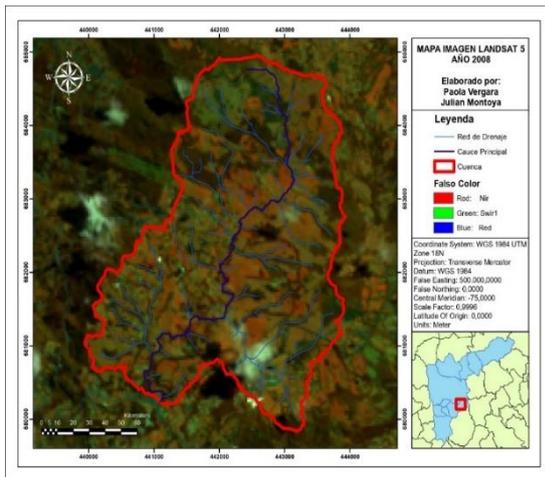
### **5.2 Procesamiento de imágenes raster.**

El proceso para la determinación de las coberturas inicia con la obtención de imágenes satelitales. Se utilizó una imagen del satélite Landsat 5 del 16 de Junio del 2008 disponible en la base de datos del servicio geológico de Estados Unidos (USGS, 2018) y una imagen Sentinel 2 del 07 de agosto 2018 disponible en Copernicus Open Access Hub (Copernicus, 2018). Nivel 1 de procesamiento lo cual consiste en la

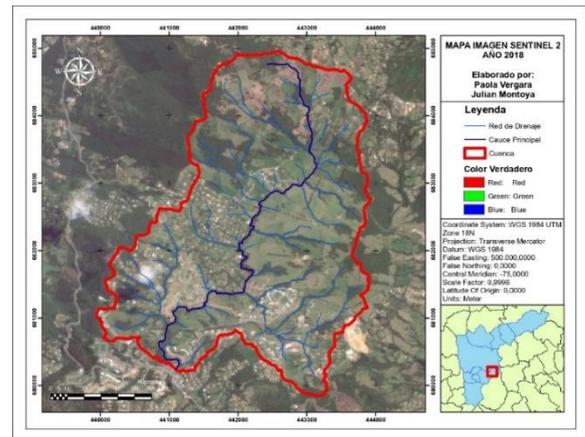
transformación de la imagen satelital en una proyección ortogonal para eliminar la inclinación de los elementos por efecto del relieve (IDEAM, 2019).

Con los valores de reflectividad, apoyados en diferentes combinaciones entre bandas y con la determinación de diferentes índices, lo que se busca es convertir dichos valores en tipos de coberturas del suelo. El proceso consiste en realizar una clasificación supervisada aprovechando el comportamiento de las coberturas del suelo en cuanto a la reflectividad, por ejemplo, se presenta una mayor reflectividad de las nubes en todas las bandas mientras que la vegetación presenta una menor reflectividad en el azul y el rojo, pero relativamente alta en el infrarrojo cercano. Utilizando un clasificador de máxima verosimilitud y determinando regiones o polígonos de interés, el software lo que hace es crear grupos de píxeles con valores similares en el resto de la imagen. Para esto nos apoyamos de combinaciones de color verdadero, falso color y el índice de vegetación (NDVI).

Para la imagen Landsat 5 del año 2008 (Figura 4), se realizó una corrección atmosférica con el propósito de convertir los valores que trae por defecto la imagen al ser descargada, a una escala radiométrica común. Para este proceso se utilizó un modelo propuesto por (Chávez, 1988), denominado “Corrección atmosférica y radiométrica según el modelo mejorado de objeto negro”. Es importante realizar esta corrección ya que la cantidad de energía que llega a la superficie terrestre cambia, esto debido a diferentes factores como por ejemplo el ángulo de incidencia, distancia del sol a la tierra, las condiciones atmosféricas, entre otros. Lo cual hace que la energía reflejada por los objetos no siempre sea igual y nos lleva a concluir que el objeto está cambiando, pero en realidad lo que está cambiando es la energía que llega a este y los objetos permanecen constantes. Este procedimiento fue desarrollado en un código en el lenguaje de programación Python. La corrección atmosférica sólo será aplicada a la imagen Landsat 5 ya que la imagen correspondiente al satélite Sentinel 2 (Figura 5) posee un mayor nivel de procesamiento donde ya se incluye esta corrección.

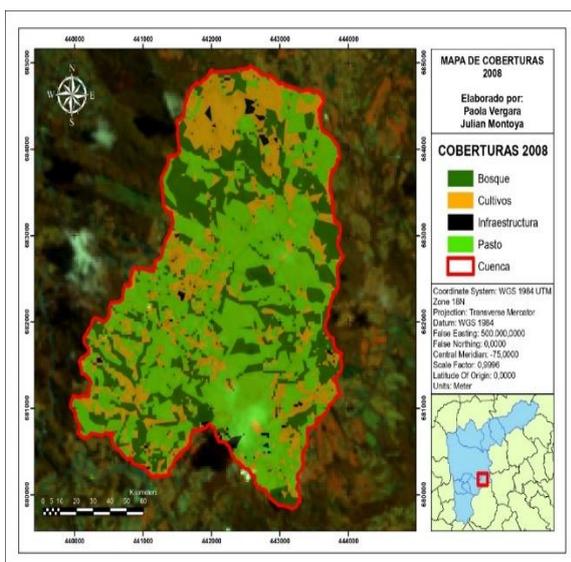


**Figura 4.** Imagen Satelital LANDSAT 5 para el año 2008.

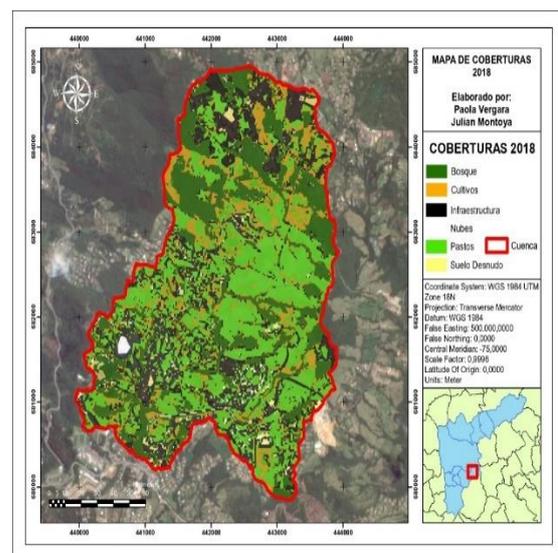


**Figura 5.** Imagen Satelital SENTINEL 2 para el año 2018.

Es un proceso delicado y dispendioso donde luego de la creación de los polígonos de interés se les debe asignar el tipo de cobertura y así ir formando una tabla de contenido la cual será el insumo de la herramienta de clasificación por máxima verosimilitud. Una vez realizada esta primera clasificación con los diferentes grupos de coberturas, se analizó el mapa buscando zonas de acierto y desaciertos con el fin de realizar las correcciones requeridas realizando una y otra vez este mismo proceso. Finalmente se realizó una operación de reclasificación con el fin de simplificar los polígonos de interés creados a las clases de coberturas presentes en la zona de estudio. El resultado final del proceso de Clasificación puede ser observado tanto en las Figuras 6 y 7.



**Figura 6.** Coberturas para el año 2008.

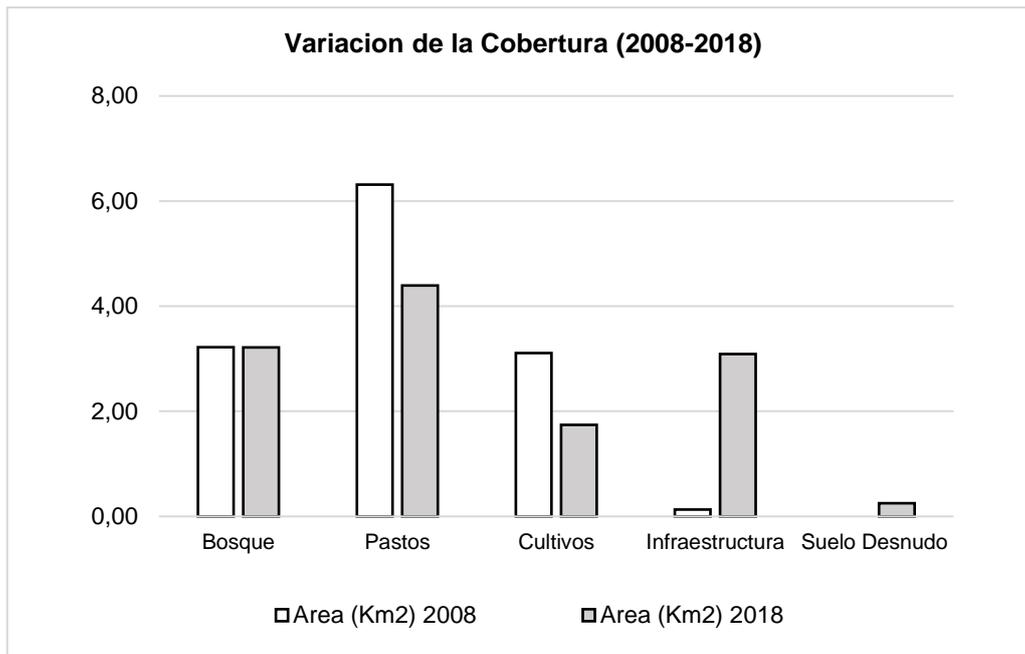


**Figura 7.** Coberturas para el año 2018.

Los resultados entre la reclasificación 2008 y 2018 muestran variaciones en casi todas las coberturas, como se muestra en la Figura 8 y en la Tabla 1, en las cuales se puede observar que la cobertura tipo bosque, fue la que menor variación tuvo, mientras que la infraestructura ha presentado un crecimiento abrupto hasta alcanzar un alto porcentaje de crecimiento; respecto a las coberturas vegetales como pastos y cultivos han presentado un descenso muy superior al que presentó la cobertura tipo bosque, es de resaltar que al tratarse de una zona rural la disminución en los cultivos, puede dar razón de un cambio en las actividades económicas de la zona o en una variación de la cobertura tipo cultivo por producción agrícolas en invernaderos como ocurre en (Camacho Sanabria, Camacho-Sanabria, Balderas Plata, & Sánchez López, 2017) y que se un mayor enfoque en el urbanismo; finalmente otro de los cambios es que mientras en el 2008 no se presentaba la cobertura tipo suelo desnudo, esta se encuentra presente en el año 2018, aunque en un porcentaje reducido respecto a los otros tipos.

<b>Comparativo de Cobertura</b>			
<b>Cobertura</b>	<b>Área (Km2) 2008</b>	<b>Área (Km2) 2018</b>	<b>Porcentaje de variación</b>
Bosque	3,22	3,22	-0,1
Pastos	6,31	4,39	-30,4
Cultivos	3,11	1,74	-43,9
Infraestructura	0,13	3,09	2256,6
Suelo Desnudo	0,00	0,25	

**Tabla 1.** Áreas de coberturas para los años 2008 y 2018.

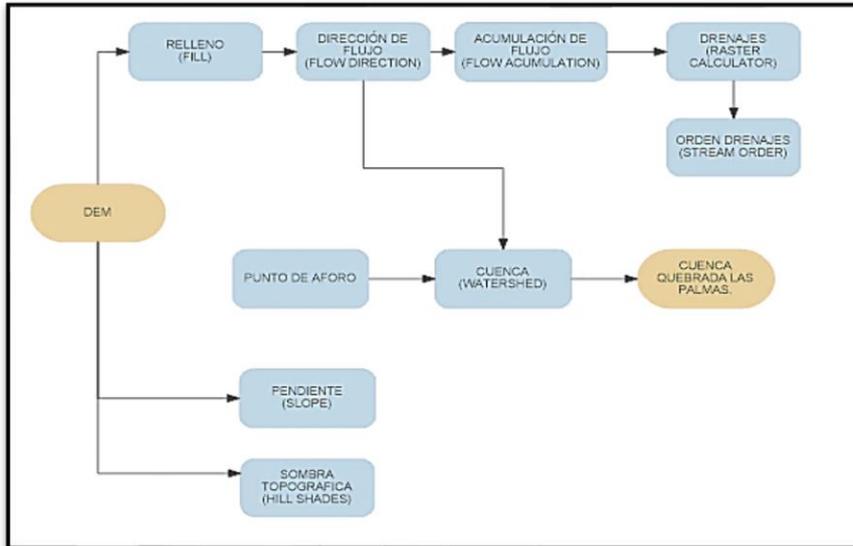


**Figura 8.** Variación de Coberturas entre los años 2008 y 2018.

### **5. 3 Análisis de Cuenca**

#### **5.3.1 Parámetros Morfométricos y Morfológicos**

A partir de la determinación del modelo de elevación digital se realizó el cálculo de los parámetros morfométricos y morfológicos (Tabla 2) utilizando el software ArcGIS 10.6.1, siguiendo el modelo que se muestra en el Figura 9 y empleando un Model Builder para la determinación de además de la cuenca, la red de drenajes, su orden por los métodos propuestos por Strahler (1957) y Shreve (1966) la cual se emplea más actualmente y se muestra en la Figura 10, centroide de la cuenca y demás cálculos necesarios como área, perímetro, pendiente(Figura 11) y longitud para el análisis hidrológico.



**Figura 9.** Modelo hidrológico para obtención de la Cuenca Las Palmas.

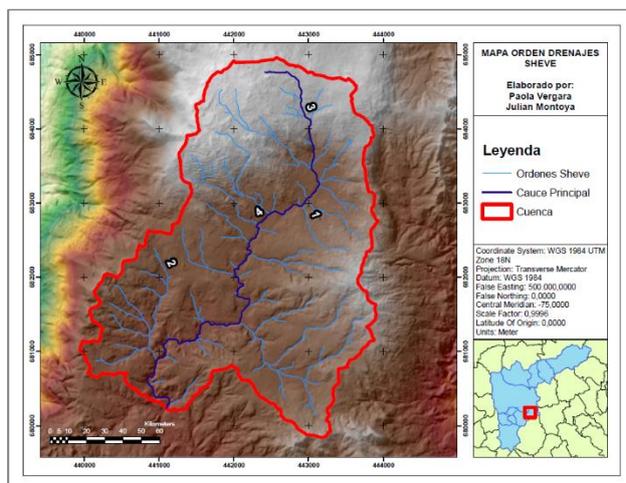
Los datos obtenidos en la Tabla 2 dan razón de la tendencia de comportamiento de la cuenca de la quebrada Las Palmas; el valor del índice de compacidad propuesto por Gravelius, el cual muestra que la cuenta presenta una mediana tendencia a presentar avenidas; de acuerdo al factor de forma tienen baja probabilidad a presentar inundaciones ya que el resultado es un valor alejado del valor de 1 y La densidad de drenaje por tratarse de un valor superior a 0,5 indica eficiencia en la red de drenaje (Montoya M. & Patiño Q., 2001).

PARÁMETRO MORFOMETRICOS		MAGNITU D
Área de la cuenca	(km <sup>2</sup> )	12,79
Longitud Cauce Principal	(km)	7,83
Perímetro cuenca	(Km)	18,36
Cota Superior Cauce Principal	(m)	2741,06
Cota Inferior Cauce Principal	(m)	2463,39
Pendiente promedio del Cauce Principal	(%)	3,54
Longitud Cauce principal al centroide	(km)	4,07
Longitud al punto más alejado	(km)	8,33
Cota Superior Cuenca	(m)	2800,02

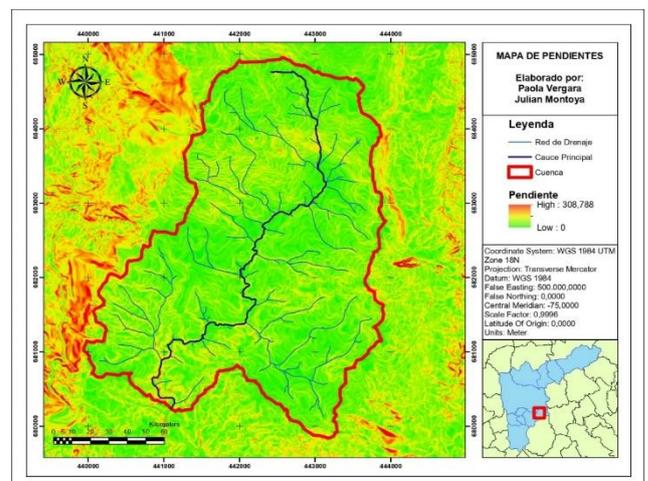
PARÁMETRO MORFOMETRICOS		MAGNITU D
Cota Inferior Cuenca	(m)	2463,28
Pendiente promedio de la Cuenca	(%)	17,00
Longitud de los drenajes	(Km )	45,52
Longitud cuenca	(Km )	5,05
Orden Shreve		4,00
Orden Strahler		96,00

PARÁMETRO MORFOLOGICOS		MAGNITU D
Índice de Compacidad Kc	Adim	1,45
Factor de forma	Adim	0,21
Densidad de drenaje	1/km	3,56

**Tabla 2.** Datos morfológicos y morfométricos de la cuenca.



**Figura 10.** Variación altitudinal Cuenca Las Palmas y Orden red de drenaje.



**Figura 11.** Pendientes Cuenca Las Palmas.

### 5.3.2 Tiempo de Concentración.

El tiempo de concentración se define como el tiempo necesario desde el inicio de la precipitación, para que toda la cuenca contribuya al sitio de aforo y se determina a partir de diferentes métodos empíricos usadas regularmente y recopiladas en el manual de (Ministerio de Transporte-Instituto Nacional de Vías, 2009), en este estudio se analizaron las fórmulas de Témez, Kirpich, Williams, Giandotti, S.C.S, Johnstone y Cross, Ventura – Heras, Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, Williams y Chow, con la finalidad de calcular diferentes tiempos de concentración y elegir un promedio de los valores, descartando los valores extremos como el de Chow (Figura 12), obteniendo como resultado final el valor de 1,6 horas o 96 min de estimación de lluvia de diseño.

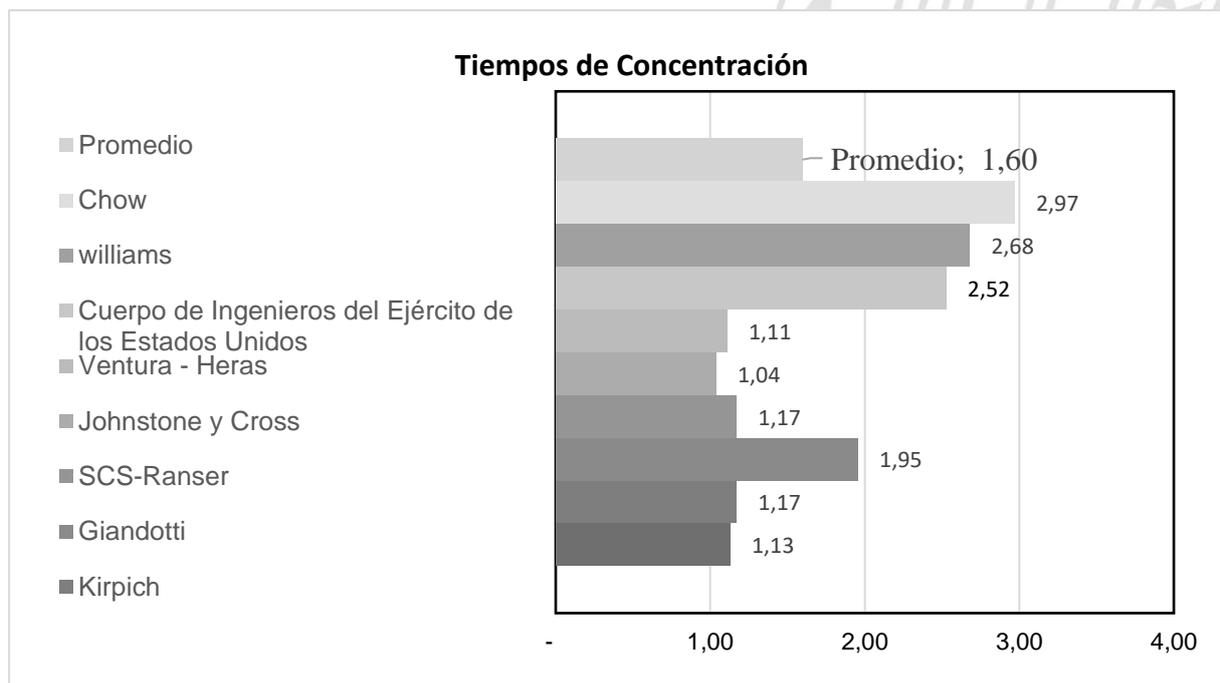


Figura 12. Tiempo de Concentración de la Cuenca.

### 5.3.3 Curva de Intensidad, Duración y Frecuencia.

A partir del dato de precipitación mensual máxima diaria y número de días con lluvia al año de la estación Santa Helena y utilizando los parámetros descritos por

(Diaz Granados & Vargas, 1998) para la región Andina (Tabla 3), se elaboraron las Curvas IDF las cuales constituyen una de las herramientas más utilizadas en la estimación de caudales de diseño de obras de drenaje en vías y alcantarillados pluviales en zonas urbanas y rurales, así como en la estimación de las tormentas de diseño en sitios donde, debido a la falta de información de caudales, es necesario recurrir a los modelos lluvia-escorrentía para el cálculo de los caudales máximos (Pulgarín Dávila, 2009). Los valores de intensidad para el periodo de retorno de 100 años se muestran en la Figura 13 , con el cual se elige la intensidad de 96 de minutos que es igual 57,11 mm/hr.

Parámetros Región Andina					
A	B	C	d	e	f
1,61	0,19	0,65	0,75	-0,15	0,08

Tabla 3. Parámetros Región Andina.

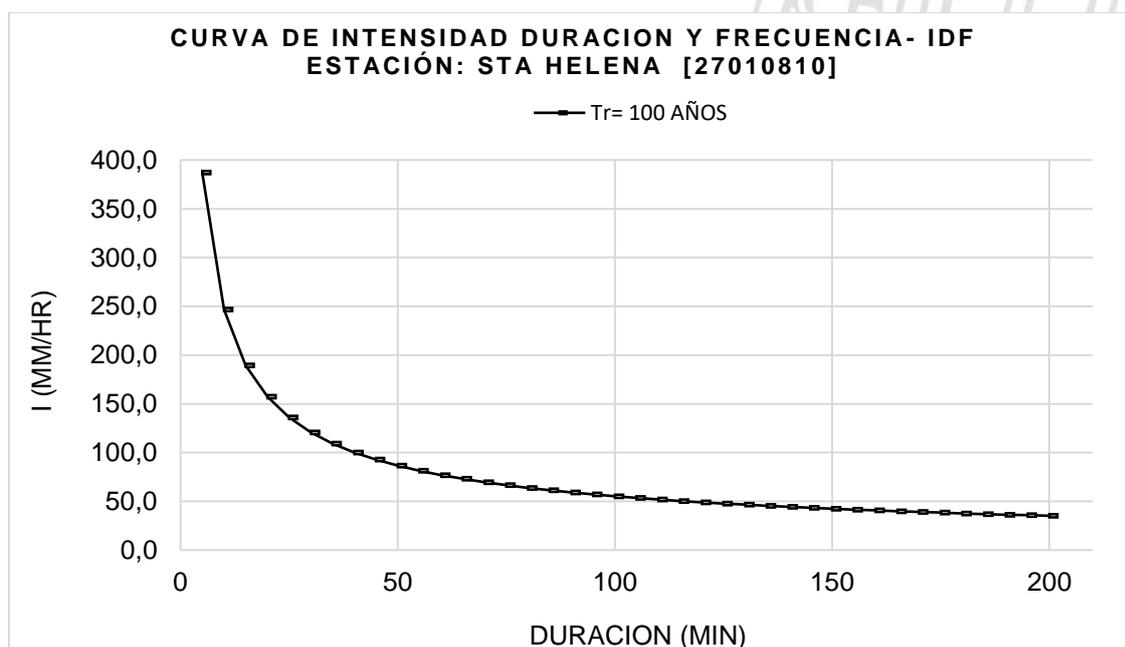
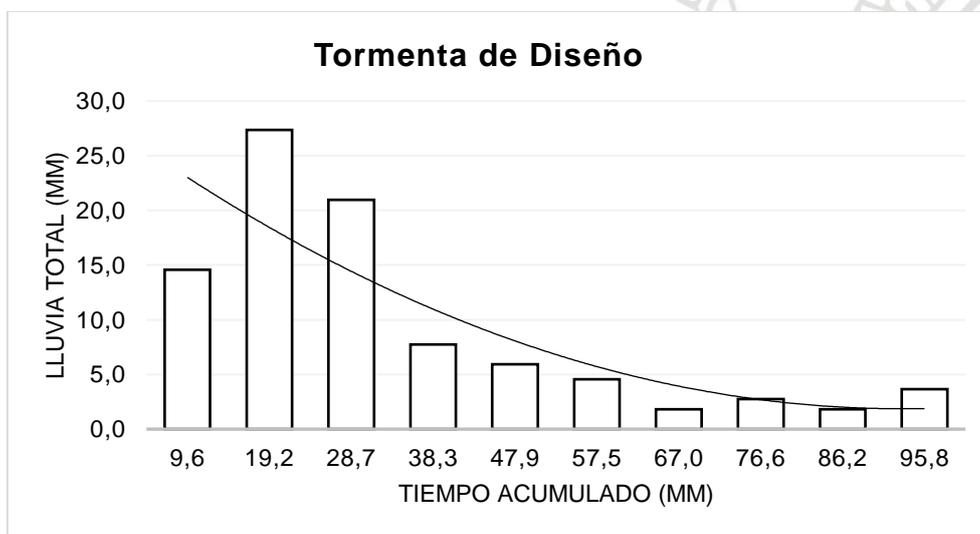


Figura 13. Curva IDF, Estación Santa Helena.

### 5.3.4 Lluvia de Diseño.

Para realizar el cálculo de los caudales es necesario generar la distribución temporal de la lluvia en este caso empleando el diagrama elaborado por Huff (1967)

para una lluvia de probabilidad de excedencia del 50%; Huff estudio fuertes tormentas de tres horas de duración y superiores, registradas en zonas que abarcan áreas de hasta 103600 hectáreas de la parte central de Illinois y encontró una relación entre la duración de la tormenta y el cuartil donde ocurre la mayor parte de la precipitación (Balbalastre Soldevila, 2018); esta relación le permitió establecer una clasificación de las tormentas en cuatro tipos de distribuciones (Mays, 2001), en la cual las tormentas de duración menores a 12 horas como es el caso (1,6 h) se emplea la distribución del cuartil I para incrementos del 10 % del tiempo de lluvia (Figura 14) .

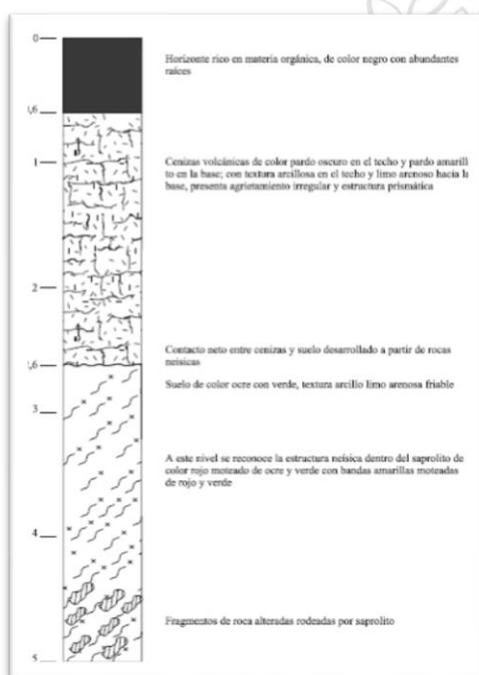


**Figura 14.** Distribución temporal de la lluvia.

### 5.3.5 Cálculo de Numero de Curva

El método de numero de curva fue el elaborado por el Soil Conservation Service SCS, del departamento de Agricultura de los Estados Unidos (NRCS,2009), a partir del cual se calcula el porcentaje de precipitación efectiva que se convierte en escorrentía de acuerdo con el tipo de cobertura y del grupo hidrológico del suelo. Para el presente estudio se toma como referencia los números de curva para escorrentías con antecedentes de humedad II del SCS de 1986 (Chow, Maidment, & Mays, 1988) los cuales se dividen en cuatro diferentes grupos según el grupo hidrológico del suelo, el cual se determinó a partir de la información geológica de la plancha 147 (Medellín Oriental) del (Ministerio de Minas y Energía- Instituto Colombiano de

Geología y Minería, 2005), se levantó un perfil de meteorización (Figura 15); “En la parte superior del perfil se presenta un horizonte de color negro, rico en materia orgánica, con abundantes raíces y restos orgánicos, el espesor varía entre 30 y 70 cm dependiendo de la topografía superficial, hacia la base presenta materia orgánica y ceniza volcánica. Debajo del horizonte orgánico se encuentra un horizonte de cenizas volcánicas, con un espesor variable entre 0,70 y 2 m, de color pardo en el techo y amarillo ocre hacia la parte media y la base, generalmente húmedo y plástico en la parte arcillosa superior, pues hacia la base es limo arenoso, cuando está seco presenta agrietamiento irregular y desarrolla estructura prismática. Macroscópicamente se reconoce cuarzo, vidrio y algunas micas”. Macroscópicamente se reconoce cuarzo, vidrio y algunas micas”.



**Figura 15.** Perfil de Suelo Vía las Palmas.

De acuerdo con este tipo de perfil se elige grupo hidrológico del suelo el tipo D los cuales son suelos con infiltración muy lenta cuando están muy húmedos con tasa de transmisión de agua muy lenta; esta clasificación fue propuesta inicialmente por Musgrave en 1955 (Durán-Barroso & Gonzales, 2015). Consiste en suelos arcillosos con alto potencial de expansión, con nivel freático alto permanente, con estrato arcilloso superficial, con infiltración muy lenta debido a sales o álcalis y poco profundos

sobre material casi impermeable. Los valores de CN se registran tanto en la Tabla 4 como en la 5, y de acuerdo con estos se determina un CN ponderado teniendo en cuenta el porcentaje de área para cada uno de los tipos de coberturas y posteriormente se realiza la corrección de los valores de CN ponderado a un antecedente de humedad III para suponer un estado de saturación máximo en el terreno, bajo el enfoque de obtener caudales máximos. Se obtiene un valor de CN promedio para el año 2008 de 89 y de 92 para el año 2018, lo cual ocurre a razón del alto crecimiento de la infraestructura.

Tipo de Cobertura	Porcentaje del Área	CN	Ponderación
Bosque	25%	79	19,9
Pasto	49%	74	36,6
Cultivos	24%	80	19,5
Infraestructura	1%	96	1,0
		<b>CN ponderado</b>	<b>76,9</b>
		CN Final	77,0
		<b>CN Corregido AMC III</b>	<b>89,0</b>

**Tabla 4.** Determinación de CN para el año 2008.

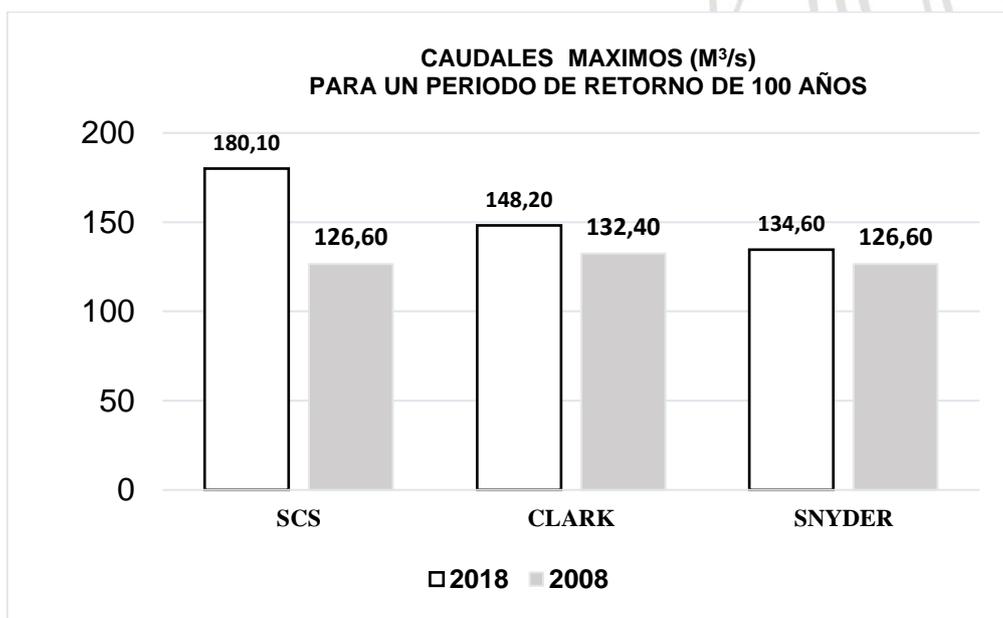
Tipo de Cobertura	Porcentaje del Área	CN	Ponderación
Bosque	25%	79	19,9
Pastos	34%	74	25,5
Cultivos	14%	80	10,9
Infraestructura	24%	96	23,2
Suelo Desnudo	2%	91	1,8
		<b>CN ponderado</b>	<b>81,3</b>
		CN Final	81,0
		<b>CN Corregido AMC III</b>	<b>92,0</b>

**Tabla 5.** Determinación de CN para el año 2018.

### 5.3.6 Cálculo de Caudales Simulación HEC-HMS

En la quebrada Las Palmas al punto de aforo no existe una historia de registro de caudales continuos, por tal motivo, fue necesario utilizar algunas técnicas de uso frecuente en hidrología, tal como hidrógrafas unitarias sintéticas (Snyder, Soil Conservation Service, Clark, el método racional) que permiten establecer correlaciones empíricas entre las características de la cuenca y la hidrógrafa unitaria de respuesta. Las componentes principales que definen cada hidrógrafa son: el tiempo de rezago, el tiempo de concentración, el tiempo base y el tiempo al pico, dichas

componentes son estimadas en función de parámetros morfométricos de la cuenca tales como el área, la pendiente promedio, cota máxima, cota mínima, distancia al centroide, etc. variando la forma de cálculo entre diferentes metodologías (Rojo Hernandez, s.f.). Para este caso en mención no se tiene en cuenta los datos obtenidos a través del método racional que por el tamaño de la cuenca de 12,79 Km para el cual la literatura limita su uso para cuencas entre valores 0,65 y 12,5 Km<sup>2</sup>, siendo lo recomendado según el Manual de Drenaje del INVIAS un valor como máximo de 2,5 Km<sup>2</sup>. El HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System) es un programa de simulación hidrológica tipo evento, lineal y semidistribuido, desarrollado para estimar las hidrógrafas de salida en una cuenca o varias subcuencas (caudales máximos y tiempos al pico) a partir de condiciones extremas de lluvias, aplicando para ello algunos de los métodos de cálculo de hietogramas de diseño, pérdidas por infiltración, flujo base y conversión en escorrentía directa. (GIREH, s.f.). Al realizar la simulación por los métodos mencionados anteriormente, utilizando el HEC-HMS 4.2.1, se observa que el mayor valor de caudal se obtiene en el método SCS para el año 2018, mientras que este y el método de Snyder obtienen el menor valor para el año 2008 (Figura 16). Los caudales para el año 2008 tienen menor variación entre los métodos, que los caudales para el año 2018 los cuales muestran la sensibilidad de los diferentes métodos a los cambios de coberturas.



**Figura 16.** Caudales Máximos para cada uno de los métodos.

## 6. Resultados y discusión:

Luego de consolidar los caudales, como resultado de los diferentes escenarios evaluados, se puede observar los efectos de los cambios de cobertura identificados, para cada uno de los métodos analizados, las estimaciones de caudal tuvieron un aumento entre un 6 y 42,3%, siendo el método de SCS el más sensible ante los cambios de Cobertura y el método SNYDER el que menos sensibilidad obtuvo, como se muestra en la Tabla 6.

Aumento de Caudal		
Método	m3	%
SCS	53,50	42,26
CLARK	15,80	11,93
SNYDER	8,00	6,32

**Tabla 6.** Aumentos presentados en los caudales hallados.

Los caudales hallados en la Figura 16 describen los eventos máximos para los próximos 100 años, pero es importante observar que en tan solo en un periodo de 10 años, se modificaron las condiciones de cobertura de tal manera que los caudales máximos ya habían aumentado en una magnitud superior al 6,3 %, ósea en tan solo un 10% de la vida útil de las obras que pudieron ser diseñadas inicialmente para este periodo de retorno, ya se tenían valores muy superiores al inicial; es de aclarar que siempre se deben tener proyecciones de las variaciones de las coberturas con el fin de tener en cuenta estos posibles cambios de impermeabilización del terreno, pero difícilmente se puede prever un crecimiento como el que ha tenido la infraestructura, sobre todo en una zona rural. Este aumento en los eventos máximos para 100 años puede indicar la posibilidad de que a futuro se presenten eventos extremos, nunca antes presentados en la zona, a pesar de la poca tendencia de la cuenca a tener crecientes y avenidas torrenciales abruptas, como producto de los cambios de cobertura, en especial debido al crecimiento de la infraestructura que ocasiona una impermeabilización del terreno.

## **7. Conclusiones y recomendaciones.**

Es importante considerar las condiciones actuales del país, al no contar con un programa que se preocupe por la obtención de información satelital se debe recurrir a lo que hay disponible en el medio lo cual se dispone por diferentes fuentes. Las imágenes satelitales más antiguas poseen una resolución de 30 m, las imágenes actuales poseen una resolución más detallada, aunque no en todas sus bandas (10 m). Estas diferencias involucradas en el procesamiento influyen en el resultado lo cual también explica los cambios tan bruscos que fueron obtenidos. Además, al momento de relacionar otras variables importantes para el estudio nos encontramos con poca disponibilidad de información por parte de los organismos encargados de estas mediciones, sumándole nuestra ubicación en el espacio ya que al encontrarnos en el trópico tenemos una gran desventaja porque la mayoría del año se encuentran nubes sobre nuestro territorio lo cual dificulta la obtención de buenas imágenes para el procesamiento.

A partir del análisis de datos de hace 10 años atrás se evidencia un crecimiento en diferentes aspectos que involucran cambios de coberturas, esta tendencia seguirá por lo que es importante que sea tenida en cuenta al momento de realizar proyecciones en cuanto a las intervenciones que estén próximas a desarrollar en el territorio, buscando una planificación más acertada y en procura de preservar los recursos más importantes. El aumento de las áreas urbanizadas y pavimentadas hace que se genere una mayor escorrentía directa con poca infiltración que implica un aumento en los caudales máximos que transitan por los canales y cauces de las corrientes de agua. Los cambios presentados en los diferentes escenarios de cobertura de la superficie incurren en cambios considerables en los caudales de una cuenca, sin embargo, es posible una estabilización de estos si se lograra una recuperación en la cobertura terrestre (Valdés, J., Arturo, C., Castro, C., & Escobar, J, 2017).

En Colombia existen diferentes leyes que buscan proteger los recursos naturales y los servicios ecosistémicos que brinda la naturaleza, se debe procurar el cumplimiento de estas con el fin de frenar la acelerada intervención del hombre sobre el territorio ya que se evidencia un deterioro en ecosistemas más importantes como Bosques, y un incremento en monocultivos de grandes extensiones, vías, infraestructura, entre otros, lo cual hace más vulnerable el ambiente disminuyendo su resiliencia.

El presente estudio se enfocó en la obtención de los caudales máximos para periodos de retorno de 100 años por métodos tradicionales, ya que actualmente son utilizados como un factor de seguridad en muchas estructuras, el cual como se observo puede presentar grandes variaciones en cortos periodos de tiempo respecto a su vida útil, de acuerdo con el cambio en las prácticas de ordenamiento humanas; este análisis podría ser replicado para un periodo superior como el de 500 años y observar la influencia de estas variaciones coberturas en un periodo macro, o incorporar variables como el cambio climático y su incidencia sobre los caudales máximos, así como los cambios en la dinámica hidrológica que puede ocasionar la impermeabilización del terreno como la tasa de evapotranspiración y la formación de la nubosidad.

## **8. Revisión Bibliográfica**

Avilés, A., Solera, A., & Paredes, J. (2016). Análisis Del Rendimiento De Sistemas Hídricos En Desarrollo Mediante El Acople De Modelos Estocásticos Hidrológicos Y Optimización De Redes De Flujo. Ingenius, (15), 48. <https://doi.org/10.17163/ings.n15.2016.05>

Aronoff S. 2005. Remote sensing for GIS managers. New York,USA. ESRI Press. 487 p.

Balbalastre Soldevila, R. (2018). 21. Análisis Comparativo De Metodologías De Cálculo De Tormentas De Diseño Para Su Aplicación En Hidrología Urbana.

- Burbano-Girón, J., Domínguez, E., & Barón-Ruiz, O. (2016). Análisis de la relación entre variables morfométricas y biofísicas en la estimación de características probabilísticas para la oferta hídrica superficial en Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 40(156), 514. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.291>
- Camacho-Sanabria, R., Camacho-Sanabria, J. M., Balderas-Plata, M. A. y Sánchez-López, M. (2017). Cambios de cobertura y uso de suelo: estudio de caso en Progreso Hidalgo, Estado de México. *Madera y Bosques*, 23(3), 39-60. doi: 10.21829/myb.2017.2331516
- Cancelo-González, J., Álvarez Enjo, M., & Díaz-Fierros, F. (2013). Influencia de un incendio en la hidrología de una pequeña cuenca del NO de España. In *FLAMMA* (Vol. 4).
- Castro-Castro, C., Durango-Vanegas, C. (2009). Administración del patrimonio cultural e histórico utilizando herramientas de Sistemas de Información Geográfica. Caso de estudio Medellín. Medellín, Colombia.
- Chávez PS Jr (1988) An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment* 24: 459-479.
- Chow, V. T., Maidment, D., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*
- Copernicus. (5 de Octubre de 2018). Copernicus Open Access Hub. Obtenido de <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>
- Di Gregorio, A. 2005. *Sistemas de Clasificación de la cobertura de la tierra. Conceptos de clasificación y manual para el usuario*. FAO, Roma. 226 pp
- Díaz Granados, M., & Vargas, R. (1998). *Curvas Sintéticas Regionalizadas de Intensidad-Duración para Colombia*.
- Díaz, Á., Mercado, T. (2017). Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí ( Córdoba , Colombia ) mediante teledetección y SIG. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(2), 452-470.

- Durán-Barroso, P., & Gonzales, J. (2015). Variabilidad de los grupos hidrológicos del método del número de curva del NRCS (NRCS-CN).
- Eastman R. 2006. Idrisi Andes guide to GIS and image processing. Worcester, USA. Clark University. 328 p.
- Forkuor, G., & Maathuis, B. (2012). Comparison of SRTM and ASTER Derived Digital Elevation Models over Two Regions in Ghana – Implications for Hydrological and Environmental Modeling. In T. Piacentini & E. Miccadei (Eds.), Studies on Environmental and Applied Geomorphology (pp. 219–240). Rijeka, Croatia: InTech
- Galeana-Pizaña, J. M., Corona-Romero, Nirani. & Ordóñez-Díaz, J. A. B. (2009). Análisis dimensional de la cobertura vegetal - Uso del suelo en la cuenca del Río Magdalena. *Ciencia Forestal en México*. 34(105): 137-158.
- García-Ruiz, J. M., Puigdefábregas-Tomás, J., & Creus-Novau, J. (1980). Influencia de las características físicas de las cuencas hidrográficas en la frecuencia e intensidad de crecidas. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 6(0), 19. <https://doi.org/10.18172/cig.879>
- GIREH, U. N.-U.-I. (s.f.). *Caja de Herramientas de hidrología para POMCAS*. Obtenido de <https://sites.google.com/site/hydrotoolbox/herramientas/borrador-herramientas/hec-hms>
- González Maya, F. (2012). Desarrollo de un Modelo Geoespacial para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico. Caso Estudio: El Bajo Cauca Antioqueño . Universidad de Antioquia.
- Hengl, T., & Evans, I. S. (2009). Mathematical and Digital Models of the Land Surface. In T. Hengl & H. I. Reuter (Eds.), *Geomorphometry: Concepts, software, applications* (pp. 31–63). Amsterdam: Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00002-0](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00002-0).

- IDEAM. (16 de Abril de 2019). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/coberturas-nacionales>.
- IDEAM. (1997). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/coberturas-tierra>.
- IDEAM. (25 de Abril de 2019). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/metodologia-corine-land-cover>.
- Instituto Antioqueño de Investigación. (2017). Geoinformática Aplicada con Aprendizaje Basado en Problemas. Medellín.
- Lillesand TM, RW Kiefer, JW Chipman. 2004. Remote sensing and image interpretation. New York, USA. Wiley.763 p.
- Mays, L. W., 2001. Stormwater Collection Systems Design Handbook. HYDROLOGY FOR DRAINAGE SYSTEM DESIGN AND ANALYSIS, Chapter 4. AccessEngineering: McGraw-Hill Professional.
- Ministerio de Minas y Energía- Instituto Colombiano de Geología y Minería. (2005). Geología de la Plancha 147. Medellín, Antioquia.
- Ministerio de Transporte-Instituto Nacional de Vías. (2009). Manual de Drenaje para Carreteras.
- Miranda-Aragón, L., Ibáñez-Castillo, L. A., Valdez-Lazalde, J. R., & Hernández-de la Rosa, P. (2009). Modelación hidrológica empírica del gasto de 100 años de periodo de retorno del Río Grande, Tlalchapa, Guerrero en dos escenarios de uso del suelo. *Agrociencia*, 43(4), 333-344.
- Montoya M., J. J., & Patiño Q., J. E. (2001). Estudio Hidrometeorológico Y Geomorfológico De Diez Quebradas Del Valle De Aburrá. Universidad EAFIT.
- Musgrave GW. 1955. How much of the rain enters the soil? In: *Water Yearbook of Agriculture*, U.S. Department of Agriculture, pp: 151-159.

NRCS. 2009. National Engineering Handbook, section 4, Hydrology, version (1956, 1964, 1971, 1985, 1993, 2004, 2009 ). In: National Engineering Handbook, Engineering Division. US. Department of Agriculture.

Peña-Araya, M. (2007). Correcciones de una imagen satelital ASTER para estimar parámetros vegetacionales en la cuenca del río Mirta , Aisén ASTER satellite image corrections to estimate vegetational parameters on the Mirta river basin , Aisén. Bosque, 28(2), 162-172. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002007000200009>

Perez, P., Cataldo, M., Zema, D., De Vente, J., & Boix-Fayos, C. (2018). Efectos de la revegetación a escala de cuenca sobre el caudal y la evapotranspiración en ambiente mediterráneo. Cuenca del Taibilla (SE de España). Bosque 39(1): 119-129, 2018. doi: 10.4067/S0717-92002018000100119.

Pulgarín Dávila, E. G. (2009). Fórmulas regionales para la estimación de curvas intensidad-frecuencia -duración basadas en las propiedades de escala de lluvia. Universidad Nacional de Colombia.

Rojo Hernandez, J. D. (s.f.). *Estimación de caudales maximos usando hidrogramas unitarios sinteticos y el metodo racional.*

Sahoo, R., & Jain, V. (2018). Sensitivity of drainage morphometry based hydrological response (GIUH) of a river basin to the spatial resolution of DEM data. Computers and Geosciences, 111(October 2017), 78-86. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.10.001>

Schumann, G., Matgen, P., Cutler, M. E. J., Black, A., Hoffmann, L., & Pfister, L. (2008). Comparison of remotely sensed water stages from LiDAR, topographic contours and SRTM. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 63(3), 283–296.

USGS. (5 de Octubre de 2018). science for a changing wold. Obtenido de GloVis: <https://glovis.usgs.gov/>

Valdés Quintero, J. (2018). Desarrollo De Una Metodología De Análisis Espacial Como Soporte A Las Decisiones En La Gestión De Recursos Naturales (Caso de estudio: Evaluación del Riesgo en Laderas de Media y Alta Pendiente, Cuenca La Presidenta, Medellín, Colombia). Universidad de Antioquia.

Valdes, J., Arturo, C., Castro, C., & Escobar, J. (2017). Procesos de Geoprocesamiento en la Espacialización de Servicios Ecosistémicos en Áreas de Interés Local Procesos de Geoprocesamiento en la Espacialización de Servicios Ecosistémicos en Áreas de Interés Local , Caso de Estudio : Cuenca la Presidenta Geoprocessing Management for the Spatialisation of Ecosystem Services in Areas of Local Interest , Case of Study : Cuenca La Presidenta. (March). <https://doi.org/10.21500/20275846.2672>

Velez, J., German, P., Mesa, O., Quintero, F., Hernandez, O., Ramirez, J., & Alvarez, O. (2004). Hidrosig : Un sistema de información geográfica para la gestión de recursos naturales y modelación del medio ambiente. Seminario Internacional La Hidroinformática en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos, 10.