

Caracterización hidrológica de la cuenca media y baja del río Magdalena.

Manuel Alfredo Bogotá Castillo

Sergio Andrés Castellanos Osorio

Universidad Antonio Nariño

Facultad De Ingeniería Civil Y Ambiental

Ingeniería Civil

Bogotá D.C

2020

Caracterización hidrológica de la cuenca media y baja del río Magdalena

Manuel Alfredo Bogotá Castillo

Sergio Andrés Castellanos Osorio

Proyecto de investigación presentado para asumir el título de

INGENIERO CIVIL

Director de tesis

Dr. Juan Pablo Rodríguez Rincón

Universidad Antonio Nariño

Facultad De Ingeniería Civil Y Ambiental

Ingeniería Civil

Bogotá D.C

2020

PÁGINA DE ACEPTACIÓN.

Firma Jurado 1

Firma Jurado 2

Bogotá D.C, Mayo de 2020

Dedicatorias y Agradecimientos.

En primer lugar, doy gracias a DIOS, por darme fortaleza y persistencia durante mi carrera, al ser más maravilloso mi madre, mi motivación y por estar hay incondicionalmente desde el primer día hasta hoy, a mi papa “taita”, y demás familia. Agradezco a la universidad Antonio Nariño por brindarme la oportunidad de alcanzar este logro, a los docentes en especial al doctor Juan Pablo Rodríguez por su disposición, enseñanza a lo largo de este proceso y el aporte para esta investigación, a la profe Alexandra Morales por sus conocimientos y atención, a los compañeros de clase especial a los del grupo “los antisísmicos” por compartir momento agradables dentro y fuera de la institución, a quienes me dieron trabajo para adquirir los recursos necesarios, son tantas persona que aportaron su granito de arena, en especial a los que nombre Gracias.... Atentamente: Alfredo Bogotá.

Este logro está dedicado exclusivamente a DIOS y mis padres Luz Dary Osorio y Ángel Castellanos por todos los sacrificios que tuvieron que hacer para que pudiera cumplir uno de las muchas metas que tengo para mi vida, a cada persona que confió en mi como Hermanos, tíos, demás familiares, amigos de infancia y compañeros de universidad que vieron muchas habilidades y aportaron para mi crecimiento académico y como persona. Agradezco al Doctor Juan Pablo Rodríguez más que mi tutor un amigo que nos incentivó a realizar un proyecto de investigación y que estuvo apoyándonos y teniéndonos mucha paciencia desarrollando nuestra tesis. Agradezco a todos los docentes de la universidad Antonio Nariño que son excelentes personas y transmitieron sus conocimientos para nuestro aprendizaje, la señora de la bolirana, la señora de las empanadas. Gracias por esta bonita oportunidad, Me siento orgulloso de ser Egresado de esta Universidad. Atentamente Sergio Castellanos.

Tabla de contenido.

RESUMEN.	7
ABSTRACT.	8
LISTA DE IMÁGENES	9
1. INTRODUCCIÓN	1 ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
2. OBJETIVOS	122
2.1 GENERAL	122
2.2 ESPECÍFICOS	122
3. MARCO TEÓRICO	133
3.1 MODELACIÓN HIDROLÓGICA.....	133
3.2 MODELACIÓN HIDRODINÁMICA	133
3.3 INCERTIDUMBRE HIDROLÓGICA E HIDRODINÁMICA.....	133
3.4 TIPOS DE MODELOS APLICACIONES	144
3.5 MODELO ITZI	1818
3.6 CÁLCULO DEL ÍNDICE TOPOGRÁFICO DE HUMEDAD (TWI)	19
3.7 ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE MACRO CUENCAS.....	200
4. ESTADO DEL ARTE.	221
4.1 AVANCES EN LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRODINÁMICA.	222
4.2 EL USO DE HERRAMIENTAS SIG EN LA HIDROLOGÍA.	265
5. DEFINICIÓN ZONA DE ESTUDIO	298

5.1 CUENCA MEDIA DEL MAGDALENA.	29
5.2 CUENCA BAJA DEL MAGDALENA	30
5.3 CANAL DEL DIQUE.....	322
5.4 HISTÓRICO DE INUNDACIONES	343
5.5 HUMEDALES DE LA REGIÓN	345
5.6 FENOMENO DE LA NIÑA.....	34
5.7 FENÓMENO DEL NIÑO.....	40
6. METODOLOGÍA.....	421
6.1. ANÁLISIS HIDROLÓGICO E HIDRODINÁMICO DE LA ZONA.	42
6.2. MODELACIÓN HIDROLÓGICA.....	42
6.3 PUESTA A PUNTO DEL MODELO	43
7. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	44
7.1 PERIODOS DE RETORNO DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS.....	4544
7.2 MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (DEM)	52
7.3 ÍNDICE TOPOGRAFICO DE HUMEDAD	54
7.4 EDAFOLOGIA DE LA ZONA	5654
8. CONCLUSIONES	61
9. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO.....	64
10. BIBLIOGRAFÍA.	64

Resumen.

El canal del Dique tiene una gran influencia ecológica, económica, social, sobresaliendo la pesca y el hábitat de diversos ecosistemas, la zona del medio y bajo Magdalena ha sufrido los desbordamientos del Río Magdalena donde se ocasionaron daños irreversibles. Se pretende desarrollar un trabajo de investigación para identificar zonas en riesgo de inundaciones, partiendo de la precipitación de años anteriores proporcionada por el IDEAM.

El suelo posee características específicas que nos permitirán medir niveles de humedad, Capilaridad, porosidad y Conductividad Hidráulica, asociando con la cantidad de precipitación que se proyectara en periodos de 25,50 y 100 años analizando las épocas de lluvia y poder lograr disminuir el riesgo de inundaciones en la zona preservando el medio ambiente, y los seres vivos que se benefician de los afluentes de dicho territorio.

Los parámetros que se utilizaran para esta modelación hidrológica e hidrodinámica son fundamentales y de acceso limitado, con lo que será un análisis bastante extenso y ayudara a conservar nuestros recursos hídricos que son importantes y abundantes en nuestro País.

Abstract.

The Dique channel has a great ecological, economic, and social influence, with fishing and the habitat of various ecosystems standing out. The middle and lower Magdalena area has suffered the overflows of the Magdalena River where irreversible damages were caused. The aim is to carry out research work to identify areas at risk of floods, based on the precipitation of previous years provided by IDEAM.

The soil has specific characteristics that will allow us to measure humidity levels, capillarity, porosity and hydraulic conductivity, associating it with the amount of precipitation that will be projected in periods of 25, 50 and 100 years, analyzing the rainy seasons and being able to reduce the risk of floods in the area preserving the environment, and living things that benefit from the tributaries of said territory.

The parameters that will be used for this hydrological and hydrodynamic modeling are fundamental and of limited access, with which it will be a fairly extensive analysis and will help conserve our water resources that are important and abundant in our country.

Lista de imágenes.

<i>Figura 1. Simulación de modelo unidimensional. Obtenido de: (HEC-RAS 4.1, n.d.).....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2. Simulación de modelo bidimensional. Obtenido de: (Vista de métodos numéricos para la predicción de inundaciones Figura Revista de Iniciación Científica, n.d.).....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3. Simulación de modelo tridimensional. Obtenido de: (vista de métodos numéricos para la predicción de inundaciones revista de iniciación científica, n.d.).....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 4. Simulación del modelo en ITZI sobre las inundaciones. Obtenida de Itzi Model Laurent Courty. 2018.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 5. (Cálculo del índice topográfico de humedad (TWI) a partir del DEM. Download Scientific Diagram, n.d.).....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 6. Artículos Científicos desarrollo estado del arte. Fuente propia.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 7. Comportamiento de los niveles medidos y simulados del embalse para periodo de lluvias. Obtenido de: Hidrodinámica del Embalse el Guajaro Colombia.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura.8 Localización de las cuencas y estaciones pluviométricas en el bajo Rio Panuco. Obtenido de: Hidrología e Hidrodinámica del rio Panuco.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 9. Capas vectoriales y raster de los Sistema de Información Geográfica (SIG) .Obtenido de: Ventajas y desventajas de los SIG.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 10. Delimitación de cuencas de estudio para análisis hidrológico e hidrodinámico. Obtenido de: https://www.youtube.com/watch?v=oh_mY5AOji0.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 11. Capas de Sistema de información Geográfica (SIG). Obtenido de Universidad de Salamanca España.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 12. Ubicación geográfica Cuenca media y baja del Magdalena Escala Nacional y en Suramérica. Obtenido de fuente propia.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 13. Inundaciones en la cuenca media y baja del magdalena.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 14. Área inundada en el desbordamiento del Canal del Dique en el año 2010. Obtenido de: Gobernación del departamento del Atlántico y el Instituto Colombiano Agustín Codazzi.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 15. Panorámica del canal del Dique año 2019 disminución del cauce por sequía. Obtenido de: Corporación Autónoma Regional (CAR).....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 16. Delimitación Cuenca media y baja del Magdalena. Obtenido de: Fuente Propia.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 17. Coordenadas Geográficas de las estaciones de la zona de estudio cuenca media y baja del magdalena. Obtenido de IDEAM.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 18. Análisis y obtención de datos para la modelación hidrológica IZTI. Obtenido de: Fuente propia.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 19. Periodos de retorno estaciones de la cuenca media y baja del Magdalena. Fuente propia.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 20. Mínimos y máximos de precipitación estación Galerazamba (14015010). Obtenido del IDEAM y fuente propia.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 21. Periodos de retorno 25, 50 y 100 años con variables reducidas Estación Galerazamba. Obtenido de fuente propia.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 22. Periodos de retorno cuenca media y baja magdalena a 25 años. Obtenido de: Fuente propia.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 23. Periodos de retorno cuenca media y baja magdalena a 50 años. Obtenido de: Fuente propia.....</i>	<i>51</i>

<i>Figura 24. Periodos de retorno cuenca media y baja magdalena a 100 años. Obtenido de:</i>	
<i>Fuente propia.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 25. Modelo digital de elevación de la zona en estudio. Obtención fuente propia.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 26. Intervalos y caracterización del TWI y DEM. Obtenido de: Fuente Propia.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 27. Índice Topográfico de Humedad (TWI) cuenca media y baja del magdalena. Obtenido de fuente propia.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 28. Taxonomía del suelo Colombiano. Obtenido de Soilgrid y fuente propia.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 29. Porosidad del suelo Colombiano. Obtenido de Soilgrid y fuente propia.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 30. Capilaridad del suelo Colombiano. Obtenido de Soilgrid y fuente propia.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 31. Conductividad hidráulica del suelo Colombiano. Obtenido de Soilgrid y fuente propia.....</i>	<i>61</i>

1. Introducción.

La cuenca media y baja del río Magdalena es un sistema de drenaje muy importante en la región Caribe de Colombia, la acumulación de agua por exceso de lluvia en épocas húmedas por medio de una escorrentía superficial y algunos factores como el cambio del uso del suelo y la deforestación permiten que se presenten desbordamientos de agua alterando el curso normal de un río o de la cuenca.

El canal del dique como derivación artificial que atraviesa las cuencas del río Magdalena presenta incrementos en la cantidad de agua que recorre en épocas húmedas, por lo que en los últimos años se han presentado desbordamientos en zonas urbanas y rurales causando graves daños a las infraestructuras cercanas.

La modelación hidrológica a gran escala de la cuenca baja y media del río Magdalena, se desarrollará por un monitoreo de estaciones pluviométricas de la zona y la intensidad en la época húmeda. Este modelo nos permitirá observar las zonas con mayor riesgo de inundación con datos de la escorrentía de los últimos años asociados a los desbordamientos por el incremento de la lluvia, recolectando datos de los últimos 30 años para obtener un grado de confiabilidad elevado.

Con el modelado hidrológico e hidrodinámico esperamos demostrar las zonas de inundaciones cercanas a la cuenca media y baja del río Magdalena y el impacto del canal del dique en municipios donde este atraviesa con su recorrido. Con el modelo esperamos demostrar el riesgo de inundación con la escorrentía que se presenta en épocas húmedas y la infiltración directa de las lluvias sobre el terreno.

2. Objetivos.

2.1 General.

Realizar un análisis hidrológico e hidrodinámico de los flujos asociados a la lluvia en las cuencas media y baja del río Magdalena y su influencia en la zona del canal del dique a una escala de 30 DEM.

2.2 Específicos.

Analizar y recolectar los datos de las estaciones encargadas de medir la precipitación y efectuar un ciclo de tiempo de 30 años con esta información lograr desarrollar un método efectivo para reducir el riesgo en las inundaciones en la zona.

Realizar un índice diferencial de agua normalizada en las estaciones pluviométricas de las cuencas del bajo Magdalena y Magdalena medio, simulando por un sistema de información geográfica QGIS las zonas de afectación con los datos recolectados.

Ejecutar un modelo de simulación de inundaciones ITZI MODEL para analizar mapas de riesgo de inundación comparando con puntos críticos en redes de drenaje y verificar el comportamiento de agua en momentos de desbordamiento.

3. Marco Teórico.

3.1 Modelación hidrológica.

Es la representación de una cuenca hidrológica con sus características y los ciclos del agua, teniendo en cuenta la identificación de subcuentas y datos de los sistemas de información geográficos, tomándolos como datos de entrada para la modelación. Siendo esta herramienta de gran ayuda para el estudio de avenidas que se pueden dar en un determinado territorio. Con las modelaciones se efectúan análisis, los cuales sirven para prevenir inundaciones. (*Modelación Hidrológica. IDEAM.*)

3.2 Modelación hidrodinámica.

Programa que busca reproducir el movimiento del agua, usando modelos matemáticos y físicos, busca tener control sobre algunos factores como altura del agua, velocidad, caudal, temperatura. Los modelos numéricos representan topografía de la cuenca y llanura de inundación. (*IDEAM. 2018*).

3.3 Incertidumbre hidrológica e hidrodinámica.

El nivel de incertidumbre indica el error que puede surgir durante la simulación con relación al fenómeno real, por lo tanto, es indispensable la medición real y compararla con la información calculada. Sin embargo a través del tiempo han surgido elementos como computadoras avanzadas, software, información de estaciones, sistemas de información geográfico, que han permitido un desarrollo más confiable en el campo de la *modelación (Hidráulica & Ambiental. n.d.)*.

3.4 Tipos de modelos aplicaciones.

En la actualidad existe gran variedad de modelos de simulación de inundaciones, algunos tienen un enfoque en 1D Y 2D, como también algunos integran los dos métodos. La tecnología ha generado gracias a su avance grandes resultados en el campo de la hidrología como son imágenes realistas de la zona en estudio las cuales representan las áreas en peligro de inundaciones, esto en gran ayuda a la información suministrada como levantamientos topográficos, datos de estaciones meteorológicas. (*Métodos numéricos para la predicción de inundaciones. Revista de iniciación científica.*)

Modelo unidimensional.

En este método se trabaja el río como una línea recta, con una serie de puntos que representa la sección transversal, siendo la geometría del cauce una propiedad de cada punto o calculo, su función es calcular el nivel del agua en cada sección transversal, para un resultado se debe tener en cuenta algunas componentes los cuales pueden influir en el resultado, podemos decir que el movimiento del agua se genera en sentido del eje del río y es perpendicular a cada sección transversal, la velocidad y cota del agua son constantes en cada sección, siendo Hec-Ras el modelo más usado en este método. (*Vista de métodos numéricos para la predicción de inundaciones. revista de iniciación científica.*)

A continuación, se escriben las ecuaciones que representan el movimiento no permanente en lamina libre en cauces naturales o artificiales, las cuales fueron escritas por (Barré de Saint Venant en 1871), surgen a partir de las leyes físicas de la conservación (Bladé y Gómez. 2006.).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \left(\frac{A^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gA (s_0 - s_f) \quad (2)$$

Dónde: t: tiempo, x: longitud del río, A: área sección mojada, Q: caudal circular, g: gravedad, h: calado de agua, So: pendiente fondo, Sf: pendiente motriz.

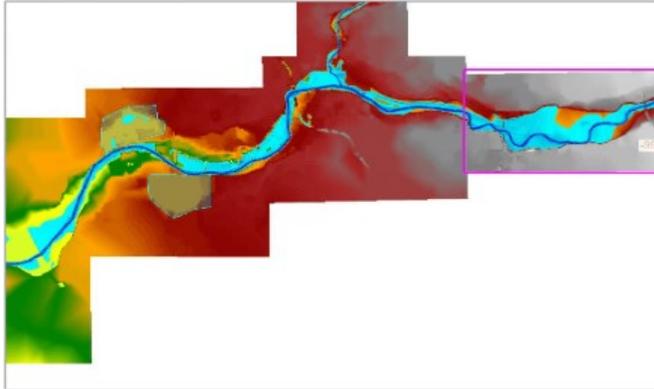


Figura 1. Simulación de modelo unidimensional. Obtenido de: (HEC-RAS 4.1, n.d.)

Modelo bidimensional.

El río se transfiere como una malla formada por una serie de celdas poligonales que indican la topografía del cauce y áreas de inundación. La malla puede ser regular o irregular, la mejor presentación de la geometría y sus contornos la da una malla irregular.

Existe el modelo IBER el cual para su mejor simulación combina los esquemas 1D y 2D este consta de un modelo hidrodinámico que permite la simulación bidimensional de cauces, transporte de solidos por arrastre y procesos de erosión y sedimentación.

También se encuentran modelos que ofrecen soluciones numéricas para simular movimientos de agua, hidrología, cambio en la calidad de agua, y transporte de sedimentos en ríos, áreas de inundación y cuencas.

Un modelo bidimensional en la descripción de inundaciones o flujos de agua, debe cumplir con los siguientes requisitos:

Características.

El campo de flujo debe ser manejado en dos o más dimensiones

Utilizar un algoritmo numérico para facilitar el problema desde el punto de vista computacional.

Se debe representar la topografía y la forma de los ríos.

(Vista de métodos numéricos para la predicción de inundaciones . Revista de Iniciación Científica.)

Se integran las ecuaciones 1 y 2, se obtienen las ecuaciones bidimensionales del flujo de lámina libre, que representan en un modelo hidrodinámico la conservación de la masa (ecuación 3) y de momento en dos direcciones horizontales (ecuación 4, 5)

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh \frac{\partial(h+Z_0)}{\partial x} - \frac{\tau_{0x} + \tau_{sx}}{\rho} + fhv + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(hT_{xx})}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(hT_{xy})}{\partial x} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -gh \frac{\partial(h+Z_0)}{\partial y} - \frac{\tau_{0y} + \tau_{sy}}{\rho} + fhu + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(hT_{xy})}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(hT_{yy})}{\partial x} \quad (5)$$

Dónde: t:tiempo, x y z:longitud en ele cartesiano, u v:velocidades del flujo en la dirección del plano, h:cálculo de agua, Z₀: cota de fondo, g:gravedad, τ_{sx}, τ_{sy}: tensiones que actúan en

la dirección xy del plano de referencia, ρ : densidad del flujo, f : fuerzas centrífugas por rotación de la tierra, T_{xx} , T_{xy} : términos de tensor de esfuerzos turbulentos de Reynolds.



Figura 2. Simulación de modelo bidimensional. Obtenido de: (Vista de métodos numéricos para la predicción de inundaciones. Revista de Iniciación Científica.)

Modelo tridimensional.

Son menos utilizados debido a que la extensión espacial del modelo requiere mallas de cálculo de millones de elementos. En la aplicación de hidráulica fluvial se suele restringir en cuanto se refiere a estudios de flujos de meandros, estructuras hidráulicas.

Para la funcionalidad de los modelos 3D utilizan diferentes clases de discretización espacial (transferir funciones continuas, modelos, variables), a su vez está relacionada con el sistema usado para el procedimiento de lámina libre. Se puede manejar capas sigma, que consiste en una malla 2D horizontal generando un número de capas en la dirección vertical, que consta de un

espesor variable localizándose entre el fondo y la lámina libre. (*Métodos numéricos para la predicción de inundaciones. revista de iniciación científica.*)

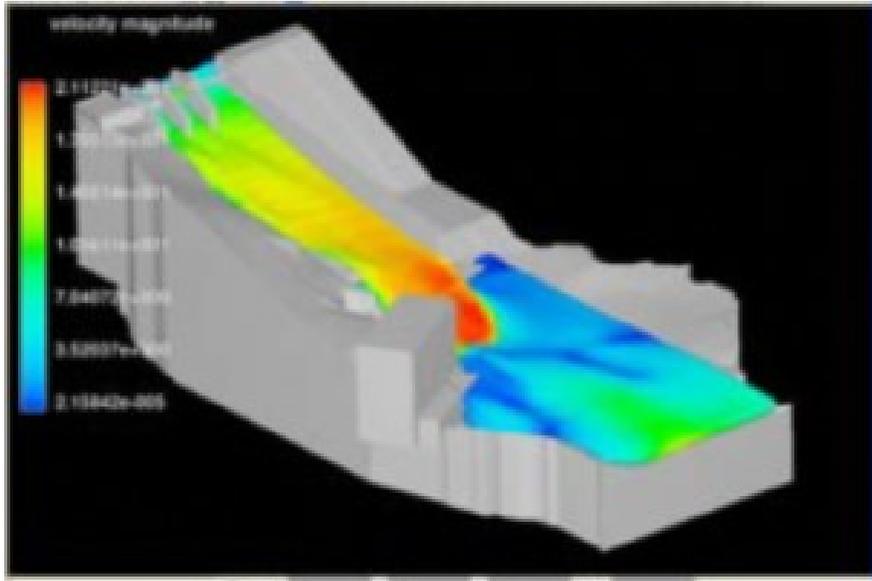


Figura 3. Simulación de modelo tridimensional. Obtenido de: (Vista de métodos numéricos para la predicción de inundaciones. Revista de iniciación científica.).

3.5 Modelo Itzi.

Es un modelo para modelaciones de inundaciones urbanas los cuales ayudan a crear mapas de riesgo de inundación, analizar puntos críticos de la red de drenaje y evaluar el cambio climático o las defensas contra las inundaciones. (Laurent Courty. 2018).



*Figura 4. Simulación del modelo en ITZI sobre las inundaciones. Obtenida de Itzi Model
Laurent Courty.2018.*

3.6 Cálculo del índice topográfico de humedad (Twi).

Es la forma para identificar los potenciales lugares donde se logra concentrar la humedad o zonas de acumulación de agua. Esta forma se obtiene del análisis morfológico del territorio y se realiza inventarios de potenciales zonas húmedas y láminas de masas de agua que existen en la delimitación topográfica donde se está trabajando la información.

El análisis de modelos digitales es una secuencia de terreno y morfología donde se identifican zonas de potenciales de acumulaciones de Humedad. Primero se debe digitalizar el modelo de elevación o DEM inicial, el TWI parte análisis de direcciones de flujo, pendiente y correcciones del DEM. (*Cálculo del índice topográfico de humedad twi. gis&beers.*).

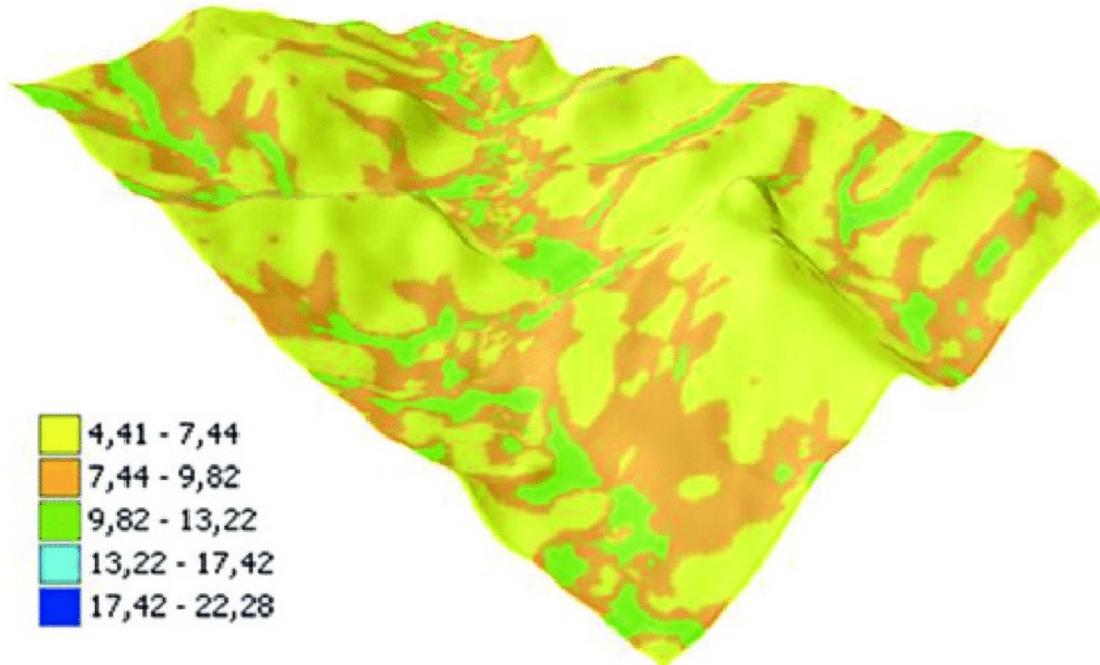


Figura 5. (Cálculo del índice topográfico de humedad (TWI) a partir del DEM. Download Scientific Diagram.).

3.7 Análisis hidrológico de macro cuencas.

Este estudio parte saber que en la zona de seleccionada pueda ocurrir un suceso que represente caudales altos generando avenidas. Para determinar estos eventos se determinan los caudales máximos para los periodos de retorno a 5, 10, 30, 50, 100 años, en las cuencas afectadas para ello se inicia conociendo información meteorológica, hídrica, topografía. (Díaz de la Cruz, V. (2012))

Para realizar un análisis es necesario contar con un levantamiento topográfico a escala 1:1000 o 1:500, que represente las características del terreno, por otro lado, en casos donde el área a estudio es muy grande es conveniente el uso de un modelo digital de elevación el cual suministra curvas de nivel de topografía existentes con imágenes aéreas. Ya contando con toda esta información se iniciará el trabajo en el software que como resultado arrojará datos con un bajo error indicando zonas o situaciones futuras a inundación. Por ultimo cálculos, listados, tablas, se

expresa en mapas mostrando la zona a peligro de inundación para diferentes periodos de retorno, dichos periodo indican que haya desbordamiento en un tiempo determinado. Por ejemplo, el caso en que sea inundable para un periodo de 30 años, quiere decir que durante ese tiempo puede ocurrir una avenida de caudal ocasionando inundación de la zona. (*Estudios hidrológicos allpe.estudios hidrologicos madrid.*).

4. Estado Del Arte.

El avance de las modelaciones hidrológicas e hidrodinámicas permite abordar la investigación sobre los nuevos métodos y programas de SISTEMA DE INFORMACION GEOGRAFICO (SIG) para mayor precisión en análisis en investigaciones sobre recursos hídricos.

La predicción que se logra con estos modelos es bastante confiable, los artículos que se escogieron nos muestra que a nivel mundial se están ejecutando de diversas formas tanto para métodos hidráulicos, hidrológicos y de climatización de zonas cercanas a embalses o puertos.

El método más sencillo para la clasificación de las investigaciones fue Avances de la modelación hidrológica e hidrodinámica y el uso de las herramientas SIG en la hidrología lo cual se divide de la siguiente manera.

Tabla 1	
<i>Artículos Científicos.</i>	
Avances en la modelación Hidrología e Hidrodinámica	Uso de Herramientas SIG en hidrología.
(Ferrer Alessi & Torrero. 2015)	(Aceves, Legorreta, Lugo, Umaña & Legorreta. 2016)
(Wurl et al. 2015)	(Pascual-aguilar. 2020)
(Torres, Padilla & Rodríguez. 2016)	(Garcia. 2002)
(Campos-Aranda. 2014)	(Caro Camargo & Bayona Romero. 2018)
(Aponte-Reyes. 2014)	
(Campos-Aranda. 2015)	

(Francésa & Bussib. 2014)	(Macías Barberán et al. 2019)
(Palacio, García & García. 2010)	(Wahid, Madden, Khalaf. 2016)
	(Farajat, Schaeffers, Hassanat, Atteyat, Jahed. 2015)
	(Viji, Prasanna & Ilangovan. 2015)
<i>Figura 6. Artículos Científicos desarrollo estado del arte. Fuente propia</i>	

4.1 Avances en la modelación hidrológica e hidrodinámica.

El desarrollo de las herramientas para la modelación hidrológica e hidrodinámica nos permite realizar un análisis avanzado para la ejecución de un prototipo, donde se toman decisiones con un cierto grado de confiabilidad en estudios relacionados con el comportamiento y características del agua.

El objetivo principal de los avances en la modelación hidrológica e hidrodinámica es evaluar los estudios y diseñar modelos encargados de predecir y simular el comportamiento del agua y poder evitar algún tipo de alteración o riesgo sobre zonas cercanas y habitadas, hasta el año 2020 se han realizado estudios y diversos modelos donde se registran resultados exitosos.

Los estudios realizados por parte de *(Torres, Padilla & Rodríguez. 2016)* el cual describe un modelo bidimensional EFDC para simular unas variables hidrodinámicas en el embalse el Guajaro (Atlántico) ubicado en el norte de Colombia y compararlo con los niveles medidos diariamente en el mismo.

El canal del dique se encarga de transportar el agua y por la apertura de las compuertas hidráulicas Del Limón y Villa Rosa calcularon los caudales de entrada y salida junto con otras características hidrodinámicas de los fluidos como vectores de velocidad del agua, salinidad,

temperatura y transporte de Sedimentos, La simulación empezó con la premisa de comparar la épocas secas y húmedas con lo que se pudo determinar lo siguiente.

Épocas Secas: El embalse en muestra sus niveles más bajos, en donde tratan de contrarrestar el déficit del volumen del agua, el modelo logra determinar el gasto que fluye por las compuertas y optimizar el accionamiento de las compuertas hidráulicas.

Épocas Húmedas: El embalse mostro niveles bastante altos, donde el nivel del agua supera el resistente por el Guajaro, el modelo hidrodinámico puede permitir la mejor toma de decisiones evitando un desbordamiento junto con el aprovechamiento del recurso hídrico de una manera eficiente. (Torres, Padilla & Rodríguez. 2016).

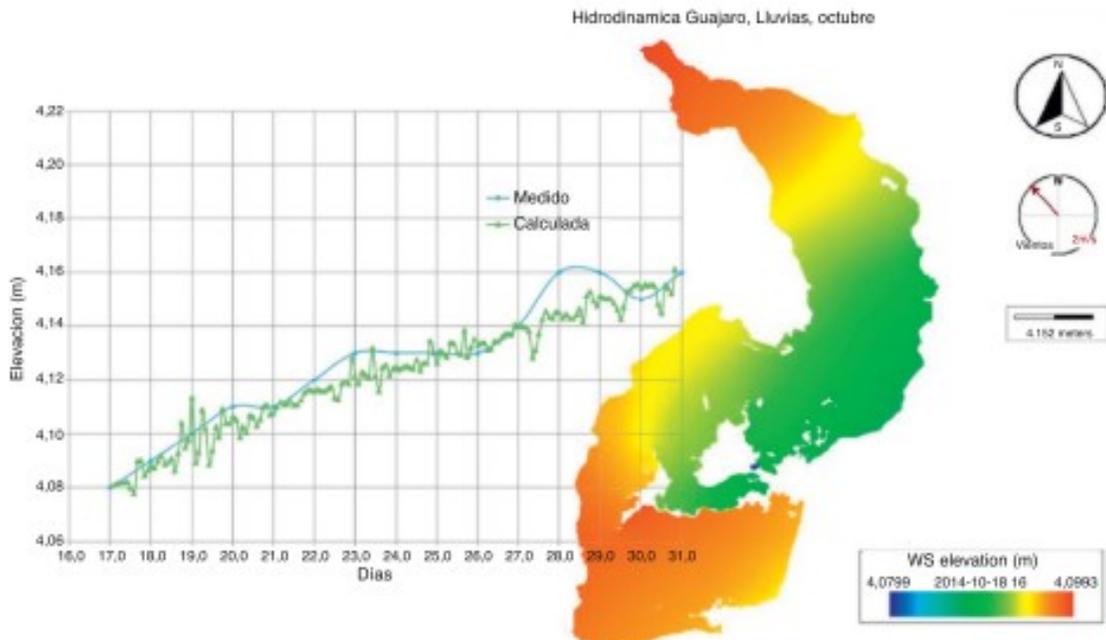


Figura 7. Comportamiento del embalse para eventos de lluvias. Obtenido de. Hidrodinámica del Embalse el Guajaro Colombia.

Por otro lado, en la ciudad de San Luis Potosí (México), se desarrolló un modelo hidrológico sobre procesos de precipitación y escurrimiento llamado (PPE), la simulación tiene como

objetivo un modelo de regresión polinomial con una memoria de datos mensual, tomando datos de la estación Hidrométrica Ballesmy del río, de la cuenca baja del río Panuco, junto con 3 estaciones pluviométricas se determinan los coeficientes de escurrimiento y filtración mensual.

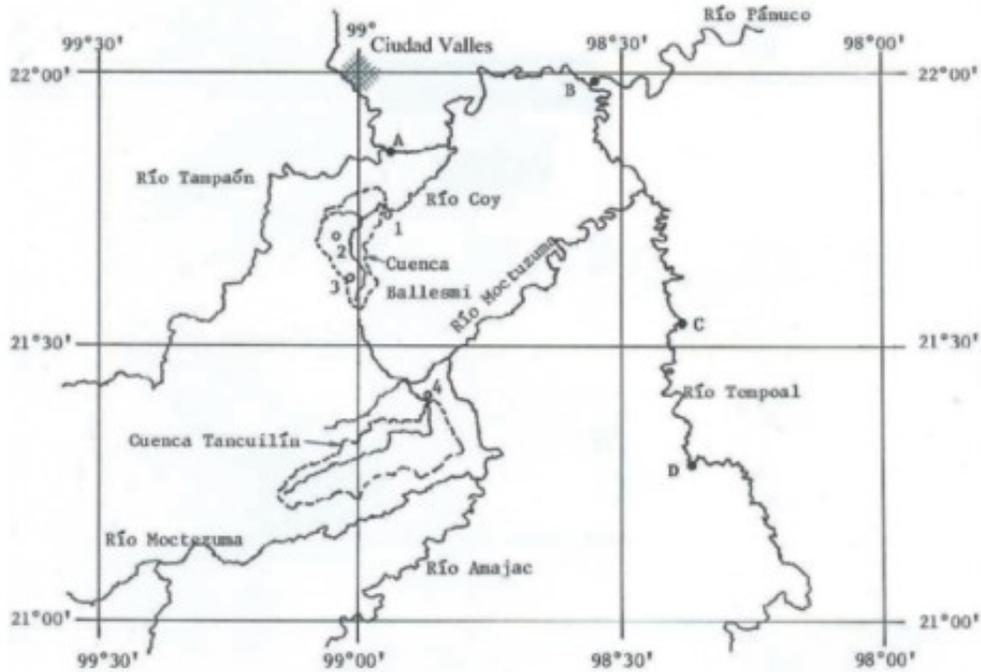


Figura.8 Localización de las cuencas y estaciones pluviométricas en el bajo Río Panuco.

Obtenido de. Hidrología e Hidrodinámica del río Panuco.

La precipitación mensual tomada por las 3 estaciones pluviométricas se lograron recolectar datos de 35 años separándose en valores diarios, bajo este contexto se comparó por medio de las regresiones la aportación del volumen escurrido junto con los aportes subterráneos promedio mensuales, el modelo pudo deducir datos faltantes que se asumieron para la ampliación del dato de escurrimiento en la cuenca teniendo en cuenta las épocas secas y húmedas proporcionando un cierto porcentaje comparando los últimos 4 años. (Campos-Aranda. 2014).

Comparando los modelos hidrodinámicos con los hidrológicos, se pudo determinar que son simulaciones que aprovechan los recursos hídricos, sus características y el enfoque principal es encontrar un grado de confiabilidad alto, para la prevención y aprovechamiento de los recursos ambientales. (Campos-Aranda. 2014).

4.2 El uso de herramientas SIG en la hidrología.

Los sistemas de información geográfica (SIG) logran permitir la organización, análisis y manipulación de datos los cuales tienen unas características exclusivas las cuales nos llevan a tomar decisiones de manera acertada, en zonas geográficamente referenciadas.

El estudio conformado por (Caro Camargo & Bayona Romero. 2018), implementa modelos hidrológicos basado en sistemas de información geográfica (ARGIS). El análisis desarrollado a las sub cuencas del río Vega y Jordán el cual recorre la ciudad de Tunja, con simulaciones del modelo Hidráulico IBER, se cuantifico numéricamente la velocidad y profundidad asociadas a un periodo de retorno de 100 años.

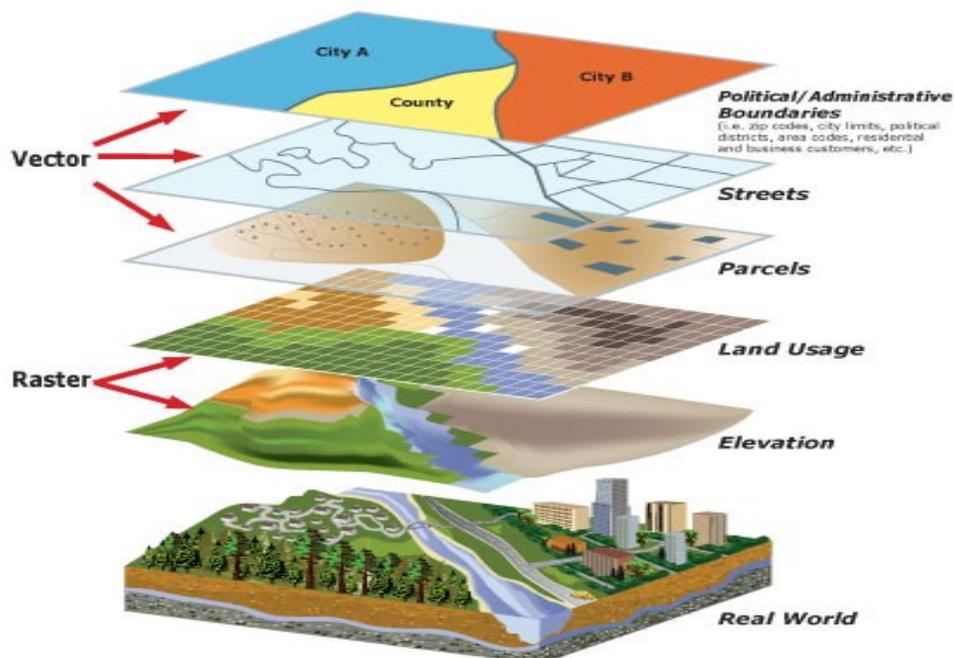


Figura 9. Capas vectoriales y raster de los Sistema de Información Geográfica (SIG). Obtenido de: *Ventajas y desventajas de los SIG*

Los estudios realizados en la ciudad de Tunja fueron revisados históricamente de antiguos acontecimientos, simulando por medio de IBER la predicción de inundaciones ejecutando y señalando algunas zonas de alto riesgo y susceptible a desbordamientos en puntos críticos a lo largo del río Vega y Jordán.

Por medio de ARGIS se pudo realizar una recolección de datos y se pudo identificar puntos críticos de inundación en la ciudad de Tunja donde son potencialmente peligrosos para la población, regresando al modelo hidrológico IBER observaron que la falta de capacidad hidráulica del alcantarillado puesto que se realizaron sin un estudio hidrológico adecuado, falta de planificación y poca inversión para situaciones extremas.

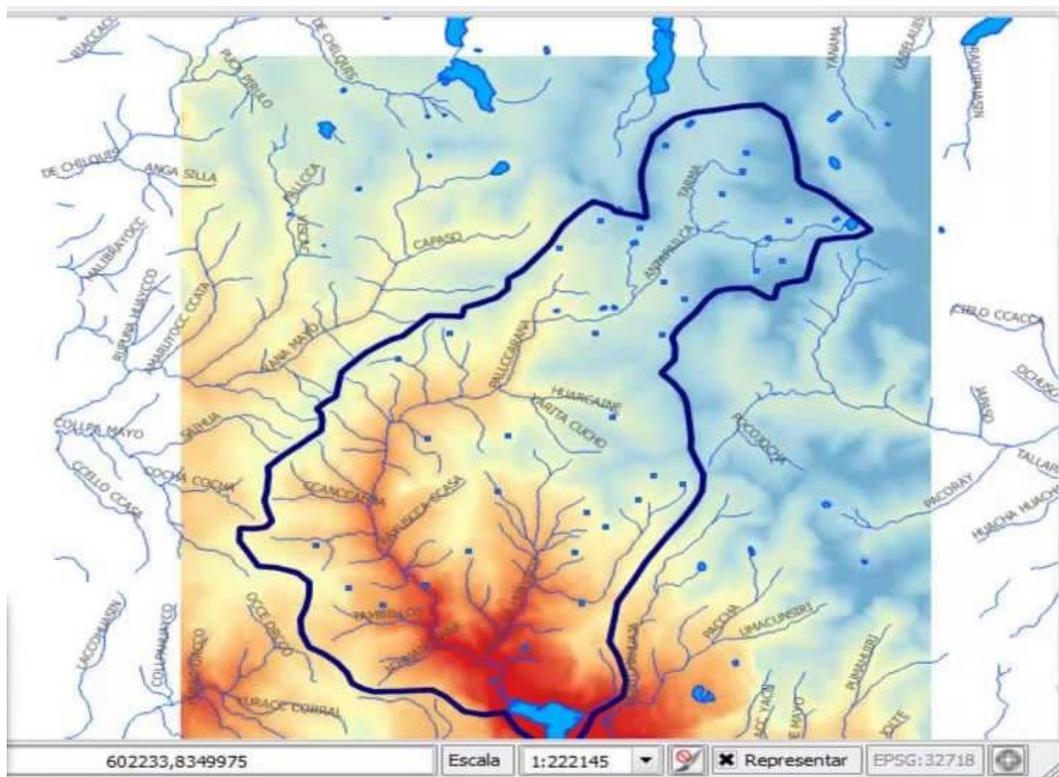


Figura 10. Delimitación de cuencas de estudio para análisis hidrológico e hidrodinámico.

Obtenido de: https://www.youtube.com/watch?v=oh_mY5AOji0

Por otra parte (Bittner et al., 2020) implemento por medio del Sistema de información Geográfico QGIS un mapeo de la zona del manantial Kárstico en la que se pueda generar una mejora en el uso del suelo y la zona de recarga para aprovechar y darle manejo a los recursos hídricos. La investigación muestra los cambios en los paisajes por medio de un modelo llamado LuKars que permite la descarga de la lluvia y los impactos en la tierra tomando diversas capas de la región montañosa y demostrando la descarga de los manantiales y el aprovechamiento en la gestión del recurso hídrico en muchos países con esta topografía.

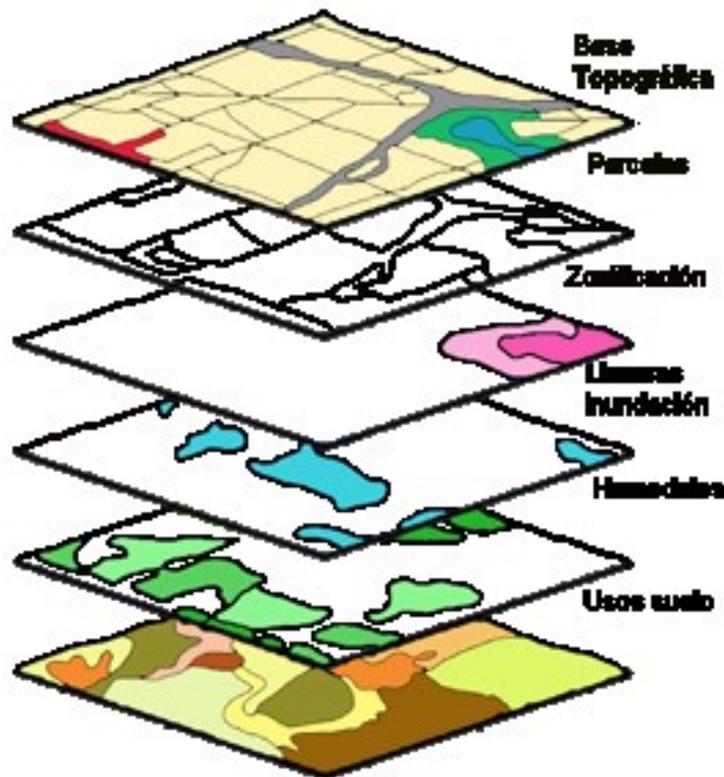


Figura 11. Capas de Sistema de información Geográfica (SIG). Obtenido de Universidad de

Salamanca España.

5. Definición zona de estudio.

La zona de estudio está conformada por las cuencas media y baja del río Magdalena, se realiza la caracterización de los departamentos y municipios que integran las cuencas con la identificación geográfica, espacial, económica, social y demografía para recopilación y procesamiento de los datos.

La cuenca media y baja del río Magdalena están constituidas por los territorios, ciénagas, lagunas y demás geo formas, están delimitadas por municipios los cuales pertenecen a los departamentos de Cesar, Atlántico, Bolívar, Magdalena, Sucre y Córdoba. *(Cormagdalena. 2013).*

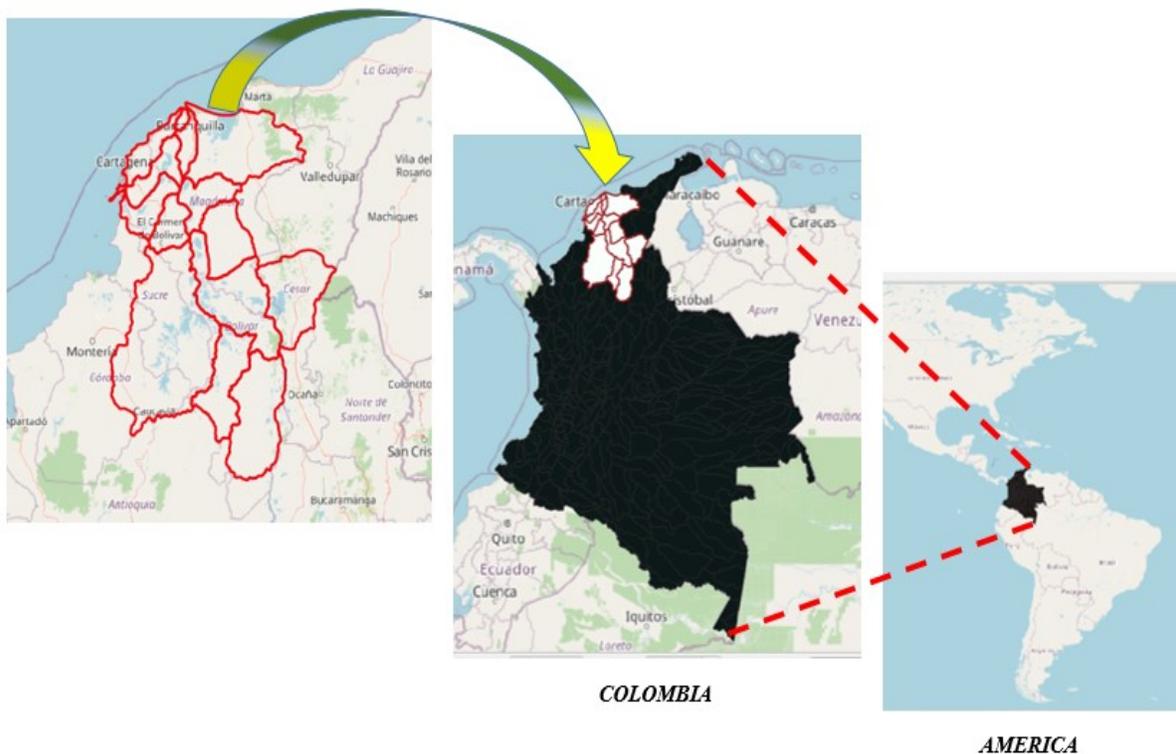


Figura 12. Ubicación geográfica Cuenca media y baja del Magdalena Escala Nacional y en Suramérica. Obtenido de fuente propia.

El río Magdalena tiene una longitud de 1.528 Km desde su nacimiento en el macizo colombiano y desembocando en Bocas de Ceniza en el mar Caribe, Este río se alimenta principalmente de afluentes cercanos a los municipios que pertenecen a la cuenca siendo un porcentaje del 9% del territorio colombiano. (*Cormagdalena. 2013*).

5.1 Cuenca Media Del Magdalena.

Está delimitada por los departamentos de Cesar y Magdalena pasando por los municipios de Gamarrá, La Gloria y El Banco. Esa cuenca tiene la particularidad de encontrarse en el valle medio del río Magdalena, pero la expansión de la frontera agrícola y ganadera disminuyó el paisaje de la zona. (*Cormagdalena. 2013*).

Economía.

Sector Agrícola.

Las actividades económicas en la cuenca media del río Magdalena se basan en la agricultura donde predominan los cultivos de Arroz, Cebada, Maíz, Quinua y Trigo. Con una área cosechada de 31.159 ha (Hectáreas) siendo un 2% de la cuenca, la producción es de 123.700 siendo un 1% donde se tiene un rendimiento (Tonelada/Hectáreas) de 4,0. (*Cormagdalena. 2013*).

Social.

Educación

Los sistemas educativos cuentan con cursos de aprendizaje como primario, Educación media y Secundaria. La comparación entre los municipios cuenta con un dato importante y son las pruebas SABER 11, el cual permite evaluar a los estudiantes de manera individual e igualmente

de manera grupal por resultados de instituciones educativas realizando promedios a los alumnos de cada colegio. *(Cormagdalena. 2013)*.

Pobreza y desigualdad.

La cuenca media del río Magdalena propuso un indicador (NBI) necesidades básicas insatisfechas y el coeficiente de desigualdad Gini, este demuestra la inseguridad en la zona y la falta de recursos para la producción de materias primas.

Los resultados que se obtuvieron para el año 2012 en la cuenca media del Magdalena fue un 47,9% de necesidades básicas insatisfechas y un Gini 0,50, respecto a los datos que se tienen se realiza la comparación a nivel nacional está por encima del promedio equivalente a 27,6% y en el estudio de desigualdad los municipios cercanos a la zona están por debajo del promedio nacional equivalente al 0,60 *(Cormagdalena. 2013)*.

5.2 Cuenca Baja Del Magdalena.

Se cruzan por los departamentos de Bolívar, Atlántico, Córdoba y Sucre pasando por los municipios de Barranco De Loba, Sitio Nuevo, Calamar, Pinillos, Mompo y Magangué. Es la última parte del Río Magdalena y tiene dos desembocaduras una es en Bocas De Ceniza en el Mar Caribe y la otra es la bahía de Cartagena a través del Canal Del Dique, particularmente el paisaje de esta llanura forma innumerables Ciénagas que cumplen con el almacenamiento de las aguas temporales lluviosas y devolverlas a los ríos en épocas secas. *(Cormagdalena. 2013)*

Economía.

Sector Agrícola.

Las actividades económicas en la parte de la cuenca baja del río Magdalena se basan en la agricultura donde predominan los cultivos de Arroz, Cebada, Maíz, Sorgo y Trigo. Con una área cosechada de 94.691 ha (Hectáreas) siendo un 6% de la cuenca, la producción es de 224.561 siendo un 3% donde se tiene un rendimiento (Tonelada/Hectáreas) de 2,4. (*Cormagdalena. 2013*)

Social.

Educación.

Los resultados son de pruebas SABER 11 del año 2010 donde se tienen 24 municipios en los cuales el 115,1% de cobertura bruta es de los grados preescolar, el 143,6% de primaria, el 107,8% de secundaria y el 76,5% de educación Media obteniendo un puntaje en las pruebas Saber 2012 de 40,8 a nivel estando por debajo del promedio nacional que es un 43% (*Cormagdalena. 2013*).

Pobreza y desigualdad.

Los resultados que se obtuvieron para el año 2012 en la cuenca baja del Magdalena fue un 60,7% de necesidades básicas insatisfechas y un gini 0,68 respecto a los datos que se tienen se realiza la comparación a nivel nacional está por encima del promedio equivalente a 27,8% y en el estudio de desigualdad los municipios cercanos a la zona están por encima del promedio nacional equivalente al 0,68. (*Cormagdalena. 2013*).

5.3 Canal del Dique.

Es una derivación artificial del río Magdalena que comienza desde Calamar (Bolívar) y desemboca en las bahías de Cartagena, este Canal tiene una longitud de 115 Km concentrando un 80% de la carga fluvial del país y cerca del 5% de los pasajeros siendo un medio de navegación importante para el transporte de materia prima (*Min transporté. 2006*).



*Figura. 13 Inundaciones en la cuenca media y baja del Magdalena. **Figura. Superior Izquierda** Inundación sur del Atlántico por rompimiento del canal del dique. Obtenido de Revista Semana. **Figura. Superior Derecha** Desbordamiento del canal del dique en la zona de Calamar. Obtenido de El Heraldo. **Figura. Inferior Izquierda** Inundación desbordamiento río San Jorge. Obtenido de Periódico La Razón. **Figura. Inferior Derecha** Vista Panorámica municipio de Santa Lucía Atlántico. Obtenido de El Heraldo.*

Problemática.

El Canal del Dique fue construido en el siglo XVI con la finalidad de poder navegar por este río hasta las bahías de Cartagena de Indias, históricamente se presenta un constante aumento de sedimentos por la remoción de las curvas naturales del río, en principio se contaban con 270

curvas y se redujeron considerablemente a 50 ocasionando un aumento de velocidad y caudal del canal hacia las bahías de Cartagena.

El incremento del caudal y la velocidad del agua por esta bifurcación en los últimos añadiendo el problema del incremento de material granular en el río está ocasionando inundaciones en zonas urbanas, la disminución de la profundidad del río y el aumento del volumen de agua genera que el recorrido natural del canal se pierda y se provoque un almacenamiento de agua en zonas como bosques, santuarios y crecimiento en el nivel del agua de las ciénagas cercanas. (*Mogollón Vélez. 2013*).

5.4 Histórico de Inundaciones.

Desde la construcción del Canal del Dique en el siglo XVI por los españoles, esta derivación es utilizada para la navegación de mercancía y personas hacia la ciudad de Cartagena, aunque históricamente desde la modificación de la naturaleza de dicho canal se desencadenaron algunos eventos analizando los problemas como inundaciones y crecientes del río por falta de planificación y de inversión. (*Mogollón Vélez. 2013*).

Inundación 1965-1970.

La zona sur del atlántico se encontraba inundada por el Canal del Dique con la creciente población en el territorio colombiano en los últimos años estas zonas que eran ciénagas fueron desecadas y convertidas en distrito de riego y drenaje para dar paso a la agricultura y la ganadería. (*Mogollón Vélez. 2013*)

Inundación 1984.

Realizaron la ampliación del Canal del Dique donde se encontró una debilidad parcial en un muro de contención y este boquete empezó a drenar agua a las zonas cercanas a esta bifurcación, los contratistas de (Sanz y Cobe-Layne Dredging) repararon en 10 días este rompimiento y se pudo continuar con las obras. *(Mogollón Vélez. 2013)*.

Inundación 2010.

Las aguas del Canal del Dique provocaron inundaciones en algunos municipios del norte de Bolívar y el Sur del Atlántico, el mismo muro que habían arreglado en 1984 tuvo una ruptura de 214 metros de un terraplén, el agua fue drenada abriendo dos compuertas del embalse el Guajaro donde se incrementó el nivel del agua 1400 m³/s. La estación San Pedrito ubicada en el departamento del Atlántico determino el nivel del rio en 9,25 metros la máxima medida de la cual se tiene registro, los registros naturales del nivel eran de 1,5 metros. *(Sánchez. 2011)*.

El Fenómeno de La Niña que se presentó en el año 2010 genero históricamente uno de los peores desastres naturales recientes en Colombia, el total de afectados por las inundaciones fue de 3.893.087 habitantes y el estado de emergencia económico, social y ecológico. El canal del dique alcanzo los 18.242 metros cúbicos por segundo, siendo así el registro más alto con su cota máxima de inundación. *(Sánchez. 2011)*.

Los municipio de Santa Lucia, Suan y Campo de la cruz en el Atlantico fueron los mas afectados en el cual todo el 100% del territorio de estos municipios estuvo inundado, las familias que vivian en este sitio fueron reubicadas en otras zonas las cuales seguian presentando problemas por el aumento del caudal en el canal del Dique y la poca infraestructura que pudiera reducir el riesgo de ruptura nuevamente del muro de contencion del Canal. *(Sánchez. 2011)*.

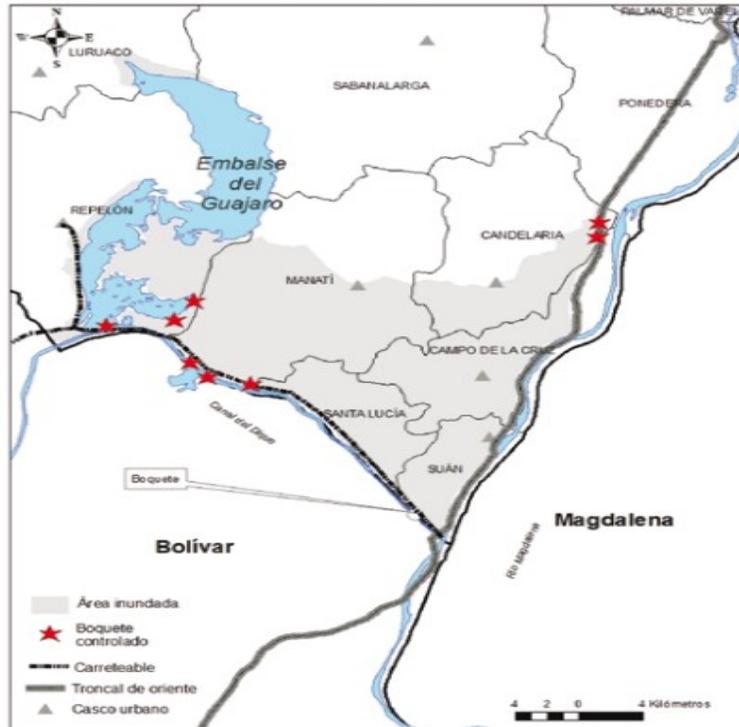


Figura 14. Área inundada en el desbordamiento del Canal del Dique en el año 2010. Obtenido de: Gobernación del departamento del Atlántico y el Instituto Colombiano Agustín Codazzi.

5.5 Humedales de la región.

Los humedales son terrenos que sufren inundaciones periódicamente dando la facilidad del desarrollo de distintas especies de fauna y flora. Colombia es un país con factores importantes como clima, ubicación geográfica, relieve, los cuales se han combinado para facilitar la abundancia del recurso hídrico, formando estuarios, ríos, pantanos humedales, y muchos más sitios naturales. (Castellanos. 2001).

La Mojana: Es una región húmeda ubicada al norte de Colombia, se caracteriza por amortiguar los caudales de los ríos Magdalena, san Jorge y Cauca, acumulando el material arrastrado por sus aguas hasta ese punto. Las poblaciones prehispánicas, realizaron obras civiles para evitar inundaciones que las afectaban, instalando canales artificiales, camellones,

canalizando las aguas hacia el mar. Esta región comprende 11 municipios en los departamentos de Antioquia, Bolívar, Córdoba, Sucre, se extiende en un área de 500.000 hectáreas aproximadamente. Maneja una topografía plana entre los 16 – 36 msnm, debido a su pendiente predominan ciénagas contando con inundación constante, la zona permanece restringida en época que van desde el mes de abril a noviembre, debido a los altos caudales de los ríos tributarios. Cuenta con diversos tipos de suelos, como arenas profundas, arcillas y limos, material que brota a la superficie. Las comunidades de la región conviven con situaciones que les ofrece el ecosistema tantos crecientes como sequias, ejerciendo a actividades de pesca, agricultura y selváticas. (*Aguilera-Díaz. 2004.*)

Ciénaga de Ayapel: Hace parte de la zona inundable perteneciente a la depresión Momposina, en términos ambientales presta el servicio de moderar los sistemas hidrológicos del río San Jorge y Cauca, a su vez almacena precipitaciones de las quebradas: quebradona, escobilla, caños Trejos, Muñoz y don Matías, acoge gran variedad de fauna, flora y protección de especies migratorias. Su área llega a ser aproximadamente 25.000 hectáreas, con un espejo de agua de 17 km². El aumento de su deterioro se está viendo a causa de la deforestación, degradación del suelo, contaminación del agua, minería, manejo inadecuado de la fauna y flora. En la década de los 70 la población se vio obligada a emigrar de la zona a causa de las permanentes inundaciones y grupos ilegales, los sedimentos que aporta el río San Jorge hacen que los suelos sean aptos para la agricultura, ganadería. La economía se basa en la pesca, la minería de oro, la extracción de arena para la construcción. (*Aguilera Díaz. 2009.*)

Depresión Momposina: Es una extensa superficie situada entre la llanura Caribe y las colinas de la serranía de Ayapel, recibe gran volumen de sedimentos de la región de los Andes, permanece en estado de hundimiento constante, su cobertura es aproximada a 24.000 km² sobre

los departamentos de Bolívar, Cesar, Córdoba, Magdalena y Sucre. Su precipitación anual es de 2.500 mm, en sus bosques húmedos se almacena diversidad de fauna como aves, peces, anfibios y reptiles. Cuenta con terrenos impermeables que almacenan aguas de ríos dando comienzo a ciénagas o pantanos. (*Depresión Momposina. Poblamiento.2004.*)

Ciénaga grande Santa Marta: Su inicio fue como bahía costera, su forma se ha modificado, debido a los sedimentos llevados por el río Magdalena y ríos que provienen del macizo de la Sierra Nevada, alberga criaderos de peces, aves y especies boscosas. Sus aguas contienen gran cantidad de salinidad que es nivelada por la lluvia y agua que transportan los ríos. Para 1956 su área cubierta con manglares era cerca de 511 km², la cual ha reducido para 1995 a 177 km². (*Unidad Administrativa Especial denominada Parques Nacionales Naturales. 2005*)

Ciénaga de Zapatosa: Complejo cenagoso posee superficies libres de agua y playones, la población cercana deriva su economía en la pesca especial y ganadería, está localizada en los departamentos de Magdalena y Cesar con un área de 40.000 hectáreas, almacena cerca de 1.000 millones cúbicos de agua. (*SINIC Colombia Cultural Sitios de Interés. Cesar*).

Ciénaga de Mallorquín: Laguna costera de 650 has de área, se localiza en la jurisdicción de Barranquilla y Puerto Colombia, vive en aumento deterioro ecológico, debido a que la ciudad vierte sus aguas residuales domésticas sin tratar, como también su extensión disminuye a causa de la instalación de residencias en sus riveras con el arrojamiento de escombros y material de relleno, mismas poblaciones que realizan prácticas acuícolas dañinas para el ecosistema. El río Magdalena con su agua aporta en el equilibrio hidrológico, pero a su vez vierte a la ciénaga sedimentos, contaminantes orgánicos y metales pesados. Cada año se pierde cerca de 60 metros de playa, lo

que apunta a pensar que la ciénaga podría desaparecer en algún momento futuro. *(Pino R J C .2014).*

Ciénaga del Guajaro: También conocida como embalse del Guajaro, es una zona de 16.000 has, alimentada por las lluvias del sector y altos caudales del río Magdalena, cuenta con una compuerta la cual permite la entrada de aguas del río crecido, sin embargo, sectores cercanos a los municipios de Manatí y Santa Lucía se fueron secando afectando a la población. El embalse fue construido al transformarse gran parte del área inundable del río Magdalena, por medio de un terraplén de 11 km de longitud. Al aumentar el nivel del agua por lo que permanecen las compuertas cerradas, se reduce la pesca generando conflictos sociales entre sus pobladores. *(avances en el manejo y aprovechamiento acuícola de embalses en América Latina y el Caribe.2017).*

5.6 Fenómeno de la niña.

Es el incremento de las lluvias y descenso de la temperatura en zonas con distintos relieves como lo son llanuras, valles, serranías y depresiones geográficas. Este fenómeno en los últimos años ha provocado un incremento notable en el cauce de los ríos siendo un factor de riesgo para los pobladores de los municipios de la zona media y baja del Magdalena. *(IDEAM. 2011).*

En el año 2011 se presentó y se catalogó este fenómeno como el más catastrófico de la historia por el aumento considerable en la precipitación de la región. El porcentaje de precipitación en este año fue de entre (57.9%-68.4%) generando aumentos considerables en la cota máxima del cauce de los ríos. *(Navarro Monterroza . 2018).*

En los años 2007, 2010 y 2017, los departamentos de Córdoba, Sucre y Magdalena presentaron desbordamientos de los ríos San Jorge, Sinú y Magdalena dejando una cantidad de

damnificados y provocando pérdidas en los ecosistemas de la región. Cuando se presenta el fenómeno de la niña 1 o 2 veces por año estas zonas presentan Inundaciones de gran magnitud siendo esencial implementar un modelo de prevención para reducir el riesgo y mejorar la infraestructura de protección para el territorio. (IDEAM.2011).

5.7 Fenómeno del niño.

El año 2019 tuvo un impacto fuerte en la economía marítima y pesquera en el Canal del dique, los bajos niveles de agua impiden la navegación de las embarcaciones transportadoras de mercancía, la poca captación de agua para la ciudad de Cartagena ocasiono un desabastecimiento en algunas zonas de la ciudad. (IDEAM. 2011).

El fenómeno del niño registro un descenso de la precipitación diaria de (-0.9 mm/h y 1.0 mm/h) generando un porcentaje en el aumento de la temperatura del (71%). Este estudio realizado por (Navarro Monterroza et al., 2018) nos permite analizar que los cambios extremos en la reducción de la lluvia es también un factor importante para el estudio y prevención de los riesgos de zonas de alta Vulnerabilidad.

Bajo la sequía que se estaba presentando preocupaba la falta de planificación y decisiones por estar permitiendo la navegación de barcos de gran tonelaje con sustancias peligrosas que pudieran afectar las bahías de Cartagena y el consumo de agua en la ciudad de Cartagena por ayudar con el abastecimiento de la ciudad, se implementaron obras de dragado en Pasa Caballos y en Calamar para ayudar a evitar el deterioro del rio. (IDEAM. 2011).



Figura 15. Panorámica del canal del Dique año 2019 disminución del cauce por sequía.

Obtenido de. Corporación Autónoma Regional (CAR)

El departamento de Córdoba y Sucre en el año 2019 y 2020, presentaron sequías en 7 municipios por el incremento de la temperatura y la reducción de la precipitación en la zona, el desabastecimiento de agua en esta época del año impacto fuertemente la economía por la muerte de animales bovinos, incendios forestales y el descenso del nivel del Rio San Jorge pero igualmente en las ciénagas como Lorica y Ayapel. (IDEAM. 2011).

6. Metodología.

El siguiente proyecto pretende realizar una modelación hidrológica de la zona del medio y bajo Magdalena, analizando los datos recolectados de las fuentes de información. Cuenta con dos fases la primera es la obtención de la información referente a la zona escogida, las estaciones pluviométricas y modelos digitales de elevación, y la segunda es la calibración y puesta a punto del modelo numérico que comprende el Índice Topográfico de Humedad TWI, periodos de retorno de la lluvia y edafología de la zona. La compilación de estos dos aspectos permite identificar el comportamiento de la cuenca media y baja del río Magdalena en condiciones normales y el rendimiento durante condiciones extremas futuras.



Figura 16. Delimitación Cuenca media y baja del Magdalena. Obtenido de: Fuente Propia

CODIGO	NOMBRE	DEPARTAMENTO	LATITUD	LONGITUD	ALTURA
29035080	NORMAL MANATI	Atlántico	10,45358	-74,95464	10
14015010	GALERAZAMBA	Bolívar	10,79417	-75,26056	20
23205020	COL COOPERATIVO	Bolívar	7,475	-73,92556	165
25025100	AEROPUERTO BARACOA	Bolívar	9,28194	-74,84528	18
25025210	PINILLOS	Bolívar	8,91139	-74,45778	10
29035030	PRESA AY GRANDE	Bolívar	9,87944	-75,32658	60
29035040	NUEVA FLORIDA	Bolívar	9,94417	-75,35139	13
23215030	AGUAS CLARAS	Cesar	8,22889	-73,60278	208
25025330	COLEGIO AGROPECUARIO PAILITAS	Cesar	8,95422	-73,63008	50
28035040	GUAYMARAL	Cesar	9,90492	-73,64753	50
13075010	CHIMA	Córdoba	9,15075	-75,62208	20
25015010	CENTRO ALEGRE	Córdoba	8,18078	-75,63228	170
25025160	CUBA HACIENDA	Córdoba	8,00389	-75,40278	50
25025170	COLOMBOY	Córdoba	8,74086	-75,49883	125
25025190	PLANETA RICA	Córdoba	8,39933	-75,58372	90
15015020	YE LA	Magdalena	10,99242	-74,21114	20
15015050	AEROPUERTO SIMON BOLIVAR	Magdalena	11,12833	-74,22889	4
25025300	SEIS EL	Magdalena	9,68367	-74,32228	50
13095020	PRIMATES	Sucre	9,53014	-75,35136	200

Figura 17. Coordenadas Geográficas de las estaciones de la zona de estudio cuenca media y baja del magdalena. Obtenido de IDEAM.

6.1. Análisis hidrológico e hidrodinámico de la zona.

La zona de la región Caribe perteneciente a la cuenca media y baja del río Magdalena cuenta con estaciones pluviométricas en los departamentos de Atlántico, Bolívar, Cesar, Córdoba, Magdalena y Sucre, los datos recolectados permitieron analizar las variaciones de la precipitación de los últimos 30 años.

La zona del Magdalena presentó condiciones extremas en años anteriores donde se produjeron inundaciones por aumento del caudal del Río Magdalena y el Canal del Dique, la variación de la precipitación de los últimos años y los fenómenos climáticos como la niña ayudaron a incrementar el nivel de riesgo en la zona.

6.2. Modelación hidrológica.

La representación de la cuenca media y baja del Magdalena tiene componentes interesantes para la elaboración de un modelo hidrológico e hidrodinámico, con base a los modelos digitales de elevación y los periodos de retorno con proyección de 50 y 100 años, tenemos un porcentaje de ocurrencia bastante preciso para predecir condiciones extremas en las zonas cercanas al Río Magdalena que comprenden un alto riesgo de inundaciones.

6.3 Puesta a punto del modelo.

La calibración del modelo hidrológico se divide en dos fases muy importantes las cuales después de la recolección de los datos y análisis de la información para la ejecución del modelo, los pasos en la metodología son los siguientes:

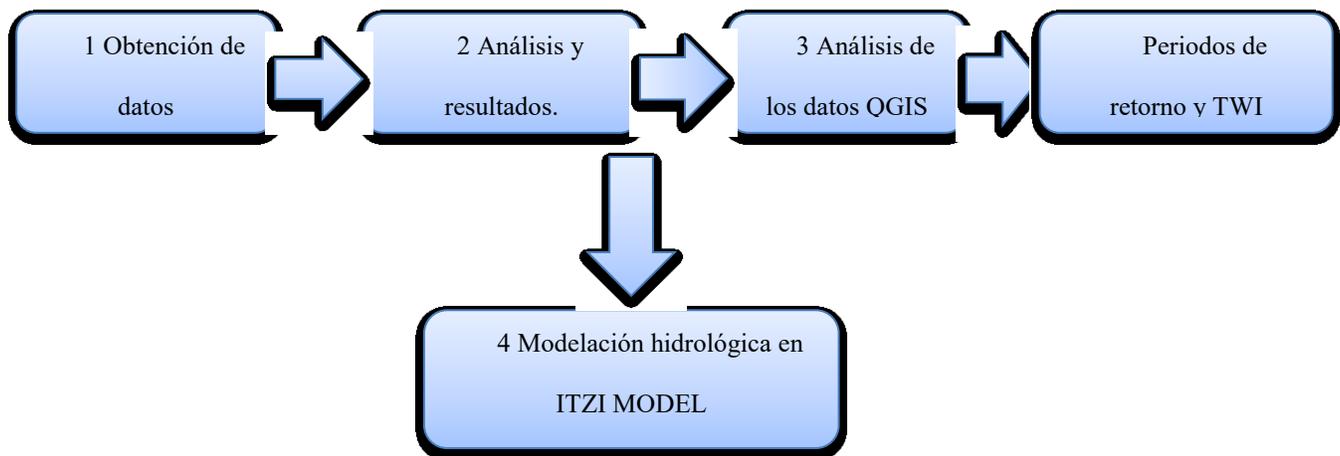


Figura 18. Análisis y obtención de datos para la modelación hidrológica IZTI. Obtenido de:

Fuente propia.

El desarrollo de estas 4 fases nos permite identificar los mecanismos acertados para el análisis de las cuencas media y baja del río Magdalena logrando obtener un modelo hidrológico de la zona con un grado de confiabilidad bastante alto y simular los movimientos del agua cuando se produce un evento extremo como son las inundaciones.

7. Análisis de resultados.

7.1 Periodos De Retorno de las estaciones Pluviométricas.

La modelación hidrológica e hidrodinámica desarrollada en la cuenca media y baja del Magdalena nos permitió determinar con base a datos recolectados por el IDEAM de 19 estaciones pluviométricas ubicadas entre los departamentos de Atlántico, Bolívar, Cesar, Magdalena y Sucre, entre los años 1981 y 2012 hay variaciones notables en la intensidad de la lluvia lo que presento en los años 1983 y 2011 inundaciones de gran magnitud en los municipios cercanos del rio Magdalena.

CODIGOS	NOMBRE	DEPARTAMENTO	F(T) 50 AÑOS	PROBABILIDAD	F(T) 100 AÑOS	PROBABILIDAD
29035080	NORMAL MANATI	Atlantico	95,71711	0,98	107,398	0,99
14015010	PINILLOS	Bolivar	108,77630	0,98	125,450	0,99
23205020	NUEVA FLORIDA	Bolivar	302,55850	0,98	359,927	0,99
25025100	GALERAZAMBA	Bolivar	58,82460	0,98	67,233	0,99
25025210	PRESA AY GRANDE	Bolivar	54,63600	0,98	61,741	0,99
29035030	COL COOPERATIVO	Bolivar	111,19240	0,98	127,624	0,99
29035040	AEROPUERTO BARACOA	Bolivar	54,53454	0,98	63,037	0,99
23215030	GUAYMARAL	Cesar	69,87035	0,98	78,985	0,99
25025330	COLEGIO AGROPECUARIO PAILITAS	Cesar	74,50124	0,98	84,262	0,99
28035040	AGUAS CLARAS	Cesar	89,31446	0,98	102,893	0,99
13075010	CENTRO ALEGRE	Cordoba	68,79590	0,98	78,509	0,99
25025170	CHIMA	Cordoba	62,29685	0,98	72,073	0,99
25015010	COLOMBOY	Cordoba	73,00471	0,98	84,191	0,99
25025160	CUBA HACIENDA	Cordoba	34,71595	0,98	41,137	0,99
25025190	PLANETA RICA	Cordoba	60,86618	0,98	70,778	0,99
15015020	AEROPUERTO SIMON BOLIVAR	Magdalena	31,22420	0,98	36,224	0,99
15015050	SEIS EL	Magdalena	41,75610	0,98	48,603	0,99
25025300	YE LA	Magdalena	45,90570	0,98	53,312	0,99
13095020	PRIMATES	Sucre	39,75680	0,98	45,150	0,99

Figura 19. Periodos de retorno estaciones de la cuenca media y baja del Magdalena. Fuente propia.

Los periodos de retorno se realizaron con una proyección de 25, 50 y 100 años en las cuales se podrá determinar el periodo de ocurrencia y la cantidad de precipitación que se tendrá para la

zona de estudio con un riesgo de inundación bastante elevado en la actualidad, esta predicción se realizó con base a los datos de la Figura.20.

Estación Galerazamba (14015010) Bolívar.

La estación cuenta con una recolección de datos desde 1981 hasta el año 2012 permitiendo un gran manejo y mayor predicción de los periodos de retorno en la zona donde se encuentra ubicado. Los datos a tener en cuenta fueron los siguientes.

Año	Máximo	N°	<i>xi</i>	$(xi - \bar{x})^2$
1981	30,00	1	30,00	178,89
1982	24,00	2	24,00	54,39
1983	11,00	3	11,00	31,64
1984	20,00	4	20,00	11,39
1985	38,00	5	38,00	456,89
1986	17,00	6	17,00	0,14
1987	34,00	7	34,00	301,89
1988	0,00	8	0,00	276,39
1989	0,00	9	0,00	276,39
1990	29,00	10	29,00	153,14
1991	37,00	11	37,00	415,14
1992	13,00	12	13,00	13,14
1993	0,00	13	0,00	276,39
1994	24,00	14	24,00	54,39
1995	0,00	15	0,00	276,39
1996	0,00	16	0,00	276,39
1997	0,00	17	0,00	276,39
1998	41,00	18	41,00	594,14
1999	19,00	19	19,00	5,64
2000	26,00	20	26,00	87,89
2001	0,00	21	0,00	276,39
2002	0,00	22	0,00	276,39
2003	10,00	23	10,00	43,89
2004	40,00	24	40,00	546,39
2005	14,00	25	14,00	6,89
2006	11,00	26	11,00	31,64
2007	3,00	27	3,00	185,64
2008	22,00	28	22,00	28,89
2009	19,00	29	19,00	5,64
2010	23,00	30	23,00	40,64
2011	26,00	31	26,00	87,89
2012	1,00	32	1,00	244,14
MAX	41,00	32	532,0	5791,5

Figura 20. Mínimos y máximos de precipitación estación Galerazamba (14015010). Obtenido del IDEAM y fuente propia.

Se determinó el valor máximo de precipitación desde 1981 hasta 2012 en el cual sobresalió el número 41.00, a continuación se demostrará los datos obtenidos en la Figura. Por las siguientes ecuaciones.

N= Número de años de los datos de precipitación desde 1981 hasta 2012.

$$N= 32$$

$\sum xi$ = Sumatoria de los 32 valores máximos de precipitación.

$$\sum xi = 30 + 24 + 11 + 20 + 38 + 17 + 34 + \dots + 1 = 532$$

X= Variable Probabilística de precipitación # 1

$$X = \frac{\sum xi}{\sum N} = \frac{532}{32} = 16,63 \text{ mm}$$

$(xi - x)^2$ = Precipitación anual.

$$(xi - x)^2 = (30 - 16,63)^2 = 178,89 \text{ mm}$$

$\sum(xi - x)^2$ = Valor acumulado de precipitación Anual.

$$\sum (xi - x)^2 = 178,89 + 54,39 + 31,64 + 11,39 + \dots + 244,14 = 5791,5 \text{ mm}$$

La primera figura demuestra los estudios y análisis previos que se deben realizar para la elaboración y predicción de los periodos de retorno de 25, 50 y 100 años. Procedemos a proyectar los periodos de retorno bajo los siguientes parámetros como se muestra en la Figura 21.

Periodo De Retorno	Variable Reducida	Precipitación (mm)	Prob. de Ocurrencia	Corrección Intervalo Fijo
Años	YT	XT'(mm)	F(xT)	XT (mm)
25	3,1985	44,5609	0,9600	50,3538
50	3,9019	52,0572	0,9800	58,8246
100	4,6001	59,4981	0,9900	67,2329

Figura 21. Periodos de retorno 25, 50 y 100 años con variables reducidas Estación

Galerazamba. Obtenido de fuente propia.

X2= Variable Probabilística de Precipitación # 2

$$X2 = \sqrt{\sum \frac{(xi - x)^2}{(N - 1)}} = \sqrt{\frac{5791,5}{32 - 1}} = 13,67 \text{ mm}$$

X3= Variable Probabilística de Precipitación #3.

$$X3 = \sqrt{\left(\frac{6}{\pi}\right)} * X2 = 10,66 \text{ mm}$$

X4= Variable Probabilística de Precipitación #4.

$$X4 = X2 * (0,5772 * X3) = 13,67 \text{ mm} * (0,5772 * 10,66 \text{ mm}) = 10,47 \text{ mm}$$

Respecto al análisis y el cálculo de las variables probabilísticas como se demuestra en la Figura. Vamos a realizar la proyección de los periodos de retorno de 25, 50 y 100 años.

Periodo de Retorno a 25 años.

YT= Variable Reducida

$$YT = LN \left(LN \left(\frac{25}{25 - 1} \right) \right) = 3,1985$$

XT'= Precipitación mm

$$XT^* = X4 + (X3 * YT) = 10,47 \text{ mm} + (10,66 * 3.1985) = 44,5609 \text{ mm}$$

F(xT)= Probabilidad de Ocurrencia

$$F(xT) = 0,9600 = 96\%$$

XT= Corrección del Intervalo Fijo

$$XT = XT^* * 1,13 = 44,5609 * 1,13 = 50,3538 \text{ mm}$$

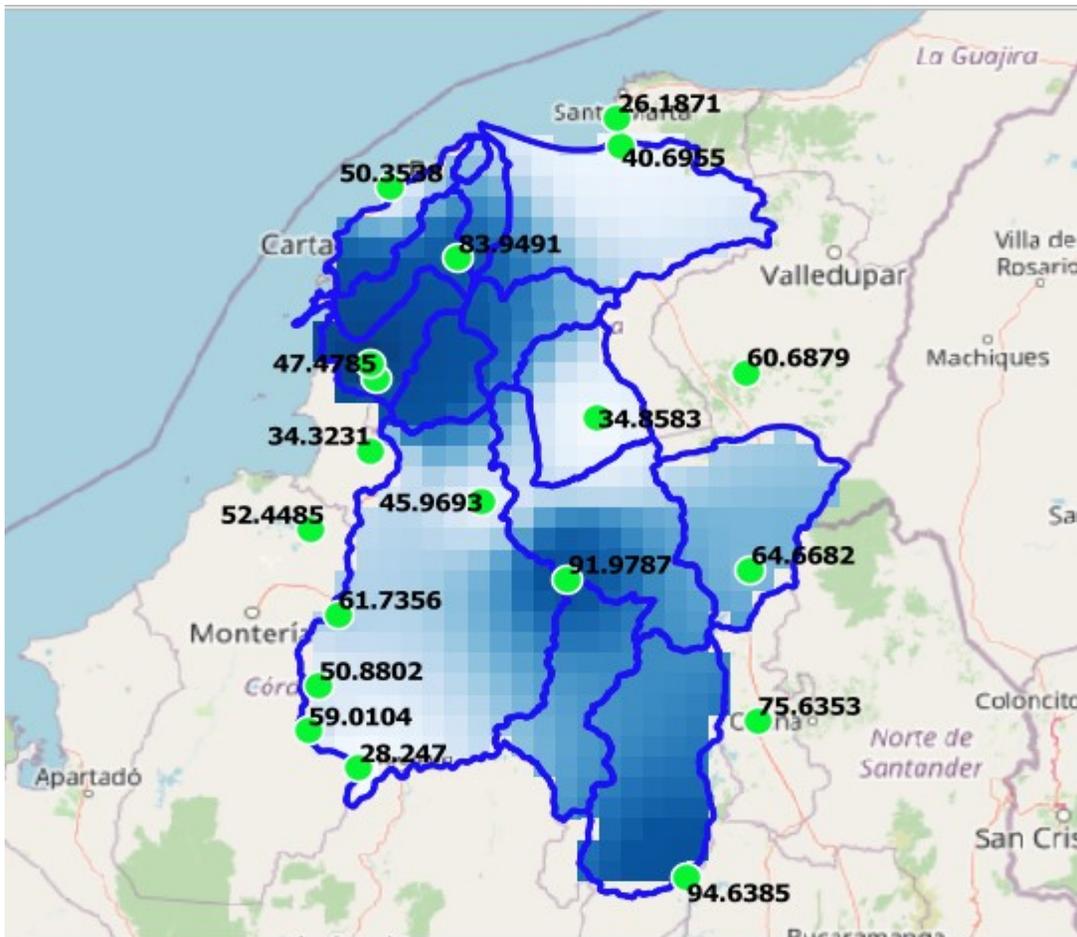


Figura 22. Periodos de retorno cuenca media y baja magdalena a 25 años. Obtenido de: Fuente propia.

Periodo De Retorno 50 Años

YT= Variable Reducida

$$YT = LN \left(LN \left(\frac{50}{50 - 1} \right) \right) = 3,9019$$

XT`= Precipitación mm

$$XT' = X4 + (X3 * YT) = 10,47 \text{ mm} + (10,66 * 3,9019) = 52,0572 \text{ mm}$$

F(xT)= Probabilidad de Ocurrencia

$$F(xT) = 0,9800 = 98\%$$

XT= Corrección del Intervalo Fijo

$$XT = XT' * 1,13 = 52,0572 * 1,13 = 58,8246 \text{ mm}$$

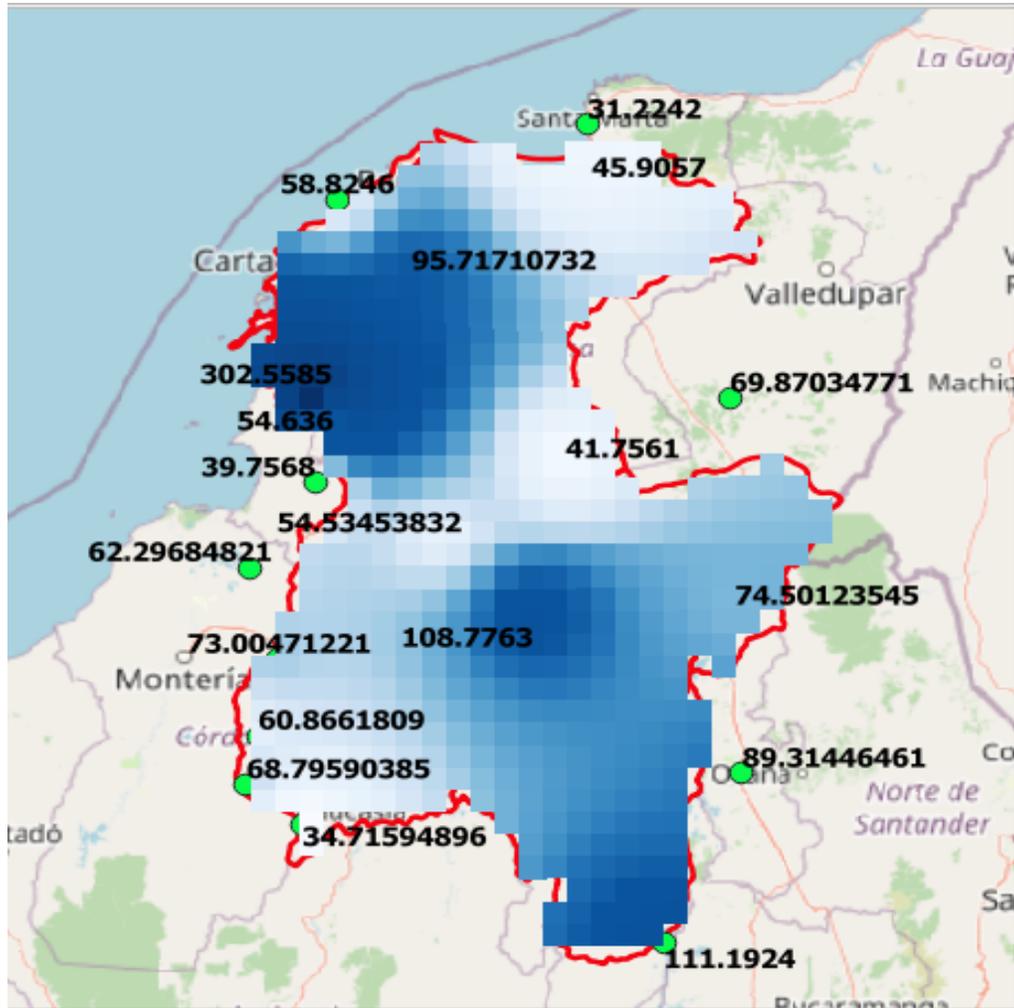


Figura 23. Periodos de retorno cuenca media y baja magdalena a 50 años. Obtenido de: Fuente propia.

Periodo De Retorno 100 Años.

YT= Variable Reducida

$$YT = LN \left(LN \left(\frac{100}{100 - 1} \right) \right) = 4,6001$$

XT= Precipitación mm

$$XT = X4 + (X3 * YT) = 10,47 \text{ mm} + (10,66 * 4,6001) = 59,4981 \text{ mm}$$

$F(xT)$ = Probabilidad de Ocurrencia

$$F(xT) = 0,9900 = 99\%$$

XT = Corrección del Intervalo Fijo

$$XT = XT^* * 1,13 = 59,4981 * 1,13 = 67,2329 \text{ mm}$$

Los periodos de retorno de la estación Galerazamba en Bolívar demuestran que el nivel de ocurrencia de precipitación en un tiempo determinado es bastante confiable, las proyecciones demostraron que la zona de las cuencas mientras más tiempo vaya transcurriendo incrementa el riesgo de inundaciones.

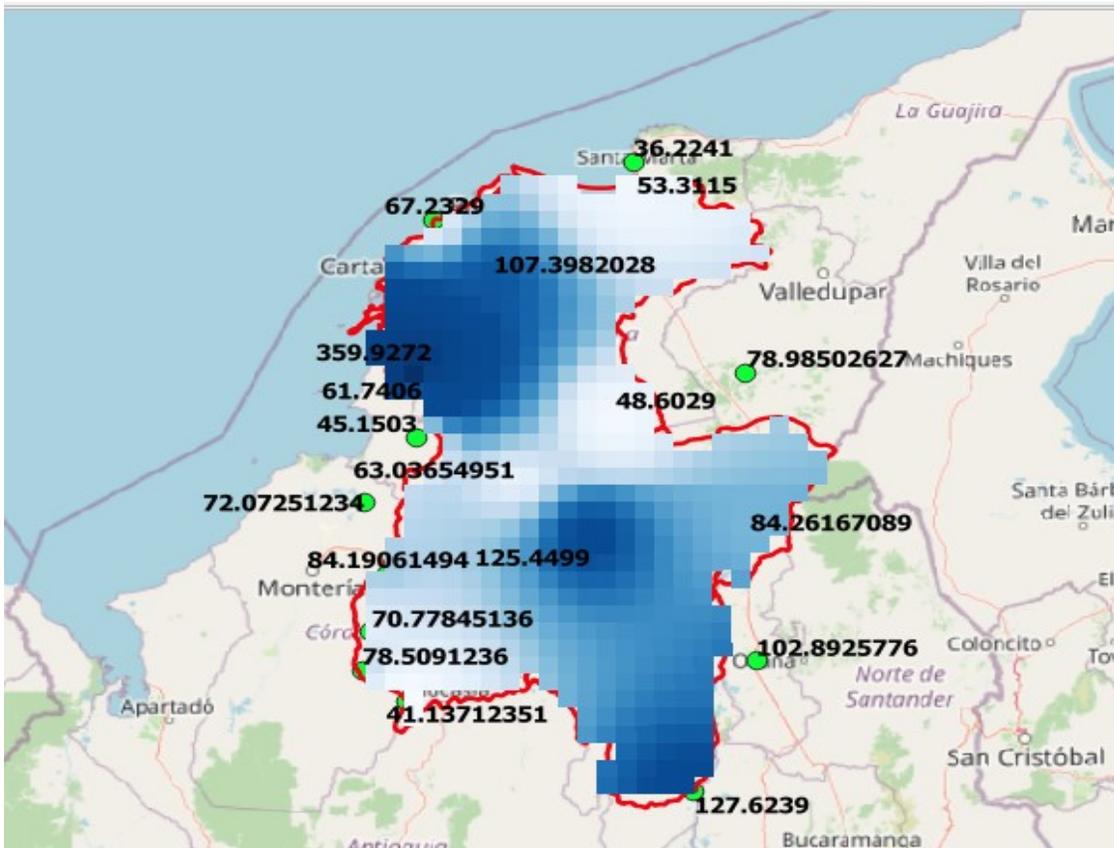


Figura 24. Periodos de retorno cuenca media y baja magdalena a 100 años. Obtenido de:

Fuente propia.

7.2 Modelo digital de elevación (DEM)

Representa la topografía de la zona, la cual determina los parámetros de la modelación hidrológica (pendientes), en la zona comprendida se identificaron sectores con diferentes tipos de relieve los cuales tenemos asociados con los metros sobre el nivel del mar (M.s.n.m).

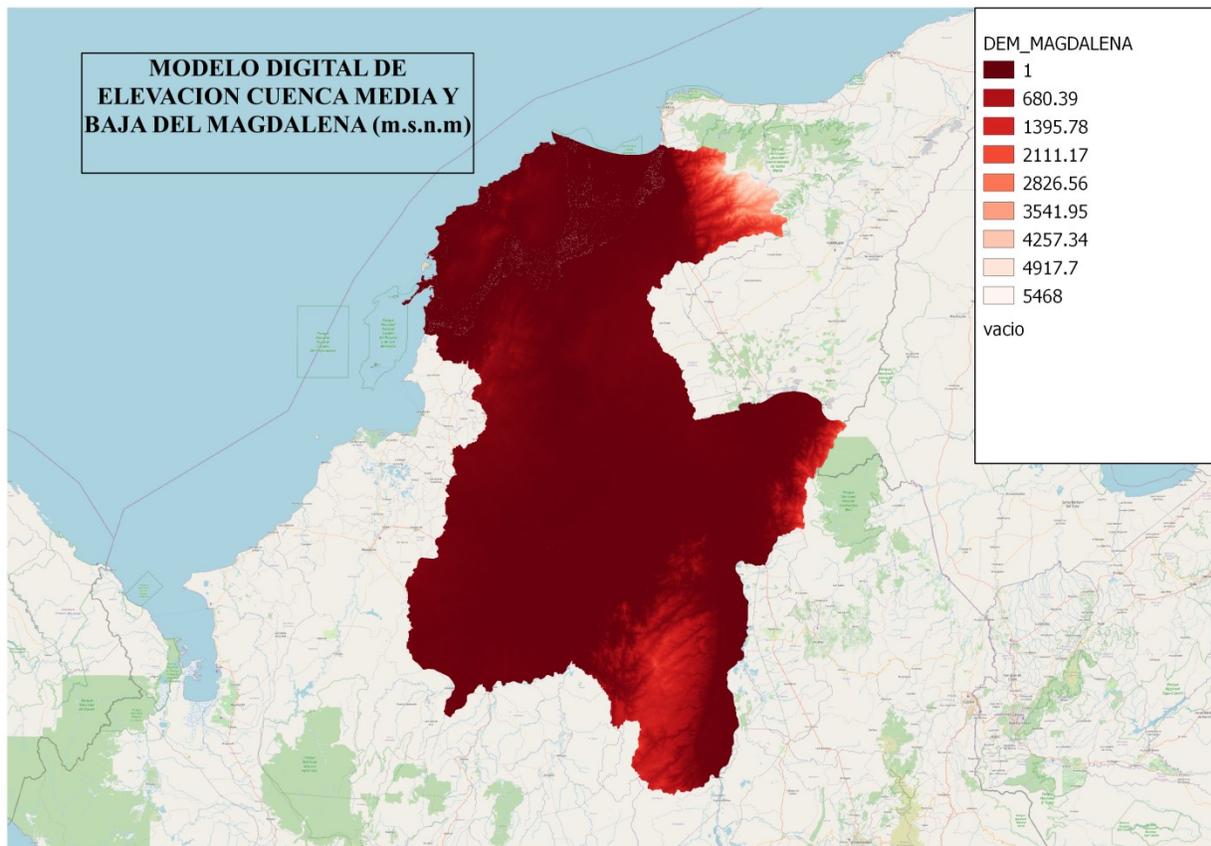


Figura 25. Modelo digital de elevación de la zona en estudio. Obtención fuente propia.

La siguiente imagen corresponde a la zona seleccionada, esta franja de relieve pertenece a los Departamentos de Atlántico, Bolívar, Cesar, Córdoba, Magdalena y Sucre.

La escala que se mostrara a continuación permite realizar un análisis avanzado sobre las elevaciones de la cuenca media y baja del Magdalena donde analizaremos la caracterización del tipo de terreno que conforma cada territorio.

El rango de (4257.34-5468) m.s.n.m nos muestra la altitud por la zona del Magdalena en el cual podemos evidenciar que se encuentra ubicada la Sierra Nevada De Santa Marta, tiene un relieve montañoso lo que permite tener unas condiciones climáticas bastante interesantes puesto que tiene playas cercanas y también picos de nieve.

Analizando el rango entre (1-2111.17) m.s.n.n el cual esta con Color Rojo Oscuro es la altitud del gran porcentaje de la zona de las cuencas media y baja del Magdalena, La zona de Atlántico, Bolívar y Córdoba está conformado topográficamente por llanuras y pequeñas depresiones del terreno. La parte de Cesar tiende a hacer una llanura, pero cuenta con una mayor cantidad de zonas montañosas conocidas como serranías por lo que la escorrentía provocada por la precipitación en épocas húmedas es de alto riesgo para los municipios cercanos al Rio Magdalena.

Los rangos (2826-3541.95) m.s.n.m están ubicados en el departamento de sucre otro sitio con bastantes serranías y depresiones geográficas, tiene una gran riqueza hidrológica. La humedad referente a las precipitaciones que se presentan periódicamente lo coloca como una zona de inundaciones bastante reiterativa.

7.3 Índice topografico de humedad (TWI)

La descripción de los Modelos digitales de elevación (DEM) y sus características geométricas como la topografía nos permite determinar el índice de humedad TWI, esta relacionado con la cantidad de agua depositada en el terreno, cuanto mas altura sobre el nivel del mar tenga una zona mayor sera la humedad en el sector, se asumen las lluvias en todo el territorio norte de Colombia con los datos recolectados de las estaciones pluviométricas cercanas a las cuencas, la edafología de la zona permite analizar el escurrimiento superficial y la infiltración dependiendo el

tipo de suelo (arena, arcilla y limos) en la cuenca media y baja del magdalena e identificar los sectores donde hay mayor probabilidad de acumulación de agua.

A continuación se dará a conocer los diferentes sectores de la zona seleccionada con sus respectivos rangos y características de la figura 26.

NOMBRE	INTERVALO	CARACTERISTICAS
Valles aluviales	15,6 – 19,4	Zonas bajas con red de drenajes, pendientes mínimas, suelos que poseen gran cantidad de humedad, en tiempos de alta precipitación sus ríos aumentan el nivel teniendo alta probabilidad de desbordamiento.
Pie de ladera	10,9 - 15,5	Desniveles bajos, inicio de la ladera, se deposita parte de los sedimentos arrastrados por el río durante su recorrido, zona con depresiones topográficas mínimas y suelos arcillosos que provocan acumulaciones de agua y partículas sólidas que son un punto de quiebre para el recorrido natural de los ríos.
Laderas	6.1 - 10,8	Pendientes pronunciadas y/o asociadas a su red de drenajes, erosión del suelo por su poca vegetación en algunas zonas, la escorrentía acumulada genera el arrastre de sedimentos provocando obstrucción en el recorrido del río donde la cota del cauce tiende a incrementar y provoca desbordamientos de los ríos y acumulaciones de agua en depresiones topográficas.
Crestas	1,4 – 6	Altitudinales máximas, baja humedad por ser una zona de formación de cuencas, de manera súbita en periodos de precipitación alta “Fenómeno de la niña” el aumento de su capacidad de agua provoca arrastre de sedimentos y materiales que promueven el incremento del cauce de los ríos presentando inundaciones en poblaciones cercanas.

Figura 26. Intervalos y caracterización del TWI y DEM. Obtenido de: Fuente Propia

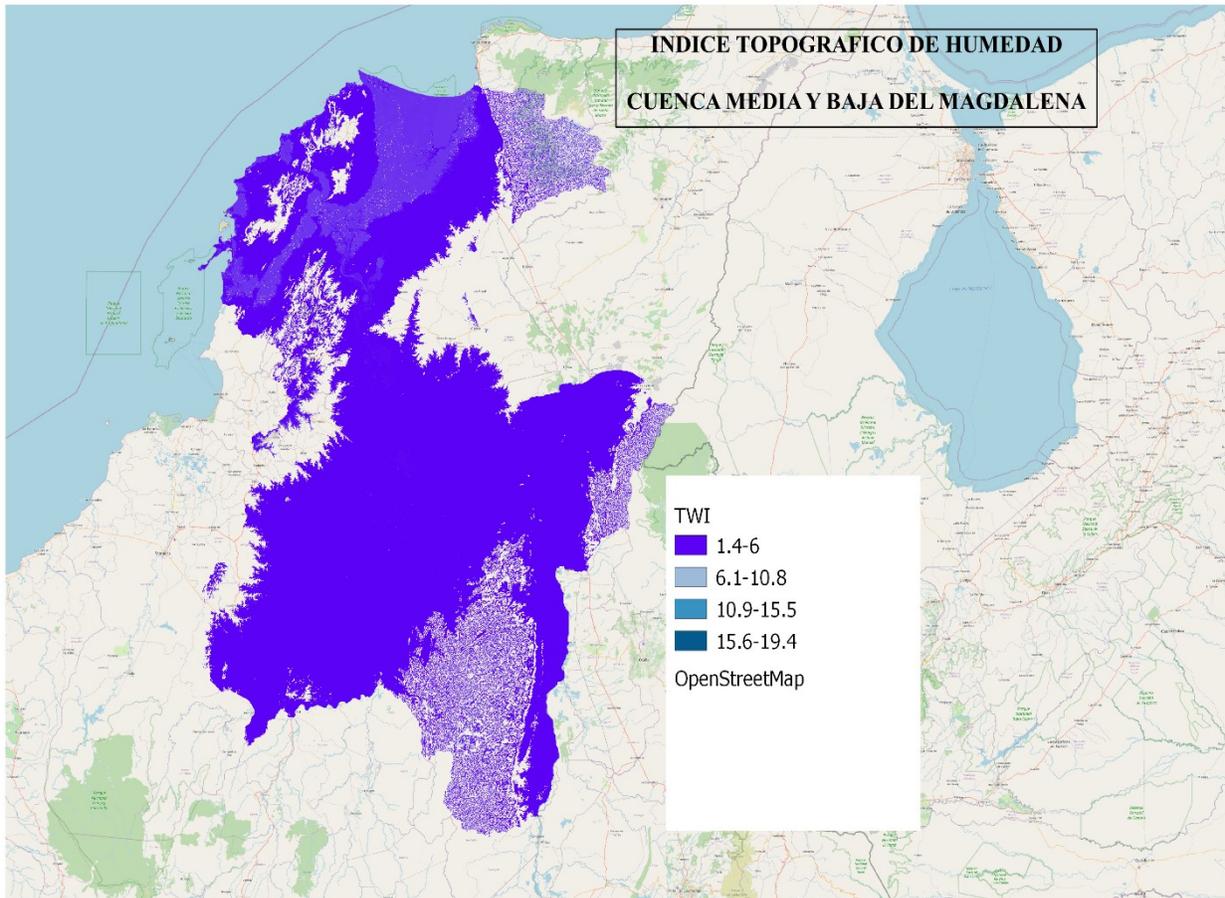


Figura 27. Índice Topográfico de Humedad (TWI) cuenca media y baja del Magdalena.

Obtenido de fuente propia.

La zona de Bolívar y Atlántico se encuentra en el rango de humedad de (6.1-10.8) y (10.9-15.5), es un territorio de bastante precipitación en épocas de humedad, por lo tanto tener cerca los afluentes del río Magdalena y Canal del Dique lo hace propenso a inundaciones de una gran magnitud, influye su topografía donde el territorio está conformado por llanuras y depresiones topográficas que permiten el almacenamiento de masas de agua por escorrentía y la duración de las lluvias en (mm/h).

Córdoba y Sucre están bajo el rango de humedad (1.4-6) zona de serranías y montañas es una zona con menor humedad a la anterior pero igualmente su relieve ayuda a acumular más fácilmente la precipitación por escorrentía superficial, a continuación, en la edafología del territorio nos muestra gran porcentaje de suelo arcilloso y debido a la cohesión de sus partículas y baja porosidad genera acumulaciones de agua que llegan a los ríos aumentando la cota del cauce.

Magdalena y Cesar (15.6-19.4) tiene una red de drenaje bastante baja por lo que es una zona de humedad alta y el paso del río Magdalena influye en las inundaciones históricas que se han presentado en toda la zona norte del país.

7.4 Edafología de la zona

El territorio colombiano está conformado por una gran cantidad de arena y arcilla en las zonas de la región caribe foco principal del estudio que estamos desarrollando para el análisis de Humedad y precipitaciones con proyección a 25,50 y 100 años, se desarrollaron 4 mapas con las principales características del suelo (Green Ampt) este análisis nos entrega diferentes atributos para la predicción de inundaciones en la zona en estudio.

Zona Cuenca Media y Baja Del Magdalena

Taxonomía Del Suelo

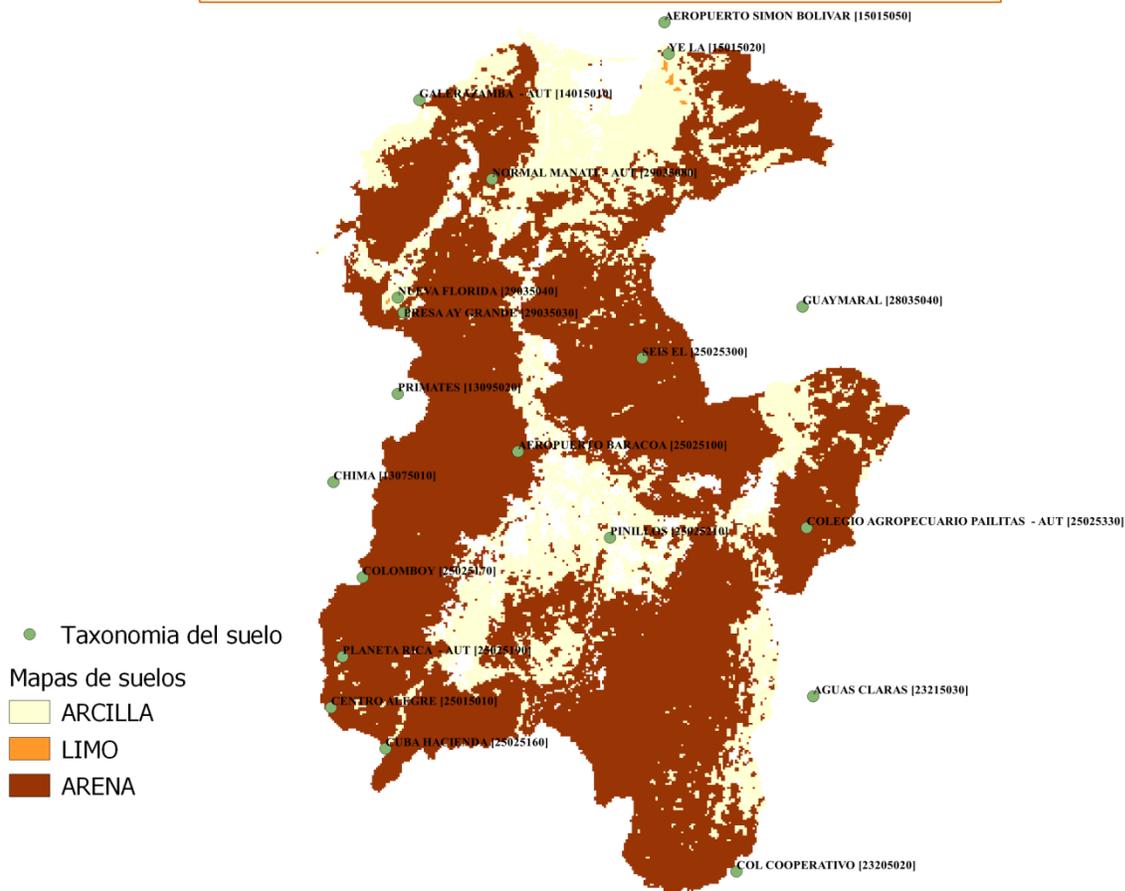


Figura 28. Taxonomía del suelo Colombiano. Obtenido de Soilgrid y fuente propia.

El mapa de clasificación de suelos nos entrega información fundamental para el desarrollo del proyecto en donde se puede observar que el 80% está conformado por Arena el 18% por Arcilla y el 2% por Limos. El suelo cuenta con unas características principales para la conductividad, porosidad y capilaridad del suelo en los cuales vamos a indicar los niveles y rangos que se manejan por la zona.

Porosidad.

La porosidad del suelo se debe a la cantidad de espacios vacíos que tiene el suelo y la cantidad de almacenamiento de agua que puede tener estos huecos, La arena (0,44) tiene un porcentaje menor de poros donde permite que el agua llegue más fácil de manera subterránea y se presenten acuíferos, mientras que la Arcilla (0,53) por ser un material cohesivo no permite la permeabilidad del agua y se presentan formaciones de agua.

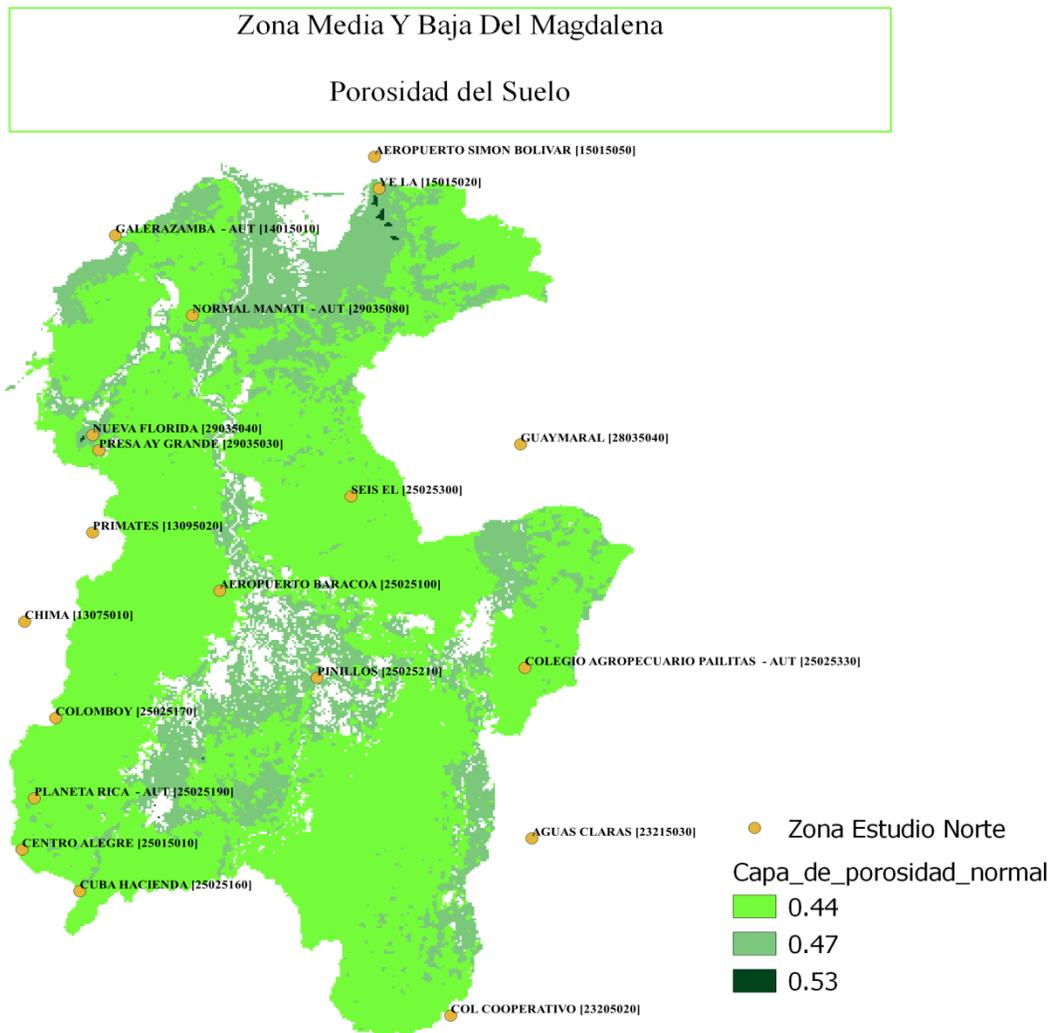


Figura 29. Porosidad del suelo colombiano. Obtenido de Soilgrid y fuente propia

Capilaridad.

La capilaridad del suelo permite identificar la subida y bajada del agua por medio de los espacios intersticiales del suelo, La arena (7,21) por su taxonomía y su porosidad le permite que la ascensión sea más fácil que en la arcilla (6,38) por la cohesión de sus partículas los fluidos no logran salir a la superficie.

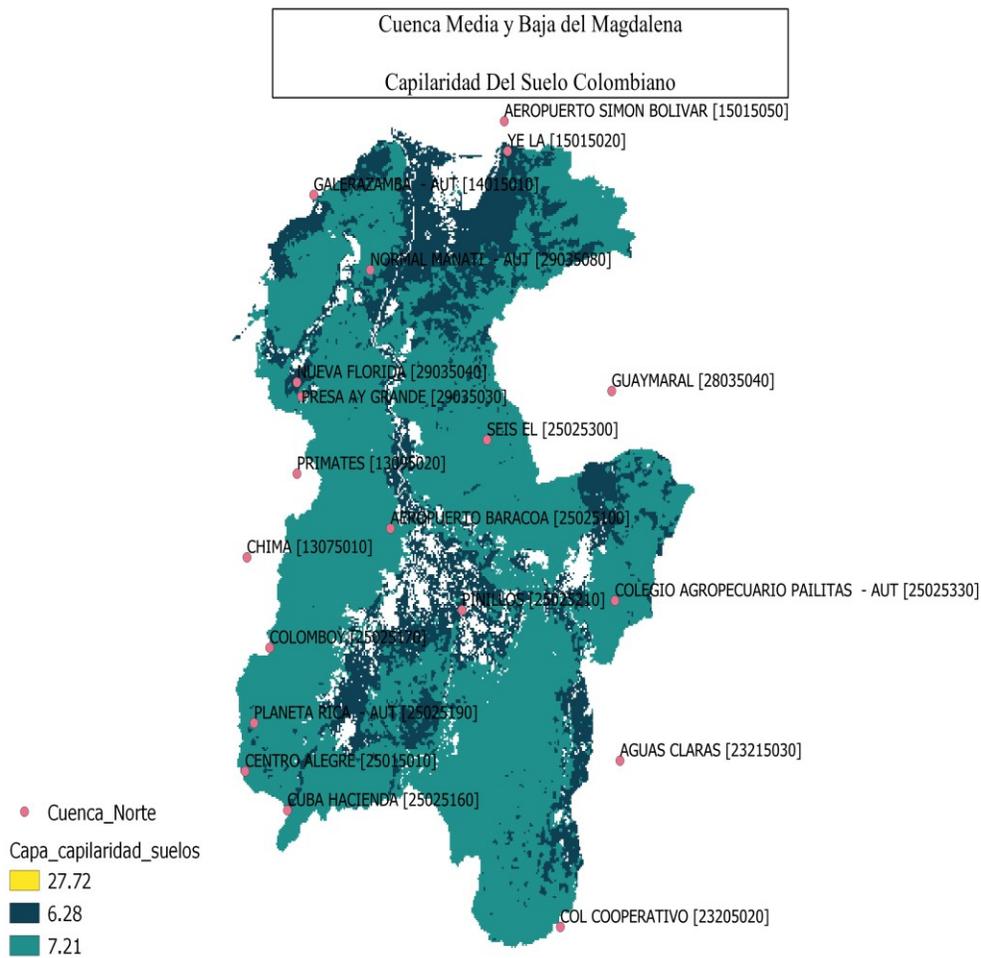


Figura 30. Capilaridad del suelo Colombiano. Obtenido de Soilgrid y fuente propia.

Conductividad Hidráulica.

Es la infiltración que se presenta en el terreno, el mapa de Conductividad hidráulica del suelo colombiano nos permitió analizar que el valor de infiltración de la arena (11,78) es demasiado elevado a comparación de la arcilla (0,03) identificamos que las zonas de arena cuentan con mayor cantidad de aguas subterráneas y en las arcillas se tienen mayores cuerpos de agua superficiales por esta razón verificando la zona en estudio tenemos que es bastante propensa a aumento de caudales y desbordamiento de ríos.

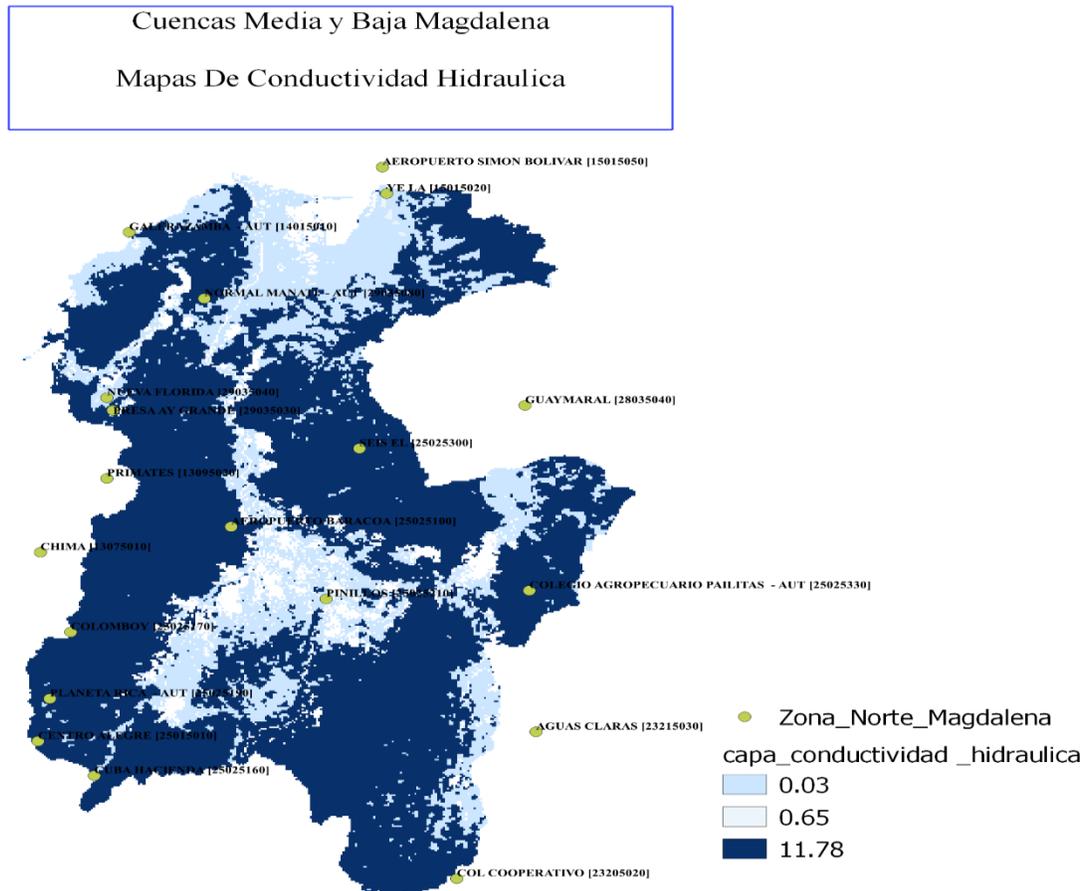


Figura 31. Conductividad hidráulica del suelo Colombiano. Obtenido de Soilgrid y fuente propia.

8. Conclusiones.

La recolección de los datos en las estaciones pluviométricas ubicadas en la zona media y baja del Magdalena tienen picos máximos de precipitación desde 1981 hasta 2012 (44mm y 84 mm), el departamento de Bolívar con las estaciones de Nueva Florida y Colegio Cooperativo tienen una proyección del periodo de retorno a 100 años en un rango de 127,624 mm y 359,927 mm obteniendo una diferencia considerable con la precipitación del año 2012, aumentando el riesgo de inundación por el recorrido del Río Magdalena por el Canal del Dique y la topografía del territorio con abundantes valles y laderas.

Con estas proyecciones se desarrolló un mapa por medio del Sistema de Información Geográfica QGIS se delimitaron las zonas de la cuenca baja y media del Magdalena identificando riesgos de inundaciones, la Edafología y propiedades del suelo nos permitió recolectar datos como el coeficiente de porosidad, Capilaridad, Conductividad hidráulica del suelo en arenas y arcillas siendo fundamental para la prevención y simulación de las zonas de inundación por medio de una modelación hidrológica.

La cuenca media y baja del río Magdalena presentan una topografía variada, zonas planas como también sectores montañosos, para la identificación de estas características fue necesario los modelos digitales de elevación. Respecto al índice topográfico de humedad TWI el sistema de información geográfica (QGIS), nos proporcionó rangos numéricos, cuanto más elevado sea el TWI mayor será la humedad en el sector: (15,6 - 19,4) corresponden valles aluviales, siendo gran parte de la zona en estudio, (10,9 – 15,5) pie de laderas, (6,1 – 10,8) laderas, y (1,4 -6) crestas o zona de mayor altura, estos contienen diversos niveles de humedad, también dependen de la edafología y la taxonomía del suelo. La resolución a 30 metros fue la adecuada para el análisis, indicando que en el área seleccionada la mayor parte de su relieve es de poca altura, en tiempos

de lluvias altas se incrementa la humedad debido a su bajo desnivel, como también tiene zonas montañosas en minoría con baja humedad debido a que desciende hacia zonas planas cercanas.

La cuenca media y baja del Magdalena tienen zonas donde se presentan acumulaciones de agua importantes para el abastecimiento de los municipios cercanos los cuales son humedales y ciénagas, en tiempos de lluvias altas moderan las avenidas de los ríos vecinos, almacenando parte del material que transportan. El fenómeno de la niña provoca un incremento en el nivel del agua debido al aumento de la precipitación en los periodos húmedos de gran magnitud, en el fenómeno del niño muchos de estos humedales se secan y se convierten en zonas aridas provocando daños irreparables al ecosistema que se beneficia.

9. Futuras líneas de trabajo

La modelación hidrológica e hidrodinámica de la cuenca media y baja del Magdalena, permitirá que nuestro trabajo de investigación sea el punto de partida para estudiantes o entidades en el avance en cuanto a prevención y análisis de inundaciones en el territorio colombiano.

recolectando información de otros municipios o regiones del país, algunas de las posibles líneas de investigación o proyectos son:

- Realizar análisis de factores relacionados al desagüe del cauce del río, como son: dragado de sedimentos, el ancho del mismo.
- La construcción de obras de protección en lugares donde haya mayor probabilidad de desbordamientos de los ríos y se tenga centros de población.
- Realizar modelaciones y respectivamente analizar posibles inundaciones en diversas cuencas con las mismas condiciones del territorio nacional.
- Identificar el sistema de arrastre de sedimentos a lo largo del río, efectuando una modelación.
- Un análisis enfocado en los fenómenos y cambios climáticos que se presentan en el territorio colombiano como son El Niño y La Niña.

10. Bibliografía.

- Aceves Quesada, J. F., Legorreta Paulín, G., Lugo Hubp, J., Umaña Romero, J., & Legorreta Cuevas, H. A. (2016). Sistemas de información geográfica y cartografía geomorfológica aplicados al inventario de deslizamientos y cartografía de susceptibilidad en la cuenca del río El Estado, Pico de Orizaba, México. *Investigaciones Geográficas*, 2016(91), 43–55. <https://doi.org/10.14350/rig.46503>.
- Aguilera-Díaz, M. M. (2004). La Mojana riqueza natural y potencial económico. *Documentos de Trabajo Sobre Economía Regional y Urbana ; No. 48*, 48. <http://repositorio.banrep.gov.co/handle/20.500.12134/3204>
- Aguilera Díaz, M. M. (2009). Ciénaga De Ayapel: Riqueza en Biodiversidad y Recursos Hídricos, Documentos de trabajo sobre economía regional. 74.
- Arbelaez, J. S. (2010). Evaluación de herramientas informáticas para el análisis de amenaza por inundaciones.
- AVANCES EN EL MANEJO Y APROVECHAMIENTO ACUICOLA DE EMBALSES EN AMERICA LATINA Y EL CARIBE. (n.d.), from <http://www.fao.org/3/ab488s/AB488S04.htm#ch3.2.11>
- Bittner, D., Rychlik, A., Klöffel, T., Leuteritz, A., Disse, M., & Chiogna, G. (2020). A GIS-based model for simulating the hydrological effects of land use changes on karst systems – The integration of the LuKARS model into FREEWAT. *Environmental Modelling and Software*, 127(March). <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104682>
- Cálculo del Índice Topográfico de Humedad TWI - Gis&Beers.
- Campos-Aranda. (2014). Modelación del proceso precipitación-escorrentía mensual por medio de regresiones. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 15(4), 625–636. [https://doi.org/10.1016/s1405-7743\(14\)70660-2](https://doi.org/10.1016/s1405-7743(14)70660-2).
- Campos-Aranda. (2015). Estimación simultánea de datos hidrológicos anuales faltantes en múltiples sitios. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 16(2), 295–306. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2015.03.013>.
- Caro Camargo, C. A., & Bayona Romero, J. A. (2018). Hydro-dynamic modeling for identification of flooding zones in the city of Tunja. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 88, 40–54.
- Castellanos, C. A. (2001). Los ecosistemas de humedales en Colombia. *Revista Luna Azul*, 13(7), 45–56. http://lunazul.ucaldas.edu.co/index2.php?option=com_content&task=view&id=171&I...%0Ahttp://lunazul.ucaldas.edu.co/downloads/8e3fad50Revista13_4.pdf
- Cormagdalena. (2013). Caracterización física, demográfica, social y económica de Río Grande la Magdalena. *Cormagdalena*, 124. http://dc02eja.cormagdalena.gov.co/recursos_user/PMA/Caracteriza Río Magdalena.pdf
- Depresión Momposina. Poblamiento*. Retrieved May 21, 2020, from <https://web.archive.org/web/20190505053034/https://pueblosoriginarios.com/sur/caribe/momposina/depression.html>.
- Díaz de la Cruz, V. (2012). Análisis hidrológico e hidráulico mediante técnicas SIG de la peligrosidad por inundaciones en la cuenca del PLA de Sant Jordi (Mallorca). 97, 61-68.
- estudios hidrológicos - allpe - estudios hidrológicos - madrid. (n.d.). <http://www.allpe.com/ingenieria/hidrologia/estudios-hidrologicos/>

- Evento, D. E. L., Luis, A., Bas, I., Carlos, I., & García, M. (2016). Modelación Hidrológica E Hidráulica Del Comportamiento Extraordinario De Febrero-Marzo
- Farajat, Schaefer, Hassanat, Atteyat, Jahed, K. (2015). Using GIS and geophysics in selecting suitable basins with freshwater aquifers for an efficient exploration strategy - A case study from Petra-Region, Jordan. *Earth Sciences Research Journal*, 19(1), 39–50. <https://doi.org/10.15446/esrj.v19n1.48357>
- Fernández-Soto, E., & Peña-Cortés, F. (2016). Aplicación de un modelo hidrológico espacialmente distribuido en dos cuencas costeras de la región de la araucanía (chile1). *Estudios Geográficos*, 77(280), 35–56. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201602>
- Ferrer Alessi, V., & Torrero, M. P. (2015). Manejo integrado de cuencas hídricas: Cuenca del río Gualjaina, Chubut, Argentina. *Boletín Mexicano de Derecho Comparado*, 2015(143), 615–643. <https://doi.org/10.22201/ijj.24484873e.2015.143.4941>
- Francés, F., & Bussib, G. (2014). Análisis del impacto del cambio climático en el ciclo de sedimentos de la cuenca del río Ésera (España) mediante un modelo hidrológico distribuido. *Ribagua*, 1(1), 14–25. [https://doi.org/10.1016/s2386-3781\(15\)30004-9](https://doi.org/10.1016/s2386-3781(15)30004-9)
- García Arbelaez, C. (2015). De Colombia. 32.
- García Arbelaez, N. (2015). Alternativa de reducción del caudal en el canal del dique mediante angostamiento de la sección por sectores y construcción de la esclusa de paricuica, 37
- García, S. G. (2002). Simulación Hidrológica Basada En Sig : 295–308. HEC-RAS 4.1. (n.d.).
- Hidráulica, I., & Ambiental, Y. (n.d.). Incertidumbre en los modelos hidrológicos y planeación de obras hidráulicas en México: Vol. XXXVI (Issue 2).
- IDEAM. (2018). IDEAM. Modelación hidrológica.
- IDEAM. (2018). IDEAM. Protocolo de modelación de la dinámica del agua.
- IDEAM. (2018). Protocolo De Modelación De La Dinámica Del Agua.
- IDEAM. (2020). IDEAM. Obtenida solicitud de información estaciones hidrometeorológicas.
- IDEAM. (2020). Precipitación de estaciones pluviométricas de los últimos 30 años.
- IDEAM. (2011). Análisis del impacto del fenómeno “la niña” 2010-2011 en la hidroclimatología del país.
- J, A. S., & J, A. S. (n.d.). Después de la inundación. XLI(2), 213–246.
- López López D. (2006). Desarrollo e implementación de un modelo para la clasificación N automática de unidades de relieve a partir de modelos digitales de elevación.
- Macías Barberán, R., Cuenca Nevárez, G., Intriago Flor, F., Caetano, C. M., Menjívar Flores, J. C., & Henry Antonio Pacheco Gil. (2019). Vulnerability to climate change of smallholder cocoa producers in the province of Manabí, Ecuador. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 72(1), 8707–8716. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v72n1.72564>
- Mari, N. A., Pons, D., Vicondo, M., Barreda, M., Amarilla, M., Nacional, I., Agropecuaria, D. T., & Córdoba, E. E. A. M. (2019). Bases para la caracterización de la hidrología superficial de la cuenca del río Cruz del Eje en la Provincia de Córdoba , Argentina. 636(5988), 18. modelación hidrológica - IDEAM. (n.d.).
- Mogollón Vélez, J. V. (2013). El Canal del Dique: historia de un desastre ambiental.
- Navarro, E, Arias, S. (2018). Variabilidad espacio-temporal de la precipitación en Colombia durante eventos ENSO.
- Nogueira, L.A. (2016). Análisis de incertidumbre en modelos hidrológicos hec-hms.
- Palacio, G. & G. (2010). Calibración de un modelo hidrodinámico 2D para la bahía de cartagena. *DYNA (Colombia)*, 77(164), 152–166.

- Pascual-aguilar, J. A. (2020). *Caracterización hidrológica de la cuenca del río Chicamocha en Colombia , con el programa Hydro-BID. February.*
- Pavon Caicedo J.D. (2012). Cambio climático en Colombia: tendencias en la segunda mitad del siglo xx y escenarios posibles para el siglo xxi, pp. 261-279
- Pino R J C (Ciénaga de Mallorquín, situación actual y derrotero)
- Reyes de La Cruz, A. López Ocaña, G. & Hernández Trejo H. (2002). Evaluación preliminar Sobre de los efectos de la inundación en el mangle. División académica de ciencias Biológicas. UJAT, México, pp. 135-139.
- Rodríguez Rincón J.P. (2011). Evaluación de los procesos costeros hidrodinámicos en la Laguna de Mechoacán Tabasco, México.
- SINIC - Colombia Cultural - Sitios de Interés - CESAR.* (n.d.). Retrieved, from <http://www.sinic.gov.co/SINIC/ColombiaCultural/ColCulturalBusca.aspx?AREID=3&SECID=8&IdDep=20&COLTEM=213>
- Torres Padilla, Rodríguez, R. & C. (2016). La modelación hidrodinámica para la gestión hídrica del embalse del Guájaro, Colombia. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, 32(3), 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2015.04.001>
- Torres Pineda C.E. (2015). Modelación hidráulica de las condiciones actuales del tramo calamar santa lucia en el canal del dique.
- Viji, R. Prasanna, P. Rajesh Ilangoan, R. (2015). Gis base SCS - CN método foro estimating runoff in Kundahpalam watershed, Nilgries District, Tamilnadu. *Earth Sciences Research Journal*, 19(1), 59–64. <https://doi.org/10.15446/esrj.v19n1.44714>
- Vista de métodos numéricos para la predicción de inundaciones | revista de iniciación científica. (n.d.).
- Wahid, Madden, Khalaf, F. (2016). Análisis geoespacial para determinar las características hidromorfológicas y evaluar las inundaciones potenciales en llanuras costeras áridas: Caso de estudio en el suroccidente de Sinaí, Egipto. *Earth Sciences Research Journal*, 20(1), E1–E9. <https://doi.org/10.15446/esrj.v20n1.49624>
- Wurl, J., García, C. N. M., & Lamadrid, M. Á. I. (2015). Caracterización del peligro por inundaciones en el oasis La Purísima, Baja California Sur, México. *Investigaciones Geográficas*, 87(87), 76–87. <https://doi.org/10.14350/rig.41858>