



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA ESTIMACIÓN DE ZONAS DE  
INUNDACIÓN CON INFORMACIÓN ESCASA POR MEDIO DE DESCRIPTORES  
GEOMORFOMÉTRICOS DERIVADOS DE MODELOS DIGITALES DE  
ELEVACIÓN**

**Gabriel Jaime Pérez Mesa**

Universidad Nacional de Colombia sede Medellín

Facultad de Minas - departamento de Geociencias y Medio Ambiente

Medellín - Colombia

2014

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA ESTIMACIÓN DE ZONAS DE  
INUNDACIÓN CON INFORMACIÓN ESCASA POR MEDIO DE DESCRIPTORES  
GEOMORFOMÈTRICOS DERIVADOS DE MODELOS DIGITALES DE  
ELEVACIÓN**

**Gabriel Jaime Pérez Mesa**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

**Maestría en Ingeniería – Recursos Hidráulicos**

Director:

Ph.D, Verónica Botero

Co- Director:

Ph.D, Jaime Ignacio Vélez

Línea de investigación

Sistemas Hidrológicos – Planificación de Recursos Hidráulicos – Línea Hidráulica E  
Hidrodinámica

Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos (PARH)

Universidad nacional de Colombia sede Medellín

Facultad de Minas - departamento de Geociencias y Medio Ambiente

Medellín - Colombia

2014

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todos mis profesores y compañeros por el conocimiento y enseñanzas que me han brindado en estos últimos dos años en el Posgrado de Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos y por haberme dejado participar en la bella experiencia de la investigación que me ha enseñado un camino en el cual puedo contribuir a la sociedad y a mi crecimiento personal. Especialmente expreso mi gratitud a la Dr. Verónica Botero y al Dr. Jaime Ignacio Vélez, por toda su sabiduría compartida en estos años de estudio.

Además doy gracias a la Universidad Nacional de Colombia y al programa Estudiante sobresaliente, el cual me dio la oportunidad de enfocarme y centrarme con total tranquilidad en mis estudios en maestría y en la elaboración del presente trabajo de investigación. Al igual que al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia, por toda la información dispuesta en diversos proyectos.

Por ultimo quiero agradecer a mi familia, que siempre ha estado apoyándome y velando por mi crecimiento académico y personal. Han sido el apoyo incondicional en los buenos y malos momentos.

## RESUMEN

Se presenta una propuesta metodológica para la estimación de zonas de inundación, partiendo de información de un Modelo Digital de Elevación (MDE) y de niveles de lámina de agua. Se discuten todos los aspectos metodológicos desde la estimación de redes de drenaje en zonas planas, como la definición de los niveles de lámina de agua para diferentes períodos de retorno, atravesando por un análisis multivariado de distintos descriptores derivados del MDE con el que se pretende entender y describir la dinámica de la zona de inundación. Para la estimación de la inundación se emplea el modelo HAND al cual se le ejecutan unas variaciones para lograr mejores resultados. Los resultados son validados con información de inundaciones detectada por sensores remotos, con topografía de alta resolución y validación en campo. Además se construye una aplicación llamada FLOODDEM V1.0 en la plataforma MATLAB 2012, con la que se ejecutará la metodología propuesta.

**Palabras Claves:** Inundación, Modelo Digital de Elevación, redes de drenaje, niveles de lámina de agua, sensores remotos, FLOODDEM, MATLAB.

## ABSTRACT

A proposed methodology for estimating flood zones based on information from a Digital Elevation Model (DEM) and levels of water surface is presented. All methodological aspects are discussed from the estimation of drainage networks in flat areas, such as the definition of the levels of water Surface for different return periods, and passed through a multivariate analysis of different descriptors derived from DEM which aims to understand the dynamics area. To estimate the flood HAND model which will run some variations for best results is employed. The results are validated with flood information detected by remote sensing with high resolution topography and field validation. In addition an application its created called FLOODDEM 2012 V1.0 in MATLAB software, which help run the proposed methodology.

**Keywords :** Flood, Digital Elevation Model, drainage networks, water surface levels, remote sensing, FLOODDEM, MATLAB.

## TABLA DE CONTENIDO

|  |    |
|--|----|
| Introducción.....                                      | 11 |
| 1.1. Objetivos .....                                   | 12 |
| 1.1.1.    Objetivo general.....                        | 12 |
| 1.1.2.    Objetivos específicos .....                  | 12 |
| 1.2. Justificación .....                               | 13 |
| 1.3. Estructura del documento.....                     | 13 |
| Antecedentes .....                                     | 15 |
| 2.1. Generalidades.....                                | 16 |
| 2.1.1.    Modelos hidrodinámicos.....                  | 16 |
| 2.1.2.    Teledetección .....                          | 20 |
| 2.1.3.    Descriptores geomorfométricos .....          | 21 |
| Propuesta metodológica .....                           | 24 |
| 3.1. Proceso 1 - Información empleada.....             | 28 |
| 3.1.1.    Modelos Digitales de Elevación.....          | 28 |
| 3.1.2.    MDE ASTER y SRTM .....                       | 29 |
| 3.1.3.    Topografía LiDAR.....                        | 29 |
| 3.1.4.    Series hidrológicas.....                     | 30 |
| 3.1.5.    Información de sensores remotos .....        | 31 |
| 3.2. Proceso 2 - Redes de drenaje .....                | 32 |
| 3.3. Proceso 3 - Análisis de niveles .....             | 38 |
| 3.4. Proceso 4 - Descriptores geomorfológicos .....    | 44 |
| 3.4.1.    HAND .....                                   | 44 |
| 3.4.2.    Distancia a la red de drenaje .....          | 47 |
| 3.4.3.    Multiresolution Valley Bottom Flatness ..... | 49 |
| 3.4.4.    Mapa de pendientes.....                      | 51 |
| 3.4.5.    Topographic Position Index.....              | 53 |
| 3.4.6.    Descriptores de rugosidad .....              | 55 |
| 3.5. Proceso 5 - Análisis multivariado .....           | 61 |
| 3.5.1.    Análisis de frecuencias.....                 | 61 |
| 3.5.2.    Análisis de componentes principales .....    | 73 |

|  |     |
|--|-----|
| 3.6. Proceso 6 - Modelo HAND.....                | 77  |
| 3.6.1. Aspectos del HAND para inundaciones.....  | 82  |
| 3.6.2. Resultados inundaciones.....              | 85  |
| Aplicación metodología con topografía LiDAR..... | 87  |
| Validación resultados.....                       | 91  |
| Desarrollo interfaz gráfica - Floodem.....       | 97  |
| Conclusiones.....                                | 107 |
| Trabajo futuro.....                              | 109 |
| Bibliografía.....                                | 110 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 Esquema general de la metodología propuesta .....   | 25 |
| Figura 2 Localización de la zona de estudio e información empleada .....   | 28 |
| Figura 3 Principio funcionamiento LIDAR (Tomado BLOM imaging the world) .....  | 29 |
| Figura 4 Topografía LiDAR .....  | 30 |
| Figura 5 Registro de serie de niveles medios diarios de la estación y Comportamiento mensual multi anual, estación PLATO. ....               | 30 |
| Figura 6 Zona de inundación adquirida del ICDE con la información del International Charter 2010-2011 .....                                  | 31 |
| Figura 7 A) MDE, B) Red de cartografía (Azul) y C) Corredor a la red (Amarillo) .....  | 33 |
| Figura 8 A) Localización punto de partida y diferentes rutas hacia la red de drenaje (B, C y D) .....  | 34 |
| Figura 9 Redes de drenaje estimadas por A) Direcciones MDE original, B) Direcciones MDE Burn, y C) Direcciones MDE con Burn controlado ..... | 37 |
| Figura 10 Estimación coincidencia Red de drenaje, generada por 3 diferentes métodos.....   | 37 |
| Figura 11 Ajuste a la distribución empírica Weibull. ....  | 40 |
| Figura 12 Niveles máximos para diferentes distribuciones de probabilidad y Prueba gráfica de niveles, estación PLATO. ....                   | 40 |
| Figura 13 Delta de niveles de las 559 estaciones para un Tr: 20 años .....   | 42 |
| Figura 14 Amarre del DEM y el Cero de la mira, para la definición de los niveles de inundación usando un DEM .....                           | 42 |
| Figura 15 HAND derivado del MDE.....   | 46 |
| Figura 16 Histograma HAND para la zona inundada y no inundada .....  | 46 |
| Figura 17 Distancia a los cuerpos de agua (Drenaje Doble y sencillo) .....   | 48 |
| Figura 18 Histograma Distancia a los cuerpos de agua para la zona inundada y no inundada .....   | 48 |
| Figura 19 MrVBF derivado del MDE .....   | 50 |
| Figura 20 Histograma MrVBF para la zona inundada y no inundada .....   | 50 |
| Figura 21 Pendientes derivadas del MDE .....   | 52 |
| Figura 22 Histograma del mapa de pendientes para la zona inundada y no inundada .....  | 52 |
| Figura 23 TPI Kenell 35 derivado del MDE .....   | 54 |
| Figura 24 Histograma del descriptor TPI para la zona inundada y no inundada.....   | 54 |
| Figura 25 Roughness derivado del MDE.....  | 56 |
| Figura 26 Histograma del Roughness para la zona inundada y no inundada .....   | 56 |
| Figura 27 Ruggedness derivado del MDE.....   | 57 |
| Figura 28 Histograma del mapa Ruggedness para la zona inundada y no inundada.....  | 57 |
| Figura 29 SRF derivado del MDE .....   | 58 |
| Figura 30 Histograma del mapa SRF para la zona inundada y no inundada .....  | 58 |
| Figura 31 TRI derivado del MDE.....  | 59 |
| Figura 32 Histograma del mapa TRI para la zona inundada y no inundada.....   | 59 |
| Figura 33 Análisis bivariado HAND y MrVBF .....  | 63 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 34 Análisis bivariado HAND y Distancias a la red.....  | 64 |
| Figura 35 Análisis bivariado HAND y TPI .....   | 65 |
| Figura 36 Análisis bivariado HAND y Pendiente .....   | 66 |
| Figura 37 Análisis bivariado HAND y Roughness.....  | 67 |
| Figura 38 Análisis bivariado HAND y Ruggedness .....  | 68 |
| Figura 39 Análisis bivariado HAND y SRF.....  | 69 |
| Figura 40 Análisis bivariado HAND y TRI.....  | 70 |
| Figura 41 Análisis multivariado .....   | 72 |
| Figura 42 A) Componente principal 1 y B) Distribución de las frecuencias de la CP1 en las zonas inundadas y no inundadas .....  | 74 |
| Figura 43 Resultados Análisis CP2-9 A) CP2, B) CP3, C) CP4, D) CP5, E) CP6, F) CP7, G) CP8, H) CP9 (I: Mapa y II: Distribución de las frecuencias de la CP9 en las zonas inundadas y no inundadas)..... | 75 |
| Figura 44 Composición falso color, 123, CP1, CP2 y CP3 .....  | 76 |
| Figura 45 MDE esquemático con red de drenaje en azul y estaciones en rojo. ....   | 77 |
| Figura 46 Línea de energía definida hasta la salida del DEM .....   | 78 |
| Figura 47 Línea de energía definida desde la estación con nivel más alto hasta la siguiente estación que encuentra a lo largo de la red de drenaje .....  | 78 |
| Figura 48. Línea de energía definida para todos los puntos de la red de drenaje dentro de las estaciones de nivel. ....   | 79 |
| Figura 49 Línea de energía generada en todos los puntos pertenecientes a la red de drenaje .....  | 79 |
| Figura 50 Metodología para la obtención de las matrices is y js .....   | 80 |
| Figura 51 Mapa asociado a inundación en el MDE esquemático.....   | 81 |
| Figura 52 Mapa de inundación para un Tr: 20 años, generado con las alternativas A) Modelo 1, B) Modelo 2, C) Modelo 3, D) Modelo 4, y E) Inundación real ICDE.....                                      | 85 |
| Figura 53 Manchas de inundación para A) Tr: 2.33 años, B) Tr: 20 años y C) Tr: 100 años extraídas del Modelo 4 (solo Río Magdalena).....  | 86 |
| Figura 54 Información extraída del vuelo LiDAR A) Modelos Digital de elevación, B) Modelo Digital de Superficie y C) Ortofoto .....   | 87 |
| Figura 55 Cambios de escala de visualización Información LiDAR .....  | 88 |
| Figura 56 Mapa de inundación empleando topografía LiDAR y el modelo HAND, para A) Tr:2.33 años, B) Tr: 20 años y C) Tr:100 años.....  | 89 |
| Figura 57 Relación de Velocidad y profundidad para el grado de amenaza. ....  | 90 |
| Figura 58 A) Mapa de profundidad de inundación y B) Mapa de amenaza de inundación para un Tr: 20 años - Centro urbano del Municipio de Plato .....  | 90 |
| Figura 59 Coincidencias de zonas inundadas y no inundadas de los 4 modelos del HAND y las zonas inundadas definidas por el ICDE. ....   | 92 |
| Figura 60 Validación de la zona de inundación.....  | 93 |
| Figura 61 Mapa de inundación para un Tr: 20 años, generado con las alternativas de HAND A) Modelo 1, B) Modelo 2, C) Modelo 3, D) Modelo 4, comparados con E) Inundación Topografía LiDAR.....          | 94 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 62 Coincidencias de zonas inundadas y no inundadas de los 4 modelos del HAND y las zonas inundadas definidas con el modelo HAND con topografía LiDAR. .... | 95  |
| Figura 63 Interfaz general y de los 3 módulos del FLOODDEM .....  | 98  |
| Figura 64 de interfaz inicial de FLOODDEM .....   | 99  |
| Figura 65 Modelo del FLOODDEM para el procesamiento de redes de drenaje .....   | 100 |
| Figura 66 Modelo del FLOODDEM para el Análisis geomorfológico del Modelos Digital de Elevación .....  | 103 |
| Figura 67 Modelo del FLOODDEM para la estimación de inundaciones .....  | 105 |

## LISTA DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1 Modelos Unidimensionales .....   | 17 |
| Tabla 2 Modelos Bidimensionales.....   | 18 |
| Tabla 3 Modelos Tridimensionales .....   | 19 |
| Tabla 4 Relación entre los elementos del relieve y los elementos morfológicos .....                              | 22 |
| Tabla 5 Información entregada por el International Charter al IC DE .....  | 31 |
| Tabla 6 Resultados Delta de niveles para la estación 25027450 .....  | 40 |
| Tabla 7 Prueba de ajuste, estación PLATO. ....   | 41 |
| Tabla 8 Delta de niveles para un Tr de 100 años y distribuciones de probabilidad Normal, LogNormal y Gumbel..... | 41 |
| Tabla 9 Media y Desviación estándar de los Delta de niveles para las 559 estaciones de niveles del IDEAM .....   | 42 |
| Tabla 10 Tabla Estadísticos HAND .....   | 46 |
| Tabla 11 Estadísticos Distancia a los cuerpos de agua .....  | 48 |
| Tabla 12 Estadísticos MrVBF .....  | 50 |
| Tabla 13 Estadísticos del mapa de pendientes .....   | 52 |
| Tabla 14 Estadísticos descriptor TPI .....   | 54 |
| Tabla 15 Estadísticos del mapa Roughness .....   | 56 |
| Tabla 16 Estadísticos del mapa Ruggedness .....  | 57 |
| Tabla 17 Estadísticos del mapa SRF .....   | 58 |
| Tabla 18 Estadísticos del mapa TRI .....   | 59 |
| Tabla 19 Coeficientes resultados ACP .....   | 73 |
| Tabla 20 Varianza acumulada ACP .....  | 73 |
| Tabla 21 Modelos propuestos para el cálculo del descriptor HAND .....  | 81 |
| Tabla 22 Delta de Niveles usados en la topografía LiDAR para generación de inundaciones .....                    | 88 |

# Capítulo 1

## Introducción

La búsqueda de zonificaciones de áreas de inundación ha sido un campo crucial de investigación para el desarrollo y planeación a diferentes niveles de la sociedad, desde la afectación a zonas agrícolas hasta la zonificación de amenazas de inundación en ciudades. Para lograr una estimación de zonas de inundación, se han planteado varias alternativas las cuales se enfocan en diversas metodologías donde se busca representar o modelar la física de la inundación o sencillamente detectarlas en el espacio.

La gama de alternativas para estimar las zonas de inundaciones es extensa, se presentan modelos hidrodinámicos (HEC-RAS, MIKE II, etc.) los cuales realizan el tránsito del flujo en un modelo que posee condiciones de frontera y parámetros de control, los resultados de estos modelos son satisfactorios para definir con certeza la zona de inundación, su principal problemática se centra en dos aspectos. Primero: la adquisición de la información la cual debe ser de gran resolución para realizar un tránsito realista del flujo y segundo: Estos métodos no son viables en grandes ríos debido a la dificultad de realizar batimetrías en ellos, como es el caso del Río Magdalena que cuenta con decenas de metros de profundidad y kilómetros de anchos en algunos tramos del río.

También se poseen métodos de teledetección, delimitando las zonas de inundación de un área determinada por medio de imágenes satelitales. Para el uso de estos métodos se necesita que la imagen corresponda temporalmente a la fecha en la que ocurrió la inundación para poder así realizar una identificación de coberturas y posteriormente la extracción de las zonas inundadas. La ventaja de emplear métodos de teledetección es el poder delimitar manchas reales debido a que se están identificando zonas que realmente se inundaron en la imagen satelital.

Otra opción que se posee para la estimación de zonas de inundación es el uso de descriptores geomorfológicos, en los que se representen o resalten algunas características de las zonas de inundación. La ventaja de esta perspectiva es que el principal insumo son los Modelos Digitales de Elevación (MDE) los cuales se puede adquirir de manera libre (MDE ASTER y MDE SRTM). Hay que considerar que la precisión de la delimitación de la zona de inundación estará definida por la calidad y resolución del MDE.

A las inundaciones se les pueden asignar varios atributos y características, pasando desde la velocidad, profundidad y extensión de la inundación y también aspectos temporales como su frecuencia o periodicidad, lo cual es fundamental para poder lograr un entendimiento completo del fenómeno espacial.

Este trabajo se enfoca en el uso de descriptores geomorfológicos extraídos del MDE ASTER (de libre acceso) para la estimación de zonas de inundación, debido a que en todas las zonas no se encuentra disponible topografía y batimetría de alta resolución para emplear modelos

hidrodinámicos. Por otro lado no existen en todas las zonas de inundación registros de imágenes de sensores remotos donde se identifique la inundación. Por lo tanto, el uso de parámetros geomorfológicos para la estimación de zonas de inundación es una gran alternativa para realizar una zonificación de inundaciones en zonas que cuentan solamente con el MDE ASTER.

Además, este trabajo tiene como objetivo el poder asociar las manchas de inundación a una frecuencia de ocurrencia por medio de un período de retorno, ayudando a cuantificar las áreas que están en más grado de amenaza por los eventos de inundación.

El enfoque central del análisis de inundaciones será el descriptor geomorfológico HAND (Height Above Nearest Drainage). Se analizan varios enfoques para poder sacar a luz las zonas inundables, partiendo de parámetros geomorfológicos, iniciando desde un análisis de niveles de inundación para diferentes áreas y períodos de retorno, como un análisis multivariado de los descriptores geomorfológicos para identificar el comportamiento y la relación de los distintos descriptores en las zonas de inundación, para ello se emplea una estadística descriptiva multivariada, un análisis de frecuencias bivariado y multivariado y un análisis de componentes principales.

## 1.1. Objetivos

### 1.1.1. Objetivo general

- Realizar la descripción, análisis y extracción de zonas de inundación a partir de descriptores geomorfométricos derivados de modelos digitales de elevación.

### 1.1.2. Objetivos específicos

- Definir los descriptores geomorfométricos más adecuados para la representación de manchas de inundación.
- Relacionar y definir los niveles de lámina de agua para los distintos periodos de retorno en la estimación de zonas de inundación.
- Establecer el mejor procedimiento para la generación de la red de drenaje como insumo en la estimación de zonas de inundación.
- Establecer la relación de distintos descriptores geomorfométricos en zonas de inundación por medio de análisis multivariado.
- Proponer una metodología para la estimación de zonas de inundación, empleando índices y descriptores geomorfométricos derivados de modelos digitales de elevación.
- Consolidar los algoritmos y procedimientos de la metodología propuesta para su aplicación general en cualquier escenario.

## 1.2. Justificación

La estimación de manchas de inundación se ha fijado como una necesidad, debido al impacto que acarrearán estos eventos naturales en las actividades y seguridad de las comunidades afectadas por inundaciones. Estos impactos conducen a consecuencias a nivel económico, social y ambiental (Schumann & Nijssen, 2011).

En consecuencia al crecimiento acelerado del hombre en nuevos territorios, se han establecido necesidades en las que son prioridad el tener un conocimiento del recurso agua en las zonas de interés y también las amenazas que pueden llegar a representar este recurso en términos de inundaciones o sequías (Poveda et al., 2002). La estimación de las inundaciones se realiza con el fin de prevenir a la población de las consecuencias que acarrearán las inundaciones y poder tomar medidas mitigadoras o preventivas concernientes al desarrollo y planeación de la comunidad.

Otro propósito para la estimación de manchas de inundación es lograr un entendimiento de la dinámica de los eventos de inundación, ya sea con respecto a los mecanismos generadores o el desarrollo de estos mismos, apelando siempre al entendimiento de la física de estos eventos naturales.

Además la estimación de zonas de inundación por métodos hidrodinámicos y de sensoriamiento remoto, está totalmente ligada a la disponibilidad de información, dificultando definir zonas de inundación en áreas donde no se posee información de detalle. Esta situación plantea una necesidad de estipular una metodología donde se cuente solamente con información mínima (solo el MDE ASTER o SRTM).

Lo descrito anteriormente marca como tarea fundamental el proponer una metodología clara, aplicable y viable con respecto a la información disponible para la estimación de manchas de inundación.

## 1.3. Estructura del documento

El desarrollo del presente trabajo se estructuró de la siguiente manera. Un Capítulo 1 de introducción, donde se pretende ambientar al lector acerca del problema general de inundaciones, abarcando los aspectos de los objetivos a cumplir, generalidades que se abordan y una justificación del desarrollo del trabajo.

En el Capítulo 2 se describen los conceptos para el desarrollo del presente trabajo, centrándose en dos apartados: uno de antecedentes e investigaciones en la estimación de zonas de inundación y el segundo en la descripción del estado del arte de las diferentes metodologías para la estimación de manchas de inundación a partir de modelos hidrodinámicos, métodos de teledetección y geomorfológicos.

Se continúa con el Capítulo 3 donde se encuentra la descripción de la propuesta metodológica para la estimación de zonas de inundación, en la que se describen los aspectos empleados para la elaboración, desarrollo y ejecución en la estimación de zonas de inundación a partir

de descriptores geomorfológicos derivados del MDE. El Capítulo 3 se centra en los subcapítulos que describirán a continuación:

- Capítulo 3.1: Se describe la información empleada para ejecutar la metodología. Incluyendo información del MDE ASTER e información de series de niveles de lamina de agua. Además se cuenta con información de topografía de alta resolución LiDAR y de imágenes de sensores remotos para la validación de los resultados.
- Capítulo 3.2: Se centra en la generación de redes de drenaje a partir del MDE, debido a la gran sensibilidad que presentan las redes de drenaje como parámetro en la estimación de zonas de inundación, centrándose en la problemática de la definición de las direcciones de flujo en zonas planas.
- Capítulo 3.3: Se desarrolla un análisis estadístico de los niveles de lámina de agua que generan inundaciones para su asociación a diferentes períodos de retorno. Además se aclaran los aspectos que se deben tener en cuenta para la definición de los niveles de lámina de agua como insumo en la estimación de zonas de inundación en la metodología propuesta.
- Capítulo 3.4: Se dedica a la descripción e interpretación de los descriptores geomorfológicos seleccionados, centrándose en la relación que poseen estos descriptores con características del terreno en zonas de inundación.
- Capítulo 3.5: Se realiza un análisis multivariado de los descriptores geomorfológicos, para poder entender de una forma más integral la interacción conjunta de los descriptores en zonas de inundación.
- Capítulo 3.6: Se plantea el modelo HAND derivado del descriptor geomorfométrico HAND, como descriptor clave para la estimación de zonas de inundación. Se realiza un análisis de todos sus parámetros de entrada y la descripción de la física del modelo, definiendo las mejores alternativas para poder representar zonas de inundación coherentes con la realidad y logrando además la asociación con frecuencias hidrológicas de niveles de lámina de agua.

El Capítulo 4 describe la aplicación del modelo HAND empleando topografía de alta resolución LiDAR (un acrónimo del inglés Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging).

En el Capítulo 5 se realiza una validación con ayuda de trabajo de campo e imágenes de sensores remotos de los resultados obtenidos del modelo HAND a partir del MDE ASTER y la topografía LiDAR. Además, se realiza un análisis estadístico de coincidencia de las zonas de inundación para los diferentes resultados obtenidos en el Capítulo 3.6 y Capítulo 4.

En el Capítulo 6 se describe la programación de la interfaz gráfica de usuario, con lo que se logra sistematizar la metodología para la estimación de zonas de inundación y ayuda como herramienta para analizar y definir zonas de inundación.

Por último, en el Capítulo 7 se definen las conclusiones en donde se estipulan los aspectos más relevantes en el desarrollo del presente trabajo de investigación y se presentan unas propuestas de trabajo futuro.

# Capítulo 2

## Antecedentes

En el marco de trabajos referentes a la estimación de manchas de inundación se encuentran varios avances que se centran en dicha tarea. Entre estos trabajos se encuentran los trabajos de (Lin, Wicks, Falconer, & Adams, 2006) y (Alaghmand, 2009) que se enfocan en modelos hidrodinámicos, la diferencia entre estos trabajos radica en la calidad de la información y de los modelos empleados.

Muchos de los trabajos de investigación para la estimación de inundaciones se centran en la caracterización de la lluvia y caudales generadores de inundaciones. Este es el caso que se observa en (Schumann & Nijssen, 2011), donde se encuentra una recopilación de investigaciones en el campo de estimación y control de inundaciones tales como las de (Bartholmes & Todini, 2005) y (Fang, Guo, Duan, & Duong, 2010), donde, el primero propone un modelo hidrológico para acoplarlo a la estimación de inundaciones y el segundo propone un análisis fractal para el estudio de las lluvias generadoras de las inundaciones. Esto da un vistazo del gran número de metodologías para la estimación y análisis de las variables precipitación y caudal para la estimación de manchas de inundación.

Además, se encuentran otros trabajos realizados donde el uso del MDE y sensores remotos son el principal insumo para la estimación de inundaciones. Trabajos como el de (Forkuo, 2011), donde emplean los MDE ASTER, para la estimación de riesgos de manchas de inundación o trabajos como (Navia et al., 2003) donde emplean sensores remotos y productos MODIS para el monitoreo y localización de las zonas de inundaciones en la región de la Mojana, Colombia. En el trabajo de (Zwenzner & Voigt, 2009) incorporan modelos hidrodinámicos e información de sensores remotos de alta resolución, logrando acoplar y calibrar los resultados de modelación hidrodinámica y la teledetección en inundaciones.

Por otro lado, se encuentran investigaciones que emplean descriptores morfométricos para definir morfologías de la zona de estudio asociadas con zonas de inundación, esto por medio del MDE. Un caso se presenta en el trabajo realizado por (Nobre et al., 2011), donde emplean el HAND, como un nuevo descriptor del MDE .

Estudiando los trabajos anteriores se puede describir las alternativas para la estimación de zonas de inundación en tres enfoques: Los Modelos Hidrodinámicos, los métodos de teledetección y por medio de descriptores geomorfométricos derivados del MDE. A continuación se realiza una descripción general de los tres enfoques.

## 2.1. Generalidades

En el contexto de alternativas para la estimación de zonas de inundación se definen tres opciones, para las cuales se describen los aspectos más relevantes a continuación.

### 2.1.1. Modelos hidrodinámicos

Existen numerosos modelos 1D, 2D o 3D para la simulación de las condiciones hidrodinámicas y morfológicas en corrientes naturales o canales artificiales. Estos modelos varían entre sí, dependiendo del grado de sofisticación, confiabilidad y de la cantidad de información hidráulica requerida.

Entre estos modelos se encuentran diversos software, como lo son en 1-D (HEC-RAS, ISIS, etc.), 2-D (CCHE2D, BRI-STARS, etc.) y 3-D (FLOW3D, CH3D-SED, etc.). Estos modelos hidrodinámicos han sido ampliamente usados para la estimación de manchas de inundación, evaluando el tránsito de un caudal determinado en una corriente hídrica. Fundamentalmente estos modelos hidrodinámicos se centran en las ecuaciones de Momentum y conservación de masa o continuidad.

Las ecuaciones de Momentum integradas en profundidad para la dimensión x, se presentan en la Ecuación 1 y Ecuación 2.

$$\text{Ecuación 1} \quad \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{1}{h} \left( \frac{\partial(h\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{xy})}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + f_{Cor}v$$

$$\text{Ecuación 2} \quad \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + \frac{1}{h} \left( \frac{\partial(h\tau_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{yy})}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho h} + f_{Cor}u$$

La ecuación de continuidad está representada por la Ecuación 3.

$$\text{Ecuación 3} \quad \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0$$

Para la definición de las características de los modelos existentes y sus principales características se puede remitir a la tesis de maestría “Simulación hidráulica de confluencias y difluencias, aplicación al río León en el Urabá antioqueño” (DUQUE, 2008). Los principales modelos y sus características se encuentran en la Tabla 1: Modelos unidimensional, Tabla 2 Modelos Bidimensionales y Tabla 3 Modelos tridimensionales.

**Tabla 1. Modelos Unidimensionales**

| Modelo  | Ecuaciones Gobernantes y Métodos de solución  | Datos de entrada   | Capacidades   | Limitaciones   |
|---|---|--|---|--|
| HEC RAS 4.0   | Ecn. Conservación de la energía (regimen permanente), Ecn. Onda Dinámica (de Saint Venant), Ecn. Velocidad de Caída (transporte en suspensión), Ecn. Continuidad fracción sólida (asociada a régimen permanente), Método de solución implícito en diferencias finitas y Modelo Desacoplado (transporte sólido y ecuaciones de movimiento) | Geometría del canal (Secciones transversales, espesor del lecho, etc). Condiciones de frontera (caudal, niveles, temperatura del agua). Parámetros (Manning, diámetro partículas, etc.)  | Procesos de erosión y depositación. Simula resaltos hidráulicos, puentes, alcantarillas, box culverts, confluencias y desviaciones. Simula procesos erosivos alrededor de estructuras hidráulicas. Considera análisis de planicies de inundación. Ecuaciones de: Ackers y White, Engelund y Hansen, Laureen, Meyer Meter y Muller, Tofalleti y Yang | Pendientes menores al 10%. No simula geometrías complejas de ríos (canales con poca sinuosidad).   |
| ISIS 2.5<br><br>(Open Channel and catchment modelling system) | Ecn. Conservación de la energía. Ecn. Onda Dinámica (de Saint Venant). Ecn. Velocidad de Caída (transporte en suspensión). Ecn. Continuidad fracción sólida (asociada a régimen permanente). Método de solución implícito en diferencias finitas  | Geometría del canal (Secciones transversales, espesor del lecho, etc.). Condiciones de frontera (caudal, niveles). Parámetros (Manning, diámetro partículas, etc.)   | Simula procesos de erosión y depositación. Análisis morfológico de canales y problemas de sedimentación en ríos y, principalmente, canales de irrigación. Ecuaciones de: Ackers y White, Engelund y Hansen y Westrich-Jurashek  | No permite simular geometrías complejas del canal ni difluencias o confluencias  |
| MIKE 11<br>(DHI, Water & Environment)                         | Ecn. Conservación de la energía. Ecn. Onda Cinemática. Ecn. Onda Difusiva. Ecn. Onda Dinámica (de Saint Venant). Ecn. Velocidad de Caída (transporte en suspensión). Ecn. Continuidad fracción sólida. Método de solución Exner transporte de sedimentos  | Geometría del canal (Secciones transversales, espesor del lecho, etc.). Condiciones de frontera (caudal, niveles, temperatura del agua). Parámetros (Manning, diámetro partículas, coeficiente de viscosidad turbulenta, etc.) | Simula procesos de erosión y depositación. Operaciones de tanques. Drenaje superficial. Estudio de mareas en zonas costeras. Ecn: Ackers y White, Engelung y Hansen, Engelung y Fredsøe, Smart y Jäegggi, Meyer - Peter & Müller , Yang, Sato Kikkawa Ashida, Lane y Kalinske.  | No simula pérdida de energía por cambios bruscos en la geometría del canal. No simula geometrías complejas de ríos (ríos con alta sinuosidad). Considera superficie del agua en forma horizontal                                   |
| HEC-6   | Ecn. Conservación de la energía. Ecn Conservación masa. Método de solución Exner transporte de sedimentos   | Geometría del canal (Secciones transversales cotas a lo largo del canal). Características del sedimento. Condiciones de frontera (hidrógrafas de caudal y sedimento)   | Simula procesos de erosión y depositación a lo largo del perfil del río. Simula redes de drenaje, dragados hidráulicos en canales. Ecuaciones de: Ackers y White, Engelund y Hansen, Meyer Meter y Muller, Tofalleti, Yang, DuBoys, Madden's, Colby, Ariathurai, Krone y Parthenaides.  | No predice corrientes secundarias de flujo o sedimentos. No simula tte de sedimentos alrededor de islas o difluencias. No permite simular geometrías complejas del canal ni difluencias o confluencias. Resolución temporal (años) |

**Tabla 2. Modelos Bidimensionales**

| Modelo  | Ecuaciones Gobernantes y Métodos de solución  | Datos de entrada  | Capacidades  | Limitaciones  |
|---|---|---|--|---|
| SMS 9.2 (Surface Water Modeling System))                              | Ecn de Navier Stokes integrada en profundidad. Ecn Continuidad fracción sólida. Método de solución implícita en diferencias finitas. Modelo de viscosidad Turbulenta $k - \epsilon$     | Parámetro de viscosidad turbulenta. Geometría Hidráulica (requiere DEM). Condiciones de frontera (caudal, niveles, etc.). Parámetros (Manning, diámetro partículas, coeficiente de viscosidad turbulenta, etc.)   | Simula procesos de erosión y depositación. Simula procesos a largo plazo (tendencia evolutiva). Considera formas del lecho: saltos, pozos, cascadas  | Es un pre y posprocesador que debe estar acoplado a distintos Modelos (FESWHS, RMA2, RMA4, SED2D-WES, etc).         |
| Bri-Stars (Bridge Stream Tube Model For Alluvial River Simulation)    | Ecn. Conservación de la energía y del momentum. Modelo de tubos de corriente. Modelo de mínima tasa de disipación de energía  | Geometría del canal (Secciones transversales). Condiciones de frontera (caudal, niveles, temperatura del agua, hidrógrafas de caudal y sedimento). Parámetros (Manning, diámetro partículas,)   | Simula procesos de erosión y depositación a lo largo del perfil del río. Permite resolver geometrías complejas en ríos con información escasa. Simula ampliación y reducción del ancho del canal debido a procesos erosión y depositación en el canal. | No tiene interfase gráfica (poco amigable). Gran cantidad de archivos de entrada                                    |
| G-Stars (Generalized Stream Tube Model For Alluvial River Simulation) | Ecn. Conservación de la energía y del momentum. Modelo de tubos de corriente. Modelo de mínima tasa de disipación de energía  | (Secciones transversales). Condiciones de frontera (caudal, niveles, temperatura del agua, hidrógrafas de caudal y sedimento). Parámetros (Manning, diámetro partículas, etc.)  | Simula procesos de erosión y depositación longitudinal y transversalmente al canal. Simula procesos de migración de orillas.   | No tiene interfase gráfica (poco amigable). Gran cantidad de archivos de entrada                                    |
| CCHE2D 2.2  | Ecn. Onda Dinámica (de Saint Venant). Ecn. Continuidad fracción sólida. Considera Longitud de adaptación del sedimento y tres modelos distintos de turbulencia                          | Geometría del canal (lecho interpolado). Condiciones de frontera (caudal, niveles, caudal constante o hidrógrafas). Parámetros (Manning, diámetro partículas, etc.)   | Simula procesos de erosión y depositación en el canal. Permite resolver geometrías complejas en ríos con información escasa. Simula procesos de migración de orillas Considera Longitud de adaptación del sedimento                                    | •   |
| MIKE 21C (DHI, Water & Environment)                                   | Ecn Onda cuasi-dinámica. Ecn. Onda Dinámica (de Saint Venant). Ecn. Continuidad fracción sólida. Método de solución de ecuaciones diferenciales en sistema elíptico. Modelo Desacoplado | Geometría del canal (DEM, espesor de la capa erodable, etc.). Condiciones de frontera (caudal, niveles, temperatura del agua, hidrógrafas de caudal y sedimento, etc.). Parámetros (Manning, diámetro partículas, coeficiente de viscosidad turbulenta, etc.) | Simula procesos de erosión y depositación en el canal. Considera formas del lecho (dunas, antidunas, lecho plano, etc.).   | •   |
| SED2D Versión 4.5   | Ecn. Onda Dinámica (de Saint Venant). Ecn. Continuidad fracción sólida. Modelo Desacoplado (transporte sólido y ecuaciones de movimiento)   | Geometría del canal (DEM, espesor de la capa erodable, etc). Condiciones de frontera (caudal, niveles, caudal constante o hidrógrafas). Parámetros (Manning, diámetro partículas, etc.)   | Simula procesos de erosión y depositación en el canal. Puede calcular transporte de sedimentos considerando los efectos de olas y viento.  | No simula niveles de agua o velocidades del flujo. No tiene interfase gráfica. Gran cantidad de archivos de entrada |

**Tabla 3. Modelos Tridimensionales**

| Modelo   | Ecuaciones Gobernantes y Métodos de solución  | Datos de entrada   | Capacidades   | Limitaciones   |
|--|---|--|---|--|
| SSIIM 2.0 (Sediment Simulation In Intakes UIT Multiblock Option) | Ecn. Navier Stokes. Método de solución a partir de las ecuaciones de advección-difusión para el transporte de sedimentos, usando la formula de Van Rijn. Modelo de viscosidad Turbulenta $k - \epsilon$                                 | Geometría del canal (DEM, espesor de la capa erodable, etc.). Condiciones de frontera (caudal, niveles, caudal constante o hidrógrafas). Parámetros (Manning, diámetro partículas, etc.) | Simula procesos de erosión y depositación en el canal. Ecuaciones de: Ackers y White, Engelund y Hansen, Van Rijn, Yang, Einstein y Sheng y Hung's  | No tiene interfase gráfica. Gran cantidad de archivos de entrada. Viscosidad cinemática y temperatura son fijas. No puede ser aplicado en ambientes costeros   |
| CH3D-SED (Curvilinear Hydrodynamics in 3 Dimensions)             | Aproximación de Reynolds para la ecuación de conservación de masa y momentum. Ecn. Continuidad fracción sólida. Modelo de viscosidad Turbulenta $k - \epsilon$  | Geometría del canal (DEM, espesor de la capa erodable, etc.). Condiciones de frontera (caudal, niveles, caudal constante o hidrógrafas). Parámetros (Manning, diámetro partículas, etc.) | Simula procesos de erosión y depositación en ríos, lagos, embalses, estuarios o ambientes costeros  | Su principal limitación es la complejidad del modelo a la hora de la simulación de un caso particular, por lo que sus creadores recomiendan un experto en el modelo para llevar a cabo la simulación |
| DELFT-3D   | Ecn. Navier Stokes. Ecn. Conservación de la energía y del momentum. Ecn. Continuidad fracción sólida. Método de solución implícito en direcciones alternantes   | Geometría del canal (DEM, espesor de la capa erodable, etc.). Condiciones de frontera (caudal, niveles, caudal constante o hidrógrafas). Parámetros (Manning, diámetro partículas, etc.) | Simula procesos de erosión y depositación en ríos y estuarios o ambientes costeros. Simula niveles de flujo, ondas mareales, y calidad del agua de corrientes, Tsunamis, intrusión salina entre otros. Ecuaciones de: Engelund y Hansen, Van Rijn, Meyer Peter y Muller, Bailard y Bijker                                       | No permite simular geometrías complejas del canal ni difluencias o confluencias  |
| CCHE3D   | Ecn. Reynolds. Ecn. Continuidad fracción sólida. Considera Longitud de adaptación del sedimento y tres modelos distintos de turbulencia. Considera teoría de capa de mezcla en varias capas. Método de solución de Elementos Eficientes | Geometría del canal (lecho interpolado). Condiciones de frontera (caudal, niveles, caudal constante o hidrógrafas). Parámetros (Manning, diámetro partículas, etc.)                      | Simula procesos de erosión y depositación en el canal. Permite resolver geometrías complejas en ríos con información escasa. Simula procesos de migración de orillas Considera teoría de capa de mezcla en varias capas. Ecuaciones de: Ackers y White, Engelund y Hansen, Meyer Meter y Muller, Wu, Wang y Jia, Laursen y Yang | *  |

### 2.1.2. Teledetección

Un método alternativo para el análisis de manchas de inundación son las técnicas utilizadas en teledetección para la clasificación de imágenes satelitales. El objetivo de estas técnicas es realizar el agrupamiento de los elementos en clases con propiedades significativamente diferentes entre sí.

La clasificación en teledetección suele realizarse a partir de imágenes multispectrales, que, una vez superpuestas poseen idénticas propiedades geométricas y de referenciación geográfica, formando un conjunto de información único. Este conjunto de información es equivalente a una matriz tridimensional, en la que las filas y columnas representan la localización geográfica, mientras que la tercera dimensión representa las diferentes bandas o propiedades medidas: cada celda de la matriz  $(i,j,k)$  posee el valor de la variable  $k$  en la localización geográfica definida por la fila  $i$  y la columna  $j$ .

La clasificación puede dividirse en dos grupos diferentes: supervisada y no supervisada. La clasificación supervisada supone un conocimiento previo de las clases por parte del operador, que debe delimitar grupos de píxeles representativos para cada una de ellas, a partir de los cuales se determinan los valores que definen la firma espectral. La clasificación no supervisada no requiere intervención del operador ya que divide los píxeles en “grupos naturales”, segmentando el espacio  $k$ -dimensional, donde cada eje de coordenadas representa una variable, con criterios estadísticos.

Para la ejecución de estos métodos se dispone de varias técnicas, iniciando con una corrección atmosférica por medio de métodos que usan información de las propias imágenes satelitales, como es el método dark-object subtraction (DOS) propuesto por (Moran, Jackson, Slater, & Teiuet, 1992) y métodos que usan información de las características de las condiciones atmosféricas como son los propuestos por (Hadjimitsis & Clayton, 2008), (Jiménez-Muñoz, Sobrino, Mattar, & Franch, 2010), (Mao et al., 2013), entre otros.

En la clasificación de imágenes multispectrales e hiperespectrales se dispone de varios métodos, como son Spectral Angles Mapper, el Spectral Vector Machine, Spectral Feature Feating, Spectral Lineal Unmixing y el Spectral Information Divergence descritos con gran detalle en el texto (Chang, 2003), una aplicación de estas técnicas de clasificación se observa en el trabajo realizado por (Dey, Jia, Fraser, & Wang, 2009), donde se emplea una versión extendida del método Support Vector Machine, detectando una zona de inundación en el río Daly en Australia

Otra alternativa para la detección de zonas de inundación, son el uso de índices de vegetación, debido a que es fácil diferenciar los cuerpos de agua en estos índices. Una opción es el uso del NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), una aplicación de este para la detección de zonas de inundación se encuentra en (Dey, Jia, & Fraser, 2008) donde se adopta la técnica de fusión de decisión de combinar el mapeo de los resultados de los datos de radar y los datos NDVI derivada de los datos ópticos aplicados en información Landsat ETM en el estado de Orissa, India en los ríos Brahmani y Baitarani.

Se resalta que el inconveniente de esta metodología es la disponibilidad de imágenes de sensores remotos en el momento y lugar donde se desea detectar la inundación.

### 2.1.3. Descriptores geomorfométricos

Otro enfoque se basa en información derivada de los MDE, para poder lograr una descripción de una geomorfología en una zona en particular. La medida y caracterización de las formas del terreno ha merecido atención desde hace más de 100 años (Cayley, 1859). Como podía esperarse, el desarrollo de las técnicas de medida se ha beneficiado de las técnicas de almacenamiento y representación de la información. La referencia a esta disciplina fue acuñada por (Chorlev et al., 1957) bajo el término geomorfometría. Posteriormente Evans (1972) introdujo la distinción entre la geomorfometría específica y la geomorfometría general. La primera trata de la distinción entre elementos geomorfológicos específicos y la segunda trata de la medida y análisis de las características morfológicas aplicables a cualquier superficie.

Estos descriptores se utilizan conjuntamente para analizar y caracterizar el relieve y sus componentes. Dado que los procesos geológicos y fluviales dejan una huella morfológica sobre las áreas afectadas, el MDE y sus modelos derivados pueden ser un instrumento de análisis objetivo de potencial utilidad.

La descripción del relieve a partir del MDE se realiza mediante un conjunto de medidas que definen características geométricas del terreno a diferentes escalas. Este proceso se conoce como parametrización del relieve, el cual se define como un conjunto de medidas que describen las formas topográficas permitiendo distinguir diferentes tipos de relieve. Los parámetros pueden ser descriptores globales o locales, pero los primeros informan únicamente sobre el conjunto del MDE por lo que son más útiles para la comparación de modelos de diferentes zonas. Los descriptores locales aportan un conjunto de datos que puede ser analizado con el mismo nivel de resolución que el MDE original.

La parametrización del relieve debe cumplir algunas condiciones para ser útil:

- Los parámetros deben tener relación con los procesos geomorfológicos que modelan el relieve.
- El conjunto de parámetros no debe proporcionar información redundante, es decir, deben medir características distintas.
- La parametrización debe incluir información sobre la influencia de la escala ya que existen parámetros cuya magnitud depende de la resolución del muestreo y, por tanto, de la escala de trabajo.

Existen varias propuestas sobre las variables que deben incluirse en la parametrización del relieve. Entre ellas, la más recomendada es la pendiente, aunque también son usadas con frecuencia en geomorfología la orientación y la curvatura (Weibel, R. & Heller, 1991); Flankilin.& Peddle, 1991) mencionan cinco parámetros básicos en este contexto: elevación, pendiente, orientación, convexidad y relieve. El relieve, definido en este caso como la

variabilidad de la superficie, es lo que otros autores denominan rugosidad. (Mark, 1975) presenta una revisión del estado del tema en los momentos previos al tratamiento informático, donde se analizan las relaciones entre diversos parámetros mediante análisis de correlación.

En función de estas características morfométricas se pueden especificar algunas características en el relieve. Para la determinación o reconocimiento es posible utilizar diversos métodos determinísticos o estocásticos. Entre estos métodos están aquellos que plantean una clasificación *a priori*, definiendo unas condiciones para la morfología de la zona, donde los elementos morfológicos básicos se clasifican en función de pendiente  $\gamma$  y curvatura longitudinal  $\eta_L$ , transversal  $\eta_T$ , máxima  $\eta_{max}$  y mínima  $\eta_{min}$ . Esto se observa en la Tabla 4.

**Tabla 4. Relación entre los elementos del relieve y los elementos morfológicos**

| ELEMENTOS | CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS |          |          |              |              | DESCRIPCIÓN   |
|-----------|-------------------------------|----------|----------|--------------|--------------|---|
|           | $\gamma$                      | $\eta_L$ | $\eta_T$ | $\eta_{max}$ | $\eta_{min}$ |   |
| PICO      | 0                             |          |          | +            | ++           | Convexidad en todas las direcciones                             |
|           | +                             | +        | +        |              |              |   |
| CRESTA    | 0                             |          |          | +            | 0            | Convexidad en una dirección ortogonal a una línea sin curvatura |
|           | +                             | +        | 0        |              |              |   |
|           | +                             | 0        | +        |              |              |   |
| COLLADO   | 0                             |          |          | +            | -            | Convexidad en una dirección ortogonal o una concavidad          |
|           | +                             | +        | -        |              |              |   |
|           | +                             | -        | +        |              |              |   |
| LADERA    | +                             | 0        | 0        |              |              | Sin curvatura y con pendiente nula                              |
| PLANICIE  | 0                             |          |          | 0            | 0            | Sin curvatura y con pendiente nula                              |
| CANAL     | 0                             |          |          | 0            | -            | Concavidad en una dirección ortogonal a una línea sin curvatura |
|           | +                             | 0        | -        |              |              |   |
| POZO      | 0                             |          |          | -            | -            | Concavidad en todas direcciones                                 |
|           | +                             | -        | -        |              |              |   |

Donde + y - indican curvatura positiva y negativa, el 0 indica no curvatura y los espacios en blanco indican que la característica no es relevante.

Uno de los problemas del método antes planteado por las decisiones basadas en reglas es la falta de exhaustividad, es decir, que todos los elementos del MDE sean asignados a algún tipo de forma topográfica. El segundo problema es evitar la arbitrariedad en la definición de las tolerancias o relajación de las reglas de decisión. Para subsanar este problema, se pueden usar técnicas de clasificación supervisadas y no supervisadas, como las usadas en la clasificación multispectral. Esto lo podemos observar en trabajos de clasificación de unidades geomorfológicas por medio de técnicas de reconocimiento de patrones (Patiño, 2012).

La aplicación de este concepto a la caracterización del relieve supone la intención de discriminar diferentes tipos de formas a partir de los datos del MDE y de los modelos derivados.

Además, estas características morfológicas pueden presentar correlaciones significativas, lo cual puede brindar una combinación de estas variables para la definición de elementos morfológicos, un ejemplo de esto es cuando se observa la correlación entre características morfológicas como la pendiente, la curvatura y la rugosidad de una zona determinada.

Todas estas variables pueden ser representadas como modelos digitales derivados con la misma resolución que el MDE original. Esta circunstancia permitirá posteriormente el análisis multivariable del relieve, teniendo en cuenta simultáneamente la totalidad de los descriptores topográficos. Definido lo anterior es posible pensar en definir una zona con características morfológicas específicas, como son las zonas de inundación, en función de los descriptores morfológicos. Esto se representa en la Ecuación 4.

$$\text{Ecuación 4 } I = f(X_1, X_2, X_3, X_4, \dots, X_n)$$

Donde I representa la zona a representar en específico (En esta situación será la zona de inundación), la cual puede ser descrita en función de parámetros morfométricos  $X_1, X_2, \dots, X_n$ .

# Capítulo 3

## Propuesta metodológica

En el desarrollo del planteamiento de una propuesta metodológica para la estimación de zonas de inundación, es clave el desglosar detalladamente las diferentes etapas que conforman el proceso de estimación de zonas de inundación para diferentes características en el tipo de información disponible, para luego generalizar un esquema metodológico viable en cualquier escenario.

Se pueden estipular varias características de la inundación, ya sea su temporalidad de permanencia clasificandolas como inundaciones lentas o inundaciones súbitas, definiendo las inundaciones lentas como aquellas inundaciones que se presentan en zonas de bajas pendientes y persisten por varios días en la zona afectada, por otro lado las inundaciones súbitas son producto de crecientes subitas en zonas de alta pendiente lo que da como resultado altos niveles de lámina de agua produciendo inundaciones, pero que eventualmente los niveles descienden rápidamente en comparación a las inundaciones lentas. Además, las inundaciones súbitas poseen mayores velocidades en comparación con las inundaciones lentas.

El uso de la metodología se centra en dos tipos de información base, un MDE y series de niveles de lámina de agua. En el caso del MDE, se puede contar con modelos de libre acceso para todo el globo terráqueo como son los modelos ASTER y SRTM, con respecto a las series de estaciones limnigráficas se presentan más problemas en su adquisición, por ello se presenta una alternativa de regionalización de niveles de inundación extraídos de series limnigráficas.

En la Figura 1 se observa el esquema completo de la metodología a emplear, posteriormente se explicara en detalle sus procesos y simultáneamente su aplicación en una zona de estudio, para lograr así un mejor entendimiento y asimilación de esta.

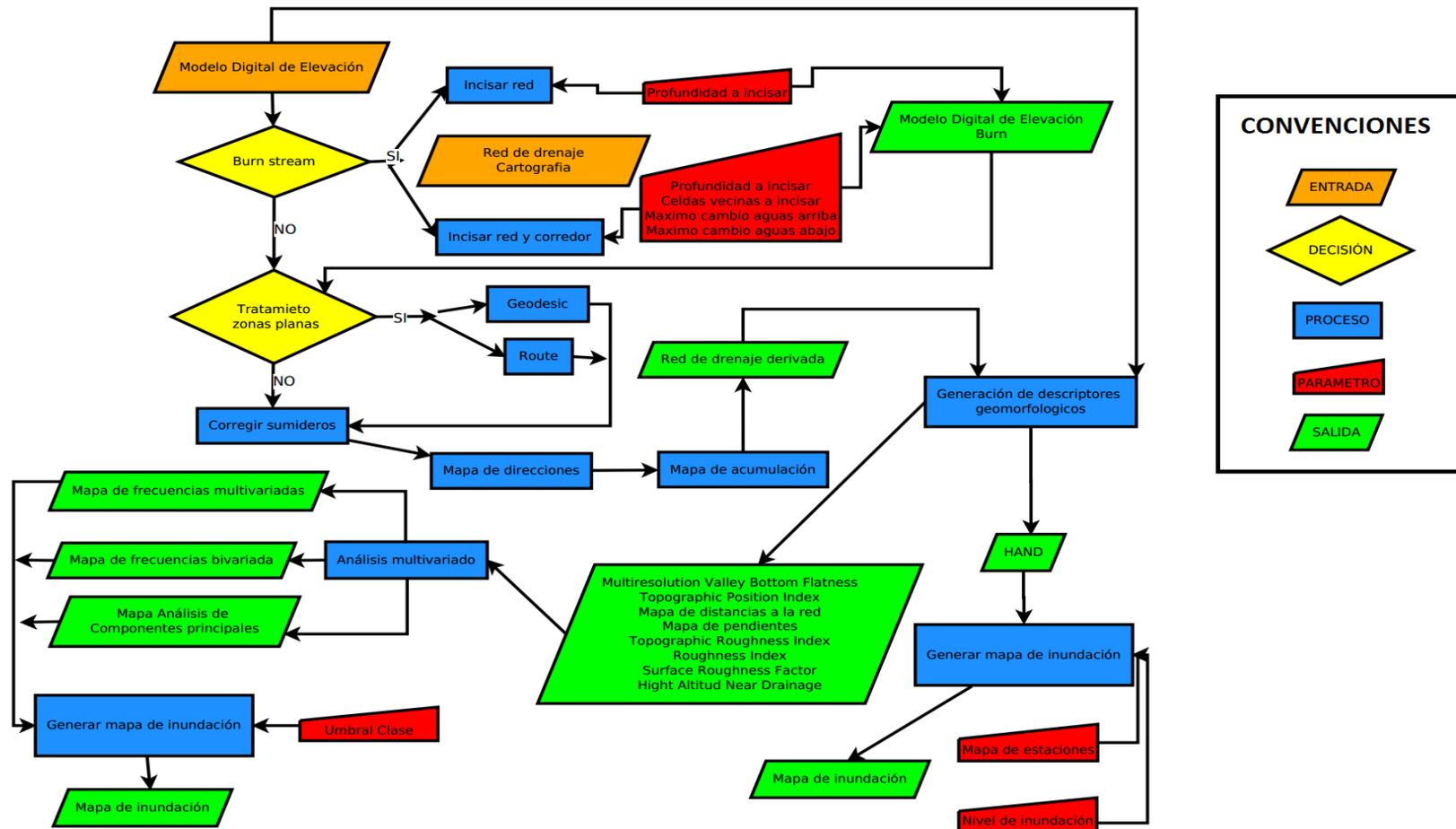


Figura 1. Esquema general de la metodología propuesta

La propuesta se divide en varias etapas, en su estructura macro se puede definir la metodología en 6 procesos que se describen a continuación:

### **1. Recolección de información preliminar.**

Para la aplicación de la metodología se debe contar con una información base descrita en el **Capítulo 3.1**, la información servirá para la ejecución de los demás procesos. A continuación se realiza una breve descripción de la información preliminar.

- **Modelo Digital de Elevación:** La resolución espacial del modelo debe ser lo mejor posible, debido a que los resultados estarán ligados a la resolución del MDE. Para la adquisición del MDE se puede contar con el MDE ASTER (resolución de aproximadamente 30 m) y el MDE SRTM (resolución de aproximadamente 90 m), estos se encuentran disponibles para todo el globo terráqueo.
- **Series de Niveles de lámina de agua:** Se necesitan los niveles de inundación asociados a la zona, para esto se puede contar con registros estaciones limnigráficas o limnimétricas, si no se posee esta información se puede recurrir a la regionalización de los niveles de lámina de agua, empleando datos de otra cuenca con condiciones hidrogeomorfológicas similares.
- **Hidrografía:** Esta información puede ser opcional, pero es muy útil para tener veracidad en la estimación de las redes de drenaje de la zona, para esto se puede recurrir a entidades públicas o privadas que tengan levantamiento de las corrientes de la zona, si no se posee, se puede recurrir a imágenes de sensores remotos para su extracción.

### **2. Procesamiento del MDE para la definición de la red de drenaje (Centrándose en las zonas planas).**

Este proceso se centra en la definición de la red de drenaje derivada del MDE, debido a que la red es el eje principal y foco de las inundaciones, por lo que si no se posee una red acorde a la representación de la realidad no va ser posible delimitar una inundación realmente representativa. Se centra la problemática en dos aspectos importantes, primero en la asignación de las direcciones de flujo en zonas planas y segundo en la definición del umbral para definir las cabeceras de estas mismas redes.

Para esto se describen en el **Capítulo 3.2**, todos los aspectos necesarios que se deben tener en cuenta para una correcta definición de la red de drenaje.

### **3. Definición de los niveles de inundación para la zona de estudio.**

Se estiman los niveles de inundación para los diferentes periodos de retorno para la delimitación de inundaciones. Además, se explica qué aspectos se deben tener presentes para el uso de los niveles de inundación para su acoplamiento con el MDE. Adicionalmente, se explica qué hacer cuando no se poseen series de niveles, explorando opciones como la regionalización de los niveles de cuencas hidrológicamente y

geomorfológicamente similares. Estos aspectos se encuentran detallados en el **Capítulo 3.3.**

#### **4. Derivación de los descriptores geomorfométricos de la zona**

Esta etapa se centra en derivar los descriptores geomorfométricos a partir del MDE, para poder entender las características geomorfológicas en las zonas de inundación. Además, los descriptores empleados representan en cierta medida física las zonas de inundación, esto se presenta en el **Capítulo 3.4.**

#### **5. Análisis multivariado de los descriptores geomorfométricos**

Este proceso se centra en el análisis de los descriptores geomorfométricos derivados en el proceso anterior, enfocándose en un análisis multivariado, caracterizando las relaciones conjuntas que presentan los descriptores en zonas de inundación. Para la realización del análisis se recurre a herramientas y análisis estadísticos como análisis de frecuencias multivariadas y un análisis de componentes principales. Este proceso se describe en el **Capítulo 3.5.**

#### **6. Aplicación del modelo HAND y definición de las zonas de inundación.**

En esta instancia se derivan las zonas de inundación empleando el modelo HAND derivado del descriptor geomorfométrico HAND. Este modelo se soporta de la red de drenaje y los niveles de lámina de agua definidos en los capítulos anteriores.

Definido el descriptor HAND y usando los niveles de inundación se generan los diferentes mapas de inundación para diferentes períodos de retorno. Los procesos 4 y 5 nos ayudarán a entender y describir las características geomorfológicas de la zona de inundación, mientras que el proceso 6 con ayuda del proceso 2 y 3 nos permite delimitar las zonas de inundación en nuestra área de estudio. Este proceso se aprecia en el **Capítulo 3.6.**

Además de los procesos propuestos anteriormente, el presente trabajo de investigación cuenta con otros apartados centrados en la validación de la metodología propuesta, validando la metodología con zonas de inundación detectadas por sensores remotos y trabajo de campo y además, se muestra la aplicación de la metodología aplicando información topográfica LiDAR de alta resolución.

### 3.1. Proceso 1 - Información empleada.

Para la ejecución del trabajo se seleccionó la zona del bajo Magdalena, comprendida desde las coordenadas 9.5°N hasta los 9.9°N en un total de 46 km del río Magdalena. La región de estudio se definió por diversas razones, partiendo de la gran dinámica geomorfológica e hidrológica en la zona, presentando sistemas de alta complejidad en bifurcaciones y complejos cenagosos, además, esto brinda una gran dificultad en modelamiento hidrológico e hidráulico de las corrientes hídricas de la región.

La zona seleccionada cuenta con grandes áreas de inundación, que han venido afectando la comunidad del Municipio de Plato, se encuentran varios reportes de las inundaciones de los años 2010 – 2011 (Reporte . Corporación Autónoma Regional del Magdalena)

Se posee información del MDE ASTER, cartografía de la zona (redes de drenaje y cuerpos de agua a escala 1:100.000 entregada por el IDEAM) y de topografía LiDAR de alta resolución en el casco urbano del municipio de Plato y se cuenta con información de la zona de inundación del 2010 y 2011 detectada por distintos sensores remotos recopilados en el International Chárter, procesados por el IDEAM y administrado por la Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales (ICDE). Además, se cuenta con una estación limnigráfica en el Río Magdalena. El MDE ASTER y la cartografía de la zona se observa en Figura 2.

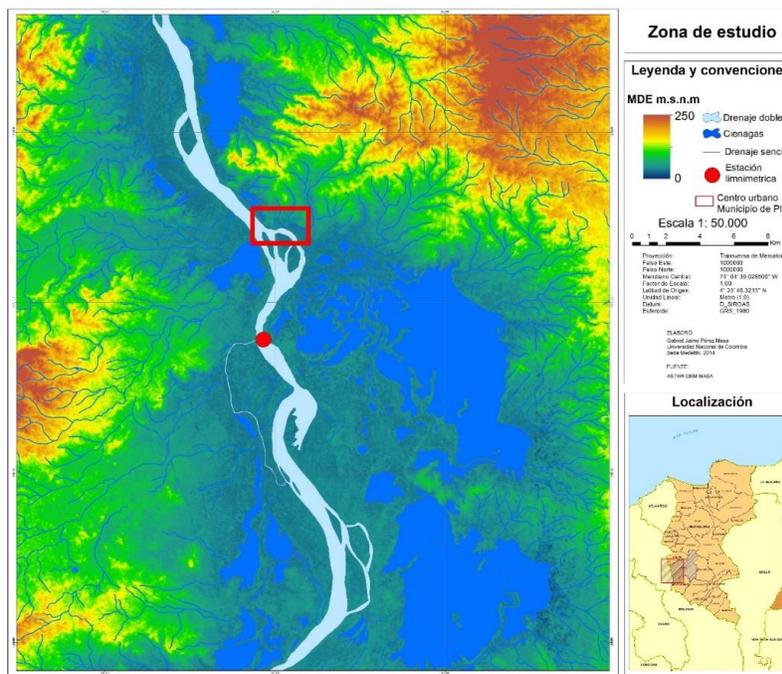


Figura 2. Localización de la zona de estudio e información empleada

#### 3.1.1. Modelos Digitales de Elevación

Para la representación del terreno nos podemos valer de mapas cartográficos con curvas de nivel. Pero con ayuda de los SIG y del sensoramiento remoto se puede representar el terreno

por medio de matrices, donde cada celda representa un valor de elevación en el terreno denominándolos Modelos Digitales de Elevación (MDE) o Modelos Digitales de Terreno (MDT). Se presentan dos alternativas de MDE de libre acceso el MDE ASTER y el SRTM

### 3.1.2. MDE ASTER y SRTM

La adquisición de estos modelos es relativamente sencilla con ayuda de instituciones como la NASA, donde han dispuesto la información de los modelos derivados de las misiones ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) y SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). El MDE ASTER cuenta con una resolución de aproximadamente 30 metros, el problema se centra en que es un modelo derivado de reflectancia de imágenes, por lo que tiene problemas con zonas nubosas. Por otro lado el modelo SRTM no tiene ese problema ya que son imágenes de radar y debido a la gran longitud de onda del radar no se presenta interferencia con las nubes, pero el problema se presenta en la densa vegetación dando resultados de elevación de la vegetación y no del terreno. En el presente trabajo se optó por emplear el MDE ASTER debido a su mejor resolución espacial con respecto al MDE SRTM.

### 3.1.3. Topografía LiDAR

El sistema LIDAR combina un escaneo Light Detection And Ranging (LiDAR) aerotransportado sobre el terreno con un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y la Unidad de Medida Inercial (IMU) de una aeronave, mapeando la superficie del terreno. El cual constituye una alternativa eficiente para la adquisición de Modelos Digitales del Terreno y Modelos Digitales de Superficie (MDT y MDS) de grandes áreas.

El principio de operación consiste en los siguientes aspectos:

- El pulso laser es enviado y el reloj comienza
- La luz se refleja en los diferentes objetos
- El sensor captura la cantidad de luz reflejada cada nanosegundo ( $10^{-9}$ seg)
- El valor de intensidad se almacena junto con el tiempo de lectura
- Los impactos (ecos) son extraídos de la señal recibida y las posiciones calculadas

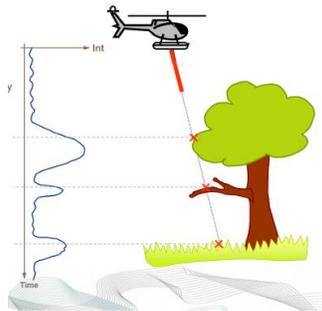


Figura 3. Principio funcionamiento LIDAR (Tomado BLOM imaging the world)

Lo ideal de esta tecnología, es el poder definir un MDE y MDS, logrando construir resultados derivados a escalas muy finas (escala 1:2.000 y 1:1.000). En este caso se cuenta con el modelo MDE y MDS del centro urbano del municipio de Plato con una resolución de 0.5 metros de pixel. El MDE se observa en la Figura 4.



Figura 4. Topografía LiDAR

### 3.1.4. Series hidrológicas

La información principal con respecto a las series hidrológicas, son las series de niveles de lámina de agua, para proceder a su extracción de valores máximos y así realizar el análisis de frecuencia y definir los valores de inundación.

Para la zona de estudio se tienen los datos de la estación registrada con el código 25027450 en el Río Magdalena (ver Figura 2 para su localización). Se presenta la gráfica del comportamiento mensual multianual y el registro de la serie completa en la Figura 5. La estación cuenta con 20 años de registro.

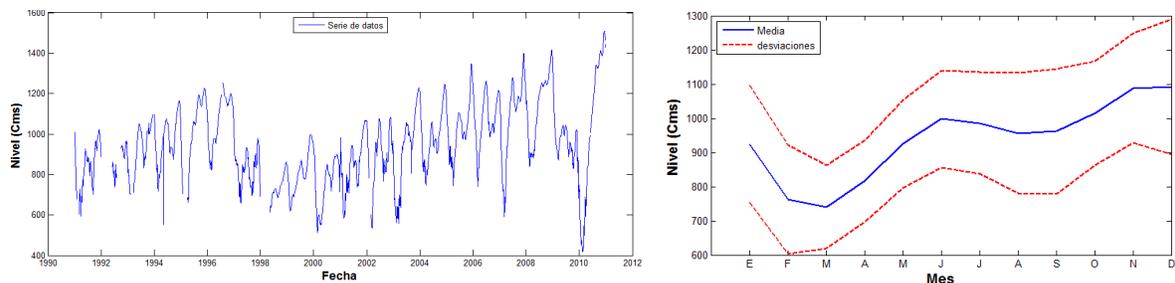


Figura 5. Registro de serie de niveles medios diarios de la estación y Comportamiento mensual multi anual, estación PLATO.

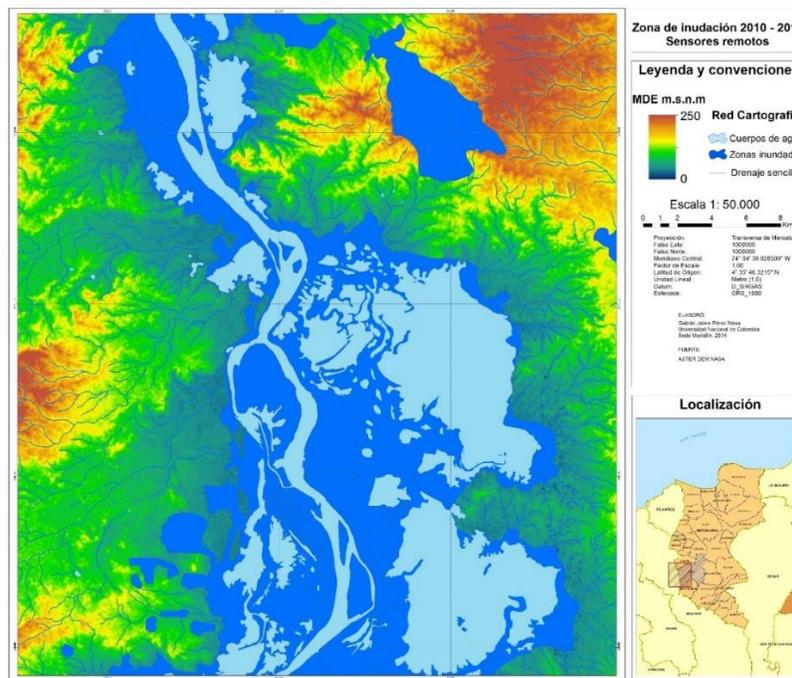
### 3.1.5. Información de sensores remotos

Se cuenta con la zona de inundación detectada por distintos sensores remotos recopilados en el International Chárter, procesados por el IDEAM y administrado por el ICDE, producto del fuerte período invernal que azotó a Colombia en el periodo 2010-2011, el cual se le asoció un período de retorno de 20 a 30 años (UNAL - IDEAM, 2011). Las características de las imágenes entregadas por el International Charter se observan en la Tabla 5.

**Tabla 5. Información entregada por el International Charter al ICDE**

| Título        | Floods in Colombia   |                |               |               |               |               |               |               |
|---------------|--|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Tipo          | FLOOD  |                |               |               |               |               |               |               |
| Descripción   | Days of torrential rain have brought widespread flooding to Colombia, destroying thousands of homes, killing at least 20 people and about 150 people missing. A state of emergency has been declared in Santa Lucia and Bello. |                |               |               |               |               |               |               |
| Fecha         | 2010-12-06T13:00:00  |                |               |               |               |               |               |               |
| Plataforma    | LANDSAT7   | RADARSAT2      | ALOS1         | RADARSAT2     | ALOS1         | LANDSAT7      | LANDSAT5      | SPOT5         |
| Instrumento   | ETM+   | SAR            | PSR           | SAR           | PSR           | ETM+          | TM            | HRG1          |
| Fecha inicial | 2010-12-06T13  | 2010-12-09T10: | 2010-12-09T03 | 2010-12-13T23 | 2010-12-09T03 | 2010-12-06T13 | 2010-12-06T13 | 2002-12-12T15 |
| Fecha final   | 2010-12-06T13  | 2010-12-09T10  | 2010-12-09T03 | 2010-12-13T23 | 2010-12-09T03 | 2010-12-06T13 | 2010-12-06T13 | 2002-12-12T15 |

El IDEAM con la información entregada por el International Charter, procedió a extraer la zona inundada de dicho evento y el resultado obtenido es el observado en la Figura 6, donde se visualiza la zona de inundación en la ola invernal del período 2010 – 2011, el producto fue generado en una escala de información de 1:100.000.



**Figura 6. Zona de inundación adquirida del ICDE con la información del International Charter 2010-2011**

## 3.2. Proceso 2 - Redes de drenaje

La estimación de redes de drenaje es un punto primordial para el desarrollo de la presente metodología, pues se ha encontrado que una buena definición de la red de drenaje es principio de una buena estimación de zonas de inundación.

La red representa el eje de la generación de inundaciones, y además son un parámetro de entrada en algunos descriptores geomorfológicos como el HAND. Se presenta una problemática en la definición de las redes de drenaje partiendo del MDE, debido a la necesidad de garantizar una red hidrológicamente consistente con el MDE. El problema se centra drenaje en las zonas planas, en donde se poseen bajos gradientes y no se conoce la dirección de flujo en el terreno, dando resultado una red inconsistente con la realidad, esto es un tema de investigación que no se ha solucionado completamente.

A continuación se aclaran y estipulan las alternativas que se tienen en la generación de las redes de drenaje, concentrándolas como insumo para la estimación de zonas de inundación.

### 3.2.1. Dirección de flujo

En la actualidad el método más ampliamente usado en la definición de direcciones de flujo es el método conocido como D8, propuesto por (O'Callaghan & Mark, 1984) este método tiene como ventaja una sencillez en su aplicación y da buenos resultados en zonas donde el gradiente de elevaciones es alto, en zonas planas se presentan problemas (donde el gradiente es cero), para solucionar esta dificultad se presentan a continuación diferentes alternativas.

Se presenta el modelo D infinity propuesto por (Tarboton, 1997). El modelo D infinity asigna a cada pixel una única dirección de drenaje especificada como un ángulo  $\alpha$  entre 0 y  $2\pi$  correspondiente a la inclinación del plano de mayor pendiente, entre los ocho planos triangulares formados por el centro de una celda y los 8 centros de la celda adyacente. En zonas planas muy extensas el método presenta la misma dificultad que el método D8, debido al bajo gradiente de elevaciones.

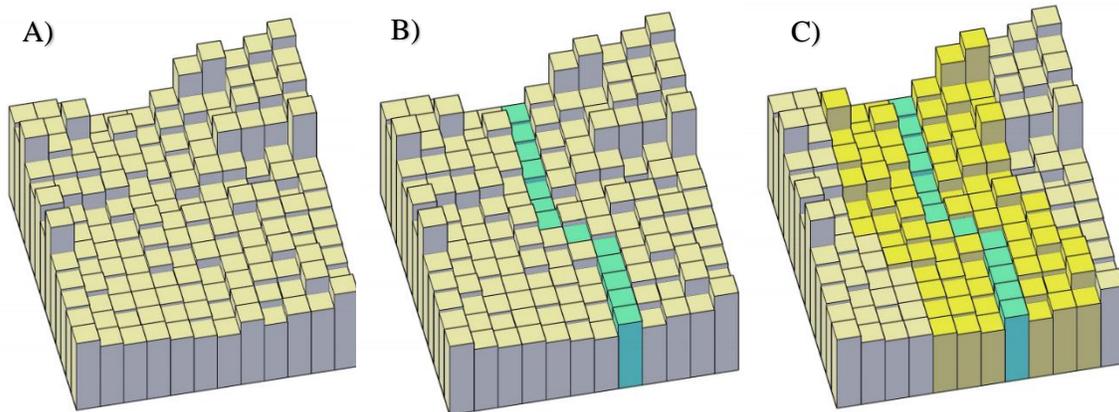
Se encuentran otros métodos para la estimación de las direcciones de redes de drenaje, en función de la erodabilidad de la zona, esta propuesta se describe en la tesis de maestría de (Castro, 2009). Otros métodos se apoyan en el uso de una cartografía existente de la red de drenaje para la definición de las direcciones de flujo en el MDE, entre estos se encuentra el método de incisado o "Burn" del MDE con la cartografía de la red de drenaje, esta consiste en restar una magnitud al MDE en las celdas que corresponden a red de drenaje en la cartografía, obligando así al flujo a que drene a la zona incisada, el problema se despliega en que se está presentando modificaciones al MDE y se debe contar con cartografía de la zona. La descripción detallada de estos métodos se encuentran en la tesis de maestría (Ramirez, 2002), al igual que en la tesis de (Castro, 2009).

Otro método que se apoya en la cartografía es el propuesto por (Hellweger, Ferdi, 1997), este parte de incisar donde está la cartografía, pero también construye laderas laterales a la red en el MDE para asegurar el flujo en dirección a la red de drenaje. Debido a la necesidad de estipular un buen método para la generación de direcciones de flujo y para posteriormente generar la red de drenaje, se plantea una nueva propuesta que se explica a continuación.

### 3.2.2. Nueva propuesta generación redes de drenaje

Se propone una nueva alternativa para la generación de redes de drenaje apoyándose en la cartografía existente de la zona, empleando un “Burn” pero minimizando los cambios en el MDE para la generación de las direcciones de flujo hacia la red de drenaje, por esto se denomina “Burn controlado”.

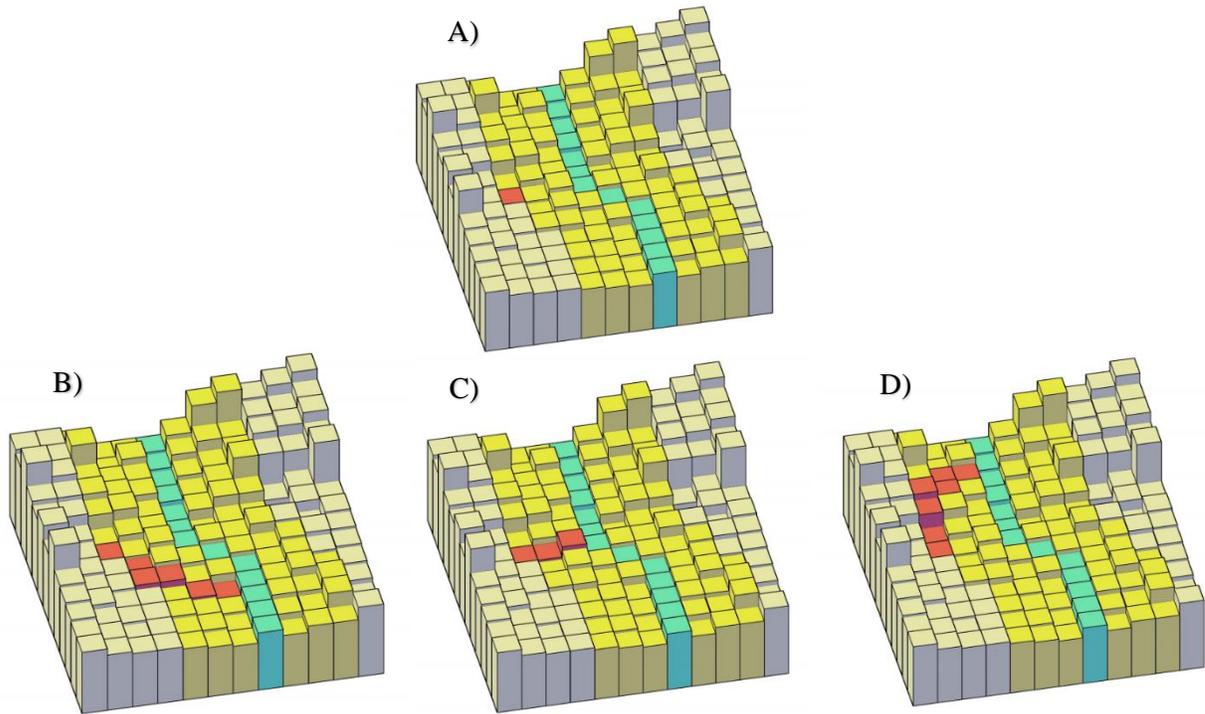
Supóngase un MDE representado por un arreglo matricial tal y como se observa en la Figura 7-A, además, se posee otro arreglo matricial donde se localiza la red de drenaje existente (extraída de la cartografía), este se observa en la Figura 7-B como las celdas de color azul. Ahora supóngase un corredor de celdas aledañas a la red de drenaje como se observa en la Figura 7-C, estas, en teoría, deberían drenar a alguna de las celdas de la red de drenaje.



**Figura 7. A) MDE, B) Red de cartografía (Azul) y C) Corredor a la red (Amarillo)**

El problema se centra en que no todas las celdas del corredor drenan a las celdas de la red de drenaje, debido a los diferentes gradientes de elevación que se presentan en la misma matriz de elevaciones, para entender esto, supóngase una celda en la matriz del MDE de color rojo como se observa en la Figura 8-A, debería drenar a alguna celda de la red de drenaje, pero en ocasiones no sucede debido a la precisión del MDE o a los gradientes nulos como los que se presentan en zonas planas. Una solución como se mencionó anteriormente es el de incisar el MDE con las celdas azules, el cual obliga a que las direcciones se centren en la red incisada, el problema se centra en que se modifica sustancialmente el MDE. La alternativa propuesta se centra en buscar una ruta de la celda roja de la Figura 8-A a alguna celda de la red de drenaje, cuya ruta modifique lo menos el MDE garantizando un gradiente negativo (La

elevación de la celda roja es mayor que la celda a la que drena), en la Figura 8 B-C-D se observan diferentes alternativas de ruta de drenaje.



**Figura 8. A) Localización punto de partida y diferentes rutas hacia la red de drenaje (B, C y D)**

Por lo que ahora el problema se enfoca en buscar cual es la mejor ruta de drenaje que modifique lo menos posible el MDE garantizando que las celdas drenen a la red de drenaje. Para solucionar esto se puede abarcar el problema por medio de un sistema de ecuaciones.

Para la expresión matemática de la representación anterior se apoyó de la teoría de grafos para poder definir el problema en un sistema de ecuaciones y poder encontrar la solución óptima. El procedimiento se explica a continuación:

Se posee la matriz  $Z$ , la cual es el MDE, de  $Z$  se deriva la matriz de adyacencia que se denomina  $A$ ,  $A$  es una matriz cuadrada que representa de forma binaria la conexión de una celda en  $Z$  con sus vecinos. También se define una matriz  $R$  de la misma dimensión que  $Z$ , la matriz  $R$  representa la red de drenaje de la cartografía. Luego se define la matriz  $R\_Buffer$  empleando un corredor o un Buffer con respecto a  $R$ , En  $R\_Buffer$  se encontraran las celdas donde se realizara el “Burn controlado”. Ahora el objetivo es que por términos de gradientes de elevación y direcciones de flujo todas las celdas en el  $R\_Buffer$  terminen drenando a las celdas de  $R$ , esto puede suceder si el gradiente es negativo (es decir siempre este disminuyendo la elevación del pixel del buffer al siguiente pixel), pero si no sucede esto se

debe encontrar un camino donde cambiando los valores de  $Z$  se logre un gradiente negativo. Por lo que el problema se resume en buscar dicho camino modificando lo menos posible el MDE garantizando un gradiente negativo hacia la red de drenaje.

Ahora se convertirá  $Z$  en un vector columna denominado  $Z_c$ . Además se tiene un vector columna  $X_1$  el cual representa el Vector de flujo (es el camino o ruta a buscar), representando de forma binaria las celdas que hacen parte de la ruta seleccionada en el “Burn controlado”. Se define también un vector de entrada y salida de flujo que se denomina  $B$ , simbolizando con 1 la celda de inicio y con -1 la celda de llegada. Por lo que se logra definir que la multiplicación de la matriz de adyacencia  $A$  para alguna ruta seleccionada  $X_1$  dará como resultado un vector que simbolice la entrada y salida de la ruta definida por  $X_1$ . Lo anterior se representa en la Ecuación 5.

$$\text{Ecuación 5} \quad A X_1 = B$$

$X_1$ : Vector de flujo

$A$ : Matriz de adyacencia

$B$ : Vector de entrada y salida

Empleando la ruta seleccionada, definida por  $X_1$ , se revisan los valores en  $Z$  de la ruta donde se garantice que el valor de la posición inicial de la ruta en  $Z$  sea mayor que el siguiente valor de la ruta en  $Z$ , empleando  $X_1$  para seleccionar los valores de  $Z$  en la nueva ruta se busca la condición que cumpla la Ecuación 6.

$$\text{Ecuación 6} \quad X_2 \leq X_3$$

Donde:

$X_2$ : Vector del nuevo MDE (pos) – Está en función de  $X_1$

$X_3$ : Vector del nuevo MDE (pos aguas abajo) – Está en función de  $X_1$

Si definimos como  $C$  y  $D$ , los valores originales de  $Z$  en  $X_2$  y  $X_3$ , el problema de optimización se reduce a la función objetivo donde se cumple la Ecuación 7.

$$\text{Ecuación 7} \quad f = (X_2 + X_3) - (C + D)$$

$C$ : Vector MDE (pos)

$D$ : Vector MDE (pos aguas abajo)

Con el sistema de ecuaciones anteriores se puede relacionar la selección de la ruta con el cambio del MDE, buscando que este cambio sea lo mínimo y garantizando un gradiente para el drenaje hacia la red de drenaje. La dificultad se centra en que  $X_1$  tiene infinitas soluciones para  $B$ , por lo que en términos prácticos se plantea una solución de caminatas aleatorias

estipulando  $N$  soluciones de  $X1$  y seleccionando la más óptima en términos de cambio del MDE.

La ventaja de este sistema es el poder definir parámetros de control en la modificación del MDE, ya sea como las diferencias máximas o mínimas a modificar en el MDE, o el Delta del cambio en la modificación del MDE. Estos parámetros se estipulan como variables de entrada en la interfaz gráfica creada para la ejecución de la presente metodología, la cual se encuentra en el Capítulo 6.

### **3.2.3. Definición del umbral de red de drenaje**

Una vez definida las direcciones en el MDE, nos enfrentamos al problema de la definición de las cabeceras de la red de drenaje, para esto nos encontramos con alternativas para definir las por medio de

- Umbrales de área
- Umbrales de potencia
- Umbrales de área pendiente

La descripción y selección de los métodos se pueden encontrar con detalle en la tesis de maestría de (Ramirez, 2002). Convencionalmente lo empleado es un umbral de área que tenga una densidad lo más similar posible al de la red extraída de la cartografía o de las imágenes satelitales.

### **3.2.4. Red definida zona de estudio**

Se generan las redes, empleando D8, el D8 con el MDE incisado o “Burn” y el método propuesto modificando lo menos posible el MDE “Burn Controlado”, los resultados se observan en la Figura 9.

Los resultados mostrados en la Figura 10, indican el porcentaje de coincidencia de la Red derivada del MDE por medio de los 3 métodos diferentes, en comparación con la red de la cartografía, en los resultados se aprecia la gran diferencia del porcentaje de coincidencia del método convencional D8 sin ningún tipo de Burn, con respecto a los métodos de Burn y Burn controlado. Estos dos últimos no muestran mucha diferencia entre ellos, por lo que se puede concluir que en sentido práctico el mejor método es el de Burn.

Por otro lado el método Burn controlado posee muchos parámetros para su estimación, por lo que la realización de una calibración de parámetros definirá sustancialmente los resultados obtenidos en la Red derivada, por lo ello se plantea este análisis de calibración como tema de investigación futura.

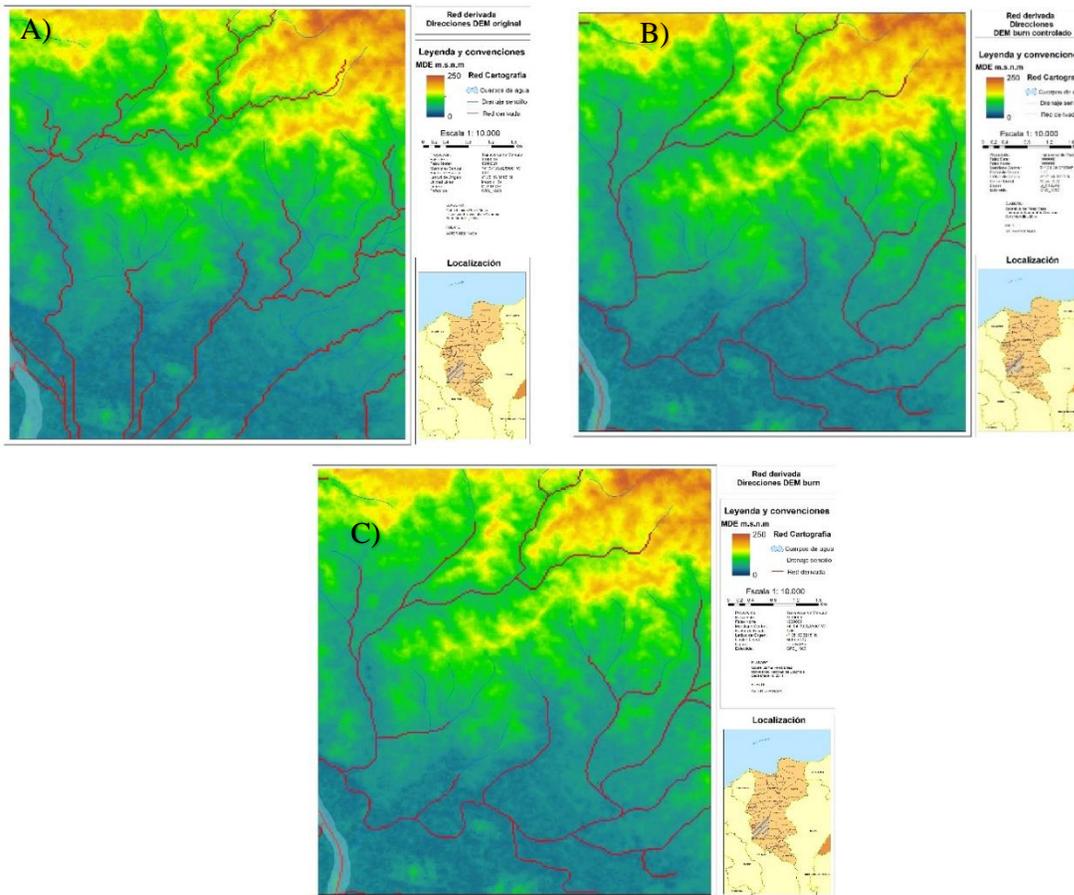


Figura 9. Redes de drenaje estimadas por A) Direcciones MDE original, B) Direcciones MDE Burn, y C) Direcciones MDE con Burn controlado

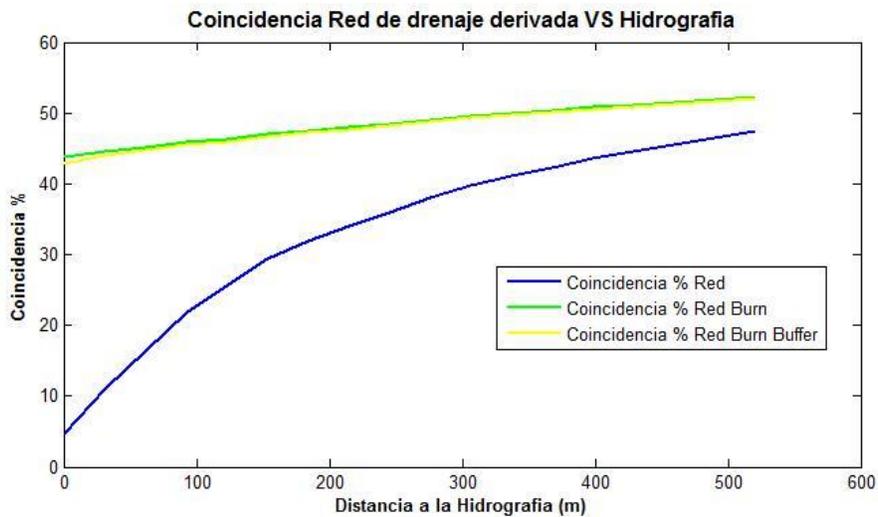


Figura 10. Estimación coincidencia Red de drenaje, generada por 3 diferentes métodos

### 3.3. Proceso 3 - Análisis de niveles

Se realiza la descripción del análisis de niveles de lámina de agua para su asociación a inundaciones. Los resultados de niveles son esenciales debido a que son el parámetro de mayor sensibilidad en la delimitación de la zona de inundación por medio del modelo HAND. Todos los aspectos y análisis realizados se explican a continuación.

#### 3.3.1. Análisis de serie de niveles

Se procede a extraer los máximos anuales para realizar el análisis de frecuencias máximas, para ello se empleo la estación registrada con el código 25027450 en el Río Magdalena. Se debe considerar la independencia de los datos de los máximos analizados, para garantizar este criterio se extrae el máximo nivel de cada año registrado con lo que se garantiza independencia en los datos (se chequea por medio de pruebas de hipótesis), el inconveniente que se presenta al realizar una extracción anual, es que quizás existan dos eventos máximos importantes en un mismo año y puede suceder que los dos sean independientes, situación que sucede en épocas prolongadas de fuertes lluvias en donde para un mismo año, se presentan dos máximos de niveles significativos y que pueden ser independientes y cambiar los resultados en el análisis de frecuencias. Por lo que se recomienda evaluar con más detalle el comportamiento de los máximos anuales para su selección.

En la selección de niveles máximos hay que aclarar un aspecto muy importante acerca del tipo de dato que se está usando. Convencionalmente se maneja dos tipos de información para la estimación de eventos máximos en niveles, estos son los máximos instantáneos y los máximos diarios, en esta información hay que resaltar algunos aspectos importantes:

La mejor de las situaciones es tener máximos instantáneos de la serie registrada, ya que así es posible conocer con certeza cuanto subió el nivel de lámina de agua para un periodo de retorno determinado. Además, un aspecto muy relevante en los cálculos de frecuencias máximas, es entender la relación que existe entre niveles y caudales en las series de análisis, debido a que cuando se están manejando niveles, se debe entender que el cambio de los niveles es poco para periodos de retorno alto (los niveles se amortiguan en el horizonte de la zona de inundación), mientras que en caudales la magnitud crece considerablemente. Entendido la relación entre caudales y niveles hay que saber que realizar ajustes de funciones de distribución de probabilidad de colas largas para series de niveles no es idóneo para análisis máximos de series de niveles (aunque sí esta aceptado para series de caudales).

En la ejecución de la estimación de niveles para distintos períodos de retorno se debe emplear la misma distribución empírica de los datos (sin realizar ningún ajuste). Puede suceder que debido a los pocos años de registro de los datos se debe recurrir a los ajustes de funciones de distribución de probabilidad. Pero teniendo en cuenta que hay que emplear una distribución que no sea de cola larga, debido a que los niveles no aumentan drásticamente con el cambio del período de retorno, caso que si sucede en los caudales.

Cuando se emplean series diarias, hay que entender que las series pueden provenir de una estación limnigráfica o limnimétrica.

- Si provienen de una estación limnigráfica, posiblemente esta estación posee los máximos instantáneos, pero si no se poseen por diferentes motivos y solo se cuenta con los registros diarios, hay que entender que el dato de la serie diaria, es un promedio del registro de todo el día, por lo que el dato máximo del día, se verá suavizado por los demás datos registrados ese mismo día.
- Si la información proviene de una estación limnimétrica, esta se basa en la medición del nivel de lámina de agua por medio de una mira donde un observador extrae el dato del nivel en la mira, generalmente realiza la lectura dos veces al día (6 a.m. y 6 p.m., estas horas pueden variar para cada estación), por lo que se poseen, solamente dos datos diarios, lo que es poco probable que se registre el evento máximo del día en esas dos mediciones, por lo que se suaviza mucho el dato máximo del día (si es que se extrae del promedio de estos datos)
- Pero también hay que entender la física del evento de inundación, generalmente las inundaciones lentas son prolongadas en el tiempo, por lo que el nivel máximo se mantiene por horas o días en algunas ocasiones, dando como resultado un registro representativo de nivel de lámina de agua del evento máximo.

Por otro lado, si la estación limnimétrica se encuentra en una zona donde se producen inundaciones súbitas, es decir que los niveles incrementan súbitamente generando la inundación y luego descienden rápidamente, el emplear series diarias estaría incurriendo en problemas de subestimación de niveles de crecida. Por lo que se recomienda lo siguiente:

- A partir de registros de campo observar cuales han sido los niveles máximos para poder así definir, hasta donde han subido los niveles máximos, teniendo en cuenta la descripción de la población y teniendo cuidado con los valores sobreestimados que pueden arrojar las descripciones de la población local.
- La otra alternativa es utilizar estos mismos niveles y tener en cuenta que están subestimados, con lo cual podemos ajustarlos con un factor de seguridad.

Entendido lo anterior se procede a estimar los niveles de lámina de agua para distintas frecuencias, que serán empleados para la estimación de inundaciones. Se realiza el ajuste a las distribuciones Normal, Log-Normal y Gumbel, solo para estimar los niveles que son mayores a la longitud de años de los registros de niveles. Para los niveles correspondientes a períodos de retorno menor a la longitud de años de la serie, se utilizará la distribución empírica Weibull. Los resultados de la distribución empírica se observan en la Figura 11.

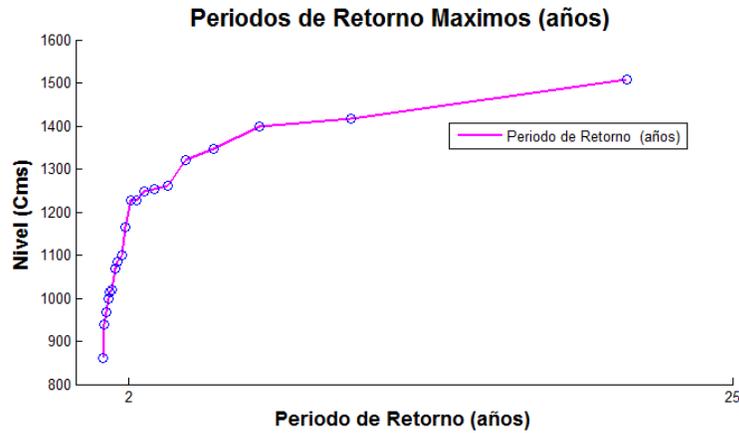


Figura 11. Ajuste a la distribución empírica Weibull.

Una vez obtenidos los niveles, se definen las diferencias de niveles de los períodos de retorno con respecto al nivel medio de lámina de agua. Este valor se denomina Delta de Nivel los cuales se emplearán en el modelo HAND para la definición de la zona de inundación, estos resultados se observan en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados Delta de niveles para la estación 25027450

|                   |             |
|-------------------|-------------|
| Código estación   | 25027450    |
| Latitud           | 9.74944444  |
| Longitud          | -74.8155278 |
| Nivel medió (cm)  | 948.9       |
| Delta_N_2.33 (cm) | 279.1       |
| Delta_N_5 (cm)    | 391.9       |
| Delta_N_10 (cm)   | 465.4       |
| Delta_N_15 (cm)   | 507.1       |
| Delta_N_20 (cm)   | 550.5       |

Los resultados de las distribuciones de probabilidad para los niveles máximos se observan en la Figura 12 y Tabla 7.

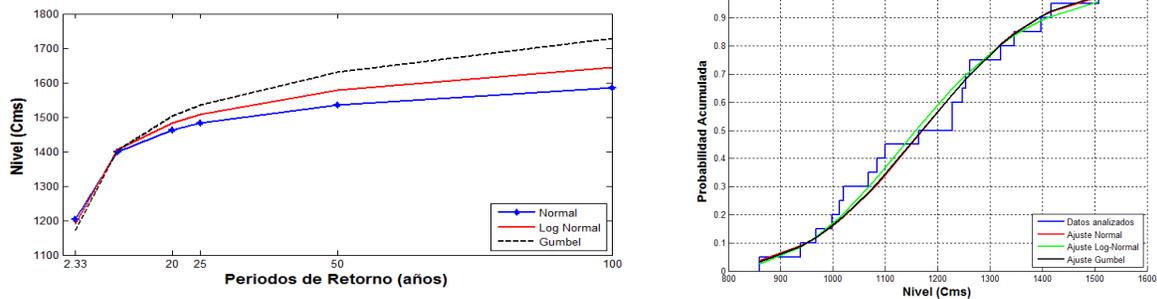


Figura 12. Niveles máximos para diferentes distribuciones de probabilidad y Prueba gráfica de niveles, estación PLATO.

**Tabla 7. Prueba de ajuste, estación PLATO.**

| Prueba de Ajuste | Niveles |
|------------------|---------|
|                  | Ajusta  |
| Normal           | no      |
| Log-Normal       | no      |
| Gumbel           | si      |

Con los resultados anteriores se define el nivel para 100 años, en este caso se debería utilizar el nivel definido por la distribución de probabilidad Gumbel (distribución de cola larga), pero como se argumentó anteriormente la física de los niveles no responde a la misma física de los caudales (ya que no aumentan tan abruptamente en frecuencias altas), debido a esto se empleará la distribución Normal. Los resultados de los Delta de los niveles definidos para un período de retorno de 100 años en las diferentes distribuciones se describen en la Tabla 8.

**Tabla 8. Delta de niveles para un Tr de 100 años y distribuciones de probabilidad Normal, LogNormal y Gumbel**

|                            |             |
|----------------------------|-------------|
| Codigo estación            | 25027450    |
| Latitud                    | 9.74944444  |
| Longitud                   | -74.8155278 |
| Nivel medió (cm)           | 948.9       |
| Delta_N_100_Normal (cm)    | 635.5       |
| Delta_N_100_LogNormal (cm) | 695.7       |
| Delta_N_100_Gumbel (cm)    | 779.5       |

### 3.3.2. Niveles por regionalización

Para el análisis por regionalización, se contaba con una base de datos de 559 estaciones de niveles suministrada por el IDEAM, con un registro promedio de 31 años. Se procedió a realizar un ajuste de los Delta de niveles con respecto al área de acumulación para su posterior uso como umbrales de inundación, pero se observó que no es posible representar los niveles solamente con el área de drenaje, sino que es necesario también incluir factores que representen la geomorfología y geología de la zona. Lo anterior se concluyó debido a que no se logró ningún ajuste satisfactorio, por lo que se plantea como trabajo futuro el lograr definir los niveles de lámina de agua regionalizados por alguna característica derivada del MDE.

En la Figura 13 se observan los datos analizados y la media de los datos para un Tr de 20 de años, también se realizó el análisis separando los datos por área de drenaje los resultados se observan en la Tabla 9. Estos resultados pueden servir como una tentativa para saber en qué rangos trabajar planteando condiciones favorables y desfavorables por medio de la desviación estándar definida en cada análisis realizado, además, se pueden refinar con trabajo de campo, aboservando huellas de inundación en la zona de estudio,

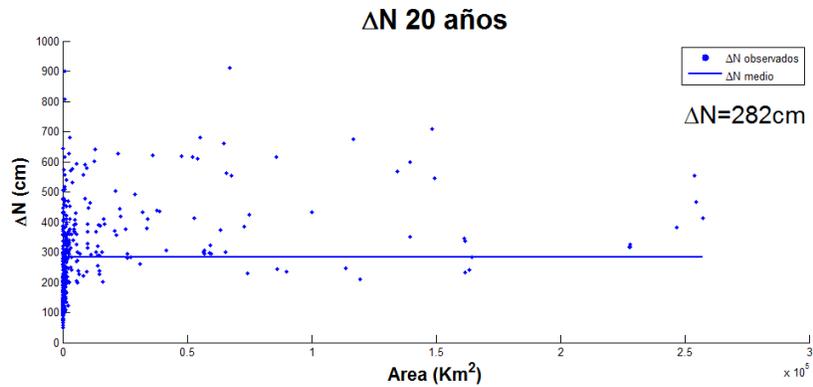


Figura 13. Delta de niveles de las 559 estaciones para un Tr: 20 años

Tabla 9. Media y Desviación estándar de los Delta de niveles para las 559 estaciones de niveles del IDEAM

| Delta de niveles (m) |               |                     |             |                     |
|----------------------|---------------|---------------------|-------------|---------------------|
|                      | Tr: 2.33 años |                     | Tr: 20 años |                     |
| Rango de área (km2)  | Media         | Desviación Estándar | Media       | Desviación Estándar |
| Todas                | 1.69          | 1.05                | 2.82        | 1.55                |
| <1000                | 1.28          | 0.78                | 2.20        | 1.55                |
| >1000 & <10000       | 2.10          | 0.81                | 3.20        | 1.20                |
| >10000               | 2.70          | 1.03                | 3.45        | 1.45                |

### 3.3.3. Amarre de niveles

Una vez definidos los niveles que se van a emplear en el análisis de inundaciones (ya sea extraídos de una estación limnográfica o por regionalización de una cuenca hidrológicamente homogénea o con ayuda de la Tabla 9), se procede a realizar el amarre de los niveles de inundación en el MDE usado, para esto se deben entender dos conceptos básicos.

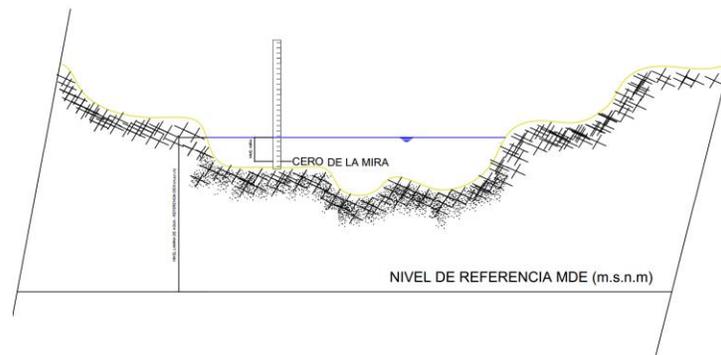


Figura 14. Amarre del MDE y el Cerro de la mira, para la definición de los niveles de inundación usando un MDE

- a. El cero de la mira está amarrado con un sistema de referencia (ver Figura 14), por lo que los niveles registrados están también amarrados al mismo sistema de referencia, acoplando fácilmente el uso de los niveles con el MDE por medio del modelo HAND para la delimitación de las inundaciones.
- b. El cero de la mira no está amarrado, por lo que los niveles no están sujetos a un sistema de referencia global, si no a un valor predefinido del 0 de la mira. Para este caso, se deben amarrar los datos de la mira a la de la topografía por medio del dato de la medición de la mira en el mismo día que se realizó la topografía, puede suceder que no se posea el dato del registro de la fecha de la topografía como es con el MDE ASTER, por lo que se puede emplear la hipótesis que el MDE está a un nivel medio de lámina de agua, con la premisa de que lo más probable es que se encuentre en condiciones media (hipótesis de valor esperado). Con este dato se amarra el nivel medio de la serie de niveles con el nivel del MDE en la red de drenaje.
- c. No se tienen niveles y se usan los niveles de regionalización de otra cuenca, para su amarre se define la situación del caso anterior suponiendo que el nivel medio de los registros de niveles está a la misma elevación que la está registrada en el MDE.

### 3.3.4. Precisión Niveles Mira vs Topografía

Se debe tener en cuenta el tipo de precisión que se está manejando tanto en los niveles como en el MDE, ya que en ocasiones se definen niveles de inundación con precisión centimétrica y por otro lado se tiene el MDE ASTER con precisión métrica, por lo que no tiene sentido definir niveles de inundación de por ejemplo 4.7 metros, si la sensibilidad de los rangos de inundación en nuestro modelo es de solamente 1 metro, por ello se recomienda redondear los niveles al entero más próximo o al siguiente entero para no subestimar la inundación.

Si se posee información topográfica de alta resolución (centimétrica) es posible utilizar la precisión centimétrica de los niveles para generar las inundaciones.

### 3.4. Proceso 4 - Descriptores geomorfológicos

Se realiza un cálculo de los descriptores geomorfológicos de la zona de estudio, para dar un entendimiento al comportamiento de los descriptores en las zonas inundadas y no inundadas. Se decidió emplear 9 descriptores para representar en cierta medida física alguna característica del terreno que es propensa a inundaciones.

La selección de los descriptores son el HAND (Height Above Nearest Drainage), MrVBF (Multiresolution Valley Bottom Flatness), TPI (Topographic Position Index), la distancia a la red de drenaje, Pendiente y otros 4 descriptores de rugosidad los cuales son TRI (Topographic Roughness Index), SRF (Surface Roughness Factor) y los factores denominados Roughness y Ruggedness.

No sobra señalar que todos estos descriptores son derivados del MDE y solamente se presenta una variación en el cálculo para el HAND y la distancia a la red de drenaje, en función de la red de drenaje que puede ser definida por el mismo MDE o por la cartografía de la red hídrica de la zona.

Además, se describirán aspectos de cada uno de los descriptores, para lograr un entendimiento en su uso como descriptores de zonas de inundación.

#### 3.4.1. HAND

El HAND (Height Above Nearest Drainage) es un descriptor propuesto por (Rennó et al., 2008). El HAND calcula las diferencias relativas de elevación de cada uno de las celdas del MDE con respecto a la celda de red de drenaje más cercano, empleando la dirección de flujo del mismo MDE, este descriptor, será el descriptor clave para la estimación de zonas de inundación.

El HAND se podría describir como una estandarización del terreno con respecto a la red de drenaje más cercana, en trabajos como (Nobre et al., 2011), se emplea el HAND como un descriptor para la zonificación de zonas geomorfológicas, definiendo zonas inundadas, zona de transición y tierras altas, además se realiza un análisis del comportamiento del HAND con respecto a la pendiente del terreno y el Topographic Position Index.

El descriptor HAND, es el descriptor fundamental para la zonificación de inundaciones, debido a que al definir un MDE estandarizado con base en la red de drenaje se logra describir los diferentes gradientes del terreno con respecto a la red de drenaje que nos representa el eje o foco de la inundación. Además este modelo permite realizar las siguientes suposiciones, que permitio proyectar en modelo HAND para la estimación de inundaciones que se describe en el **Capítulo 3.6**.

- Si es un mapa de elevaciones relativas a la red de drenaje, basta con saber a qué elevación está la lámina de agua en la red de drenaje y con los Delta de niveles se puede estimar qué celdas están por debajo del nivel de lámina de agua, logrando definir las zonas inundadas.

- En inundaciones lentas el Delta de nivel es generalmente constante en la zona afectada, por lo que es perfecto utilizar un umbral constante de inundación en el HAND.
- El HAND está representando un indicador de energía potencial con respecto a la red de drenaje.

Inicialmente para la aplicación del HAND debemos contar con un MDE y una red de drenaje derivada del mismo MDE, luego procedemos a calcular el descriptor HAND como se describe en (Rennó et al., 2008).

Se calcula el descriptor HAND, los resultados obtenidos se observan en la Figura 15, además en la Figura 16 se observa la distribución de las frecuencias de las magnitudes del descriptor para la zona inundada y no inundada definida por la información del ICDE, también se observa en la Tabla 10, las estadísticas básicas del descriptor en la zona inundada, no inundada y toda la zona.

De estos resultados se puede concluir que el descriptor está sujeto a la delimitación de la red de drenaje derivada. Además hay algunos aspectos en los resultados obtenidos que hay que aclarar.

- En la zona donde se localiza el Río Magdalena se observa valores de HAND por encima de cero, esto ocurre debido a que en el MDE ASTER el Río Magdalena no se define como red de drenaje por las direcciones de flujo y a la dinámica fluvial del Magdalena donde se encuentran islas y barras de sedimentos que se presentan en el cauce del Magdalena dando así la perspectiva que la zona del río está por encima de sus márgenes derecha e izquierda.
- En términos de valores medio, se observa en la Tabla 10, la diferencia del valor medio del HAND en la zona inundada y no inundada, ayudando a pensar la utilidad de definir el descriptor como descriptor de inundación en una determinada zona, además observando estos resultados, se soporta la idea de que valores de HAND muy cercanos a cero son los que están con menor gradiente a la línea de energía y los que posiblemente estén inundados.
- Los resultados son apoyados por medio del histograma de frecuencias de la zona de estudio ver Figura 16, dividiéndolo en el histograma de la zona inundada y no inundada, se observa en el histograma que la mayoría de frecuencias en la zona inundada se encuentra a valores cercanos de cero en el HAND

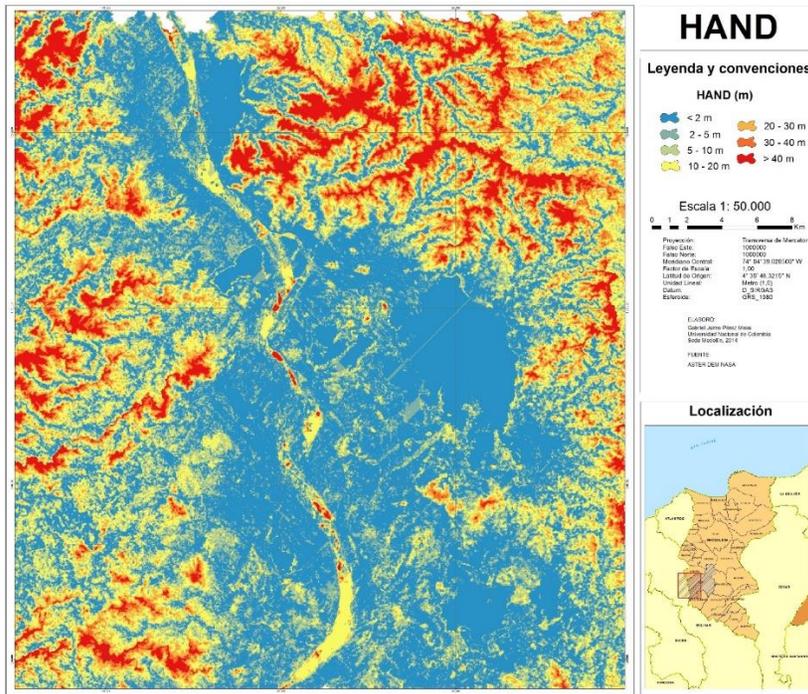


Figura 15. HAND derivado del MDE

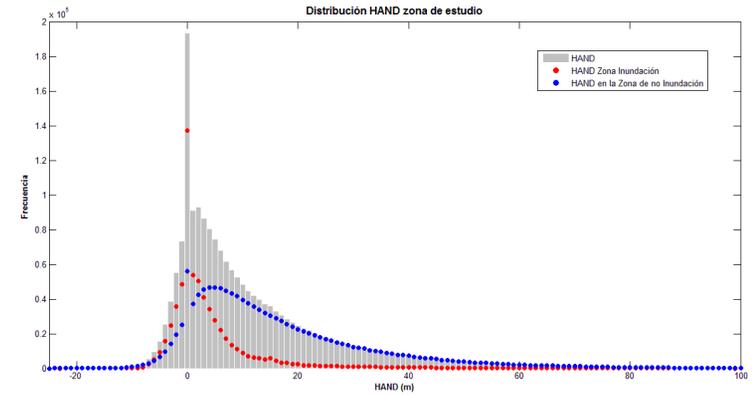


Figura 16. Histograma HAND para la zona inundada y no inundada

Tabla 10. Tabla Estadísticos HAND

| Estadísticas HAND          |               |                  |              |
|----------------------------|---------------|------------------|--------------|
|                            | Zona Inundada | Zona No Inundada | Toda la zona |
| Media (m)                  | 3.81          | 16.19            | 11.94        |
| Desviación Estandar (m)    | 8.88          | 16.96            | 15.82        |
| Varianza (m <sup>2</sup> ) | 78.82         | 287.53           | 250.37       |
| Minimo (m)                 | -24.00        | -28.00           | -28.00       |
| Maximo (m)                 | 108.00        | 182.00           | 182.00       |
| Rango (m)                  | 132.00        | 210.00           | 210.00       |
| Coef asimetria             | 3.50          | 1.74             | 2.03         |
| Curtosis (m <sup>3</sup> ) | 20.58         | 7.68             | 8.95         |
| Numero de datos            | 6.30E+05      | 1.20E+06         | 1.83E+06     |

### 3.4.2. Distancia a la red de drenaje

El parámetro de la distancia horizontal con respecto a la red de drenaje es de interés—por que es lógico pensar que zonas que estén más cerca de la red de drenaje tenga más posibilidad de inundarse de una que está más alejada, por ende se decide incluir este descriptor para analizarlo como indicador de zonas de inundación.

Para este descriptor se tienen tres alternativas para su estimación. La primera opción es definir las distancias a la red de drenaje derivada de las direcciones de flujo del MDE original, la segunda opción es la red de drenaje derivada de las direcciones del MDE por medio del método de incisado o “Burn” y la última alternativa es la distancia a la Red empleando la cartografía de las corrientes hídricas de la zona. Se calcularon las tres alternativas, a continuación se muestran los resultados empleando la red definida en la cartografía.

Los resultados obtenidos se observan en la Figura 17, donde se observa las distancias a la red de drenaje, incluyendo ciénagas, además en la Figura 18 se muestra la distribución de las frecuencias de las magnitudes del descriptor para la zona inundada y no inundada definida por la información del ICDE, también se observa en la Tabla 11, las estadísticas básicas del descriptor, se destaca que:

- El mapa de distancias de la red de drenaje está definido por el objeto espacial que representa la red de drenaje, por lo que no importa si la red es una pequeña quebrada o un gran río, el parámetro de distancia se define por igual, lo que ayuda a concluir que este descriptor puede tener un gran grado de confusión en zonas inundadas y no inundadas, presentándose en la Figura 18.
- En términos de valores medios, se observa en la Tabla 11, la diferencia del valor medio de la distancias a la red de drenaje en la zona inundada y no inundada, pero se observa el alto valor de la desviación estándar, explicando la zona de confusión en la definición de las clases inundada y no inundada.

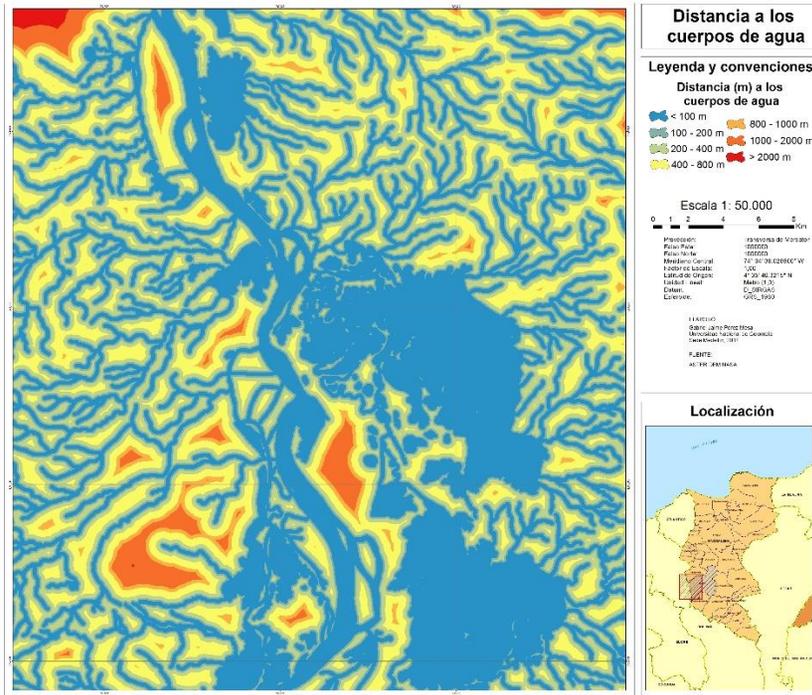


Figura 17. Distancia a los cuerpos de agua (Drenaje Doble y sencillo)

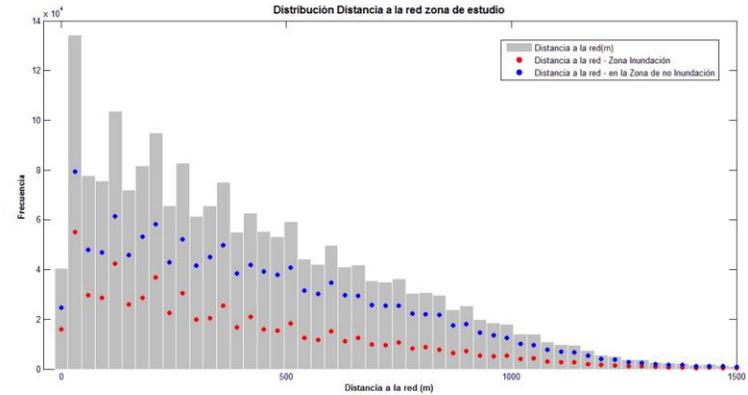


Figura 18. Histograma Distancia a los cuerpos de agua para la zona inundada y no inundada

Tabla 11. Estadísticos Distancia a los cuerpos de agua

| Estadísticas Distancia Red DD |               |                  |              |
|-------------------------------|---------------|------------------|--------------|
|                               | Zona Inundada | Zona No Inundada | Toda la zona |
| Media (m)                     | 164.22        | 298.30           | 252.23       |
| Desviación Estandar (m)       | 249.52        | 254.76           | 260.86       |
| Varianza (m <sup>2</sup> )    | 62261.00      | 64904.00         | 68050.00     |
| Minimo (m)                    | 0.00          | 0.00             | 0.00         |
| Maximo (m)                    | 1919.40       | 2058.40          | 2058.40      |
| Rango (m)                     | 1919.40       | 2058.40          | 2058.40      |
| Coef asimetria                | 2.39          | 1.51             | 1.64         |
| Curtosis (m <sup>3</sup> )    | 10.14         | 6.04             | 6.54         |
| Numero de datos               | 6.30E+05      | 1.20E+06         | 1.83E+06     |

### 3.4.3. Multiresolution Valley Bottom Flatness

El algoritmo MrVBF propuesto por (Gallant & Dowling, 2003) se calcula empleando solamente el MDE. Parte del cálculo del descriptor Valley Flatness (VF) de escala única como la posición de topografía local y de pendiente en un área de 3x3 celdas. Luego se define una celda como parte de un valle cuando es menor que sus vecinos y tienen una baja pendiente. Luego se evalúa con lógica difusa varias múltiples resoluciones que son calculadas a partir del remuestreo del MDE para diferentes escalas. En forma general el índice MrVBF es una combinación de pesos de los valores individuales del VF de diferentes escalas.

El potencial del algoritmo MrVBF es que logra resultados multi escala por el uso de múltiples resoluciones y además la resolución más gruesa obtenida es remuestreada a la resolución del MDE original lo cual reduce la información del MDE original.

Se calcula el MrVBF con 4 cambios de escala y empleando el algoritmo y parámetros propuestos en el trabajo de (Gallant & Dowling, 2003). Los resultados obtenidos se observan en la Figura 19, donde se presenta el descriptor MrVBF, además en la Figura 20 se percibe la distribución de las frecuencias de las magnitudes del descriptor para la zona inundada y no inundada definida por la información del ICDE, también se observa en la Tabla 12 las estadísticas básicas del descriptor.

- Es interesante observar los resultados del MrVBF en la Figura 19 ya que saca a luz todo el valle de la zona estudiada. En la interpretación del descriptor se debe entender que entre mayor magnitud tenga el descriptor más posible es que sea valle y viceversa, además se observa como el Río Magdalena no se clasifica como Valle con respecto al descriptor MrVBF, debido a su cantidad de islas y barras que captura el MDE ASTER.
- En el histograma de la Figura 20, se aprecian 4 quiebres en frecuencias, debido a los 4 cambios de escala que se producen en el método, lo interesante es observar como este descriptor separa las zonas inundadas y no inundadas en algunas clases del histograma. En términos de la media del descriptor se observa como hay una media mayor en la zona inundada y una media menor en la zona no inundada, logrando un buen indicador para usar este índice como un descriptor de inundaciones.

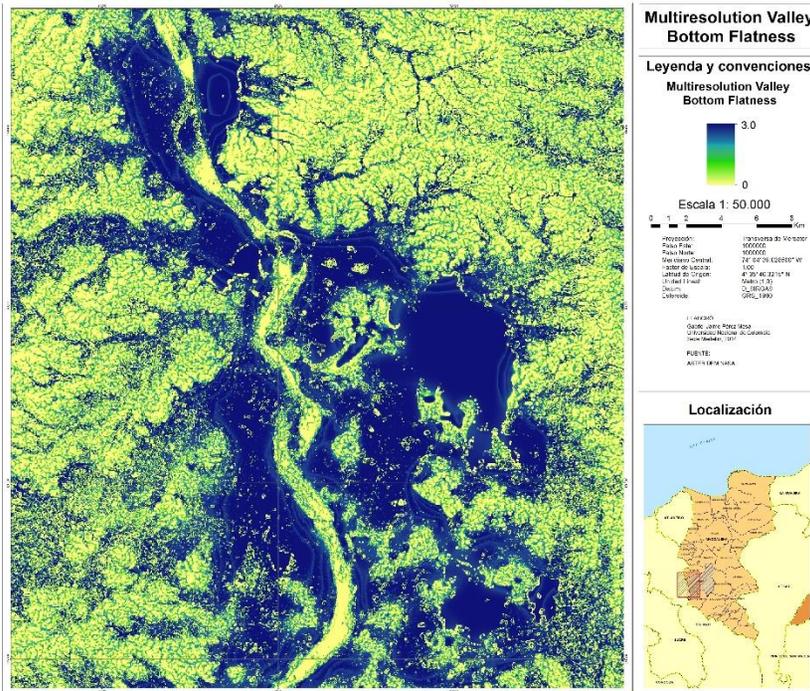


Figura 19. MrVBF derivado del MDE

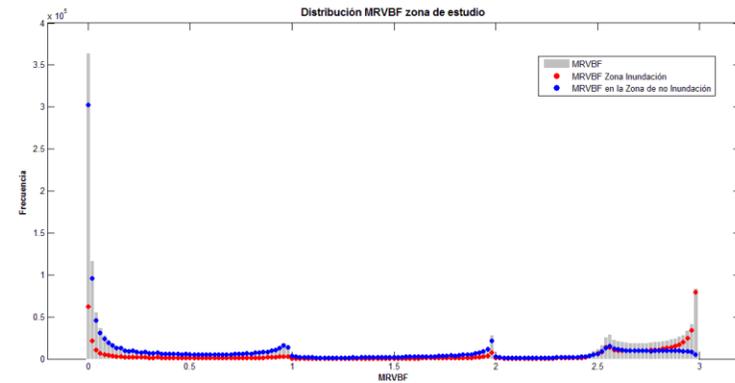


Figura 20. Histograma MrVBF para la zona inundada y no inundada

Tabla 12. Estadísticos MrVBF

| Estadísticas MrBVF  |               |                  |              |
|---------------------|---------------|------------------|--------------|
|                     | Zona Inundada | Zona No Inundada | Toda la zona |
| Media               | 2.02          | 0.99             | 1.34         |
| Desviación Estandar | 1.15          | 1.08             | 1.21         |
| Varianza            | 1.33          | 1.17             | 1.46         |
| Minimo              | 0.00          | 0.00             | 0.00         |
| Maximo              | 2.99          | 2.99             | 2.99         |
| Rango               | 2.99          | 2.99             | 2.99         |
| Coef asimetria      | -0.88         | 0.65             | 0.15         |
| Curtosis            | 2.02          | 1.79             | 1.27         |
| Numero de datos     | 6.30E+05      | 1.20E+06         | 1.83E+06     |

### 3.4.4. Mapa de pendientes

Se procede a calcular el mapa de pendientes derivado del MDE, el cual se puede representar como un ajuste de un plano a los valores de elevación  $Z$  de una vecindad de celdas de  $3 \times 3$  alrededor de la celda de procesamiento o central. Este descriptor se calcula utilizando la técnica de máxima media descrita en (Burrough & McDonnell, 1998), se puede definir en porcentaje o en grados. Se conoce que una de las características de las zonas de inundación es que se encuentra en zonas planas.

Se calculó el mapa de pendientes en porcentaje, los resultados obtenidos se presentan en la Figura 21, donde se observa el descriptor de pendientes, además en la Figura 22 se encuentra la distribución de las frecuencias de las magnitudes del descriptor para la zona inundada y no inundada definida por la información del ICDE, en la Tabla 13, las estadísticas básicas del descriptor.

- Los resultados de la Figura 21, revelan que la zona está principalmente conformada por bajas pendientes concentrándose las menores pendientes en la zona de inundación. En la Figura 22, se muestra que para las frecuencias de pendientes cercanas a cero predomina la zona de inundación.
- Se percibe cómo el Río Magdalena posee altas pendientes, debido a su cantidad de islas y barras que captura el MDE ASTER.
- En la Tabla 13, se encuentra la diferencia de las medias para la zona inundada y no inundada en aproximadamente un 3%, a esto hay que sumarle que en la media de la zona inundada, está el ruido introducido por el Río Magdalena debido a sus altas pendientes en las barras e islas.

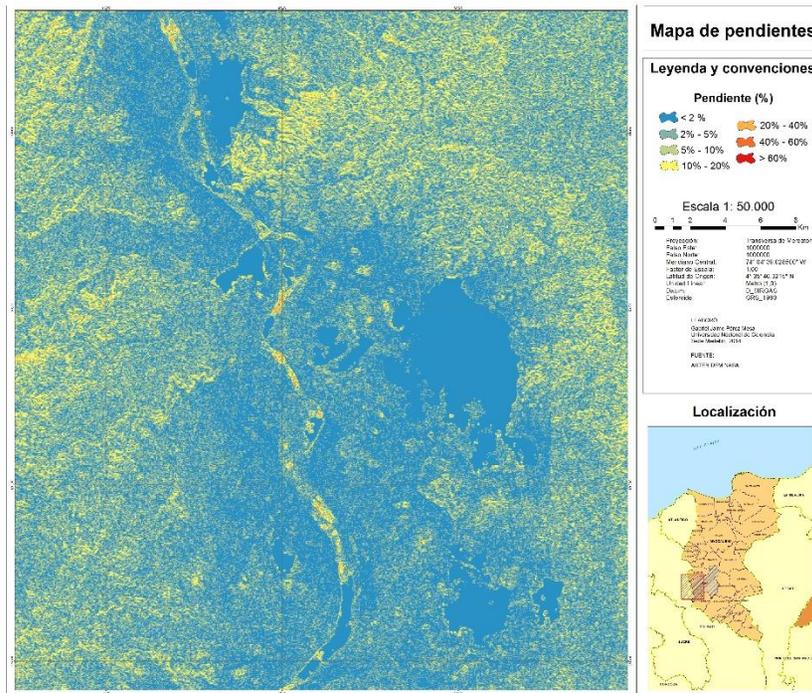


Figura 21. Pendientes derivadas del MDE

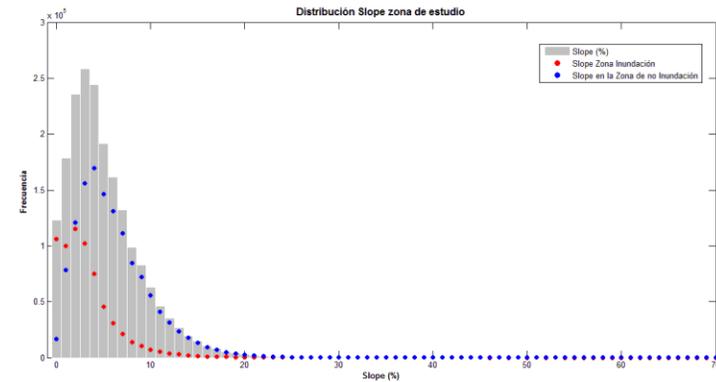


Figura 22. Histograma del mapa de pendientes para la zona inundada y no inundada

Tabla 13. Estadísticos del mapa de pendientes

|                     | Estadísticas Pendiente (%) |                  |              |
|---------------------|----------------------------|------------------|--------------|
|                     | Zona Inundada              | Zona No Inundada | Toda la zona |
| Media               | 3.20                       | 6.01             | 5.04         |
| Desviación Estandar | 3.18                       | 3.80             | 3.84         |
| Varianza            | 10.12                      | 14.44            | 14.74        |
| Minimo              | 0.00                       | 0.00             | 0.00         |
| Maximo              | 53.04                      | 41.01            | 53.04        |
| Rango               | 53.04                      | 41.01            | 53.04        |
| Coef asimetria      | 2.60                       | 1.20             | 1.39         |
| Curtosis            | 16.41                      | 5.07             | 6.24         |
| Numero de datos     | 6.30E+05                   | 1.20E+06         | 1.83E+06     |

### 3.4.5. Topographic Position Index

Se empleó el algoritmo Topographic Position Index (TPI) propuesto por (Weiss & Conservancy, 2000), en donde compara la elevación de cada una de las celdas del MDE con respecto a la media de la elevación de los vecinos de la celda de análisis.

Valores positivos del TPI representan localizaciones que están por encima del promedio de sus vecinos, tal y como se define con sus vecinos (crestas). Valores negativos del TPI representan localizaciones que están por debajo de sus vecinos (Valles). Valores de TPI cercanos a cero representan áreas planas (donde la pendiente es cercana a cero), un aspecto importante para el cálculo del TPI es la selección del radio de número de vecinos para la ejecución del TPI.

El modelo propuesto del TPI estipula un radio de vecinos para su ejecución. La selección de este radio depende de la zona y sus características, en la zona de estudio se empleó un radio de 35 celdas debido a que la zona de estudio presenta bajas pendientes en un área muy extensa, por lo que un radio significativo logra representar mejor las zonas de transición de valles a crestas. Para el análisis se debe considerar, TPI cercanos a cero (zonas planas) o menores este umbral (valles) serán las zonas de inundación.

En la Figura 23, se presenta el descriptor TPI, además en la Figura 24 la distribución de las frecuencias de las magnitudes del descriptor para la zona inundada y no inundada definida por la información del ICDE, en la Tabla 14, se encuentran las estadísticas básicas del descriptor.

- En la Figura 23, se observa que la zona de estudio es una zona muy plana debido a los valores cercanos del TPI a cero. Además se muestra en la Tabla 14 de las estadísticas de la zona inundada y no inundada, que los valores de la media son muy cercanos a cero, dificultando la separación de las zonas inundadas y no inundadas.
- En la Figura 24, se encuentra una gran zona de confusión de las zonas inundadas y no inundadas, por lo que el descriptor TPI para este caso posee mucha dispersión para poder definir concretamente la zona inundada.



### 3.4.6. Descriptores de rugosidad

Por último, se hace uso de 4 descriptores de rugosidad del terreno, con la idea de que las zonas inundadas son zonas con baja rugosidad. Se emplean 4 descriptores.

- Roughness: Este descriptor se calcula como la mayor diferencia entre los vecinos de la celda de análisis, logrando representar el mayor gradiente en un grupo de celdas. Los resultados obtenidos de este descriptor para la zona de estudio se observan en la Figura 25 y Figura 26 y Tabla 15.
- Ruggedness: Se estima como el rango de valores dentro de un área, este se calcula de la forma que esta descrito en (Olaya, 2009). Se utiliza 7 para lograr una mejor representación de los rangos en la zona de estudio, debido a que la zona es muy plana. Los resultados obtenidos de este descriptor para la zona de estudio se encuentran en la Figura 27 y Figura 28 y la Tabla 16
- Surface Roughness Factor (SRF): Es un descriptor propuesto por (Hobson, 1972) donde se emplean los vectores normales al terreno haciendo uso de los descriptores de pendiente y aspecto del terreno. Se calculó de la forma que está definida en (Olaya, 2009), los resultados obtenidos de este descriptor para la zona de estudio se observan en la Figura 29 y Figura 30 y la Tabla 17.
- Topographic Roughness Index (TRI): Es un índice desarrollado por (Riley, DeGloria, & Elliot, 1999). expresa la diferencia de elevación entre las celdas adyacentes de un MDE. El proceso calcula esencialmente la diferencia en los valores de elevación de una celda central y los 8 vecinos. El TRI se deriva entonces tomando la raíz cuadrada de este promedio el cual corresponde a la variación media de cota entre cualquier punto del MDE y su área circundante. Se utilizó un radio de 7 celdas para lograr una mejor representación de los rangos en la zona de estudio, debido a que la zona es muy plana, los resultados obtenidos de este descriptor para la zona de estudio se presentan en la Figura 31 y Figura 32 y la Tabla 18

En general se obtuvieron resultados similares en el comportamiento de los descriptores de rugosidad en la zona de estudio, observando mayor concentración de las frecuencias en las zonas no inundadas para rugosidades bajas, corroborando la idea planteada (en zonas de inundación la rugosidad es baja), el único índice de rugosidad que no obtuvo estos resultados fueron los del SRF, encontrando una gran zona de confusión entre las zona inundada y no inundada.



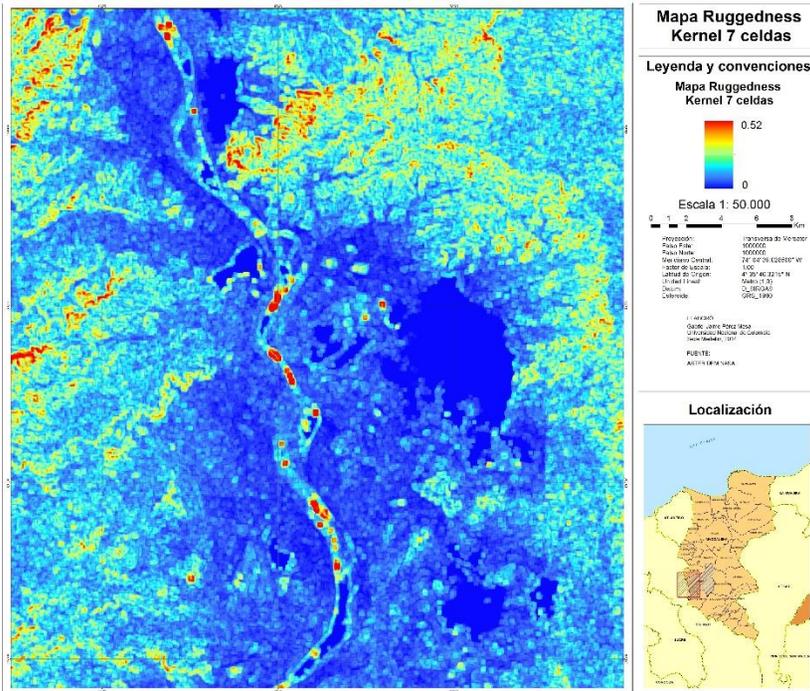


Figura 27. Ruggedness derivado del MDE

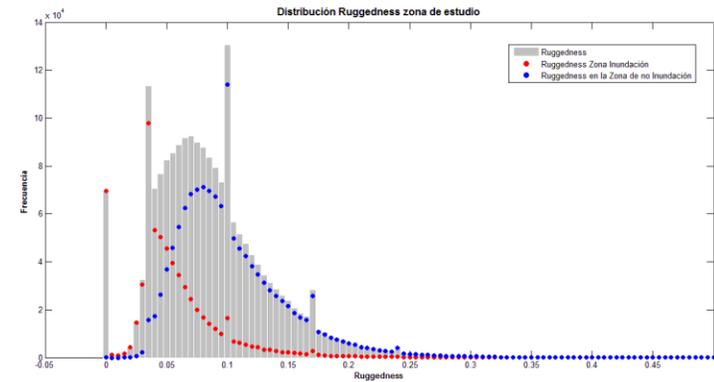


Figura 28. Histograma del mapa Ruggedness para la zona inundada y no inundada

Tabla 16. Estadísticos del mapa Ruggedness

| Estadísticas Ruggedness |               |                  |              |
|-------------------------|---------------|------------------|--------------|
|                         | Zona Inundada | Zona No Inundada | Toda la zona |
| Media                   | 0.06          | 0.10             | 0.09         |
| Desviación Estandar     | 0.04          | 0.04             | 0.05         |
| Varianza                | 0.00          | 0.00             | 0.00         |
| Minimo                  | 0.00          | 0.01             | 0.00         |
| Maximo                  | 0.53          | 0.55             | 0.55         |
| Rango                   | 0.53          | 0.53             | 0.55         |
| Coef asimetria          | 2.18          | 1.37             | 1.12         |
| Curtosis                | 13.24         | 6.35             | 5.96         |
| Numero de datos         | 6.30E+05      | 1.20E+06         | 1.83E+06     |

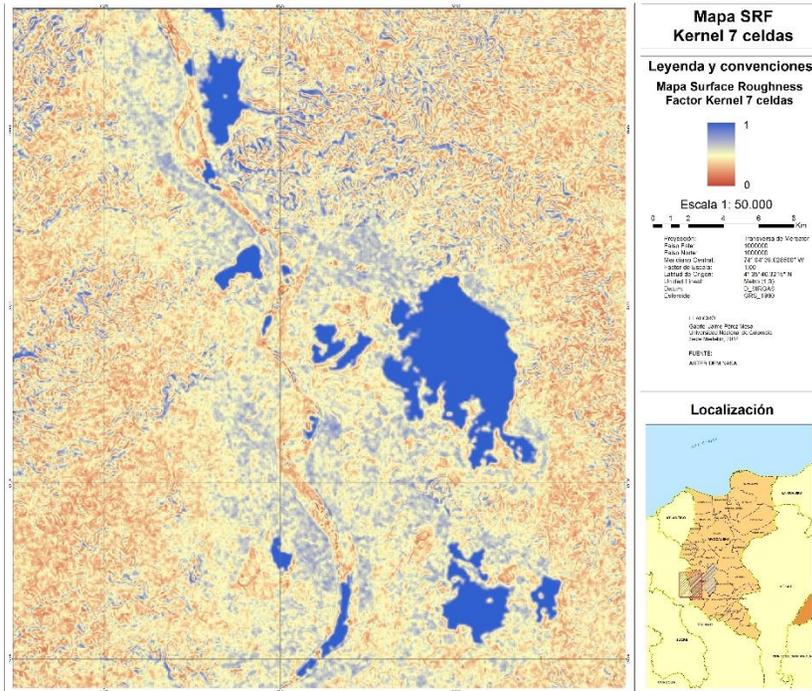


Figura 29. SRF derivado del MDE

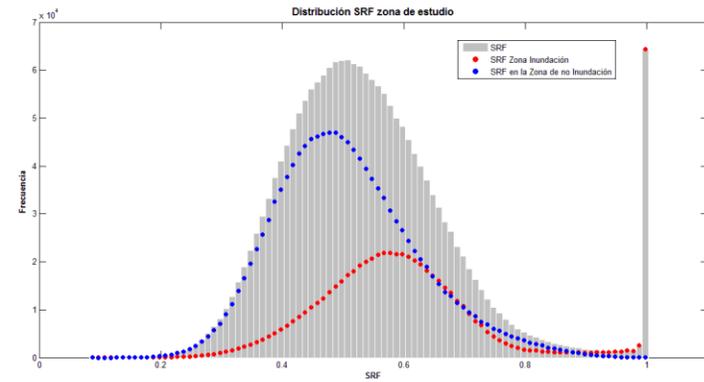


Figura 30. Histograma del mapa SRF para la zona inundada y no inundada

Tabla 17. Estadísticos del mapa SRF

| Estadísticas SRF    |               |                  |              |
|---------------------|---------------|------------------|--------------|
|                     | Zona Inundada | Zona No Inundada | Toda la zona |
| Media               | 0.62          | 0.51             | 0.55         |
| Desviación Estandar | 0.17          | 0.12             | 0.15         |
| Varianza            | 0.03          | 0.01             | 0.02         |
| Minimo              | 0.09          | 0.13             | 0.09         |
| Maximo              | 1.00          | 0.99             | 1.00         |
| Rango               | 0.91          | 0.86             | 0.91         |
| Coef asimetria      | 0.89          | 0.53             | 1.05         |
| Curtosis            | 3.33          | 3.31             | 4.57         |
| Numero de datos     | 6.30E+05      | 1.20E+06         | 1.83E+06     |

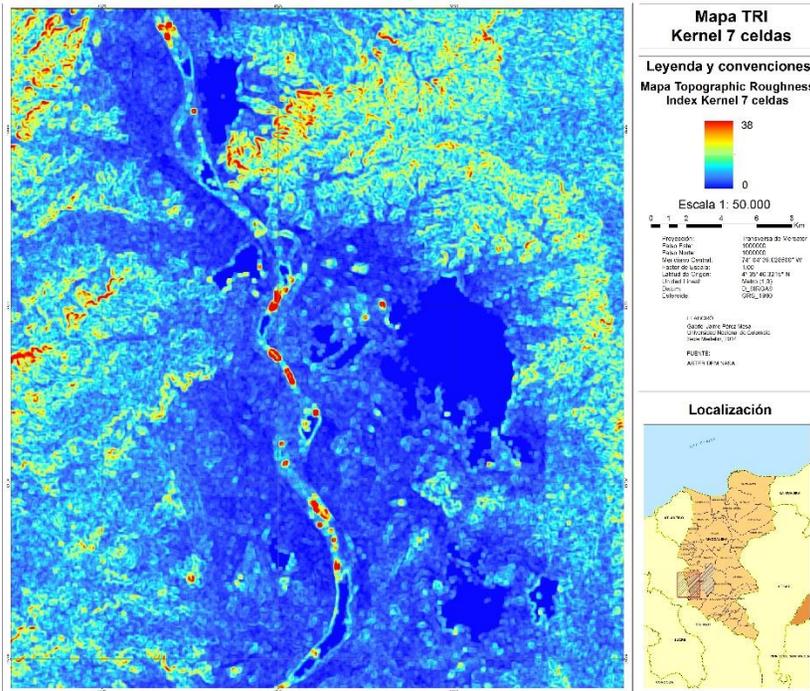


Figura 31. TRI derivado del MDE

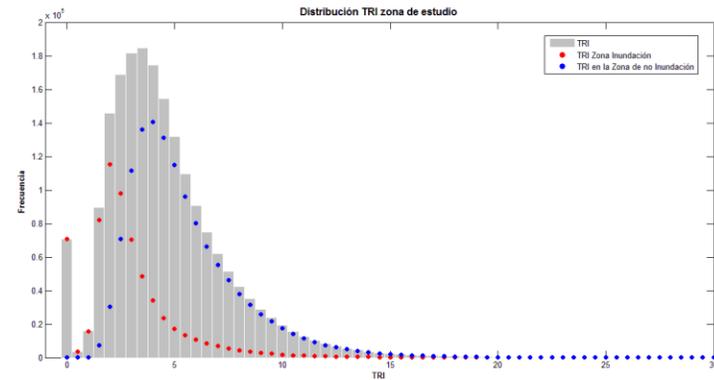


Figura 32. Histograma del mapa TRI para la zona inundada y no inundada

Tabla 18. Estadísticos del mapa TRI

|                     | Estadísticas TRI |                  |              |
|---------------------|------------------|------------------|--------------|
|                     | Zona Inundada    | Zona No Inundada | Toda la zona |
| Media               | 2.88             | 5.42             | 4.55         |
| Desviación Estandar | 2.37             | 2.56             | 2.77         |
| Varianza            | 5.61             | 6.57             | 7.69         |
| Minimo              | 0.00             | 0.84             | 0.00         |
| Maximo              | 37.78            | 32.61            | 37.78        |
| Rango               | 37.78            | 31.77            | 37.78        |
| Coef asimetria      | 2.91             | 1.58             | 1.47         |
| Curtosis            | 20.61            | 7.25             | 7.70         |
| Numero de datos     | 6.30E+05         | 1.20E+06         | 1.83E+06     |

Además, se analizaron los siguientes mapas derivados del MDE, pero se descartaron por razones que se explicarán a continuación.

- **Área acumulada:** Es un mapa que nos ayuda a describir las celdas que son red de drenaje, pero como tal no nos ayuda como descriptor de zona de inundación, ya que está muy claro que donde el mapa es red de drenaje, será zona de inundación.
- **Sediment transport Index:** Este es un índice que utiliza el área acumulada, por lo que su clasificación se concentra en las celdas de la red de drenaje, intuyendo que esta zona ya está inundada, por eso, no es relevante.
- **Wetness Index:** Lo mismo para este índice, utiliza el área acumulada, por eso no es útil para emplearla como un descriptor de zonas de inundación.

### **3.5. Proceso 5 - Análisis multivariado**

Se procede a realizar un análisis multivariado donde se pueda entender la relación de los descriptores del terreno como descriptores de inundaciones. Se comienza por un análisis de frecuencias multivariadas y posteriormente por un análisis de componentes principales, para poder entender qué tipo de relaciones pueden surgir del conjunto de datos de los descriptores del MDE y lograr un entendimiento conjunto de los descriptores, centrándose en la zona de inundación.

#### **3.5.1. Análisis de frecuencias**

Se analiza la relación de los distintos descriptores, enfocándose en el descriptor HAND por sus propiedades para definir zonas de inundación. Se plantea la hipótesis de que si los descriptores representan las zonas de inundación en algún intervalo de sus rangos de datos, otro descriptor en su intervalo de representación de inundación debe poseer una relación estrecha con respecto al primer descriptor, con lo cual la varianza conjunta en la zona de inundación debe ser mínima y su representación en el campo de frecuencias debe ser máxima. Se realiza el análisis en términos de frecuencias bivariadas y multivariadas.

El propósito de este enfoque es el de analizar de una forma muy sencilla el comportamiento de los descriptores extraídos de la zona de estudio, representando la unidad espacial con la magnitud de frecuencia de los histogramas multivariados y poder percibir los mayores grupos destacados en el conjunto de datos.

##### **3.5.1.1. Frecuencias bivariadas**

Se realiza el análisis de frecuencias bivariadas, centrándose en 4 tipos de análisis.

- Un gráfico de boxplot, en donde se puede analizar el comportamiento y la distribución de los datos de una variable con respecto a la otra.
- Un histograma de frecuencias bivariadas, donde ayuda a visualizar los rangos de mayor concentración de frecuencias de los datos analizados.
- Se realiza una estadística zonal empleando el HAND como el tipo de clase para la realización de la estadística. Se calcula la media y el intervalo de confianza de un 99.3% asumiendo una distribución normal.
- Se realiza un histograma de las frecuencias bivariadas, dividiéndolos en las zonas inundadas y no inundadas, para observar que frecuencias bivariadas se concentran en las zonas de inundación.
- Por último se define un mapa de frecuencias relativas (se estandarizan las frecuencias en función de la frecuencia máxima, definiendo un rango de 0-1) de cada uno de los grupos de los mapas bivariados, para observar como es el comportamiento de estas frecuencias.

Se debe aclarar que para la realización del mapa de frecuencias, primero se tiene que definir las clases de cada uno de los mapas de análisis, para precisar estas clases se puede definir por número de intervalos, por número de percentiles o por desviaciones estándar. En este caso se clasificaron por 0.5 desviaciones estándar, para cada uno de los mapas.

En los resultados de las estadísticas zonales se observa en azul la media y en rojo el intervalo de confianza del 99.3% del rango en el que se puede encontrar la media, se hace claridad que esto es solamente la estadística de la media, si queremos pensar en la dispersión de los datos, se visualiza el gráfico de boxplot para entender su variabilidad.

Ahora para analizar la variabilidad de los datos con respecto a las clases definidas por el descriptor HAND, se procede a realizar un boxplot, centrando los resultados para el rango de -10 a 10 del HAND, este es el rango de mayor importancia de análisis y en el que se concentran las inundaciones.

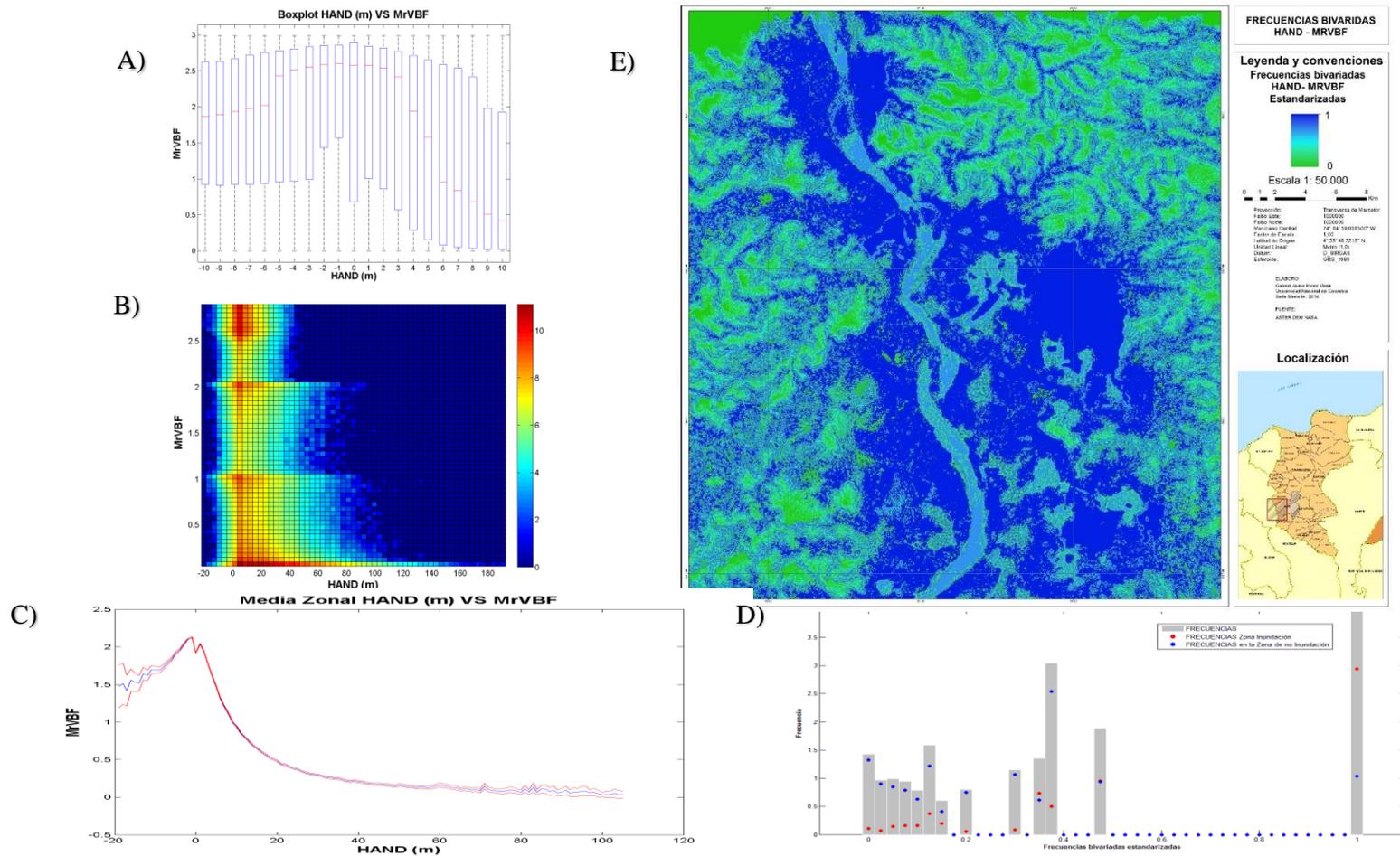


Figura 33. Análisis bivariado HAND y MrVBF A) Grafica de Boxplot, B) Histograma bivariado en escala logarítmica, C) Media zonal con intervalo de confianza del 99.3%, D) Histograma para las frecuencias bivariadas en las zonas inundadas y no inundadas y E) Mapa de frecuencias bivariadas estandarizadas en el rango [0 1]

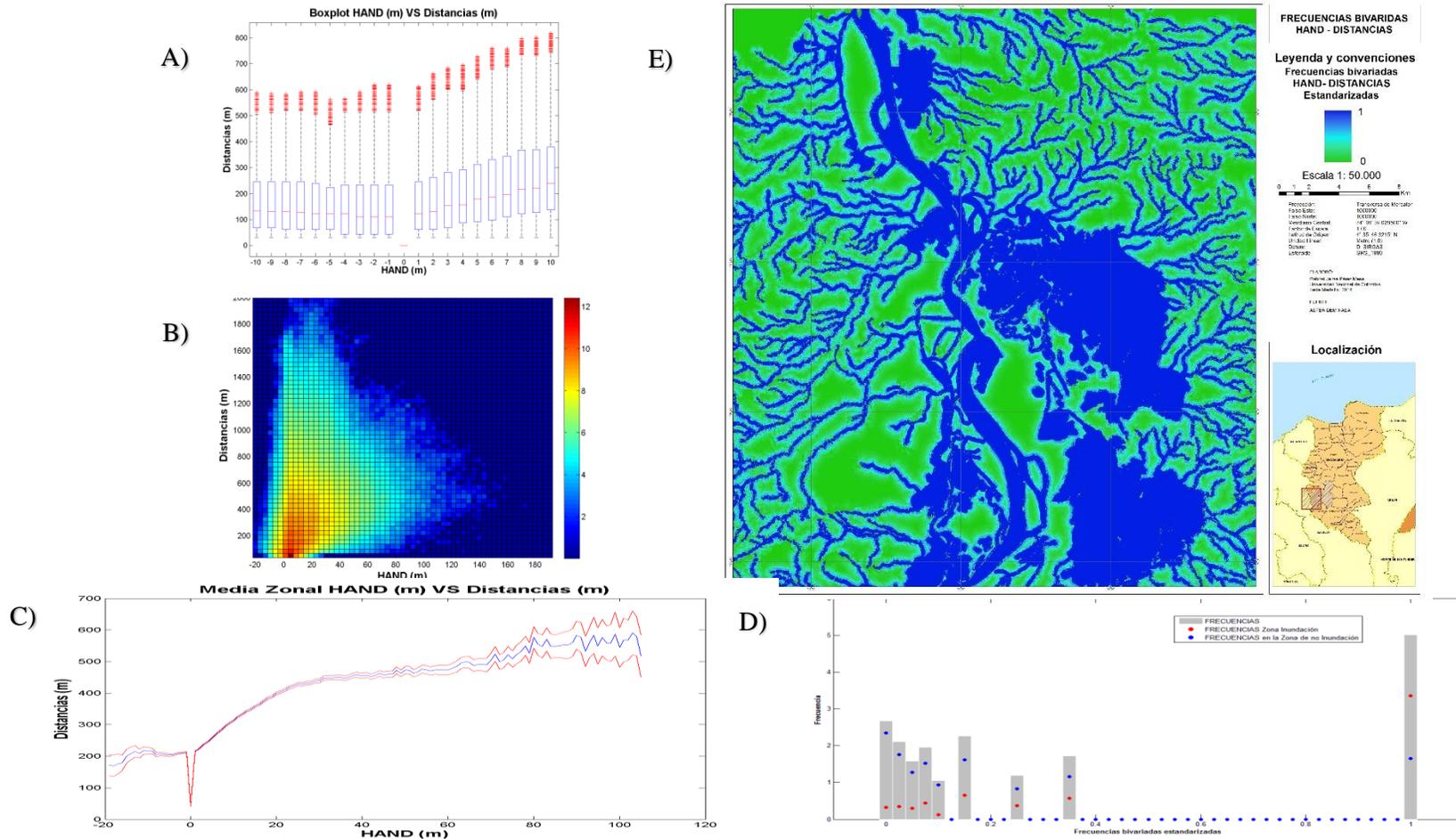


Figura 34. Análisis bivariado HAND y Distancias a la red A) Grafica de Boxplot, B) Histograma bivariado en escala logarítmica, C) Media zonal con intervalo de confianza del 99.3%, D) Histograma para las frecuencias bivariadas en las zonas inundadas y no inundadas y E) Mapa de frecuencias bivariadas estandarizadas en el rango [0 1]







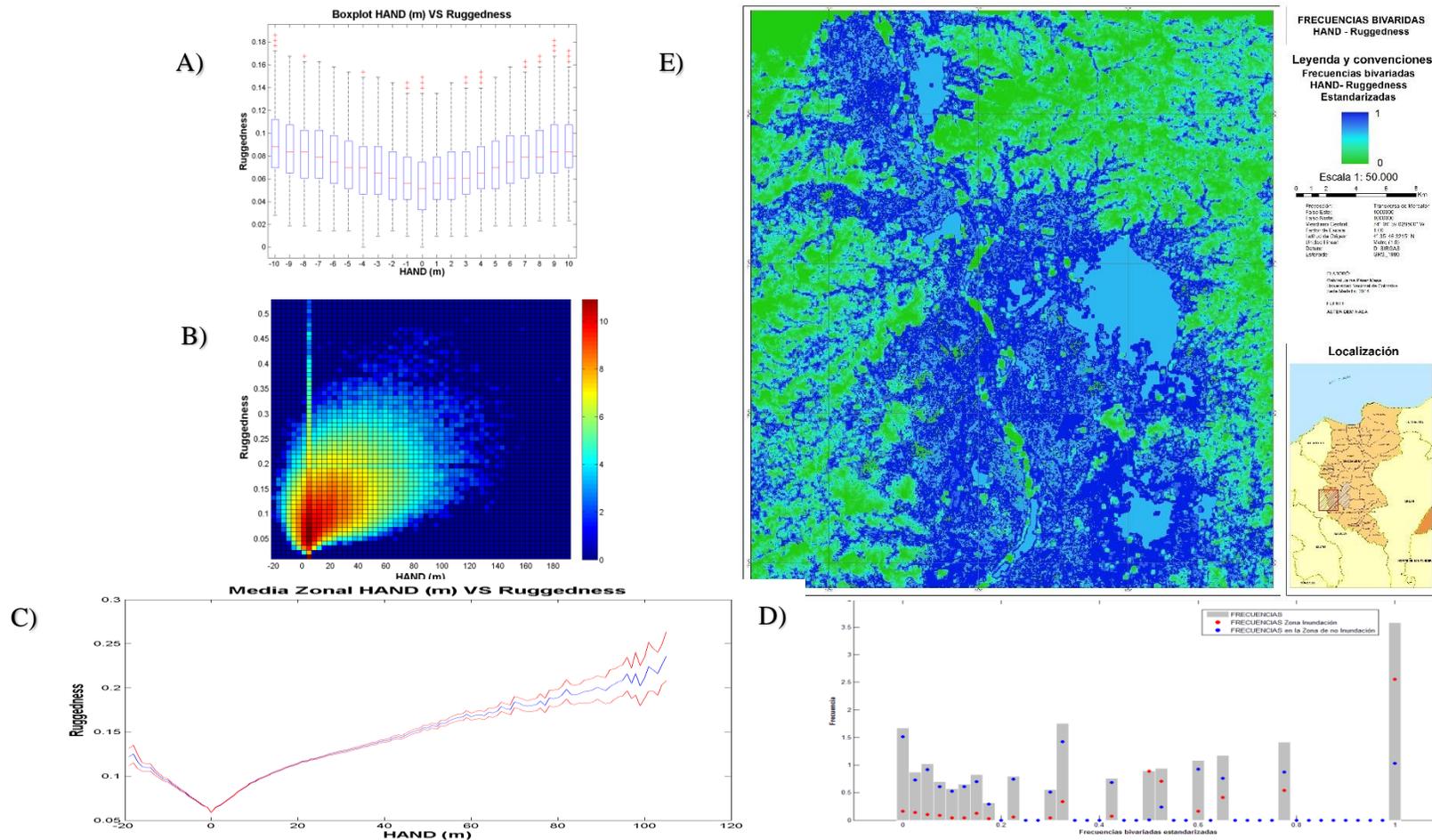


Figura 38. Análisis bivariado HAND y Ruggedness A) Grafica de Boxplot, B) Histograma bivariado en escala logarítmica, C) Media zonal con intervalo de confianza del 99.3%, D) Histograma para las frecuencias bivariadas en las zonas inundadas y no inundadas y E) Mapa de frecuencias bivariadas estandarizadas en el rango [0 1]

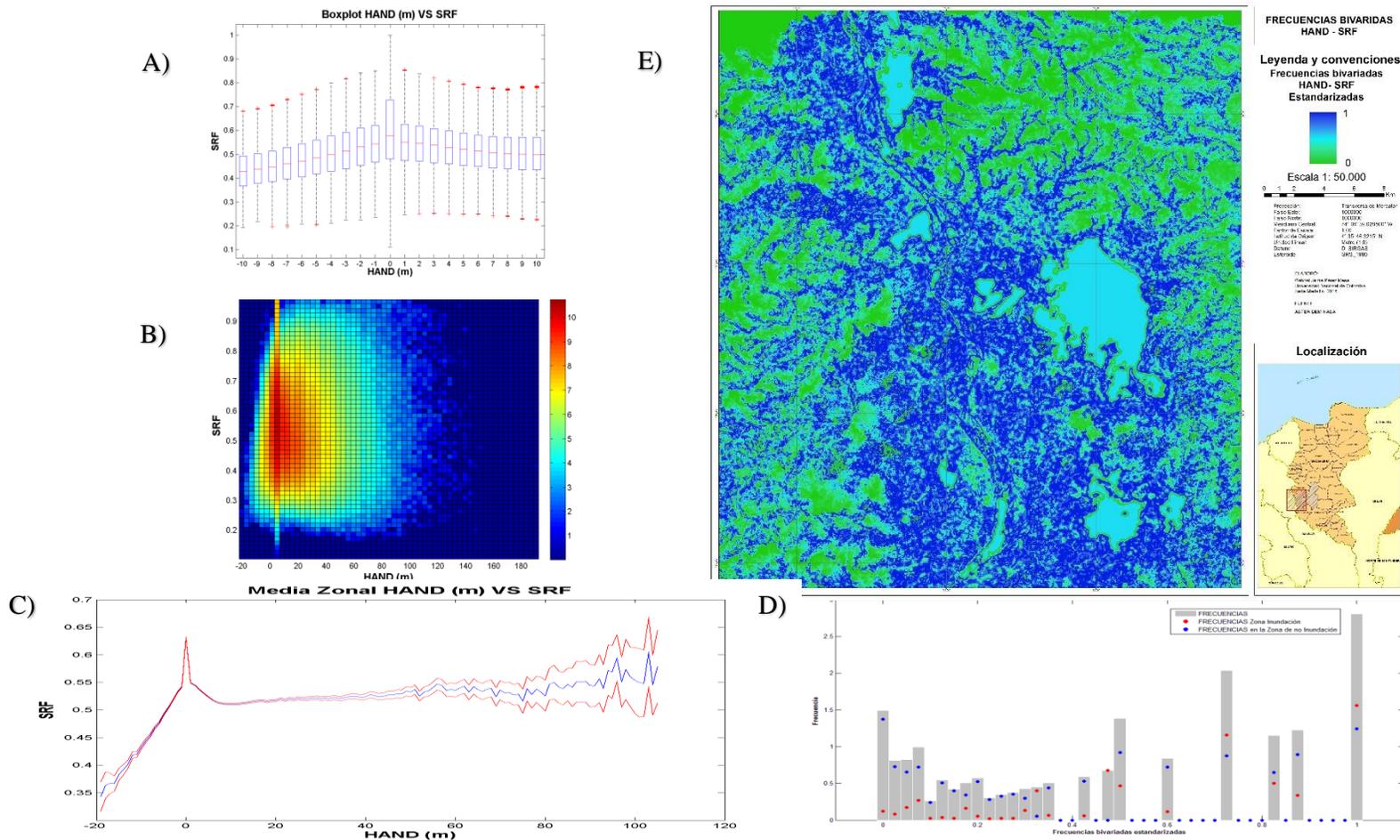


Figura 39. Análisis bivariado HAND y SRF A) Grafica de Boxplot, B) Histograma bivariado en escala logarítmica, C) Media zonal con intervalo de confianza del 99.3%, D) Histograma para las frecuencias bivariadas en las zonas inundadas y no inundadas y E) Mapa de frecuencias bivariadas estandarizadas en el rango [0 1]

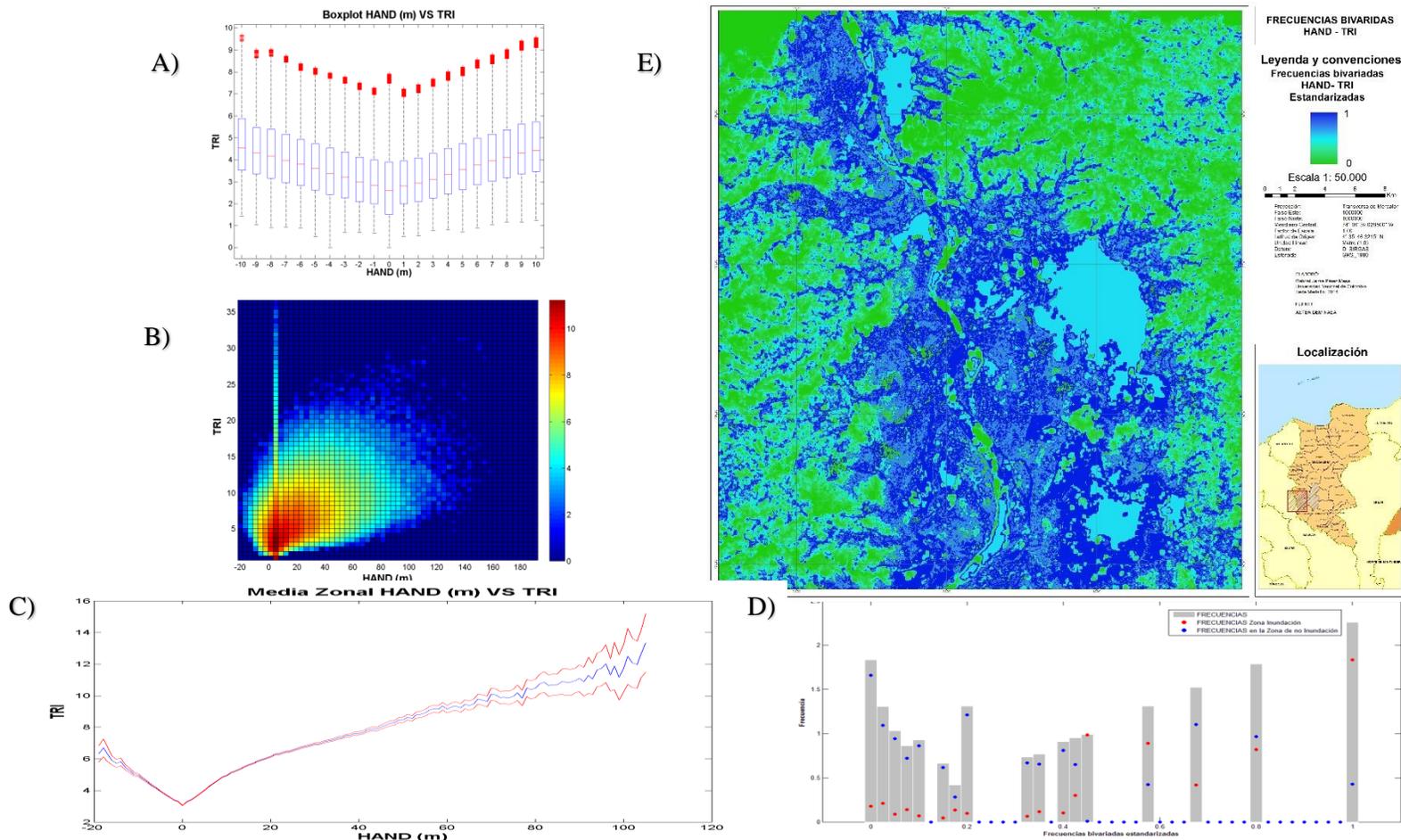


Figura 40. Análisis bivariado HAND y TRI A) Grafica de Boxplot, B) Histograma bivariado en escala logarítmica, C) Media zonal con intervalo de confianza del 99.3%, D) Histograma para las frecuencias bivariadas en las zonas inundadas y no inundadas y E) Mapa de frecuencias bivariadas estandarizadas en el rango [0 1]

Los resultados anteriores resaltan la gran relación que existe entre los descriptores empleados, se pueden derivar las siguientes conclusiones

- En la Figura 33 a la Figura 40 parte E), se puede apreciar que las mayores frecuencias estandarizadas (valores cercanas a 1) se concentran en las zonas de inundación, resultado que es corroborado con ayuda de los histogramas de la Figura 33 a la Figura 40 parte D)), logrando observar en todas las distribuciones bivariadas que en las mayores frecuencias se concentran las zonas de inundación.
- En términos de análisis del HAND con respecto a las demás variables se observa por medio de la Figura 33 a la Figura 40 parte B), que la mayoría de los datos se agrupan centrándose en valores cercanos a HAND de 0, alcanzando a simbolizar la representatividad de altas zonas de inundación en el área.
- Observando la Figura 33 a la Figura 40 parte A) se detalla la dispersión que existe de los datos con respecto a la clase HAND, aun así se percibe la tendencia de los datos en los diferentes rangos, situación que se observa con más claridad en la Figura 33 a la Figura 40 parte C) donde se calcula la media de los datos empleando la clase HAND, y se aprecia el punto de inflexión que existe en valores HAND cercanos a cero, eso se aprecia en todos los análisis bivariados exceptuando el análisis con el TPI, en donde se observa un cambio brusco en el HAND cercano al cero pero vuelve a recuperar su tendencia.

### 3.5.1.2. Frecuencias multivariadas.

Se realiza el mismo análisis para frecuencias multivariadas, con la diferencia que se emplearán más variables para la definición de las frecuencias, con el propósito de evaluar como es la varianza de los descriptores conjuntamente en términos de frecuencias. Se definen los histogramas multivariados y se estandarizan con la máxima frecuencia tal y como se realizó en las frecuencias bivariadas para definir los datos en el rango [0 1]

Observando los resultados de la Figura 41 parte I), se aprecia cómo las clases máximas de frecuencias van disminuyendo mientras se va introduciendo otro descriptor, debido al aumento de clases y una disminución de frecuencias, consecuencia al aumento de descriptores. Lo interesante de los resultados es poder cuantificar cómo se van agrupando o reduciendo las frecuencias máximas sacando a flote zonas cada vez más claras, ayudando a pensar en la delimitación de una zona de inundación. En Figura 41 parte II) se observa el grado de coincidencia de zonas de inundación en las mayores frecuencias eliminando el conflicto en las mayores frecuencias, pero además se observa cómo va aumentando el conflicto en las menores frecuencias.

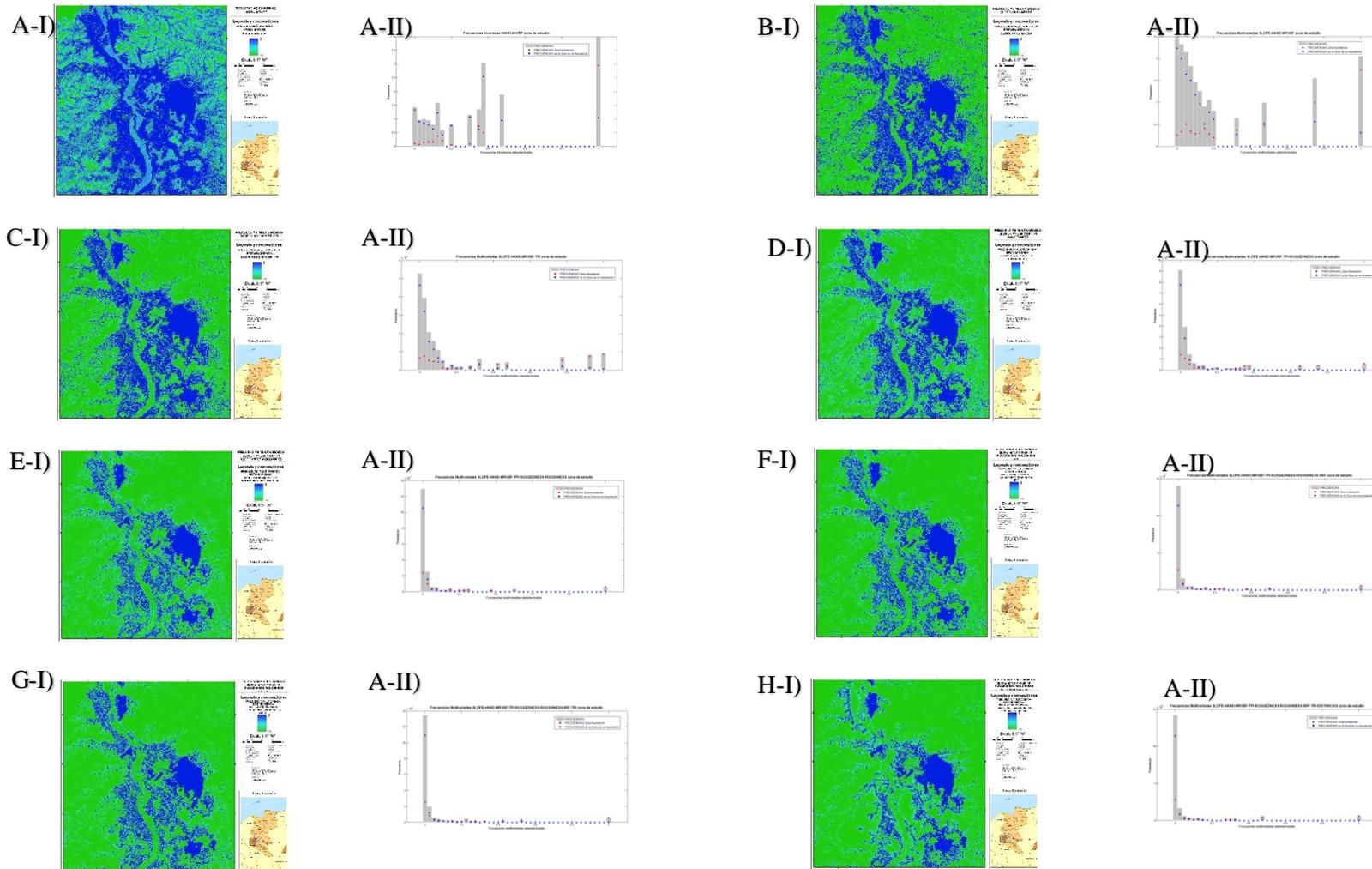


Figura 41. Análisis multivariado A) HAND – MrVBF, B) HAND – MrVBF – Pendiente, C) HAND – MrVBF – Pendiente – TPI, D) HAND – MrVBF – Pendiente – TPI – RUGGEDNESS, E) HAND\_MRNVBF\_SLOPE\_TPI\_RUGGEDNESS\_ROUGHNESS, F) HAND\_MRNVBF\_SLOPE\_TPI\_RUGGEDNESS\_ROUGHNESS\_SRF, G) HAND\_MRNVBF\_SLOPE\_TPI\_RUGGEDNESS\_ROUGHNESS\_SRF\_TRI, H) HAND\_MRNVBF\_SLOPE\_TPI\_RUGGEDNESS\_ROUGHNESS\_SRF\_TRI\_DISTANCIAS (I: Mapa y II: Distribución de las frecuencias en las zonas inundadas y no inundadas)

### 3.5.2. Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales (ACP) es la representación de las medidas numéricas de varias variables en un espacio de pocas dimensiones, esto con el fin de disminuir la dimensionalidad de un conjunto de datos. Lo importante del análisis ACP es que construye una transformación lineal con un nuevo sistema de coordenadas en el cual la varianza de mayor tamaño del conjunto de datos es capturada en el primer eje (se denomina primera componente principal), la segunda varianza más grande es el segundo eje (segunda componente principal) y así sucesivamente, por lo que las componentes principales son una excelente alternativa para analizar la relación entre los datos y poder sintetizarlos en pocos vectores que representen la mayoría de la varianza del grupo de los datos originales.

Se realizan los análisis de componentes principales para ver la relación entre estos mismos y ver su representación en términos de varianza en el conjunto completo de datos, además se explora si el comportamiento de las componentes ortogonales expresan zonas de inundación. Los resultados de los coeficientes del ACP y la varianza acumulada de los componentes principales se observan en la Tabla 19 y Tabla 20 respectivamente.

**Tabla 19. Coeficientes resultados ACP**

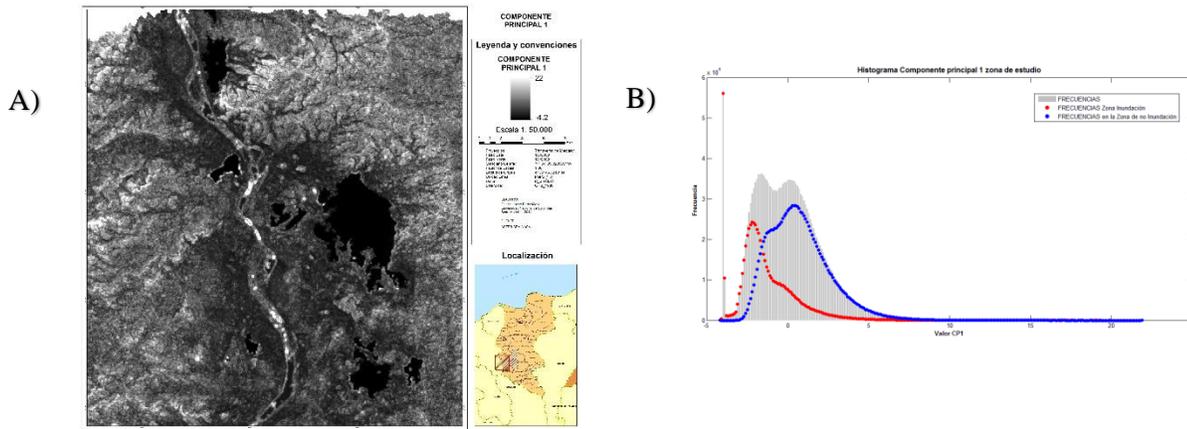
|            | CP1    | CP2    | CP3    | CP4    | CP5    | CP6    | CP7    | CP8    | CP9    |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| MRVBF      | -0.369 | -0.016 | -0.008 | 0.180  | 0.685  | 0.543  | 0.103  | 0.238  | -0.023 |
| Distancias | 0.129  | 0.459  | -0.568 | 0.575  | -0.171 | 0.171  | -0.246 | -0.013 | 0.000  |
| Pendiente  | 0.407  | -0.221 | 0.081  | 0.051  | -0.329 | 0.316  | 0.141  | 0.734  | -0.095 |
| HAND       | 0.317  | 0.516  | 0.078  | 0.042  | 0.236  | -0.233 | 0.717  | 0.038  | 0.006  |
| TPI        | 0.184  | 0.588  | 0.244  | -0.530 | 0.037  | 0.337  | -0.404 | 0.033  | -0.016 |
| TRI        | 0.429  | -0.145 | 0.158  | 0.193  | 0.324  | -0.114 | -0.265 | 0.028  | 0.737  |
| Roughness  | 0.398  | -0.252 | -0.053 | -0.036 | -0.062 | 0.573  | 0.253  | -0.615 | -0.029 |
| Ruggedness | 0.421  | -0.137 | 0.112  | 0.180  | 0.403  | -0.233 | -0.311 | -0.046 | -0.666 |
| SRF        | -0.168 | 0.159  | 0.751  | 0.529  | -0.256 | 0.115  | -0.023 | -0.144 | -0.044 |

**Tabla 20. Varianza acumulada ACP**

| Varianza | COMPONENTE        |
|----------|-------------------|
| 0.501    | 1                 |
| 0.653    | 1-2               |
| 0.765    | 1-2-3             |
| 0.856    | 1-2-3-4           |
| 0.912    | 1-2-3-4-5         |
| 0.954    | 1-2-3-4-5-6       |
| 0.981    | 1-2-3-4-5-6-7     |
| 0.998    | 1-2-3-4-5-6-7-8   |
| 1.000    | 1-2-3-4-5-6-7-8-9 |

En la Tabla 20 se aprecia que la primera componente posee el 50% de la varianza del conjunto de los datos originales, por lo que logra representar un gran porcentaje del comportamiento de la dinámica de la zona, por otro lado se observa que de la componente 1 a la 5 se está representado el 91% de la varianza del conjunto de los datos, por lo que el ACP es una buena alternativa en este caso para la disminución de la dimensionalidad de los datos.

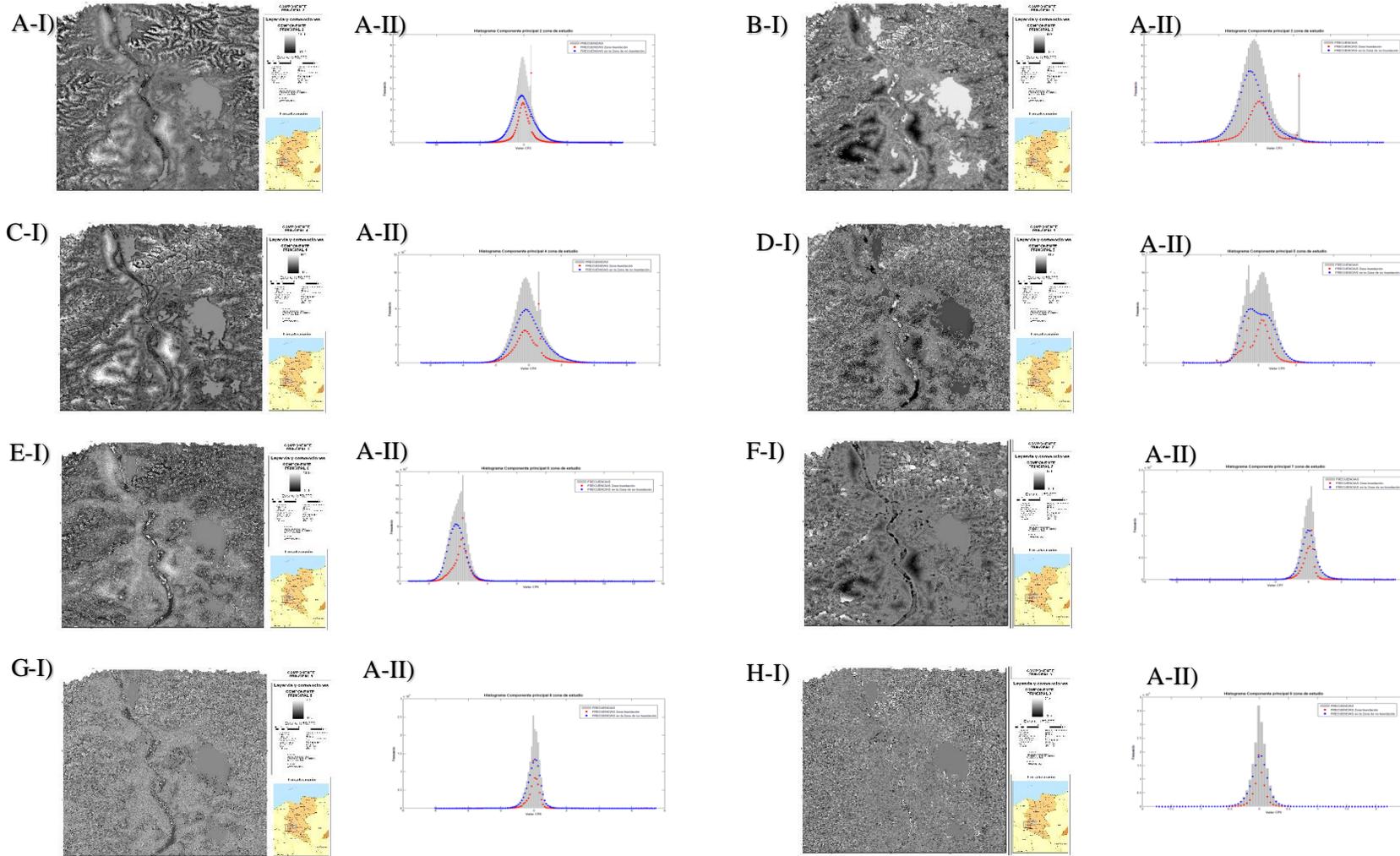
Observando los resultados de los coeficientes del ACP en la Tabla 19 se puede definir el porcentaje de participación de cada uno de los datos originales en cada una de las componentes. En las Figura 42 y Figura 43 se observan las 9 componentes principales y su histograma de frecuencias dividiéndolo en zona inundada y no inundada, para poder evaluar el comportamiento en estas zonas en específico.



**Figura 42. A) Componente principal 1 y B) Distribución de las frecuencias de la CP1 en las zonas inundadas y no inundadas**

Los resultados obtenidos de las componentes principales observados en la Figura 42 y Figura 43, permite destacar algunos aspectos importantes.

- La primera componente muestra un comportamiento del histograma en la zona de inundación y no inundación muy marcado en los histogramas de inundación y no inundación definiendo tendencias en la CP1, encontrando que los menores valores son en zonas de inundación y los mayores en zonas no inundadas, esto se aprecia en la Figura 42-A) de la distribución de las frecuencias CP1 en zonas inundadas y no inundadas. Además se destaca el comportamiento bimodal del histograma en el que se encuentran dos medias, resultado que da respuesta a la existencia de dos clases predominantes en la zona de estudio (zona inundada y no inundada)
- En las componentes 2 a la 9 se observa en el análisis del histograma, que la zona de confusión de zona inundada y no inundada es muy alta, aun así visualmente se pueden percibir algunas zonas que pueden caracterizar a un elemento geomorfológico.
- La componente 6 posee una tendencia en el histograma cercano a los valores de 1, donde se puede visualizar una zona homogénea, que se puede asemejar a la zona de inundación detectada por el ICDE, pero aún así se encuentra mucha zona de confusión en la zona no inundada.



**Figura 43. Resultados Análisis CP2-9 A) CP2, B) CP3, C) CP4, D) CP5, E) CP6, F) CP7, G) CP8, H) CP9 (I: Mapa y II: Distribución de las frecuencias de la CP9 en las zonas inundadas y no inundadas)**

Se realiza una composición de falso color de las tres primeras componentes principales ya que representan el 76 por ciento de la varianza, los resultados se observan en la Figura 44. Se puede delimitar visulamente tres clases, ayudando asociarlas a zonas de inundación (las zonas que van de la gama del verde hasta el azul).

La existencia de clases predominantes derivadas del ACP esta soportada por los resultados obtenidos en el comportamiento bimodal del histograma del CP1 , ayudando a concluir que los descriptores geomorfológicos usados en términos conjuntos están describiendo zonas en que se pueden asociar a áreas de inundación.

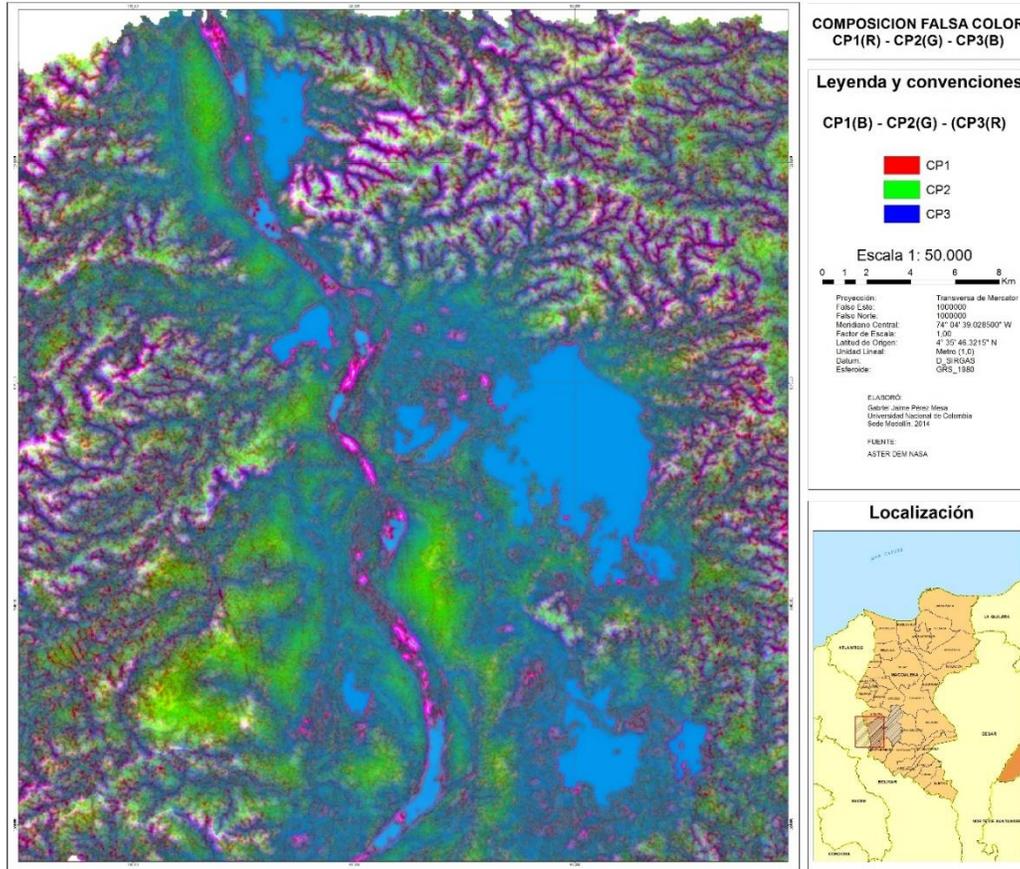
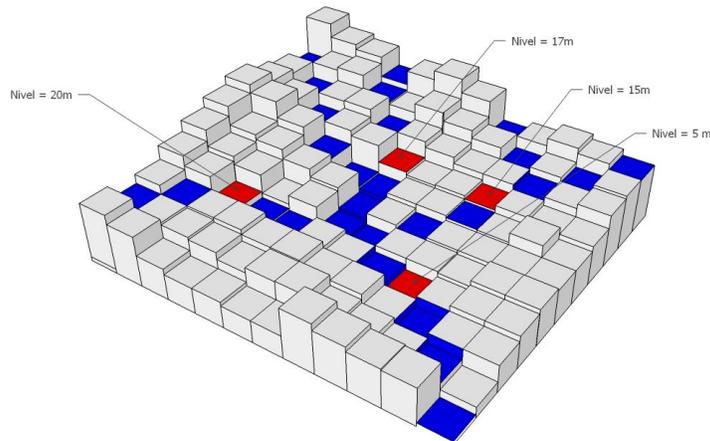


Figura 44. Composición falso color, 123, CP1, CP2 y CP3

### 3.6. Proceso 6 - Modelo HAND

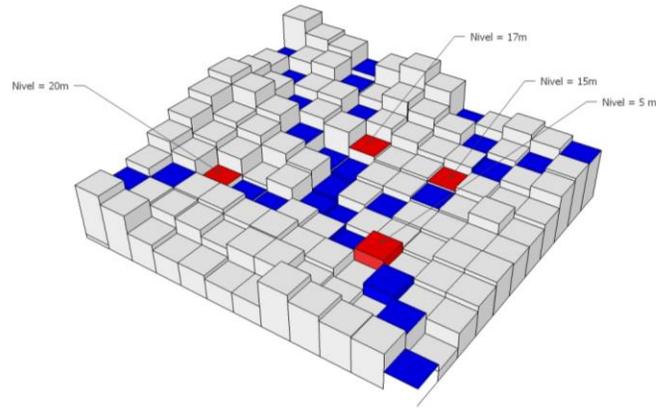
Entendido el descriptor HAND como una posible herramienta para la delimitación de inundaciones, debido a su concepto físico de representar las elevaciones de forma relativa con respecto a la red de drenaje más cercana por medio de las direcciones de flujo derivadas del MDE. Se decide incorporar el concepto de línea de energía en la red de drenaje, para posteriormente poder detectar las zonas inundadas por medio del descriptor HAND. La ventaja es poder relacionar directamente la línea de energía con los niveles de inundación para una frecuencia determinada, permitiendo delimitar zonas de inundación para diferentes periodos de retorno. El acople de información del HAND y línea de energía es lo que se denomina como modelo HAND, a continuación se explica con detalle el procedimiento para su ejecución.

El proceso de generación de líneas de energía comienza con una superposición de capas de información, todas en formato ráster, con el mismo número de filas y columnas, la misma georreferenciación y el mismo tamaño de píxeles, como se muestra en la Figura 45.



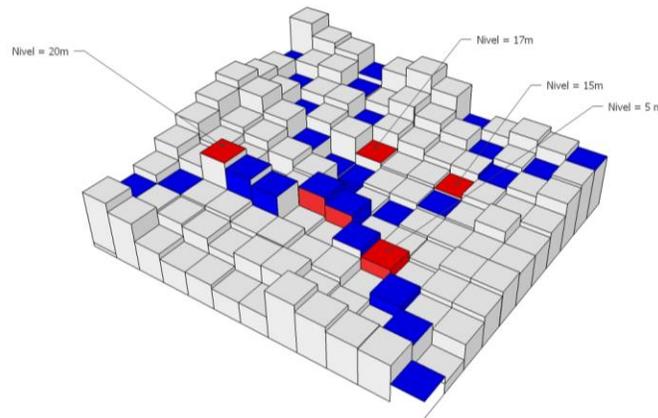
**Figura 45. MDE esquemático con red de drenaje en azul y estaciones en rojo.**

Para generar la línea de energía a lo largo de la red de drenaje se empieza en el píxel de la red de drenaje más bajo, así se garantiza que los píxeles de aguas arriba siempre encuentren un valor de nivel al bajar por la red de drenaje. Partiendo de la estación con nivel más bajo se recorre la red de drenaje hasta encontrar la salida del MDE asignando valores de niveles piezométricos a la red, que dependen de la pendiente del terreno ver Figura 46. Línea de energía definida hasta la salida del MDE.



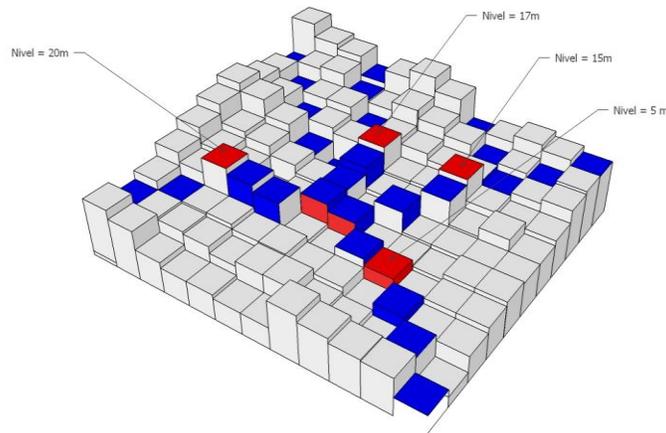
**Figura 46. Línea de energía definida hasta la salida del MDE**

Luego se hace un proceso desde las estaciones de aguas arriba hacia las estaciones de aguas abajo. El proceso consiste en empezar desde los niveles máximos y moverse a lo largo de la red de drenaje calculando pendientes. En el momento en el que el proceso encuentra otra estación calcula la pendiente del tramo a partir de la diferencia entre los niveles y la longitud calculada Figura 47.



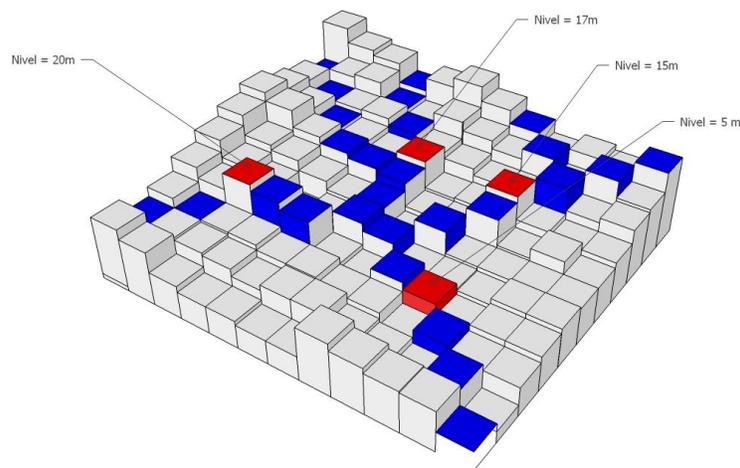
**Figura 47. Línea de energía definida desde la estación con nivel más alto hasta la siguiente estación que encuentra a lo largo de la red de drenaje**

Luego el proceso regresa desde la estación de aguas arriba asignando niveles piezométricos a toda la red por medio de la pendiente encontrada. El proceso se repite hasta pasar por todas las estaciones ver Figura 48.



**Figura 48. Línea de energía definida para todos los puntos de la red de drenaje dentro de las estaciones de nivel.**

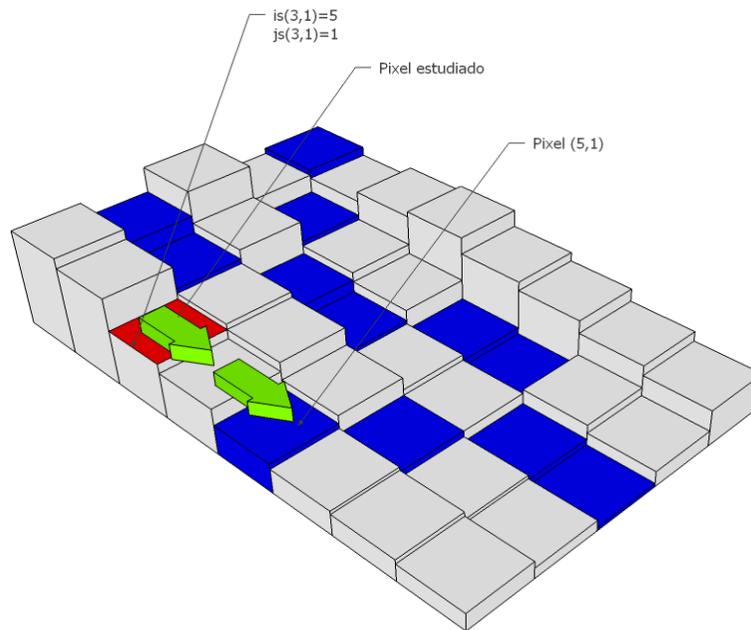
Después de tener línea de energía a lo largo del tramo de la red de drenaje con información de estaciones, se procede a llevar niveles piezométricos al resto de la red. Para esto se parte de todos los puntos de la red para los cuales no se tiene información partiendo de un nivel piezométrico conocido y asociando una altura piezométrica a cada pixel de la red de acuerdo con una pendiente calculada para los ríos en la zona de estudio. Para el caso de estudio se trabaja a partir de la pendiente calculada del terreno. Así se viaja hacia aguas arriba hasta que el valor del MDE queda por encima del nivel piezométrico, en este caso el valor que se le asigna a la red de drenaje es el valor del MDE. Así se considerarán todos los pixeles que queden a la misma altura de la red de drenaje en las zonas encañonadas pero no se harán sobre estimaciones considerando niveles piezométricos que en realidad no tienen por qué ser los verdaderos Figura 49.



**Figura 49. Línea de energía generada en todos los puntos pertenecientes a la red de drenaje**

El proceso de generación de zonas inundadas asociadas a los eventos máximos y a la información de niveles comienza con una superposición de capas de información, todas en formato raster, con el mismo número de filas y columnas, la misma georreferenciación, y el mismo tamaño de píxeles.

Las matrices de  $i_s$  y  $j_s$  son calculadas según lo expuesto en la metodología del HAND (Rennó et al., 2008). Las matrices tienen valores de la columna ( $j_s$ ) y la fila ( $i_s$ ) del píxel, en la red de drenaje, hacia el cual drena cada punto del terreno. La explicación se ve mejor en la Figura 50, donde el píxel para el cual se está calculando las matrices de  $i_s$  y de  $j_s$  es el píxel pintado de rojo. Se viaja a través del mapa de direcciones hasta llegar a un píxel de la red de drenaje. El valor de la fila del píxel de la red de drenaje es el valor para la matriz  $i_s$  en la celda roja y el valor de la columna del píxel de la red de drenaje es el valor para la matriz  $j_s$  en la celda roja.

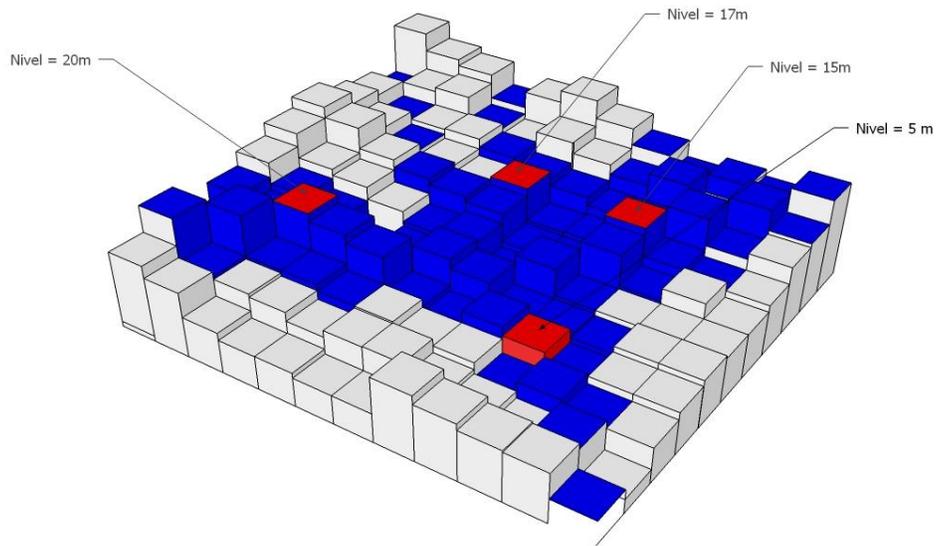


**Figura 50. Metodología para la obtención de las matrices  $i_s$  y  $j_s$**

El procedimiento se repite hasta que todos los píxeles dentro de la cuenca queden con valor de  $i_s$  y de  $j_s$ .

Teniendo las matrices de  $i_s$  y de  $j_s$  se hace un barrido por todo el MDE comparando el valor del MDE del píxel con el valor de la línea de energía del píxel asociado a las matrices  $i_s$  y  $j_s$ . Tal y como se muestra a continuación:

Si  $MDE(i,j) < \text{LineaEnergia}(i_s(i,j),j_s(i,j))$  se considera que el píxel se inunda. Si no, se considera que el píxel no se inunda. Esto teniendo en cuenta que  $i=1,2,3,\dots$  No. filas y  $j=1,2,3,\dots$  No. Columnas. Así se hace para todos los píxeles hasta determinar todas las celdas dentro del MDE. Obteniendo un raster de 1 y 0 donde el valor es 1 para las zonas inundadas y un cero para las zonas no inundadas como se muestra en la Figura 51.



**Figura 51 Mapa asociado a inundación en el MDE esquemático**

El modelo HAND utiliza 4 capas de información para realizar su estimación, los cuales son, el MDE, el mapa de direcciones, la red de drenaje y la línea de energía. Generalmente el mapa de direcciones es generado del MDE original y posteriormente la red de drenaje es derivado de este mapa de direcciones.

Se presentan diferentes alternativas en los mapas de entrada para el cálculo del modelo HAND. Se definen en total 4 combinaciones relevantes para la ejecución y análisis del modelo HAND, las propuestas se presentan en la Tabla 21

**Tabla 21. Modelos propuestos para el cálculo del descriptor HAND**

| OPCIÓN DE MODELO | MDE          | Mapa dirección de flujo            | Red de drenaje  | Línea de energía |
|------------------|--------------|------------------------------------|---|------------------|
| Modelo 1         | MDE Original | Derivado del MDE original          | Derivado del mapa de direcciones el cual es derivado del MDE original             | Estación nivel   |
| Modelo 2         | MDE Original | Derivado del MDE incisado o 'Burn' | Derivado del mapa de direcciones el cual es derivado del MDE incisado o 'Burn'    | Estación nivel   |
| Modelo 3         | MDE Original | Derivado del MDE incisado o 'Burn' | Estipulado como la Red de la Cartografía  | Estación nivel   |
| Modelo 4         | MDE Original | Derivado del MDE incisado o 'Burn' | Estipulado solamente como la red principal de la cartografía (solo Río Magdalena) | Estación nivel   |

De ahora en adelante se hará referencia a los modelos propuestos como Modelo 1, Modelo 2, Modelo 3 y Modelo 4, y las características de estos están definidas por la Tabla 21.

Para un entendimiento de los aspectos básicos del modelo HAND como descriptor de inundaciones en el siguiente apartado se explican los aspectos y detalles que se deben tener en cuenta en la ejecución del HAND.

### 3.6.1. Aspectos del HAND para inundaciones

En el uso del modelo HAND como delimitador de inundaciones requiere tener en cuenta algunas consideraciones que se describen a continuación.

#### Aspectos de niveles

- Es fundamental definir el correcto amarre de los niveles de lámina de agua para definir el umbral de inundación en el modelo HAND, por esto se debe considerar las siguientes situaciones:
  - No se posee una estación de niveles (limnigráfica o limnimétrica) cerca de la zona de estudio para poder estimar la magnitud del nivel de inundación para una frecuencia determinada, para suplir este problema se puede utilizar las gráficas que se encuentran en el Capítulo 3.3.
  - Se posee una estación de niveles que no está amarrada al MDE. Se emplea la hipótesis de que la elevación en el MDE es el nivel medio registrado en la serie de niveles, definiendo el valor del Delta en la estación para la construcción la línea de energía.
  - Por último el caso donde se posee información del MDE en donde es posible amarrar los niveles con la topografía y descartar así la hipótesis de los niveles medios de lámina de agua que representa el MDE en las celdas que son red de drenaje. En este caso se puede definir con gran detalle hasta donde subieron los niveles de lámina de agua en la topografía empleada (estos resultados se ven claramente en la aplicación de la topografía de alta resolución LiDAR)
- Otro aspecto muy importante en la definición de los niveles de inundación empleando la información del MDE ASTER y del SRTM es la precisión vertical de estos modelos es de 1 metro, por lo que no vale la pena definir rangos de inundación con decimales, debido a que el MDE no será sensible a estos cambios, se recomienda redondear el valor del umbral al entero más cercano o al entero próximo para no subestimar la inundación.

#### Aspectos en la red de drenaje

- El HAND utiliza las celdas de red de drenaje para realizar las diferencias relativas, estas celdas son definidas a partir de un umbral de acumulación de celdas o área, dando como resultado una red de drenaje que es representada por una sucesión de celdas representando líneas de drenaje. El problema es poder representar canales más anchos, es decir hay redes de drenaje que poseen un ancho mayor que el de una celda, por lo que la celda no está representado toda el área de la red de drenaje, hecho que es muy importante para definir la zona de inundación y como parámetro del HAND.

- Para este caso se plantean dos alternativas, una es dejar la red tal y como está (la que se obtiene a partir del mapa de direcciones) y tener la premisa que las celdas que hacen parte de la red real también se inundarán. Esta premisa se va deteriorando conforme al ancho del canal, por lo que si se encuentran anchos significativos en la red de drenaje, no se sabría definir con certeza a partir del mapa de direcciones cual es la red de drenaje más representativa del afluente, sumándole además la situación de que generalmente los afluentes con ancho muy significativo son las que producen las inundaciones de mayores dimensiones.
- La otra alternativa para solucionar este problema es la definición del mapa de red de drenaje partir de la cartografía en donde se conozca con certeza que celdas son red de drenaje, realizando esto se puede emplear el HAND definiendo a priori que celdas son red de drenaje y empleando el mapa de direcciones derivado del MDE para realizar el HAND.
- Otro aspecto muy importante es la definición de las cabeceras de las redes de drenaje, ya que como bien se sabe el HAND utiliza la red de drenaje como foco de inundación, por lo que si se excede en la estimación de la densidad de la red de drenaje (es decir define un umbral muy bajo de área de acumulación para la red drenaje) se va obtener una zona muy saturada de redes de drenaje, dando como producto un mapa muy inundado, situación con la que se debe tener sumo cuidado. Para esto se posee las siguientes alternativas.
  - Definir la red de drenaje partir de un umbral de área de acumulación
  - Definir la red de drenaje a partir de un umbral de área y pendiente
  - Definir la red a partir de la cabeceras extraídas de la cartografía de la red de drenaje (si es que existe)
  - Definir la red drenaje como la de la cartografía (si es que existe)

### Otros aspectos

- Además se aclara que con el HAND se puede estimar la profundidad de inundación, debido a que realmente el HAND es un cálculo de diferencias relativas de elevaciones con la red de drenaje
- Otro aspecto muy relevante es definir la magnitud de la línea de energía en la zona de estudio y su dinámica en la red de drenaje. Como se explico anteriormente la línea de energía se construye a partir de estaciones de nivel localizadas en la red de drenaje
- para la estimación de los niveles, es que para la estimación de estos se está empleando un umbral de lámina de agua, el cual lo representamos como una línea de energía, el problema se centra es que esta línea de energía siempre es constante, por lo que se

está diciendo que el nivel de lámina de agua que está produciendo la inundación es el mismo para toda la zona que se está evaluando, lo cual no es del todo cierto, ya que como bien se sabe el nivel de lámina de agua en el tránsito de los cauces cambian en función de la geometría, rugosidad y pendiente del canal, este nivel se mantiene relativamente constante en inundaciones lentas, lo cual si se podría decir que poseen niveles constantes para las zonas de grandes ríos donde se presentan inundaciones lentas. Pero este no es el caso para inundaciones súbitas o para los demás segmentos de redes de drenaje que presentan altas pendientes. Para esto se propone las siguientes alternativas

- Si solo se quiere evaluar una zona en particular y se define un nivel constante para esta zona, sencillamente se utiliza un umbral constante para la línea de energía para definir la zona de inundación (la zona debe ser muy plana para que la línea de energía sea lo más constante posible o la zona debe ser delimitada donde no se presenten cambios significativos de la línea de energía)
- Si se desea aplicar el modelo HAND en una zona mucho más significativa (diferentes afluentes, donde se tiene conciencia de los cambios de línea de energía en la red de drenaje, se puede emplear estaciones de control para poder definir líneas de energía variantes (esto se presenta como una alternativa en la Interfaz Gráfica presentada en el Capítulo 6), logrando una interpolación de línea de energía a partir de unas estaciones de nivel, definidas para los distintos segmentos de la red de drenaje.

Una vez entendido lo anterior y definidas las 4 alternativas planteadas para ejecutar el modelo HAND, se procede a ejecutar el modelo. En la Figura 52 se observan los resultados para los mapas de inundación correspondientes a un período de retorno de 20 años (Delta de nivel de 6 metros), para cada una de las cuatro alternativas propuestas del HAND.

### 3.6.2. Resultados inundaciones.

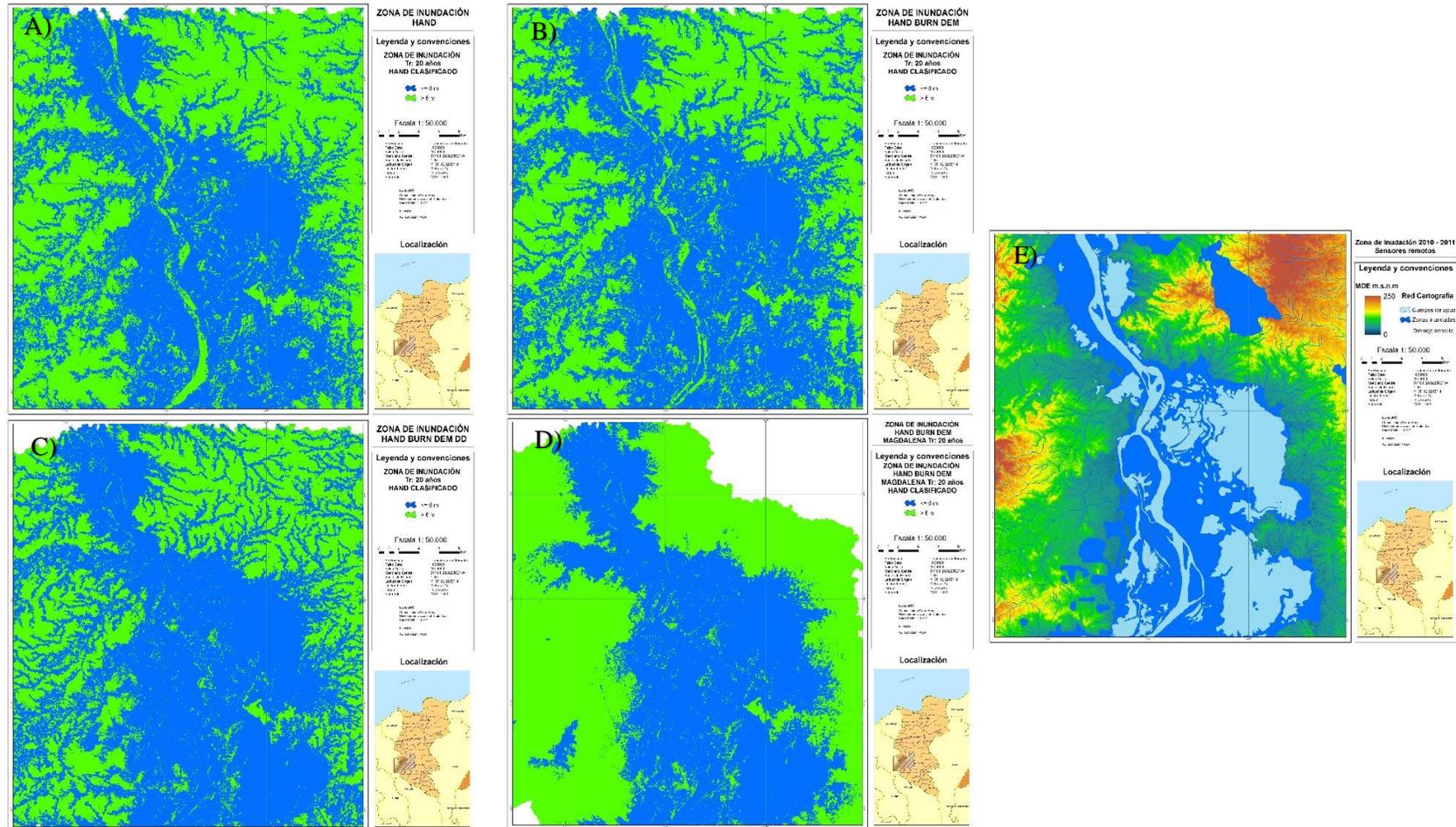


Figura 52. Mapa de inundación para un Tr: 20 años, generado con las alternativas A) Modelo 1, B) Modelo 2, C) Modelo 3, D) Modelo 4, comparados con E) Inundación real ICDE

Se obtienen también los resultados de mapas de inundación para distintos Tr. Para un Tr de 2.33 años con un Delta de nivel de 2.8 metros debido a la precisión del MDE se usará un umbral de 3 metros, para un Tr de 20 años de usará un Delta de nivel de 5.5 metros el cual se usará un Umbral de 6 metros y para un Tr de 100 años se empleará un nivel de 7.8 metros el cual se redondea a un umbral de 8 metros.

Los resultados se obtuvieron para las 4 alternativas del HAND, en la Figura 53 se observan los resultados para la alternativa del HAND empleando solamente el modelo 4.

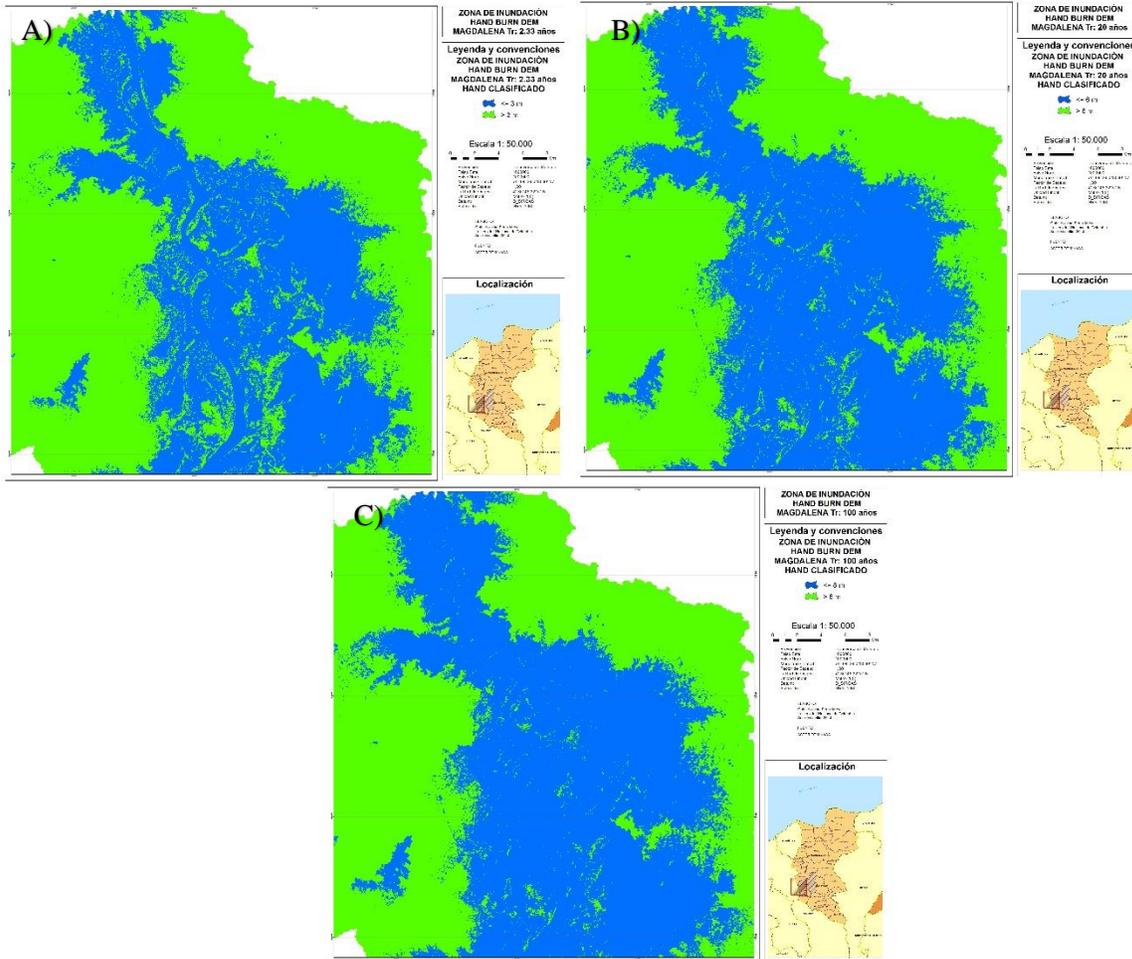
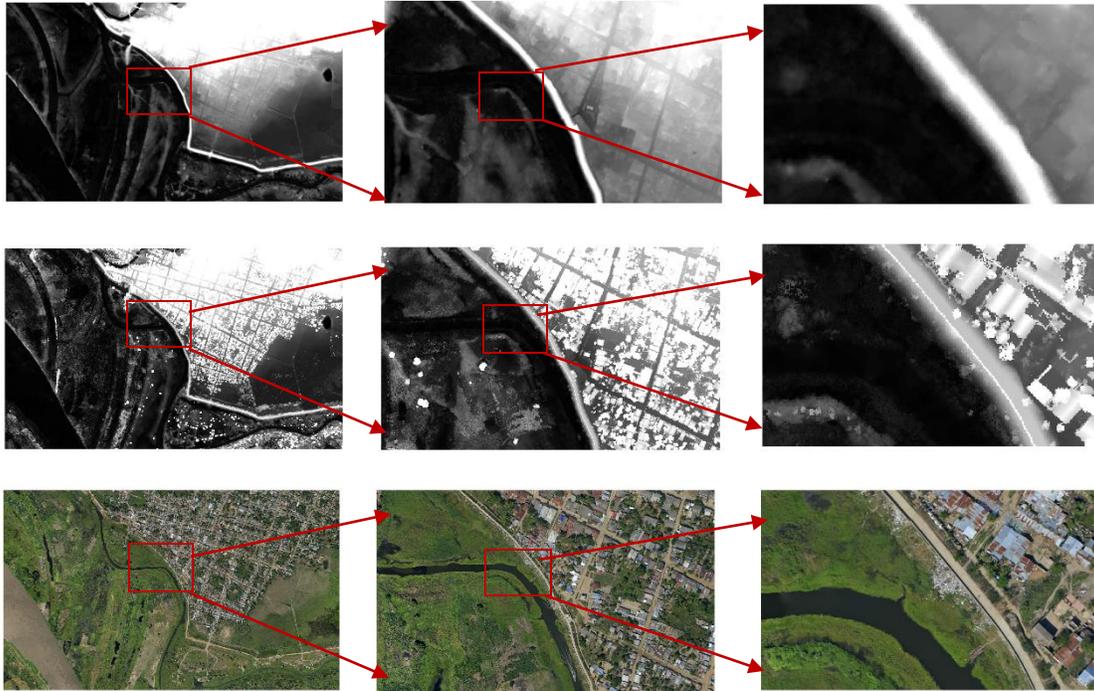


Figura 53. Manchas de inundación para A) Tr: 2.33 años, B) Tr: 20 años y C) Tr: 100 años extraídas del Modelo 4 (solo Río Magdalena)





**Figura 55. Cambios de escala de visualización Información LiDAR**

Aparte de esta información de gran resolución MDE (0.5 metros) y Ortofoto (0.1 metros) se posee la fecha del levantamiento de la topografía, logrando amarrar el nivel de lámina de agua registrada por la estación limnigráfica con respecto a la topografía LiDAR. Logrando calcular la línea de energía para cada período de retorno con exactitud con respecto a la topografía. Los datos de los Delta de niveles se observan en la Tabla 22.

**Tabla 22. Delta de Niveles usados en la topografía LiDAR para generación de inundaciones**

| DELTAS USADOS EN TOPOGRAFIA LiDAR (cm)   |      |
|--|------|
| Nivel de la mira - día de medición LiDAR | 1026 |
| *DELTA 2.33                              | 202  |
| *DELTA 20                                | 473  |
| *DELTA 100                               | 635  |

Con los Delta de niveles definido de la Tabla 22, se estiman las zonas de inundación empleando el HAND para los distintos períodos de retorno, los resultados se observan en la Figura 56.

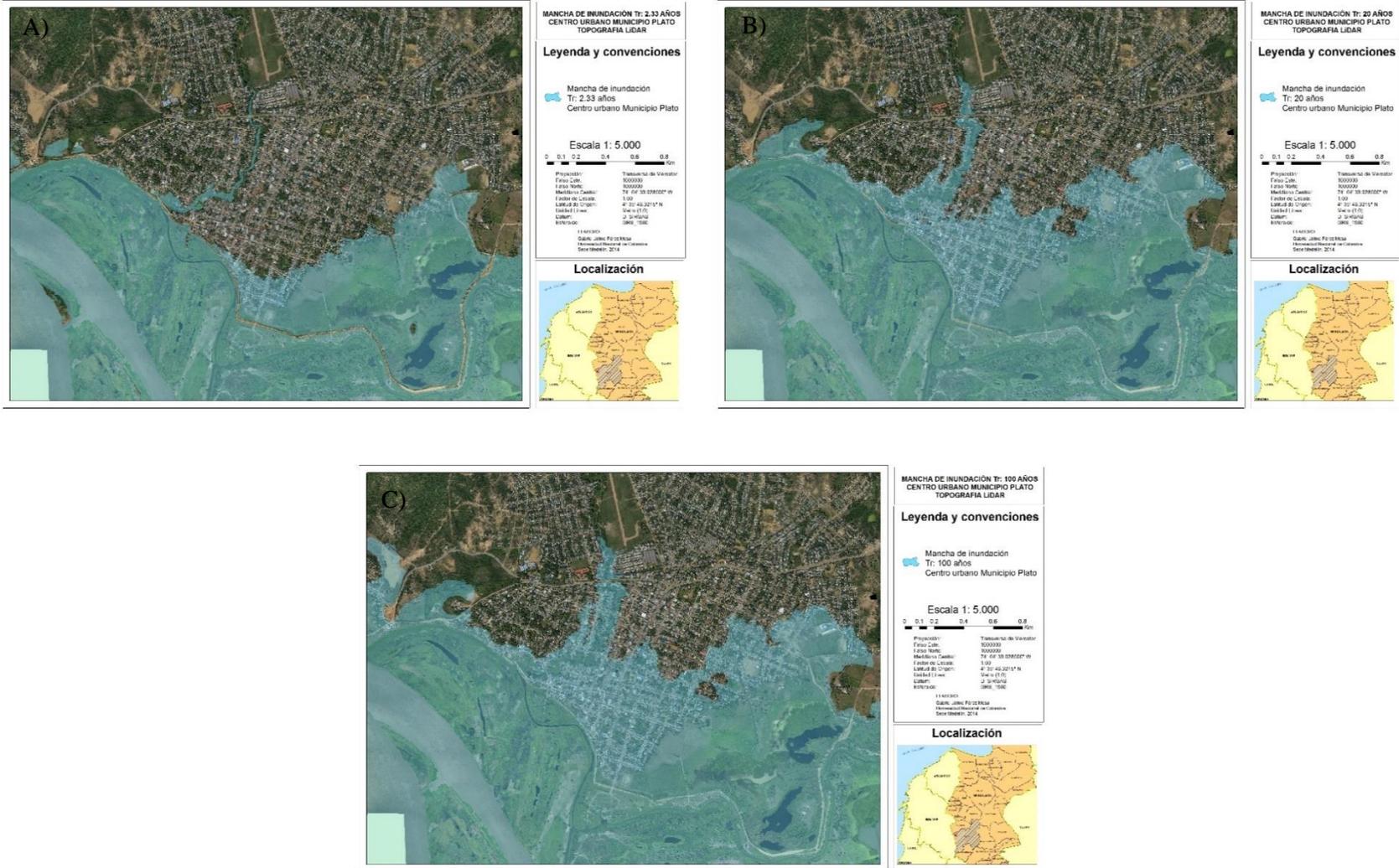


Figura 56. Mapa de inundación empleando topografía LiDAR y el modelo HAND, para A) Tr:2.33 años, B) Tr: 20 años y C) Tr:100 años

Además es posible calcular la profundidad de inundación y empleando la relación entre profundidad y velocidad descrita en la Figura 57, es posible definir la amenaza observada en la Figura 58 -B. Como se supone que es una inundación lenta, se asume que la velocidad es baja (del orden de 0 – 0.5m/s) y es constante, por este hecho la amenaza depende únicamente de la profundidad (para el caso de inundaciones lentas).

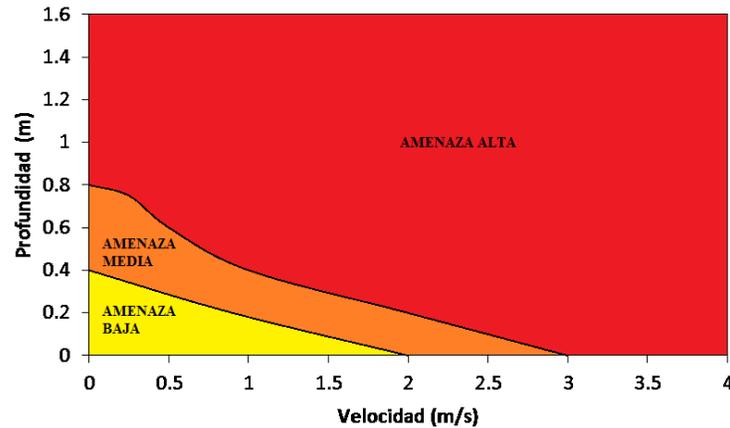


Figura 57. Relación de Velocidad y profundidad para el grado de amenaza.

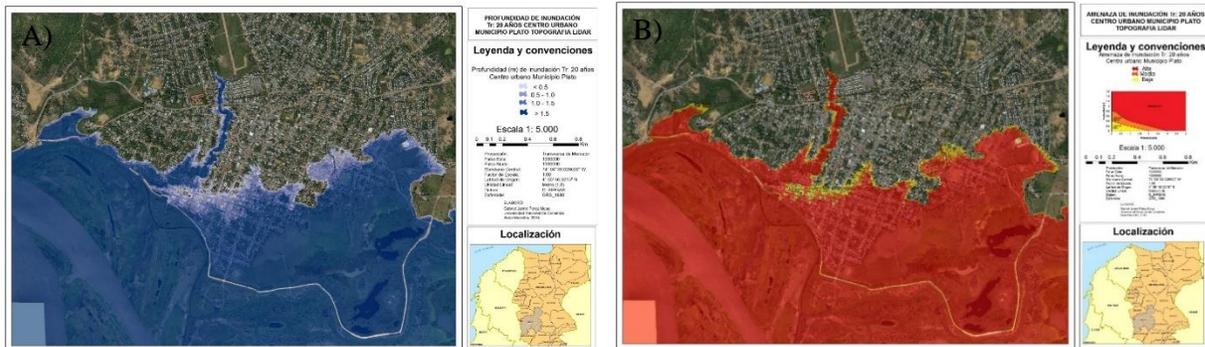


Figura 58. A) Mapa de profundidad de inundación y B) Mapa de amenaza de inundación para un Tr: 20 años - Centro urbano del Municipio de Plato

Los resultados dan gran nivel de detalle, para la definición de las zonas de inundación, logrando detalles de escala 1:2000 e inclusive escala 1:1000, resultado idóneo para términos de planeación y gestión por parte de las entidades públicas.

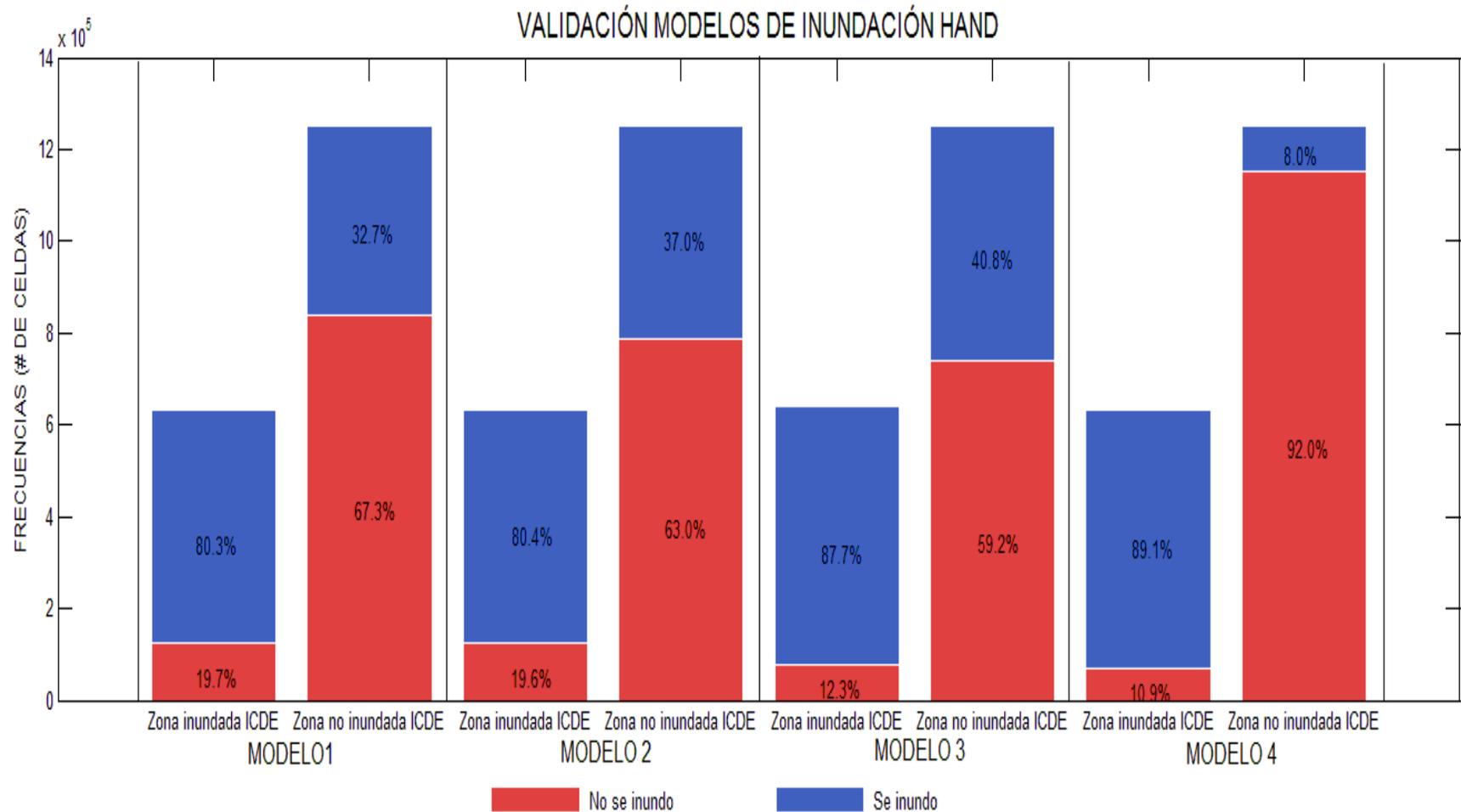
# Capítulo 5

## Validación resultados

Se validan los resultados de las manchas de inundación obtenidas por los diferentes métodos, tanto para el MDE ASTER como para la topografía LiDAR, para esto se realizan 3 validaciones:

- La primera validación consistirá en verificar la zona de inundación de los 4 modelos HAND para la zona inundada y no inundada definida por el ICDE, para esto se realizará una estadística del conteo de coincidencias de las zonas que se inundaron y no se inundaron en los modelos HAND y en la zona definida por el ICDE.
- El segundo resultado a validar es la mancha de inundación obtenida con Topografía LiDAR para el centro urbano del municipio de Plato, para esto se soportará de trabajo de campo donde se verificarán los resultados obtenidos.
- Por último se validarán los resultados de las manchas de inundación obtenidos por los 4 modelos HAND con uso del MDE ASTER, centrandó la validación en el centro urbano del municipio de Plato, para esto nos apoyaremos de la inundación derivada de la Topografía LiDAR como la inundación real. Se realizará la misma estadística de coincidencias, para observar el desempeño de los 4 modelos empleados.

En la Figura 59 se observan los resultados de la validación de las zonas de inundación definidas por las 4 alternativas para la ejecución del modelo HAND y la inundación definida por el ICDE.



**Figura 59. Coincidencias de zonas inundadas y no inundadas de los 4 modelos del HAND y las zonas inundadas definidas por el ICDE. (Modelo 1: HAND con Direcciones del MDE original y Red del MDE original, Modelo 2: HAND con Direcciones del MDE incisado o ‘Burn’ y Red del MDE incisado o ‘Burn’, Modelo 3: HAND con Direcciones del MDE incisado o ‘Burn’ y Red de la cartografía y Modelo 4: HAND con Direcciones del MDE incisado o ‘Burn’ y Red solamente del drenaje principal (Río Magdalena)).**

Ahora se procede a validar los resultados obtenidos del modelo HAND empleando la topografía LiDAR, para este se realizó una salida de campo, donde se verificó la inundación del modelo por medio de testimonios y relatos de la comunidad y además con pruebas de marcas de inundación en viviendas producto del último evento de inundación de los años 2010-2011 asociado a un período de retorno de 20 años. Los resultados se observan en la Figura 60.



**Figura 60. Validación de la zona de inundación. Puntos rojos son las zonas que se recorrieron para verificar el contorno de la inundación.**

Los resultados de las inundaciones de la topografía son realmente satisfactorios ya que logra estimar con gran precisión las zonas de inundación registrada por el último evento de inundación del periodo 2010 y 2011. Estos resultados servirán para validar los resultados obtenidos en la misma zona para las inundaciones obtenidas en los 4 modelos HAND con el MDE ASTER, logrando evaluar como es el comportamiento en diferentes escalas. Los resultados se observan en las Figura 61 y Figura 62.

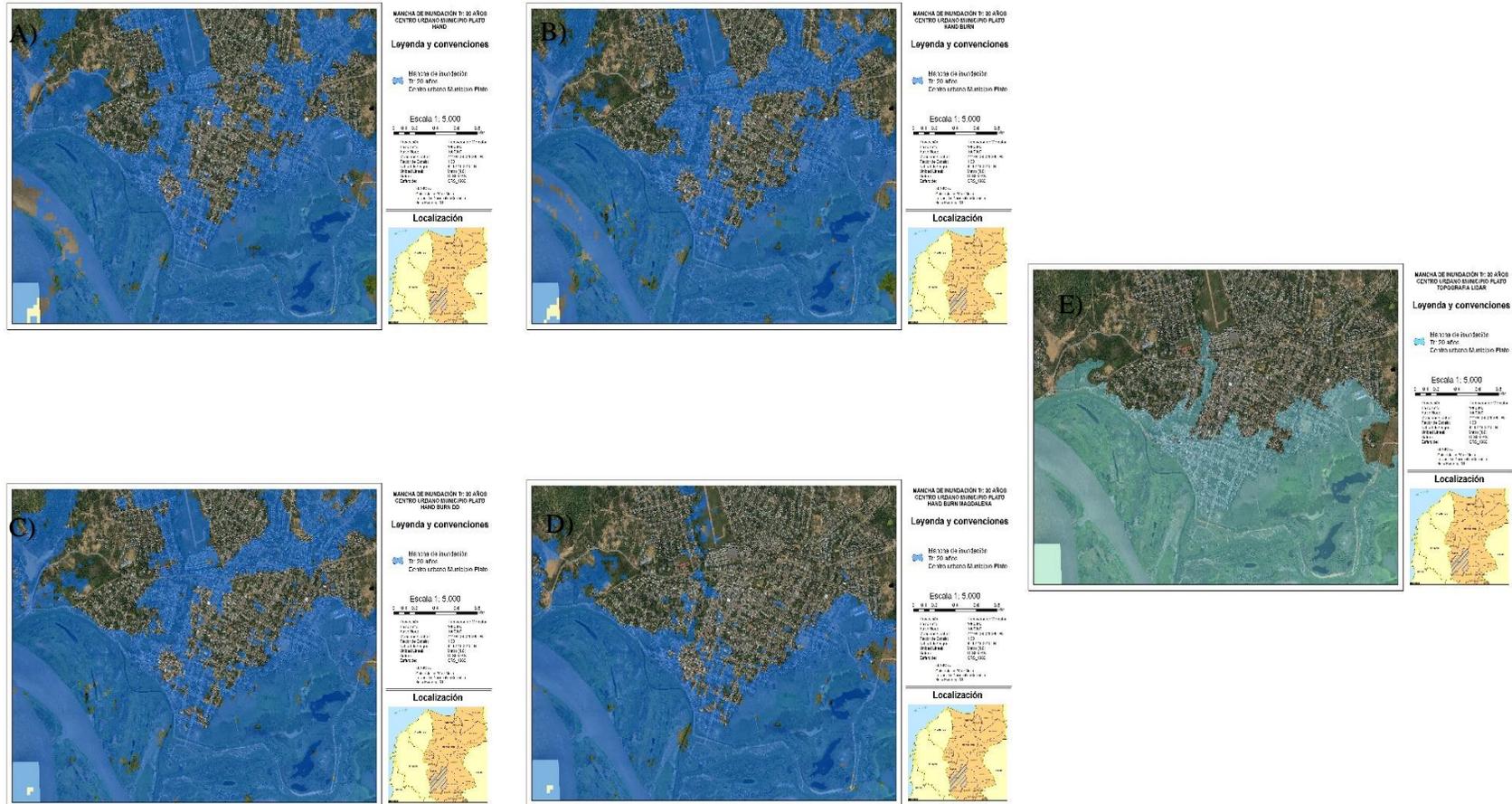
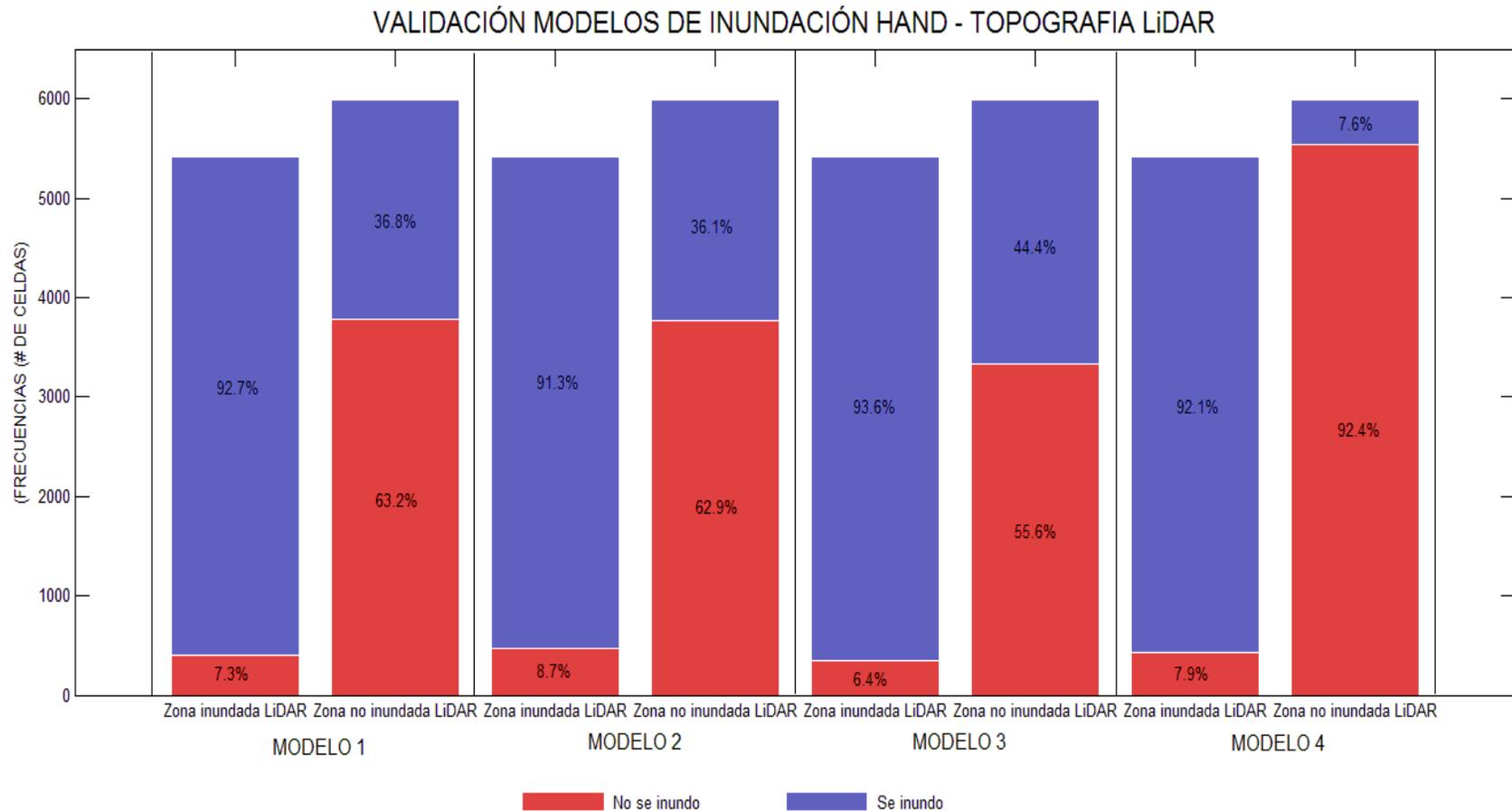


Figura 61. Mapa de inundación para un Tr: 20 años, generado con las alternativas de HAND A) Modelo 1, B) Modelo 2, C) Modelo 3, D) Modelo 4, comparados con E) Inundación Topografía LiDAR.



**Figura 62. Coincidencias de zonas inundadas y no inundadas de los 4 modelos del HAND y las zonas inundadas definidas con el modelo HAND con topografía LiDAR. (Modelo 1: HAND con Direcciones del MDE original y Red del MDE original, Modelo 2: HAND con Direcciones del MDE incisado o ‘Burn’ y Red del MDE incisado o ‘Burn’, Modelo 3: HAND con Direcciones del MDE incisado o ‘Burn’ y Red de la cartografía y Modelo 4: HAND con Direcciones del MDE incisado o ‘Burn’ y Red solamente del drenaje principal (Río Magdalena))**

Observando los resultados en la Figura 59 de la Validación de las zonas de inundación definidas por los 4 modelos HAND con respecto a los resultados de la zona de inundación definida por el ICDE, se aprecia que los mejores resultados se logran con el Modelo 4. Es claro que es muy importante validar el modelo tanto para la zona que se inundó como para la que no se inundó, en los primeros tres modelos se estaba obteniendo gran cantidad de zonas inundadas, donde realmente no se inundaba en la inundación registrada por el ICDE, esto debido a que la inundación registrada por ICDE corresponde al desbordamiento del Magdalena y no de sus afluentes. Es por ello que los mejores resultados de validación se obtuvieron en el modelo HAND donde solamente se estipuló como red de drenaje el Río Magdalena para poder detectar solamente la inundación producto de este río.

Los resultados obtenidos en la validación de la zona de inundación definida con Topografía LiDAR (ver Figura 60), son realmente satisfactorios, ya que se detectó con gran precisión la zona de inundación, lo cual comprueba el gran desempeño del modelo en la estimación de inundaciones con información de alta precisión.

Por otro lado los resultados de la validación tomando como referencia el centro urbano del Municipio de Plato observado en la Figura 62, arrojan también resultados satisfactorios si pensamos que estamos trabajando con un MDE ASTER de resolución de 30 metros de celda, logrando nuevamente los mejores resultados en el Modelo 4, donde solamente se consideró el río Magdalena en el modelo HAND

## Capítulo 6

### Desarrollo interfaz gráfica - Floodem.

Para la aplicación de la metodología anteriormente planteada y para realizar el análisis y la obtención de los mapas de inundación, se realiza la programación de una Interfaz Gráfica de Usuario.

Esta interfaz se realizó empleando el software MATLAB versión 2012, por medio de la programación de diversos algoritmos para la ejecución de la metodología. Para lograr esto se apoyó de las distintas librerías predeterminadas que posee MATLAB y también se apoyó de algunos algoritmos planteados en el software Topotoolbox creado por (Schwanghart & Kuhn, 2010).

La Interfaz Gráfica de Usuario creada en el actual trabajo, se le denominó con el nombre Floodem correspondiente a la versión 1.0. Floodem Se centra en 3 módulos de procesamiento:

- Procesamiento de redes de drenaje
- Análisis Geomorfológico DEM
- Estimación de inundaciones

El esquema general de Floodem se observa en la Figura 63. Se centra en un menú principal donde se puede direccionar posteriormente a cualquiera de los 3 módulos de procesamiento planteados. A continuación se explicarán las funcionalidades y aspectos generales de cada módulo de procesamiento.

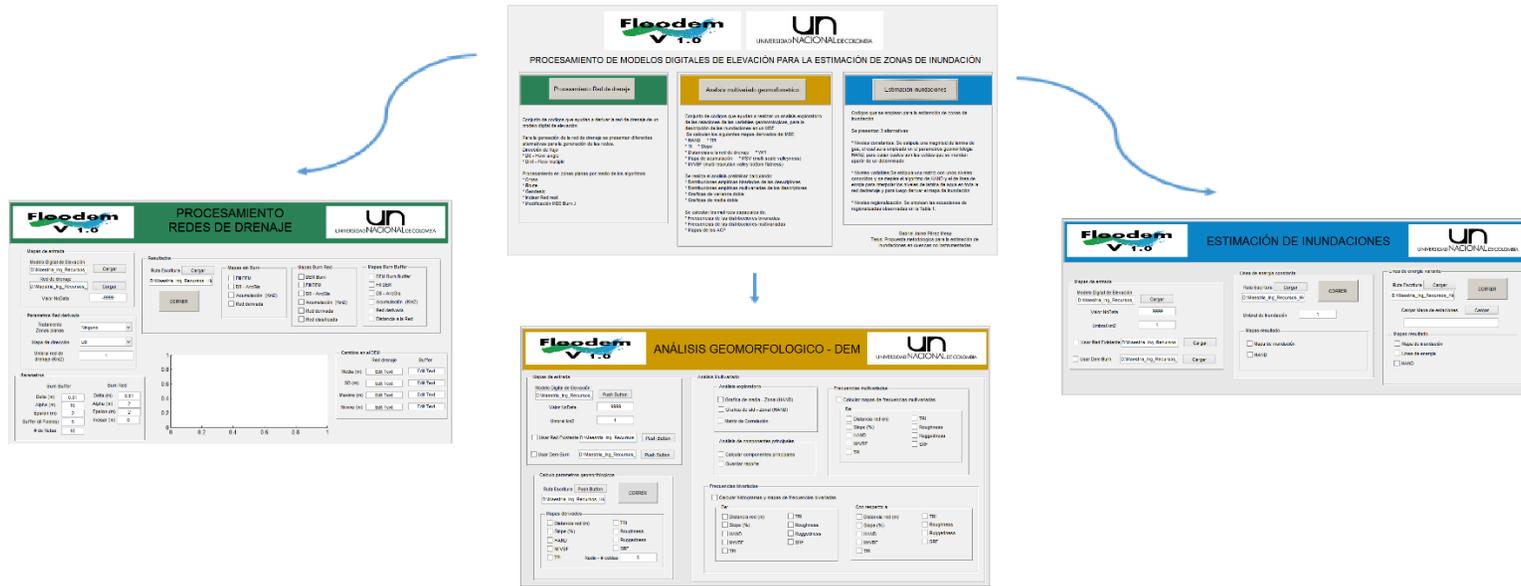
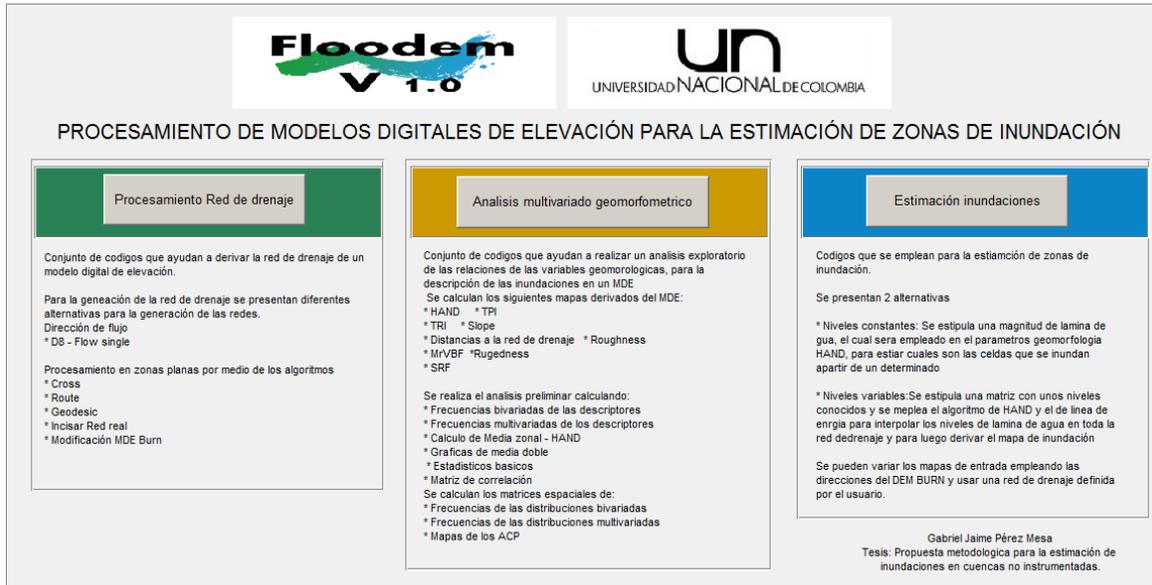


Figura 63. Interfaz general y de los 3 módulos del FLOODDEM

Interfaz inicial

En la Figura 64 se observa la interfaz inicial de Floodem, en esta el usuario puede seleccionar cuál de los 3 módulos de procesamiento desea ejecutar, además cuenta con una pequeña descripción de cada uno de los módulos de procesamiento



**Figura 64. de interfaz inicial de FLOODDEM**

Modulo procesamiento redes de drenaje

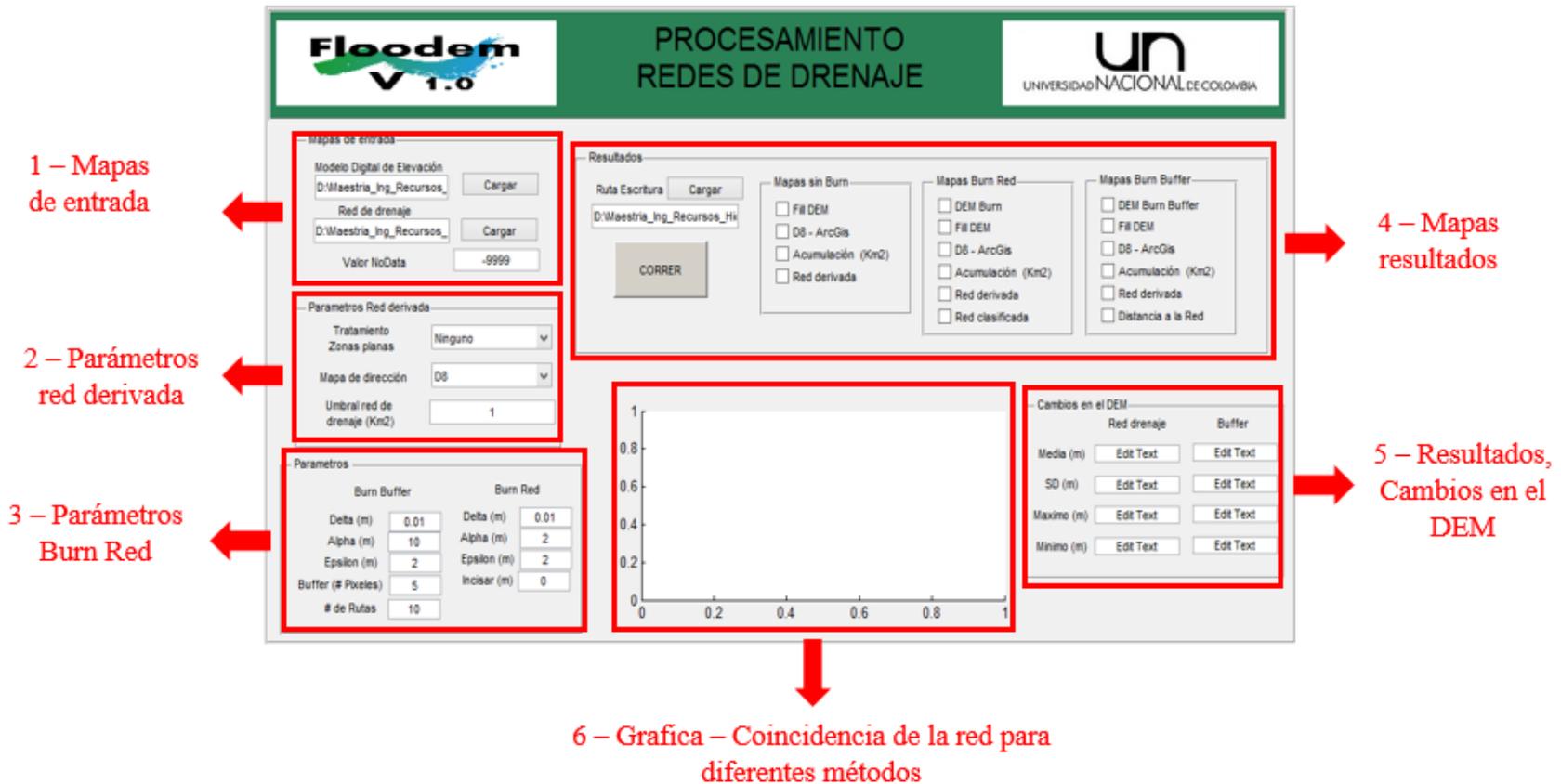


Figura 65. Modelo del FLOODDEM para el procesamiento de redes de drenaje

Las características, parámetros, mapas de entrada y resultados del módulo de procesamiento de redes de drenaje observado en la Figura 65, se explican a continuación

1. **Mapas de entrada:** En este apartado se carga el MDE y la Red de drenaje, los dos archivos deben estar en formato .ascii, se debe asegurar que los dos mapas tengan el mismo sistema de referencia y el mismo número de filas y columnas.
2. **Parámetros red derivada:** Se estipulan los parámetros de la red derivada sin emplear ningún incisado o 'Burn', definiendo el tipo de tratamiento de zonas planas (Extraído de TopoToolbox), el mapa de direcciones y el Umbral de área para la generación de la red de drenaje
3. **Parámetros Burn Red:** En este apartado se definen los parámetros del 'Burn', se definen dos tipos de 'Burn'
  - a. **'Burn Red':** Este modifica el MDE solo en pixeles de la red, asegurando la correcta dirección de flujo solo en los pixeles de la red de drenaje, este Burn es controlado por 4 parámetros
    - i. **Delta:** Es el paso de magnitud con la que se va definir los nuevos valores del MDE en la red de drenaje donde se tenga que corregir el MDE para garantizar las direcciones en el sentido de la red.
    - ii. **Alpha:** Es un umbral para realizar la corrección, cuando la diferencia con el pixel de aguas arriba es mayor que Alpha se hace la corrección, si es menor no se realiza.
    - iii. **Epsilon:** Es un umbral para realizar la corrección, cuando la diferencia con el pixel de aguas arriba es menor que épsilon se hace la corrección si es mayor no se realiza.
    - iv. **Incisar:** Es la magnitud inicial con la que se desea incisar el MDE en las celdas que son red de drenaje.
  - b. **'Burn Buffer':** Este realiza el Burn en un corredor aferente a la red de drenaje, empleando el método propuesto en el Capítulo 3.2 de un Burn controlado, este Burn es controlado por 5 parámetros
    - i. **Delta** Es el paso de magnitud con la que se va definir los nuevos valores del MDE en la zona del Burn donde se tenga que corregir el MDE para garantizar las direcciones en el sentido hacia la red.
    - ii. **Alpha:** Es un umbral para realizar la corrección, cuando la diferencia con el pixel de aguas arriba es mayor que Alpha se hace la corrección, si es menor no se realiza.
    - iii. **Epsilon:** Es un umbral para realizar la corrección, cuando la diferencia con el pixel de aguas arriba es menor que épsilon se hace la corrección si es mayor no se realiza.
    - iv. **Buffer (# pixeles):** Este parámetro especifica de cuantos pixeles será el corredor para realizar el Burn.
    - v. **Número de rutas:** Se especifica el número de rutas para emplear en las caminatas aleatorias para poder encontrar la ruta más óptima.
4. **Mapas resultados:** Se seleccionan la ruta y los mapas resultados que se desean guardar en formato .ascii, para los diferentes métodos de Burn.

5. **Resultados cambios en el MDE:** Muestra las estadísticas de las diferencias en el MDE original con el MDE incisado con el método ‘Burn Red’ y ‘Burn Buffer’ Este último corresponde al método “Burn controlado”
6. **Gráfico – Coincidencia de la red para diferentes métodos:** Se crea una gráfica donde se observa la coincidencia porcentual de la red de drenaje generada por los 3 métodos (Sin Burn, ‘Burn Red’ y ‘Burn Buffer’), esta es la misma gráfica que se observa en la Figura 10

Modulo Análisis Geomorfológico – DEM

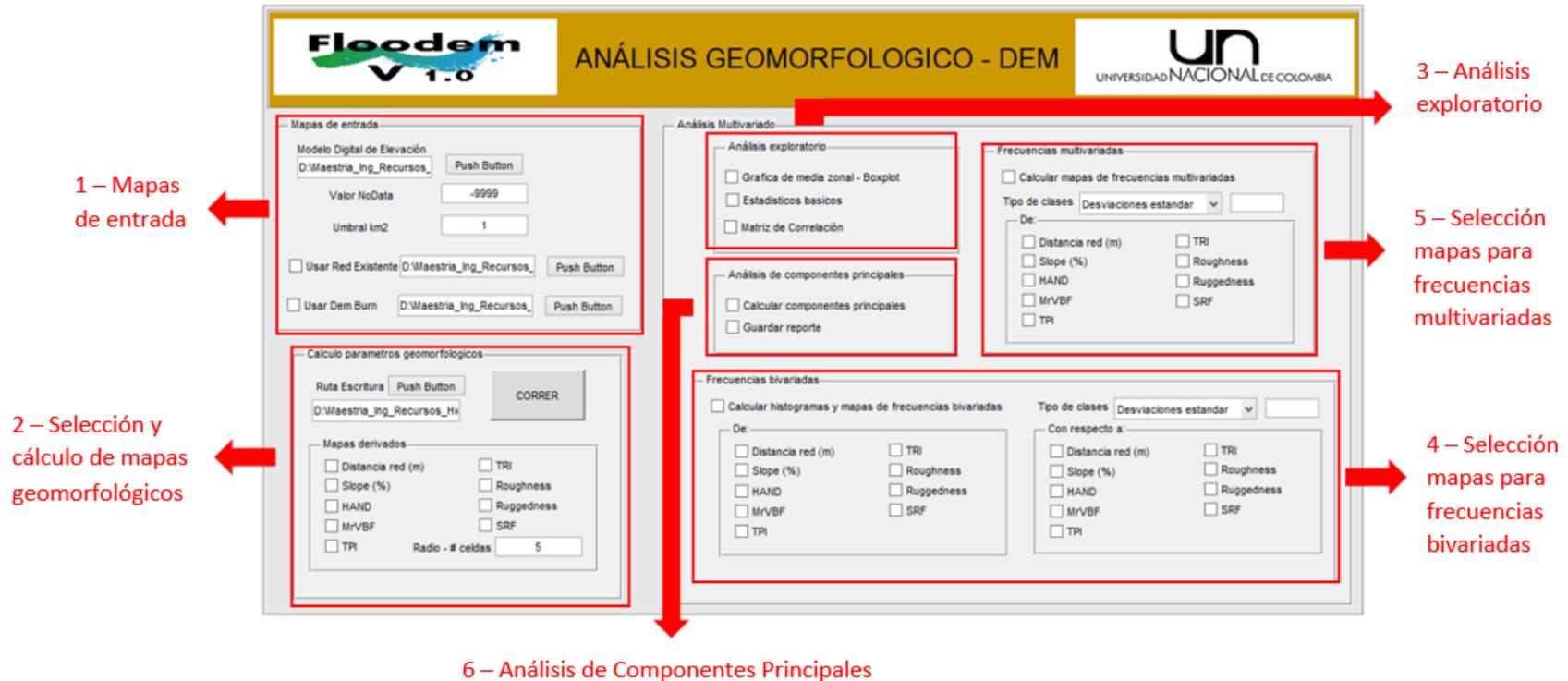


Figura 66. Modelo del FLOODDEM para el Análisis geomorfológico del Modelos Digital de Elevación

Las características, parámetros, mapas de entrada y resultados del módulo de Análisis geomorfológico – DEM observado en la Figura 66, se explican a continuación

1. **Mapas de entrada:** En este apartado se carga el MDE, además está la opción para cargar los mapas de una Red existente y de un MDE Burn, estos dos últimos mapas serán opcionales y solo servirán para el cálculo del mapa de distancias y del descriptor HAND. Los archivos deben estar en formato .ascii, se debe asegurar que todos los mapas tengan el mismo sistema de referencia y el mismo número de filas y columnas
2. **Selección y cálculo de mapas geomorfológicos:** Se seleccionan los mapas que se desean guardar, estos se guardarán en formato .ascii, además se debe definir en esta sección el número del radio (Radio #) de celdas, para el cálculo de vecindad el cual requiere los descriptores como el TPI, TRI, Roughness, Ruggedness y el SRF
3. **Análisis exploratorio:** En este apartado se realiza el análisis exploratorio el cual incluye un cálculo de las estadísticas básicas de cada uno de los descriptores, el cálculo de la matriz de correlación de los descriptores y además se realiza el cálculo de la gráfica de media zonal y un boxplot de cada una de los descriptores con respecto al descriptor del HAND.
4. **Selección mapas para frecuencias bivariadas:** Primero se define el método para la agrupación de clases de cada uno de los mapas geomorfológicos derivados, luego se seleccionan los pares de mapas con los que se desea realizar los mapas de frecuencias bivariadas y el histograma de frecuencias bivariadas. Para la realización de la agrupación de clases se cuenta con tres alternativas
  - a. Desviaciones estándar
  - b. Cuantiles
  - c. Intervalos definidos por el usuario
5. **Selección mapas para frecuencias multivariadas:** Se realiza lo mismo que en el submodulo 4, excepto que aquí se seleccionan los N mapas para realizar el mapa de frecuencias multivariadas.
6. **Análisis de Componentes Principales:** Se realiza el ACP, está la opción para guardar los resultados, los cuales incluye los mapas de las componentes principales del análisis y las tablas de los coeficientes y la varianza acumulada del ACP.

Modulo Estimación de inundaciones

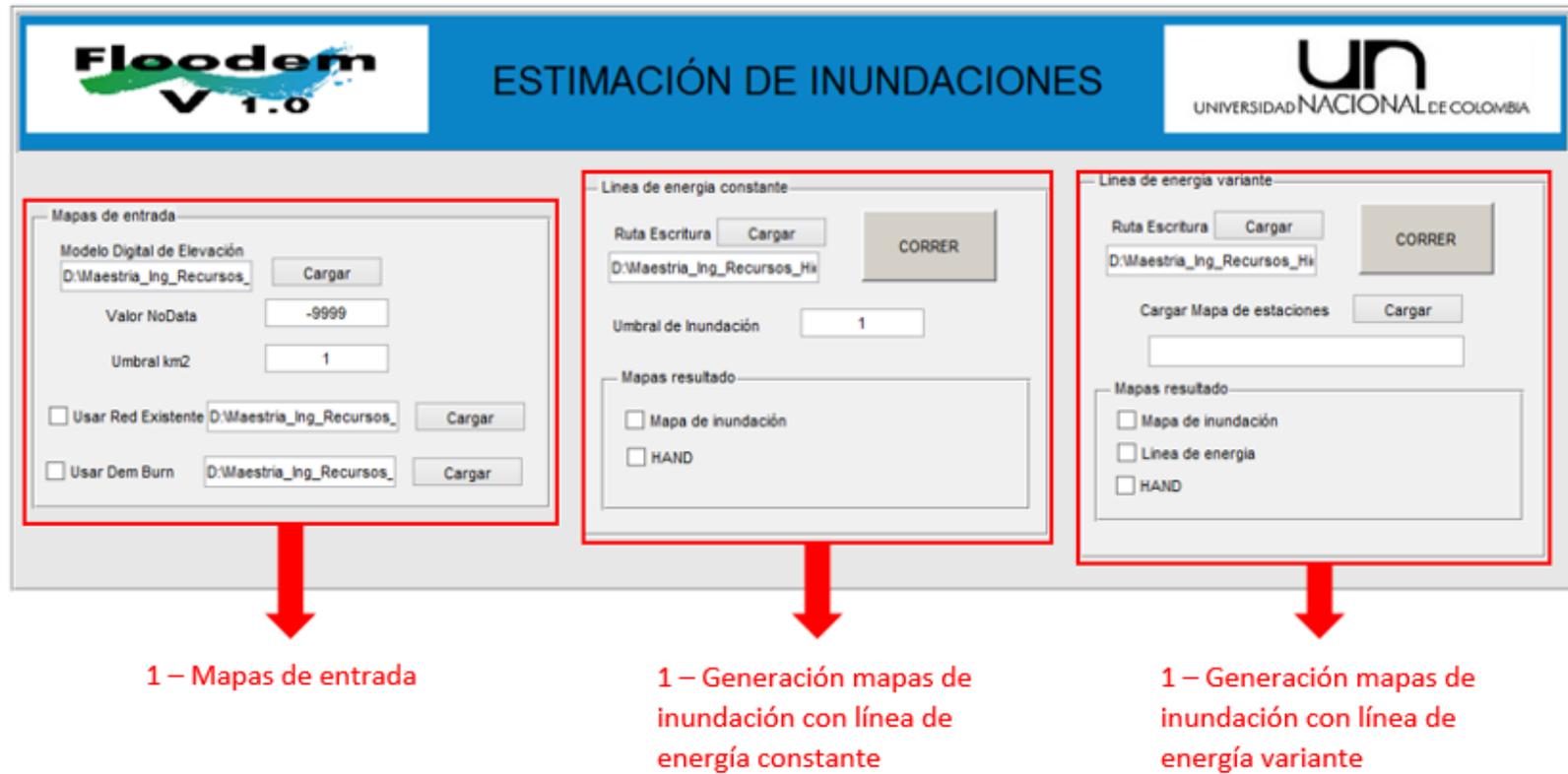


Figura 67. Modelo del FLOODDEM para la estimación de inundaciones

Las características, parámetros, mapas de entrada y resultados del módulo de procesamiento de redes de drenaje observado en la Figura 67, se explican a continuación.

- 1. Mapas de entrada:** En este apartado se carga el MDE, además está la opción para cargar los mapas de una Red existente y de un MDE Burn, estos dos últimos mapas serán opcionales y serán para realizar las variaciones en el HAND propuestas en la presente trabajo de investigación. Los archivos deben estar en formato .ascii, se debe asegurar que todos los mapas tengan el mismo sistema de referencia y el mismo número de filas y columnas
- 2. Generación mapas de inundación con línea de energía constante:** Se define el Umbral para definir el mapa de inundación, además se seleccionan si se desea guardar en formato ascii, los mapas de inundación y del HAND.
- 3. Generación mapas de inundación con línea de energía variante:** Se define el mapa de inundación empleando un mapa de estaciones el cual define los niveles de lámina de agua en diferentes puntos de la red, esta es la alternativa que se posee para modelar variaciones en el nivel de lámina de agua empleando el modelo HAND. además se seleccionan si se desea guardar en formato ascii, los mapas de inundación, línea de energía y del HAND.

# Capítulo 7

## Conclusiones

Se obtienen resultados satisfactorios en la estimación de zonas de inundación, por lo que se es viable el usar la metodología propuesta en cualquier localidad, si se cuenta con niveles de lámina de agua y sus respectivos amarres y el MDE de la zona. Además contando con la aplicación programa FLOODDEM V1.0, se puede proceder a ejecutar gran parte de la metodología para el análisis y estimación de zonas de inundación.

El descriptor HAND y el concepto de línea de energía, muestra gran potencialidad para la estimación de zonas de inundación, debido a su sentido físico de simplemente realizar una diferencia de niveles relativos con respecto a los niveles de lámina de agua en la red de drenaje, estimando así las zonas inundadas.

Es importante tener bien definidos los parámetros generadores del HAND como son las direcciones de flujo y la red de drenaje, ya que como la red es el eje central de la inundación, es primordial garantizar la buena definición de esta para la generación idónea de la mancha de inundación. Además es importante hacer uso de los diversos métodos para la generación de direcciones de flujo, y de información complementaria de cartografía para poder definir con certeza estos parámetros y poder generar así un buen mapa de inundación.

Se destaca una de las grandes ventajas del uso del modelo HAND, al no necesitar calibración, debido a la sencilla representación de una condición física real, convirtiéndolo en un modelo práctico para usarlo en estimación de inundaciones, resultados reflejados en el uso del MDE ASTER y Topografía LiDAR.

Aunque el HAND es una herramienta muy práctica para la zonificación de inundaciones, se debe tener sumo cuidado con la selección de los niveles de inundación de diferentes períodos de retorno, ya que como se describió los niveles poseen varios aspectos para su selección, desde su estimación por registros como su amarre al MDE, por lo que los resultados de las zonas de inundación estarán ligados totalmente a una buena selección de delta de niveles de inundación.

El uso del modelo HAND empleando topografía de alta resolución ha demostrado resultados excelentes donde se logran estimaciones de inundación a escala 1:1000, esto gracias al sentido físico del HAND y el registro de los niveles de lámina de agua.

No es necesario definir todas las redes de drenaje para la delimitación de inundaciones en el modelo HAND, basta con definir la Red principal generadora de inundación, aun así es indispensable el usar un mapa de direcciones de flujo coherentes a toda la red de drenaje de la zona de estudio (Resultados Modelo 4)

Los resultados obtenidos en el método propuesto para la generación de red de drenaje modificando lo menos posible el MDE empleando un incisado o un “Burn controlado”, no mostró muchas diferencias con los obtenidos con el método de solo realizar un incisado o un “Burn” en la red, esto puede ser debido a la búsqueda de la calibración de los parámetros del modelo, lo cual esta como trabajo futuro derivado del presente trabajo de investigación.

Se ha observado que el comportamiento de los niveles de lámina de agua con relación al área es errático, por lo que se presume que obedece a otras variables físicas, tales como la pendiente de la cuenca, la geomorfología y la geología de la zona.

En el análisis multivariado se identificó la gran relación que poseen los descriptores geomorfológicos. Por lo que permite inferir y comprender las características geomorfológicas de las zonas de inundación, que parten desde la cercanía a la red de drenaje, y también aspectos de rugosidad y de pendiente y de su localización con respecto a sus vecinos para la clasificación como valle, permitiendo entender que la dinámica de las zonas de inundación es bastante compleja, pero se puede entender gran parte de esta dinámica partiendo solamente del MDE.

La aplicación del modelo HAND en el presente trabajo siempre se aplico en una zona con predominación de inundaciones lentas, por lo que se manejó un nivel de línea de energía constante, si se estuviera trabajando en zonas con alta pendiente e inundaciones de carácter súbito, se debe tener en consideración el cambio en la línea de energía y variarla a lo largo de la red de drenaje, para este escenario se dispuso de la herramienta de “Línea de energía Variante” en el módulo de Estimación de Inundaciones en Floodem V1.0.

## Trabajo futuro

Partiendo del anterior trabajo de investigación, se plantea y se deja como trabajo futuro los siguientes aspectos:

Realizar un ajuste de los niveles de lámina de agua para distintos períodos de retorno, en función de parámetros o descriptores derivados del MDE, para poder acoplar un método regionalizado, y estimar los distintos niveles en todo el trayecto de la red de drenaje, logrando aplicar un HAND con línea de energía variante, logrando una mejor interpretación en zonas con altas pendientes e inundaciones súbitas.

Poder definir un método para la definición de las cabeceras de las redes de drenaje, la correcta selección del umbral, estará sujeta a la magnitud de zonas de inundación generadas a partir del modelo HAND.

El poder buscar un método eficaz de calibración donde se encuentre los mejores parámetros para el “Burn controlado” en el presente trabajo, esto es necesario debido, a que seguramente estos parámetros cambiarán para diferentes cuencas y zonas de estudio.

El poder estimar las zonas de inundación a partir de niveles proyectados en el MDE por medio del HAND, abre la posibilidad en poder acoplar este modelo, a un modelo hidrológico estimando diferentes niveles de lámina de agua en toda la red de drenaje para cualquier evento de lluvia, logrando definir la zona de inundación no solo espacial si no también temporal.

# Bibliografía

- Alghamand, S. (2009). RIVER MODELLING FOR FLOOD RISK MAP PREDICTION : CASE STUDY OF SUNGAI KAYU ARA. *Integration The Vlsi Journal*, (July).
- Bartholmes, J., & Todini, E. (2005). Coupling meteorological and hydrological models for flood forecasting. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9(4), 333–346. doi:10.5194/hess-9-333-2005
- Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (1998). *Principles of Geographical Information Systems*. (R. A. De By, Ed.) *Economic Geography* (Vol. 75, p. 422). Oxford University Press. doi:10.2307/144481
- Castro, J. C. (2009). *METODOLOGIA PARA LA OBTENCION DE MODELOS DIGITALES DE TERRENO HIDROLOGICAMENTE Y GEOMORFOLOGICAMENTE COHERENTES*.
- Cayley, A. (1859). A sixth memoir upon quantics. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 149(1), 61–90.
- Chang, C.-I. (2003). *Hyperspectral Imaging: Techniques for Spectral Detection and Classification*.
- Chorlev, R., J., Malm, D, ... A. (1957). A new standar estimating bas n shape. *Sci*, 255(1), 138–141.
- Colombia., U. N. de, & IDEAM. (2011). *Implementación de la metodología de zonificación de amenazas por inundaciones para 3 grandes cuencas del país (Bajo Magdalena/Cauca/San Jorge, Sinú y Atrato). Fase II*.
- Dey, C., Jia, X., & Fraser, D. (2008). Decision Fusion for Reliable Flood Mapping Using Remote Sensing Images. *2008 Digital Image Computing: Techniques and Applications*, 184–190. doi:10.1109/DICTA.2008.65
- Dey, C., Jia, X., Fraser, D., & Wang, L. (2009). Mixed Pixel Analysis for Flood Mapping Using Extended Support Vector Machine. *2009 Digital Image Computing: Techniques and Applications*, 291–295. doi:10.1109/DICTA.2009.55
- DUQUE, O. (2008). *SIMULACIÓN HIDRÁULICA DE CONFLUENCIAS Y DIFLUENCIAS, APLICACIÓN AL RIO LEÓN EN EL URABÁ ANTIOQUEÑO*.
- Evans. (1972). General geomorphology, derivatives of altitude and descriptive statistics. *Spatial Analysis in Geomorphology*, 17–90.

- Fang, C., Guo, S., Duan, Y., & Duong, D. (2010). Two new approaches to dividing flood sub-seasons in flood season using the fractal theory. *Chinese Science Bulletin*, 55(1), 105–110. doi:10.1007/s11434-009-0315-z
- Flankilin. Peddle. (1991). Image Textureprocessing and data integration for surface pattern discrimination, 57, 413–420.
- Forkuo, E. K. (2011). Flood Hazard Mapping using Aster Image data with GIS, 1(4), 932–951.
- Gallant, J. C., & Dowling, T. I. (2003). A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas. *Water Resources Research*, 39(12), n/a–n/a. doi:10.1029/2002WR001426
- Hadjimitsis, D. G., & Clayton, C. R. I. (2008). The use of an improved atmospheric correction algorithm for removing atmospheric effects from remotely sensed images using an atmosphere – surface simulation and, 387(June), 381–387. doi:10.1002/met
- Hellweger, Ferdi, and D. M. (1997). AGREE-DEM surface reconditioning system. *Online at Http://www. Ce. Utxas. Edu/prof/maidment/gishydro/ferdi/research/agree/agree. Html.*
- Hobson, R. (1972). Surface roughness in topography: quantitative approach. *Spatial Analysis in Geomorphology*, 225–245.
- Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. a., Mattar, C., & Franch, B. (2010). Atmospheric correction of optical imagery from MODIS and Reanalysis atmospheric products. *Remote Sensing of Environment*, 114(10), 2195–2210. doi:10.1016/j.rse.2010.04.022
- Lin, B., Wicks, J. M., Falconer, R. A., & Adams, K. (2006). Integrating 1D and 2D hydrodynamic models for flood simulation. *Proceedings of the ICE Water Management*, 159(1), 19–25. Retrieved from <http://www.atypon-link.com/TELF/doi/pdf/10.1680/wama.2006.159.1.19>
- Mao, Z., Chen, J., Hao, Z., Pan, D., Tao, B., & Zhu, Q. (2013). A new approach to estimate the aerosol scattering ratios for the atmospheric correction of satellite remote sensing data in coastal regions. *Remote Sensing of Environment*, 132, 186–194. doi:10.1016/j.rse.2013.01.015
- Mark, D. M. (1975). Geomorphometric parameters: a review and evaluation. *Geogr. Ann*, 57A, 165–177.
- Moran, M. S., Jackson, R. D., Slater, P. N., & Teiuet, P. M. (1992). Evaluation of Simplified Procedures for Retrieval of Land Surface Reflectance Factors from Satellite Sensor Output, 184, 169–184.

- Navia, J. A., Baquero, O. L., De, E., Ingeniería, F. De, Valle, U., & Cinara, I. (2003). Diseño e implementación de una metodología para el monitoreo de los cuerpos de agua en la región de la Mojana , utilizando productos MODIS y software libre.
- Nobre, a. D., Cuartas, L. a., Hodnett, M., Rennó, C. D., Rodrigues, G., Silveira, a., ... Saleska, S. (2011). Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology*, 404(1-2), 13–29.  
doi:10.1016/j.jhydrol.2011.03.051
- O'Callaghan, J. F., & Mark, D. M. (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 28(3), 323–344.  
doi:10.1016/S0734-189X(84)80011-0
- Olaya, V. (2009). Basic land-surface parameters. In *In: Geomorphometry. Concepts, Software, Applications* (pp. 141–169).
- Patiño, D. (2012). *Diseño de una Metodología de Clasificación Automática de Unidades Geomorfológicas en la Geografía Colombiana Utilizando Técnicas de Reconocimiento de Patrones*.
- Poveda, G., Ignacio, J., Upegui, V., José, O., Sánchez, M., Isabel, L., ... Ortiz, H. (2002). REGIONALIZACIÓN Y APLICACIÓN DE LA CURVA DE RECESIÓN DE CAUDALES  $Q_{med} = (P - E) A$ , 73–80.
- Ramirez, M. (2002). EXTRACCION AUTOMATICA DE REDES DE DRENAJE A PARTIR DE MODELOS DIGIT ALES DE TERRENO.
- Rennó, C. D., Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Soares, J. V., Hodnett, M. G., Tomasella, J., & Waterloo, M. J. (2008). HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. *Remote Sensing of Environment*, 112(9), 3469–3481. doi:10.1016/j.rse.2008.03.018
- Riley, S. J., DeGloria, S. D., & Elliot, R. (1999). A Terrain Ruggedness Index that Quantifies Topographic Heterogeneity. *International Journal of Sciences*, 5, 23–27.  
doiciteulike-article-id:8858430
- Schumann, A. H., & Nijssen, D. (2011). Flood Risk Assessment and Management, 249–275. doi:10.1007/978-90-481-9917-4
- Schwanghart, W., & Kuhn, N. J. (2010). TopoToolbox: A set of Matlab functions for topographic analysis. *Environmental Modelling and Software*, 25(6), 770–781.
- Tarboton, D. G. (1997). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33(2), 309–319.  
doi:10.1029/96WR03137

- Weibel, R. & Heller, M. (1991). Digital Terrain Modeling. In: Maguire. *Geographical Information Systems: Principles and Applications*, 269–297.
- Weiss, A. D., & Conservancy, T. N. (2000). Topographic Position and Landforms Analysis, 200.
- Zwenzner, H., & Voigt, S. (2009). Improved estimation of flood parameters by combining space based SAR data with very high resolution digital elevation data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(5), 567–576. doi:10.5194/hess-13-567-2009