

**EVALUACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA DE LA QUEBRADA LA MUCUY,  
MUNICIPIO SANTOS MARQUINA ESTADO MÉRIDA, MEDIANTE EL USO DE  
PROGRAMAS DE SIMULACIÓN QUE PERMITAN EL DISEÑO DE SOLUCIONES  
ESTRUCTURALES A LAS CRECIDAS DE LA CUENCA EN ESTUDIO.**

*Por: Ing. María Andreina Arias Albornoz*

**Trabajo de Grado para optar al título de Magister Scientiae en Desarrollo de los  
Recursos de Aguas y Tierras, mención: Obras Hidráulicas.**

**Centro Interamericano de Desarrollo e  
Investigación Ambiental y Territorial.  
Universidad de los Andes  
Mérida-Venezuela  
Octubre 2018**

**EVALUACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA DE LA QUEBRADA LA MUCUY,  
MUNICIPIO SANTOS MARQUINA ESTADO MÉRIDA, MEDIANTE EL USO DE  
PROGRAMAS DE SIMULACIÓN QUE PERMITAN EL DISEÑO DE SOLUCIONES  
ESTRUCTURALES A LAS CRECIDAS DE LA CUENCA EN ESTUDIO.**

**Trabajo de Grado para optar al título de Magister Scientiae en Desarrollo de los  
Recursos de Aguas y Tierras, mención: Obras Hidráulicas.**

Prof. Ada Moreno  
Tutora

Prof. María Alejandra Pérez  
Cotutora

Prof. Miguel Medina  
Asesor

**Centro Interamericano de Desarrollo e  
Investigación Ambiental y Territorial.  
Universidad de los Andes  
Mérida-Venezuela  
Octubre 2018**

## **DEDICATORIA**

Un largo recorrido, dedicado a mis padres Elizabeth y Duilio, pilares fundamentales dentro de este trabajo. A mis hermanos Saira, Ruth y Manuel, quienes siempre han estado presentes a pesar de las adversidades. A mi compañero Sergio Velasco, quien ha hecho más agradable y llevadero este camino. Este logro lo dedico a todos ustedes.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la profesora Ada Moreno, por su acompañamiento durante todo el trabajo, gracias por aportar su conocimiento y experiencia a lo largo de la investigación, haciéndola más grata y entendible.

A los profesores María Alejandra Pérez y Miguel Medina, agradecida por su paciencia en todo momento. Fueron parte fundamental del trabajo, siempre brindaron contribuciones significativas en el área de estudio.

A mi compañero, el Ing. Sergio Velasco, quien me enseñó y aportó al trabajo sus conocimientos en el área de geomática y muchas cosas adicionales, gracias por tu paciencia y comprensión en todo momento.

Al profesor Jorge Carrero, quien en su vasta experiencia como geomorfólogo fue parte importante dentro del desarrollo del trabajo, especialmente por sus aportes en el área geológica dentro de la zona.

A los profesores Luis Mora y Hervé Jegat, quienes de manera desinteresada realizaron aportes significativos al presente trabajo, contribuyendo a un mayor alcance del mismo.

A todas las personas que hicieron parte de este trabajo, siempre estarán en mi memoria, con detalles, aportes y experiencias, siempre agradecida con todos.

## ÍNDICE

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
Lista de Figuras.....	vii
Lista de Tablas.....	ix
Lista de Símbolos.....	x
RESÚMEN.....	xii
INTRODUCCIÓN.....	13
CAPÍTULO 1.....	15
1.1 Planteamiento del problema y justificación.....	15
1.2 Objetivos.....	18
1.2.1 Objetivo General.....	18
1.2.2 Objetivos específicos.....	18
1.3 Alcances y Limitaciones.....	18
CAPÍTULO 2.....	21
2.1 Antecedentes generales sobre el tema de investigación.....	21
2.2 Antecedentes relacionados con los modelos a emplear.....	24
2.3 Antecedentes del área en estudio.....	31
2.4 Bases teóricas y definición de términos básicos.....	35
2.4.1 Evaluación hidrológica.....	35
2.4.2 Evaluación hidráulica.....	36
2.4.3 Eventos normales y extremos (Extreme and normal events).....	36
2.4.4 Crecidas o avenidas.....	37
2.4.5 Inundación.....	39
2.4.6 Usos de la tierra y cobertura vegetal.....	40
2.4.7 Abanicos aluviales (aluvial fans).....	40
2.4.8 Flujo de detritos (debris flow).....	41

2.4.9 Modelo HEC-HMS.....	42
2.4.10 Modelo HEC-RAS y su extensión HEC-GeoRAS.....	45
2.4.11 Modelo FLO-2D.....	46
2.4.12 Consideraciones de los SIG.....	47
2.4.13 Transformación lluvia-escorrentía.....	48
2.4.14 Modelos de depósitos, modelo de onda cinemática.....	49
2.4.15 Consideraciones básicas sobre medidas estructurales.....	50
CAPÍTULO 3.....	51
3.1 Recopilación de material e información bibliográfica, cartográfica y etnográfica.....	54
3.2 Procesamiento digital mediante el ArcGis v10.2.2.....	55
3.3 Selección de estaciones pluviográficas y sus características.....	55
3.4 Usos de la tierra y clasificación textural de los suelos.....	56
3.5 Obtención de las curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia).....	58
3.6 Estimación de hietogramas de diseño, método de los bloques alternos.....	58
3.7 Transposición de la tormenta del río Chama del 28 de abril de 1972 en la cuenca La Mucuy.....	59
3.8 Etapas del análisis hidrológico y determinación de los parámetros a emplear.....	60
3.8.1 Coeficiente de rugosidad de Manning.....	60
3.8.2 Número de curva (CN).....	60
3.9 Obtención de los hidrogramas de crecida mediante el modelo hidrológico HEC-HMS v4.1.....	61
3.9.1 Estimación de la lluvia efectiva.....	61
3.9.2 Descripción del método de onda cinemática.....	62
3.10 Evaluación hidráulica de crecidas en el tramo de estudio de la Quebrada La Mucuy ..	63
3.10.1 Evaluación con modelo unidimensional.....	64
3.10.2 Evaluación con modelo bidimensional.....	65
3.11 Pre-diseño de medidas estructurales en el tramo de estudio.....	66
CAPÍTULO 4.....	69

4.1 Localización y extensión .....	69
4.2 Geología .....	70
4.3 Geomorfología .....	70
4.4 Suelos .....	71
4.5 Hidrografía .....	72
4.6 Amenazas y riesgos .....	73
4.7 Morfometría de la Cuenca La Mucuy .....	74
4.8 Propiedades del relieve.....	74
4.9 Propiedades lineales de la red fluvial .....	75
4.10 Climatología .....	77
4.11 Uso de la tierra .....	77
4.12 Uso urbano-residencial.....	78
4.13 Uso minero .....	79
4.14 Precipitación.....	79
4.15 Temperatura .....	80
CAPÍTULO 5.....	81
5.1 Procesamiento de la información recopilada .....	81
5.2 Eventos de Crecida: registros históricos en el sector La Mucuy.....	84
5.3 Estaciones pluviográficas de la zona y polígonos de Thiessen .....	86
5.4 Usos de la tierra y cobertura vegetal .....	87
5.4.1 Clasificación textural de los suelos en la cuenca La Mucuy.....	91
5.5 Curvas IDF de la cuenca, generación de hietogramas de precipitación máxima .....	94
5.6 Transposición de la tormenta del río Chama del 28 de abril de 1972 en la cuenca La Mucuy.....	97
5.7 Estimación de parámetros hidrológicos de la cuenca.....	97
5.8 Conceptualización hidrológica de la Cuenca La Mucuy.....	98
5.9 Evaluación hidrológica de la cuenca mediante HEC-HMS v4.1 .....	102
5.10 Evaluación hidráulica de la quebrada La Mucuy .....	104

5.10.1 Resultados obtenidos con el modelo unidimensional HEC-RAS v5.0.....	105
5.10.2 Resultados obtenidos con el modelo bidimensional FLO-2D Basic. ....	111
5.11 Análisis de zonas de desborde estimadas a partir de la mancha de crecida .....	115
5.12 Comparación entre los resultados obtenidos con el modelo unidimensional HEC-RAS y el modelo bidimensional FLO-2D Basic .....	118
5.13 Análisis de sensibilidad para el parámetro de rugosidad, dentro del modelo HEC-RAS .....	120
5.14 Pre-diseño de medidas estructurales.....	123
5.14.1 Características topográficas y escala de trabajo .....	125
5.14.2 Características de las partículas del cauce. ....	125
5.14.3 Características hidráulicas. ....	128
5.14.4 Pendiente de compensación.....	129
5.14.5 Determinación del eje longitudinal de regularización. ....	131
5.14.6 Altura efectiva del dique.....	133
5.14.7 Separación entre diques.....	133
5.14.8 Elección del tipo de dique. ....	133
5.14.9 Pre-diseño de los diques. ....	134
CAPÍTULO 6 .....	140
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	140
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	145
ANEXOS.....	152

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2.2.1 Fases del programa HEC – HMS. Modificado de Delgadillo (2014).....	44
Figura 3.1 Esquema metodológico. Fuente: elaboración propia. ....	53
Figura 3.2 Clasificación de los suelos de acuerdo a grupos. Adaptado de Pimstein (2014). ....	57
Figura 3.3 Etapas generales del proceso en el modelo bidimensional FLO-2D.....	65

Figura 3.4 Procedimientos generales para el pre-diseño de medidas estructurales. Elaboración propia.....	68
Figura 4.1 Situación relativa de la zona en estudio. Cuenca La Mucuy. ....	69
Figura 5.1 Mapa base de la cuenca La Mucuy. Elaboración propia. ....	82
Figura 5.2 Representación de la topografía y subcuencas delimitadas. Elaboración propia. ...	83
Figura 5.3 Áreas de influencia según los polígonos de Thiessen. Elaboración propia. ....	86
Figura 5.4 Mapa geomorfológico de la quebrada Ño León y adyacencias a Tabay. ....	90
Figura 5.5 Clasificación textural de los suelos de la cuenca. Elaboración propia. ....	93
Figura 5.6 Curvas de intensidad-duración-frecuencia para la estación Tabay (3038). Elaboración propia.....	95
Figura 5.7 Hietogramas para los períodos de retorno señalados. Método de los bloques alternos. Elaboración propia. ....	96
Figura 5.8 Conceptualización hidrológica de la cuenca La Mucuy, para el modelo HEC-HMS v4.1. Elaboración propia. ....	99
Figura 5.9 Conceptualización hidrológica cuenca La Mucuy. Elaboración propia. ....	100
Figura 5.10 Hidrograma de crecida para el punto “Unión 3”, confluencia entre La Mucuy y Ño León. Elaboración propia. ....	103
Figura 5.11 Localización de los tramos dentro de la quebrada La Mucuy. Elaboración propia. ....	104
Figura 5.12 Mancha de crecida para $Tr= 25$ años. Salida en ArcGis, con uso de HEC-GeoRAS. Elaboración propia. ....	110
Figura 5.13 Mancha de crecida para $Tr= 25$ años. Salida en ArcGis, con uso de FLO-2D. Elaboración propia. ....	114
Figura 5.14 Zonas estimadas por desborde, imágenes actuales del lugar. Elaboración propia. ....	116
Figura 5.15 Comparación entre profundidades de flujo según HEC-RAS y FLO-2D. ....	118
Figura 5.16 Comparación entre velocidades de flujo según HEC-RAS y FLO-2D. ....	118
Figura 5.17 Ubicación de secciones transversales y puntos referenciales. Modificado de HEC-RAS v5.0. ....	121
Figura 5.18 Variación de la velocidad contra la rugosidad de Manning. Elaboración propia.	121

Figura 5.19 Variación de la profundidad contra la rugosidad de Manning. Elaboración propia. ....	122
Figura 5.20 Variación del número de Froude contra la rugosidad de Manning. Elaboración propia. ....	123
Figura 5.21 Características de los granos del cauce, ubicación aguas arriba del puente Mesa Los Leones. Cota aproximada 1950 msnm. ....	126
Figura 5.22 Características de los granos del cauce, ubicación puente “Parque Los Corales”. Cota aproximada 1840 msnm. ....	126
Figura 5.23 Características de los granos del cauce, ubicación aguas abajo del puente Parque Los Corales. Cota aproximada 1830 msnm. ....	127
Figura 5.24 Relación de los tamaños, ubicación aguas abajo del puente Parque Los Corales. Partículas entre 30 y 100 mm aproximadamente. ....	127
Figura 5.25 Características de los granos del cauce, ubicación confluencia entre las quebradas La Mucuy y Ño León. Cota aproximada 1770 msnm. ....	128
Figura 5.26 Eje longitudinal de regularización y ubicación de los diques en el tramo. Elaboración propia. ....	132
Figura 5.27 Vista longitudinal para la pendiente natural y de compensación. ....	135
Figura 5.28 Etapas de azolvamiento en diques para control de torrentes. ....	135
Figura 5.29 Perfil longitudinal de la quebrada La Mucuy, y ubicación de los diques transversales. Elaboración propia. ....	136
Figura 5.30 Vista transversal para el dique 4, junto con la sección transversal tipo. Elaboración propia. ....	137

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Información referente a las estaciones escogidas. ....	56
Tabla 4.1 Factor de forma para cada microcuenca que conforma la cuenca La Mucuy. ....	74
Tabla 4.2 Pendiente media de los cauces principales. ....	74
Tabla 4.3 Clasificación de Cauces para la microcuenca El Oro. ....	75
Tabla 4.4 Clasificación de Cauces para la microcuenca Ño León. ....	75
Tabla 4.5 Clasificación de Cauces para la microcuenca Desbarrancadero. ....	75

Tabla 4.6 Clasificación de Cauces para la microcuenca La Coromoto.....	76
Tabla 4.7 Densidad de drenaje para las microcuencas el Oro, La Coromoto, Desbarrancadero y Ño León.....	76
Tabla 4.8 Relación de producción agrícola y pecuaria. La Mucuy.....	78
Tabla 4.9 Extracción minera. La Mucuy.....	79
Tabla 4.10 Precipitación (Pp) mensual y anual para el período 1960 - 1995, de la Estación Truchícola La Mucuy.....	79
Tabla 4.11 Precipitación (Pp) mensual y anual para el período 2000 - 2005, de la Estación Truchícola La Mucuy.....	80
Tabla 4.12 Precipitación (Pp) mensual y anual para el período 2000 - 2005, de la Estación Tabay, Serial 3038.....	80
Tabla 4.13 Registro de temperatura para el período 1968-1977, de la Estación Truchícola La Mucuy.....	80
Tabla 5.1 Registros históricos de crecidas en La Mucuy (1940-2007).....	84
Tabla 5.2 Precipitaciones promedio (Pp) de las estaciones pluviográficas escogidas.....	87
Tabla 5.3 Parámetros hidrológicos de cada subcuenca.....	101
Tabla 5.4 Caudales pico generados en Unión 3.....	102
Tabla 5.5 Parámetros hidráulicos para $Tr= 25$ años y $Q_{m\acute{a}x}= 319,4$ m <sup>3</sup> /s.....	106
Tabla 5.6 Parámetros hidráulicos para $Tr= 50$ años y $Q_{m\acute{a}x}= 327,5$ m <sup>3</sup> /s.....	107
Tabla 5.7 Parámetros hidráulicos para $Tr= 100$ años y $Q_{m\acute{a}x}= 354,7$ m <sup>3</sup> /s.....	107
Tabla 5.8 Porcentaje de datos representativos. $Tr= 25$ años y $Q_{m\acute{a}x}= 319,4$ m <sup>3</sup> /s.....	108
Tabla 5.9 Porcentaje de datos representativos. $Tr= 50$ años y $Q_{m\acute{a}x}= 327,5$ m <sup>3</sup> /s.....	108
Tabla 5.10 Porcentaje de datos representativos. $Tr= 100$ años y $Q_{m\acute{a}x}= 354,7$ m <sup>3</sup> /s.....	108
Tabla 5.11 Parámetros hidráulicos para $Tr= 25$ años y $Q_{m\acute{a}x}= 319,4$ m <sup>3</sup> /s.....	112
Tabla 5.12 Parámetros hidráulicos para $Tr= 50$ años y $Q_{m\acute{a}x}= 327,5$ m <sup>3</sup> /s.....	112
Tabla 5.13 Parámetros hidráulicos para $Tr= 100$ años y $Q_{m\acute{a}x}= 354,7$ m <sup>3</sup> /s.....	112

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_d$ = área de desborde.

CN= número de curva.

$C_v$ = coeficiente que relaciona la velocidad media del agua y la velocidad en el fondo.

$D_m$ = diámetro medio de las partículas del material granular.

Fr= número de Froude.

$H$ = desnivel o altura.

$I$ = intensidad de la lluvia efectiva.

$L$ = longitud del cauce.

$n$ = coeficiente de rugosidad de Manning.

$P$ = precipitación total.

$P_e$ = precipitación efectiva.

$P_m$ = perímetro mojado de la sección considerada.

$q$ = gasto por unidad de ancho o caudal unitario.

$Q$ = caudal total.

$S$ = infiltración potencial.

$S_c$ = pendiente de compensación.

$S_f$  = pendiente de flujo.

$S_o$  = pendiente de fondo.

$t$ = tiempo.

$T_c$ = tiempo de concentración.

Tr= período de retorno.

$V$ = velocidad de flujo.

$x$ = distancia medida en el sentido del movimiento.

$Y$ = profundidad o tirante de agua.

## RESÚMEN

El presente trabajo tiene por finalidad la evaluación hidrológica e hidráulica de la quebrada La Mucuy, del Municipio Santos Marquina en el estado Mérida, bajo el uso de dos programas de simulación; uno de ellos unidimensional (1D), y el otro bajo enfoque bidimensional (2D). Todo esto con el propósito a posteriori de mitigar los impactos generados por eventos de crecida, mediante la implementación de medidas estructurales, y adicionalmente los provocados por la explotación indiscriminada actualmente, con el emplazamiento de las albercas de sedimentación en las márgenes de la quebrada. Los aspectos recabados para el estudio hidrológico estuvieron basados en la data respectiva a las intensidades máximas de lluvia generadas en la estación Tabay (3038), y a su vez se utilizó la transposición de tormenta del río Chama ocurrida el 28 de abril de 1972, para obtener un enfoque hidrológico paralelo en la cuenca. Sin embargo, resultaron de mayor magnitud los valores de intensidades máximas en la estación Tabay (3038), es decir, mayor cantidad de escorrentía; por lo cual se decidió trabajar con éstos, ya que la perspectiva del estudio se enmarcó en eventos extremos de crecidas. La investigación se concertó para evaluación de tres escenarios como lo fueron períodos de retorno de 25, 50 y 100 años, obteniendo valores de caudales extremos de 319,5 m<sup>3</sup>/s, 327,5 m<sup>3</sup>/s y 354,7 m<sup>3</sup>/s respectivamente. Adicionalmente, se utilizaron como modelos hidráulicos el HEC-RAS v5.0 y el FLO-2D Basic, con la finalidad de observar y comparar ambos modelos bajo los períodos de retorno mencionados. Fueron comparados los parámetros hidráulicos más representativos como lo son calados de agua, velocidades de flujo y áreas de desborde proporcionadas por cada modelo. Asimismo, se generó el pre-diseño de diques transversales de gaviones, previendo toda la información complementaria que atañe el uso de medidas estructurales para la corrección y estabilización de cursos torrenciales como lo es la quebrada La Mucuy.

**Palabras Clave:** evaluación hidrológica-hidráulica, eventos extremos, modelos hidráulicos, medidas estructurales.

## INTRODUCCIÓN

La concepción de las evaluaciones hidrológico-hidráulicas para muchas de las cuencas en Venezuela, constituye una gran cantidad de factores incidentes en el análisis de las mismas, y es de suma importancia que estos estudios sean realizados con frecuencia, sobre todo en aquellas cuencas que tengan interacción socio-económico-ambiental, ya que ante un evento extremo que pueda presentarse, se requieren de medidas estructurales o no estructurales para aminorar los efectos provocados por crecidas, como lo es el caso del presente estudio.

Particularmente, la quebrada La Mucuy es un cauce torrencial que ha venido cambiando su dinámica conforme a las variabilidades presentadas desde los primeros eventos de crecida generados en la zona (reportes desde el año 1940), con lo cual se evidencia la importancia de recolectar información pertinente a nivel hidrológico e hidráulico sobre la quebrada y sus adyacencias. Es de hacer mención, que no sólo existe el tramo de estudio de la quebrada La Mucuy, adicional a ello se encuentra un sistema integrado de subcuencas que constituyen el ecosistema actualmente existente. Entre ellas, las que fueron consideradas para el presente estudio están las quebradas El Oro, La Coromoto, Ño León y Desbarrancadero, denominadas de esta forma según la cartografía nacional para el estado Mérida.

Las tendencias actuales junto con los sistemas de información geográfica (SIG), representan una herramienta muy versátil en lo que al campo de la hidrología se refieren, pero a pesar de esto, se logran de una forma bastante comprensible y agradable los resultados generados con el uso de estas tecnologías. Este estudio se basa en el uso de varias de estas herramientas, entre las que destacan el software ArcGis v10.2.2 (licencia suministrada por el CIDIAT), el modelo unidimensional HEC-RAS v5.0 (software libre), el complemento gráfico denominado HEC-GeoRAS v3.5 para ser usado dentro del ArcGis, y el modelo bidimensional FLO-2D Basic (versión libre limitada). Adicionalmente entre otras herramientas utilizadas en menor proporción son el Global Mapper v17, y el complemento HEC-GeoHMS v4.1 para ArcGis.

Se desarrolla una metodología basada en diversos procedimientos, donde son considerados puntos de vista de distintos autores, así como la experticia de algunos ingenieros y profesores pertenecientes a la temática de estudio. En este sentido, se recalcan algunos de los aspectos más relevantes, donde de forma explicativa se tienen los siguientes enfoques:

La problemática existente y su justificación, abarcando puntos de interés como lo son los eventos de crecida producidos en diferentes partes a nivel nacional y estatal. Destacando que, la quebrada la Mucuy no escapa a estos eventos, sino que más aún deben ser considerados dentro de los planes de ordenamiento territorial del Municipio Santos Marquina, como parte fundamental para el desarrollo sustentable del entorno. Asimismo, la justificación del presente estudio radica en la necesidad de un análisis referente a evaluación hidrológica-hidráulica, que permita conducir a la búsqueda de posibles alternativas estructurales coadyuvantes a la mitigación de efectos por crecidas.

De igual manera, el trabajo está sustentado con una recopilación bastante extensa en cuanto a estudios previos se refiere. Cabe destacar, que la información recabada fue clasificada de manera organizada en tres partes, y en este sentido se tienen antecedentes generales sobre la temática de investigación (crecidas, desbordes en diferentes cuencas), antecedentes de estudios de crecidas en la cuenca La Mucuy, y finalmente antecedentes relacionados a los softwares a utilizar. Igualmente, las bases teóricas constituyen parte importante para la mayor comprensión del tema, donde se destacan conceptualizaciones referentes a: modelos de lluvia-escorrentía, eventos normales y extremos, crecidas e inundaciones, usos de la tierra y cobertura vegetal, entre otros.

Finalmente, se da pie a la búsqueda de resultados inherentes a la evaluación hidrológica-hidráulica realizada, con miras al análisis y pre-diseño de medidas estructurales que sustenten la mitigación de efectos producidos por crecidas, sin dejar de lado el impacto importante que es generado actualmente por el saque no controlado de sedimentos aguas abajo de la confluencia entre las quebradas La Mucuy y Ño León.

# CAPÍTULO 1

## EL PROBLEMA

### 1.1 Planteamiento del problema y justificación

Los recursos hídricos representan el desarrollo, subsistencia y equilibrio en lo que respecta al desenvolvimiento de la vida en el planeta tierra. De allí, deriva la necesidad del ser humano de instaurarse en lugares que le permitan la mayor cercanía a cuerpos de agua, así como la interrelación, dependencia y sostenimiento para su entorno socio-natural. No obstante, la recurrencia hacia la vecindad del vital líquido, implica el asentamiento vulnerable de las sociedades, lo cual conlleva a una serie de eventos que pudieran catalogarse dentro del marco de los desastres socio-naturales, específicamente los referentes a crecidas e inundaciones. Generalmente, estos fenómenos naturales radican en la dinámica de los sistemas fluviales, que afectan tanto al cauce como a las áreas adyacentes a éste, considerando así posibles zonas de desborde.

Históricamente, los fenómenos naturales atribuidos al agua se remontan hace aproximadamente unos 20.000 años con el diluvio de la era del hielo, que tuvo lugar en lo que actualmente se conoce como Washington y Oregon en los Estados Unidos. Cabe destacar que, aunque para ese momento no se encontraban poblaciones asentadas que pudieran verse afectadas, la fuerza del agua generada durante ese evento, ocasionó el posicionamiento de grandes rocas en altas colinas, siendo esto uno de los indicadores que los científicos buscan para estudiar inundaciones antiguas. De igual forma, a nivel mundial se destacan crecidas históricas, que determinan el comportamiento de los cursos fluviales, dejando así evidencia sobre la importancia del manejo y uso sustentable del entorno natural al momento de generar asentamientos poblacionales. Tal es el caso, por ejemplo, de la gran inundación del río Mississippi en 1927, siendo ésta la inundación más destructiva del río en los Estados Unidos; además se debe mencionar que debido a ello se construyó el sistema de diques más largo del mundo y cauces de alivio.

Asimismo, en Asia, el río Amarillo corresponde al mayor causante de inundaciones en China, generando pérdidas importantes aun cuando se han construido distintas obras de alivio a su

alrededor. Particularmente, dicho río arrastra gran cantidad de materiales en suspensión lo que hace al mismo de mayor cuidado en cuanto a la construcción de obras hidráulicas.

Bajo este orden de ideas, en Venezuela se presentan constantemente eventos importantes sobre la ocurrencia de crecidas que mantienen una relación estrecha con la generación de movimientos de masa y flujo de barro, tal es el caso en primer lugar de la tragedia de Vargas, ocurrida en diciembre del año 1999, dejando un saldo de más de 758 muertos (Campos y Bravo, 2011). Asimismo, se debe mencionar la tragedia del río Limón, en el Municipio Girardot del Estado Aragua (septiembre de 1987), dejando un saldo de 350 muertos. Es importante destacar que estos eventos ocurren históricamente, aunque no exista una vulnerabilidad concreta, por lo que no se debe dejar de lado el hecho de que, a pesar de la ocurrencia natural de los mismos, se deben tener en cuenta los riesgos presentes cuando ya existe un asentamiento poblacional.

Particularmente, el Estado Mérida por sus características físico-naturales y gran cantidad de afluentes torrenciales, posee data importante en cuanto al estudio de crecidas, lo cual permite corroborar con hechos históricos las características más importantes durante la ocurrencia y consecuencias de las mismas, así como sus causas y posibles factores influyentes. Al estar la ciudad ubicada sobre una meseta, el riesgo de que ocurran inundaciones es aún mayor, especialmente en aquellas zonas donde los asentamientos poblacionales se encuentran cercanos a los cursos de agua. Sin embargo, la mayoría de las inundaciones ocurridas no son sólo de agua, sino también con mezclas de arena, piedras, palos y lodo. En tal sentido, se destacan algunos eventos importantes ocurridos en el estado, como lo es la tragedia del río Mocotíes en febrero de 2005, donde ni siquiera se tienen registros de los caudales máximos correspondientes a dicha crecida (Delgadillo, 2014). También se puede mencionar el desborde del río San Pedro en octubre de 1987, dejando un saldo aproximado de 50 muertos en distintos municipios. Particularmente, para la zona de estudio, se han tenido registros de distintos eventos ocurridos en la cuenca de la quebrada La Mucuy, donde se tienen acontecimientos de inundación desde el año 1940 según reportes de antiguos pobladores; dentro de los más relevantes, destacan la crecida del año 1946, la cual bajo información recopilada etnográficamente hubo un derrumbe del cerro, formación de avenida con agua sucia y formación de inmensas *playas*; también se menciona la crecida del año 1972 (Lacruz y Rondón, 2008), donde por causa de represamiento

de material, se formó un *turbión* de aguas parameras, provocando aludes de tierra y piedras. Asimismo, de las más recientes según recopilación hemerográfica, el 9 de junio de 1998 por causa de fuertes crecientes, hubo destrucción de algunas viviendas, inundación de la vialidad, pérdida de cultivos y destrucción de una unidad educativa (Lacruz y Rondón, 2008).

Con base en lo anteriormente expuesto, se quiere evaluar de manera hidrológica e hidráulica el comportamiento de la quebrada La Mucuy del Municipio Santos Marquina en su parte baja, especialmente en las zonas aledañas donde hay poblaciones actualmente asentadas, tratando de generar soluciones estructurales a lo largo de la quebrada, que permitan mitigar daños posteriores por efecto de una crecida, recordando adicionalmente que este lugar está siendo explotado indiscriminadamente por los saques de agregado, lo que genera aún mayores riesgos al momento de que ocurra un evento de crecida. Evidentemente, una explotación no planificada de agregados en las márgenes de cualquier río, ocasiona un impacto negativo que influye directamente en el régimen hidráulico del mismo, ya que se ven afectadas la pendiente, ancho y calado en una determinada sección (Hernández y Serrentino, 2009).

En virtud de lo antes mencionado, el presente Trabajo de Grado se justifica en la necesidad de establecer patrones de comportamiento de la quebrada y sus adyacencias, mediante la simulación hidrológica e hidráulica de la cuenca en estudio, con especial énfasis en las cercanías al pueblo de Tabay del Estado Mérida. Principalmente, entre los propósitos de este estudio, es el plasmar la influencia que acarrear los diversos usos actualmente existentes alrededor de la zona en estudio (cultivos, uso agropecuario y agrícola, uso residencial...), bajo posibles cambios temporales a futuro, para así evidenciar según el Plan de Ordenamiento Urbanístico del municipio la factibilidad de diseñar medidas estructurales que mitiguen daños ocasionados por crecida. Asimismo, se quiere generar la información pertinente a zonas de desborde en las cercanías del cauce en estudio, con la finalidad de aportar mayor información al plan de ordenamiento actual.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo General.

Evaluar el comportamiento hidrológico-hidráulico de la quebrada La Mucuy parte baja, ubicada en el Municipio Santos Marquina del Estado Mérida, mediante el uso de programas de simulación que permitan la creación de soluciones estructurales a las crecidas correspondientes de la cuenca en estudio.

### 1.2.2 Objetivos específicos.

- Analizar el efecto de los cambios de uso de la tierra bajo distintos escenarios, en los caudales máximos generados por las crecidas.
- Comparar los resultados del estudio hidrológico-hidráulico generado en la quebrada La Mucuy, bajo distintos programas de simulación.
- Establecer un mapa de zonificación de crecidas, observando distintos períodos de retorno con base en los resultados generados por los programas para el lugar en cuestión.
- Pre-diseñar soluciones efectivas que permitan la mitigación del impacto producido por los saques de agregado en las márgenes de la quebrada La Mucuy, conforme a la estabilidad del cauce y al transporte de sedimentos del lugar en cuestión.

## 1.3 Alcances y Limitaciones

Los alcances del presente trabajo se enmarcan en la generación de parámetros hidrológicos e hidráulicos de la quebrada La Mucuy, abarcando características generales de toda la cuenca (conformada por 4 subcuencas importantes: El Oro, La Coromoto, Ño León y Desbarrancadero) y como tramo de estudio en particular el denominado por la cartografía nacional como quebrada La Mucuy, que va aguas abajo de la confluencia entre las quebradas El Oro y La Coromoto hasta antes de su desembocadura en el río Chama. Este estudio pretende realizar mediante el uso de programas de simulación las manchas de crecida que pudieran generarse en la quebrada mencionada, a través de dos modelos hidráulicos como los son el HEC-RAS v5.0 (*Hydrologic Engineering Center- River Analysis System*) y el modelo FLO-2D Basic (conjuntamente con su

sistema integrado GDS v2009). Asimismo, cabe resaltar que los resultados precedentes para la generación de estas zonas de desborde provienen de los hidrogramas de crecida efectuados en el modelo hidrológico HEC-HMS v4.1 (*Hydrologic Engineering Center- Hydrologic Modeling System*). Dentro de los alcances también se prevé la comparación de los resultados hidráulicos arrojados por los modelos a utilizar, con base en la representación cartográfica de las respectivas manchas de crecida para diferentes períodos de retorno. Asimismo, cabe destacar la recopilación de información bibliográfica, hemerográfica y etnográfica, referente a eventos de crecida ocurridos en años anteriores, con lo cual se sustenta el estudio y se impone dentro de sus trascendencias la obtención de parámetros hidrológicos e hidráulicos importantes, que brinden a la comunidad asentada en las adyacencias de la quebrada y a los organismos públicos competentes (como lo es la Alcaldía del Municipio Santos Marquina) una investigación que sirva como instrumento orientador y planificador respecto a las posibles zonas que puedan verse afectadas por un evento extremo como lo son las crecidas en cursos torrenciales de este tipo. Por otro lado, la presente investigación procura reflejar en sus resultados la contribución inminente sobre toma de decisiones a nivel local en cuanto a la actualización de los planes de ordenamiento territorial y las zonas con mayor grado de afectación bajo efectos de una crecida, así como la generación preliminar de medidas estructurales que mitiguen el impacto provocado durante la ocurrencia de dicho evento, y que a su vez contribuyan a la estabilidad del cauce.

En contraste con la anteriormente expuesto, dentro de las limitaciones del presente trabajo se encuentran, la falta de información hidrometeorológica reciente en la zona; ya que los registros obtenidos datan de fechas históricas (entre años 1960 a 1998 aproximadamente), lo que restringió de alguna forma los parámetros estudiados. La determinación de algunos parámetros hidrológicos (tales como rugosidad de Manning “n” y el número de curva “CN”) estuvo limitada a tablas referenciales ya establecidas y a estudios previos realizados por autores anteriores, bajo las características que conciernen a la obtención de los mismos.

Otros de los factores limitantes atañen al uso únicamente del caudal líquido para los análisis efectuados, ya que no existe una data previa para consideración de caudal sólido o carga de fondo dentro de la zona de estudio (transporte de sedimentos por el fondo y en suspensión).

El trabajo no cuenta con un estudio topográfico en campo, debido a insuficiencia de recursos económicos y transporte, por lo cual se vio limitado al uso solamente de sistemas de información geográfica (SIG), mediante el uso de modelos digitales de elevación (DEM) obtenidos con plataformas digitales.

Es de hacer notar, que los usos de los modelos hidráulicos empleados, no fueron desarrollados para zonas montañosas, lo cual incide de alguna manera en los resultados obtenidos. No obstante, existen ciertas condiciones dentro de cada programa que permiten “considerar” características particulares de los cauces de montaña. Esto representa limitaciones al momento de realizar las simulaciones respectivas.

El análisis preliminar de las medidas estructurales se estipula siguiendo las recomendaciones generales para diferentes alternativas (según varios autores y estudios anteriores en cauces de montaña), teniendo como limitante la ausencia de un estudio previo de transporte de sedimentos lo que restringe el análisis de las medidas estructurales a emplear, ya que sólo se indican características y aproximaciones generales de las obras.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

## CAPÍTULO 2

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Antecedentes generales sobre el tema de investigación

Referente a las amenazas naturales, provocadas por crecidas torrenciales en zonas pobladas, existe una gran cantidad de trabajos que respaldan la necesidad de estudiar el comportamiento de los cauces presentes, así como mantener información concerniente a ciertos parámetros hídricos que resultan de gran importancia para la toma de decisiones al momento de “predecir” eventos de crecida. Adicionalmente, existen otros factores influyentes en el marco de estos eventos, como lo son el movimiento de masas, flujo de detritos, entre otros. Es por ello, que a continuación se detallan trabajos relacionados con los eventos mencionados anteriormente.

Duque y Barrios (1987), realizaron un estudio hidrológico de la Zona Sur del Lago de Maracaibo, en el cual se enfocan en la simulación hidrológica de caudales máximos para diferentes frecuencias en aquellos lugares con mayor carencia de información; esto se llevó a cabo haciendo uso del programa EVENTO el cual fue desarrollado por los mismos autores, de igual forma, para la estimación de producción de sedimentos, fue aplicada la ecuación modificada de pérdida de suelo MUSLE. En dicho trabajo, la elaboración del análisis de tormentas, permitió la generación de los gastos máximos, enfatizándose en el evento de lluvia ocurrido el 15 de diciembre de 1975, con una duración de 6 horas y un valor máximo de 53,7 mm en la estación El Vigía (serial 3035), donde se centró la tormenta. Como datos importantes obtenidos del trabajo, destacan las estimaciones de caudales pico del río Mocotíes hasta su confluencia con el Chama, con valores de 401,9 m<sup>3</sup>/s y 451 m<sup>3</sup>/s para períodos de retorno de 50 y 100 años, así como la estimación de producción de sedimentos de aproximadamente 1,0 millón de toneladas por año, con producción media de 1952,40 ton/km<sup>2</sup>.

En este sentido, Molina (2006) elabora un trabajo donde determina las áreas bajo amenaza de inundación por crecidas de las quebradas El Rincón y El Salado junto a sus principales tributarios, y de esta forma establece niveles de áreas amenazadas según su intensidad (alta, media y baja). Hubo consideraciones respecto al criterio hidrológico, relacionado con la

estimación de períodos de retorno y el análisis morfométrico. Cabe resaltar, que se tomaron en cuenta los aspectos importantes para el análisis como lo son, el uso del suelo, procesos erosivos y los sectores de pendiente.

Desde el punto de vista de zonificación para zonas vulnerables, se tiene el trabajo realizado por Cuervo (2007), quien realizó una zonificación de movimientos de masa en las cuencas del río Montalbán y quebrada La Portuguesa en el estado Mérida. Principalmente, el trabajo se enmarca en la aplicación de tecnología de sistemas de información geográfica (SIG), y estuvo estructurado bajo el desarrollo de 7 etapas principales: 1) preparatoria, 2) estructuración de la información base, 3) generación de los mapas índice, 4) generación del mapa movimientos de masa, 5) generación de los mapas de susceptibilidad, 6) análisis de la precipitación como factor detonante y 7) zonificación de amenaza. En este sentido, al realizar un análisis estadístico multivariado y mediante la superposición de mapas para la estimación de la susceptibilidad, se logró determinar el grado de influencia que ejerce cada característica geo-ambiental para la generación de movimientos de masa.

Partiendo de un estudio realizado en la cuenca del río Neverí en el estado Anzoátegui, se tiene el trabajo efectuado por Galantón y Romero (2007), en el cual desarrollan el estudio de diferentes tipos de defensas ribereñas que puedan aminorar el daño a la población en caso de crecidas excepcionales. Es relevante mencionar, que se insta a la investigación de distintos tipos de obras civiles, considerando sus características en cuanto a construcción, diseño, eficiencia y posterior mantenimiento, ya que durante las dos tormentas que se mencionan (en los años 1970 y 1999), se han producido tanto pérdidas humanas como económicas debido a las inundaciones originadas. En su estudio concluyen que aun cuando existen diques marginales a lo largo del río, no se cumple el debido mantenimiento, por lo que existen tramos desprovistos de protección, así como también recomiendan que estos muros se coloquen a una mayor distancia del cauce, permitiendo así una menor socavación en las bases de estas defensas marginales.

Entre los trabajos realizados por el Ministerio del Poder Popular para el Ambiente, existe un trabajo del año 2013 donde se elabora un diagnóstico preliminar de la Zona Sur del Lago de Maracaibo en Venezuela, enfatizándose en los riesgos asociados a inundaciones del área, así como la búsqueda de información referente a la existencia de estrategias e identificación de

medidas estructurales y no estructurales para mitigar los daños que producen las avenidas. Asimismo, se realizó un mapeo de usos de la tierra para diferentes años, recopilación y procesamiento de información hidroclimática entre otros detalles considerados. Con base en las áreas de estudio, se obtuvieron las respectivas manchas de crecidas, así como la cartografía de las áreas inundables y los hidrogramas de crecida de los ríos Chama, Escalante, Mucujepe y Onia.

Citado en Delgadillo (2014), se encuentra el estudio elaborado por Ballesteros *et al.* (2013) quienes realizaron el estudio sobre la efectividad de distintas medidas estructurales, respecto a diferentes escenarios de inundación en la cuenca del río Alberche, perteneciente a la localidad de Navaluenga en Madrid-España. Durante el desarrollo del estudio se efectúan análisis dendrogeomorfológicos de árboles ribereños en las zonas inundables, aplican el método del número de curva de escurrimiento (CN), y también hacen uso del modelo HEC-HMS para la estimación de caudales máximos. Además de ello, consideran algunos criterios hidráulicos basados en los calados del agua, mediante el uso de secciones transversales las cuales fueron levantadas a escalas 1:500 y 1:1000. Dicho estudio concluye haciendo notar que las obras hidráulicas analizadas como medidas estructurales, resultan más costosas al compararlas con un tipo de medidas estructurales más pequeñas sobre el área en cuestión, siendo éstas últimas de eficiencia similar a las anteriores.

En este mismo año, Valencia y Guevara desarrollaron la validación del modelo HEC-HMS en la cuenca del río Cabriales, Valencia estado Carabobo, con la finalidad de estipular el análisis hidrológico de dicha cuenca. Basaron su estudio principalmente en tres (03) crecidas representativas en la zona, mencionando así que para los años 1971, 1986 y 2008 ocurrieron tormentas de crecida que afectaron gran parte de la población en cuanto a la inundación de áreas e infraestructura urbana en la ciudad de Valencia. Teniendo en consideración la información hidrometeorológica de dichas tormentas, el estudio muestra que el modelo HEC-HMS caracteriza de manera adecuada los hidrogramas de las tormentas históricas utilizadas. En este sentido, se recomienda el uso de una estructura hidrológica para futuras estimaciones de caudales máximos. El modelo caracteriza muy bien los picos de crecidas tanto para la tormenta del año 2008 y del año 1971, a pesar de que existen dudas sobre los datos observados. Concluyen

que los datos captados de manera digital desde el programa SIG hacia el modelo hidrológico reflejan una inmensa capacidad de estos sistemas para generar información para las simulaciones hidrológicas.

Más recientemente, Parra y Salcedo (2015) realizan un análisis multitemporal mediante el uso de imágenes satelitales, lo cual permite el monitoreo o seguimiento de la evolución de algunos fenómenos naturales y a su vez acontecimientos humanos. Resulta importante este estudio, ya que se aprecia uno de los métodos más eficaces para la comparación y determinación de cambios que ocurran en la vegetación en un determinado lapso de tiempo, lo cual interfiere para la planificación ambiental, y lo concerniente a la toma de decisiones cuando se deben clasificar las zonas según cierto grado de vulnerabilidad debido a los impactos generados por causas antrópicas. Lo interesante de este trabajo resulta en la comparación de los usos de la tierra y cobertura vegetal para dos lapsos de tiempo, comprendidos entre 1988-2001 para un primer período y los años 2001-2013 para un segundo período; al obtener los resultados para ambos períodos se observa que hubo un 2,68% de cambios para la superficie total analizada durante el primer período (1988-2001), y, posteriormente para el siguiente período estudiado hubo un 1,48% de cambios apreciados. Dichos cambios de cobertura, fueron evidenciados en mayor instancia sobre el eje de la carretera trasandina y en las vertientes de las quebradas que drenan hacia el río Chama.

## **2.2 Antecedentes relacionados con los modelos a emplear**

En el marco de los programas existentes para la simulación de crecidas, y evaluación de comportamientos en cuanto a manchas por inundación, movimientos de masa, tránsito de crecidas, análisis de frecuencias, entre otros usos determinados; se detallan algunos trabajos referentes a los modelos de simulación a emplearse (desde los trabajos más antiguos hasta los más recientes) para el desarrollo del presente trabajo, con el propósito de sustentar de manera práctica y teórica la aplicación de los mismos.

Haciendo referencia a algunos softwares para modelar fenómenos de crecida, Landaeta (2004), hizo uso de los modelos CAUDAL3 (Mintegui y Robredo, 1993), SMADA, el HEC-HMS y la fórmula racional con la idea de simular el evento de crecida ocurrido el 30 de octubre

del 2011 en la cuenca de la quebrada La Pedregosa, del Municipio Libertador del estado Mérida. Partiendo del método del número de curva (CN), fueron procesadas las lluvias extremas a partir de los datos de la estación La Punta (serial 8049), y con los parámetros hidráulicos se hizo la estimación de caudales pico para períodos de retorno de 20, 50 y 100 años. En este sentido, con base en los resultados obtenidos, se tuvo una capacidad hidráulica en la sección de 306,74 m<sup>3</sup>/s (a nivel del puente La Mata), cabe destacar que este valor fue tomado como referencia del modelo HEC-HMS, el cual estimó de mejor manera el caudal del evento máximo del 30-10-2001. Con base en el programa, se obtuvieron unos 392,1 m<sup>3</sup>/s para la cuenca subdividida en segmentos y 299 m<sup>3</sup>/s para toda la cuenca en 100 años de período de retorno.

En el caso de Perú, se aplicó el modelo FLO-2D en la quebrada Runtumayo (Cuzco), para analizar el alud y flujo de detritos del 12 de octubre del 2005, estableciéndose lo siguiente:

Como consecuencia del alud producto de un desprendimiento de hielo y rocas del nevado Verónica (5,893 msnm), ocurrido el día 12 de octubre del 2005, se realizaron los estudios geológicos y geodinámicos (Cárdenas *et al.*, 2005, Cárdenas *et al.*, 2006). Además, se construyeron los mapas de peligros basados en evaluaciones de campo y la aplicación del modelo numérico bidimensional FLO-2D de simulación digital (Valderrama *et al.*, 2006, p.169).

Asimismo, en dicho trabajo hacen uso de la cartografía de los diferentes conos aluviales, así como el estudio del alud-flujo de detritos del 12 de octubre y la aplicación del modelo numérico bidimensional FLO-2D de simulación digital, en el cual se ha realizado una zonificación de peligros a aluviones en la zona de Palomares y Tiaparo.

Haciendo énfasis en las aplicaciones de simulaciones hidráulicas, Castillo *et al.* (2006), realiza el modelado de flujo de lodo usando FLO-2D en la quebrada Paíuha de la ciudad de Matucana, Lima - Perú; donde se estima que en dicha quebrada se han reconocido importantes procesos de movimientos en masa activos como deslizamientos, caídas de rocas, flujos de lodo, así como también erosión de laderas; los que por una parte afectan los terrenos de cultivo y por otra aportan gran cantidad de material detrítico a la quebrada, donde dicha actividad condiciona la ocurrencia de flujos de lodo (conocidos como huaycos). Se explica que en caso de una reactivación de los movimientos en masa en la cuenca es muy probable que se generen huaycos

de gran magnitud que podrían afectar un sector de Matucana, así como represar total o parcialmente el río Rímac y aumentar el daño sobre ella y otros centros poblados situados aguas arriba y aguas abajo del río.

Mediante el uso del programa, fueron establecidos ciertos parámetros tales como estudio de suelos, toma de muestras en campo y estimación de la rugosidad. Entre otros de los parámetros introducidos en el modelo fueron: la gravedad específica del sedimento ( $G_s$ ) de 2,65, una resistencia al flujo laminar ( $K$ ) igual 2285 (empleado en otros estudios de flujos hiperconcentrados), una rugosidad “ $n$ ” de Manning de 0,17 en el cauce de la quebrada (para cauces de fuerte pendiente), y un coeficiente “ $n$ ” de Manning de 0,040 en la confluencia con el río Rímac. De los resultados del FLO-2D, se reporta un volumen total de creciente simulada de 1,1 millones de  $m^3$ , de los cuales 0,45 millones de  $m^3$  son agua y 0,62 millones de  $m^3$  corresponden a sedimento y tirantes máximos en la parte baja de la quebrada.

En Colombia, Barrios y Olaya (2007), elaboró cálculos y análisis de los hidrogramas para el flujo torrencial del 22 de junio de 2006, ocurrido en la microcuenca El Salto, municipio Ibagué, llegando a unas conclusiones que manifiestan la evidencia sobre la necesidad de construir modelos hidrológicos de flujos torrenciales para cuencas hidrográficas colombianas con información hidrometeorológica escasa. Cabe destacar que dicha investigación se desarrolló con base en la generación de un hidrograma sintético del antiguo Soil Conservation Service (SCS) lo que actualmente se denomina Natural Resources Conservation Service (NRCS), y un hidrograma analítico fundamentado en mediciones de campo, para el flujo torrencial ocurrido el 22 de junio de 2006 en la microcuenca El Salto, afluente del río Combeima en el municipio de Ibagué Tolima.

La precisión de estos hidrogramas fue calculada y convalidada a través de simulaciones elaboradas con el modelo reológico para flujos torrenciales (mud and debris flow) del software FLO-2D, tomando como función objetivo el área del depósito medido en campo. Como resultado, se encontró que el hidrograma sintético del SCS no expresa la respuesta hidrológica de la microcuenca y subestima significativamente el caudal pico; por tanto, no se recomienda

su uso para modelar la transformación precipitación-escorrentía, para diseñar estructuras hidráulicas, ni para definir mapas de amenaza en el área de estudio.

Posteriormente, para ese mismo año (2007), la Universidad Central de Venezuela, conjuntamente con la Corporación del Estado Vargas, y por cofinanciamiento de la Unión Europea, realizan un proyecto relacionado a la evaluación y prevención del riesgo de origen hidrometeorológico y geodinámico de las cuencas de Tacagua, La Zorra y Mamo en el Estado Vargas, en el cual se elaboran mapas de amenazas por inundaciones a partir de diferentes períodos de retorno. Para ello, se hizo uso de los modelos CASC2D-SED y HEC-HMS, con la finalidad de estimar los caudales y a su vez combinarlos con el método del Número de Curva de Escorrentía (CN) del antiguo SCS (actualmente denominado NRCS, Natural Resources Conservation Service), a fin de obtener la lluvia efectiva a transitar y el modelo FLO-2D para simular los “flujos torrenciales”.

Con base en el propósito de las simulaciones hidráulicas, en Italia, se realizó la comparación de modelos numéricos de 2 flujos de detritos en Cortina d' Ampezzo area, Dolomites. El autor explica inicialmente los simuladores a emplear, donde específicamente para el programa FLO-2D se expresa que corresponde a un modelo bidimensional de diferencia para agua y fluidos no newtonianos de abanicos aluviales. La superficie se discretiza en una grilla de elementos donde se tiene asignado un modelo de elevación y factores de rugosidad respectivos. El detalle y la precisión de la simulación están definidos bajo el tamaño de la grilla. De esta manera, se introducen los datos hidrológicos, bajo el uso del programa HEC-HMS de una estación cercana. Se destaca igualmente, que en comparación con los otros programas el FLO-2D representa una mayor precisión cuando de amenazas por inundación se trata (Armento *et al.*, 2008).

De igual forma, Bertolo y Bottino (2008) realizaron un estudio comparativo entre modelos de simulación para mostrar como diferentes programas pueden ser usados con la finalidad de predecir flujos de detritos debido a distintos movimientos, en el río Frangerello, Italia, y de esa manera predecir la distancia a recorrer y el lugar de deposición del material sólido, así como los comportamientos de las mezclas de los flujos y la máxima concentración de sólidos. Entre los modelos usados se tienen el DAMBRK Model, DAN Model y el FLO-2D. Al hacer uso del

programa FLO-2D el análisis fue separado en dos partes, donde la primera corresponde a la parte superior del canal de la montaña, y la segunda parte corresponde aguas arriba del abanico fluvial y a través de él. Se concluye en dicho estudio que, al comparar los valores de velocidad obtenidos para los programas, difieren en algunos valores y se observan algunos resultados más reales con FLO-2D, sin embargo, pareciera que sobrestima la profundidad de flujo. El programa permitió analizar el comportamiento del mismo tirante de agua bajo diferentes condiciones: una masa de agua pura, un flujo con el 30 % de material sólido, y un flujo con un 60 % en volumen de sólidos al comienzo del flujo de detritos.

Torres y González (2010), desarrollan una investigación referente a la aplicación del modelo HEC-RAS para la emisión de pronósticos hidrológicos de inundaciones en tiempo real, en el río Bogotá del sector Alicachín (cuena media y alta). Los autores determinan cada una de las etapas que ha originado la presencia de una onda de caudal en un canal natural, así como la respuesta del río ante la cantidad de agua en la parte media del sector Alicachín. De esta forma, se explica que el modelo se basa en ecuaciones diferenciales determinísticas, que al ser solucionadas en la estructura del modelo de simulación hidráulica HEC-RAS, permiten pronosticar la dinámica de los niveles de agua en los eventos hidrometeorológicos extremos de inundación, mediante la definición de las cotas de inundación, obtenidas a través de los perfiles transversales, simulando de manera aproximada el comportamiento de la dinámica del agua y del cauce con características de: secciones mojadas variables con cualquier geometría a lo largo del cauce, diferentes tipos de rugosidad para ciertas partes del perfil mojado, distintas profundidades de agua y con caudal variable a lo largo del cauce en condiciones de régimen de flujo subcrítico o supercrítico, con efectos hidráulicos debido a obstáculos transversales naturales o artificiales en el cauce. Entre las conclusiones de dicha investigación, resaltan que el programa HEC-RAS, tiene muy buenas funciones de procesamiento para realizar las condiciones de simulación previstas, asimismo, destacan la capacidad de interactuar con modelos digitales de terreno (DEM), mediante entorno de sistemas de información geográfica (ArcInfo, ArcView o ArcGIS). Adicionalmente, se menciona que el análisis resulta más cabal mediante el complemento HEC-GeoRAS, el cual permite evaluar los factores de topografía y una alta calidad en cuanto a mapas de inundaciones, con gran facilidad.

Existe una gran cantidad de trabajos donde ha sido empleado el software HEC-HMS, es por ello que Superlano (2010), hace uso de este software para estimar los hidrogramas de crecida de la subcuenca San Francisco en el Municipio Tovar del estado Mérida, haciendo énfasis en la margen izquierda del río Mocotíes. El trabajo se encuentra estructurado, tal que, en una primera fase hace uso de los programas Gvsig, ArcView y AJUSTEV3, aplicando el método del bloque alterno definido conceptualmente por Chow *et al.*, (1994), donde obtuvo los hietogramas de lluvias máximas de la estación Tovar. Consecutivamente, en una segunda fase, realiza la conceptualización hidrológica de la subcuenca (con 42 vertientes o segmentos de escurrimiento, y 21 cauces o segmentos de escorrentía) así como la inclusión de tres mapas con la distribución espacial del: número de curva de escorrentía (CN), “n” de Manning, y grupos hidrológicos de suelos; de esta forma, se generaron los caudales máximos con frecuencias de 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100, 200 y 500 años.

El desarrollo del importante aporte realizado por López (2010), hace mención respecto al uso del programa FLO-2D, dónde se cita textualmente:

(...) se refiere a la presentada por O'Brien en el año 2000, que permite estimar las variaciones y cantidades de flujo de detritos a partir de hidrogramas de caudales líquidos. Es de hacer notar que los autores realizan la calibración de los modelos con las mediciones obtenidas a partir de las batimetrías, lo que le confiere a los resultados una mayor confiabilidad. En este sentido, muestran los resultados vinculados con los flujos de detritos, con base a las estimaciones de caudal líquido, volumen de agua y sedimentos; y finalmente ofrecen una exposición sobre los modelos de simulación utilizados para calcular la producción ordinaria de volumen sólido en la cuenca de la quebrada San José de Galipán (p.311).

De igual forma, se tienen algunas extracciones tales como:

Correspondió a M. Mengual definir los criterios para el diseño de presas del tipo rastrillo. En el caso de M. Bello y J. L. López analizan la efectividad de las presas proyectadas para el control de sedimentos del río Cerro Grande en Tanaguarena, aplicando el modelo de simulación FLO-2D (Ferrer *et al.*, 2014, p. 315).

A partir de un diagnóstico geológico e hidráulico, J. Sanabria, evalúa las condiciones del abanico de la quebrada Uria, cuya población fue casi

totalmente destruida por el evento de 1999. Propone la construcción de una presa abierta de retención de sedimentos y mediante simulación (Modelo FLO-2D) demuestra que las obras recomendadas pueden controlar los flujos (Ferrer *et al.*, 2014, p. 315).

Para el mismo año, la firma Salomón López Zerpa (SLZ), realiza el estudio hidrológico y de hidráulica fluvial del río Carapo en el estado Táchira, con la finalidad de conocer el impacto ambiental del desarrollo urbanístico “Ciudad de las Casas” en las cercanías de la Hacienda “La Polonia”, en el municipio Junín del mencionado estado. Tomando en consideración los propósitos del estudio, fueron estimados los caudales máximos para frecuencias de 25, 50 y 100 años haciendo uso del modelo EVENTO (Duque, 1983), así como la aplicación del programa HEC-RAS para la simulación de los perfiles hidráulicos a partir de 22 secciones topográficas, las cuales permitieron posteriormente la delimitación de las manchas de inundación en un mapa a escala 1:5000.

Dicho trabajo resulta relevante en esta investigación, puesto que se mencionan los sectores donde deben construirse las obras de defensa para aminorar desbordes respecto a tiempos de retorno de 50 y 100 años, considerando el ancho estable del río para evitar procesos de socavación y degradación. Entre sus conclusiones señalan que: no se recomienda desarrollar ningún tipo de infraestructura en las áreas conformadas por terrazas recientes, ni tampoco en cotas inferiores a los niveles de agua que corresponden a los caudales máximos para un  $T_r = 25$  años. Por otro lado, destacan que, en los sectores situados en las terrazas más altas, ubicadas por encima de las manchas de inundación de 100 años, podrán asentarse infraestructuras siempre y cuando se haga una evaluación geotécnica y se cumpla con las condiciones establecidas en la Ley de Aguas del año 2007.

En este mismo orden de ideas, existen dos proyectos realizados por la Asociación Cooperativa de Ingeniería para Estudios y Proyectos en Agua y Ambiente (CIEPA, 2013 a y b) en los terrenos conocidos como “La Guaiquera” y “Don Pepe Rojas” en los municipios Libertador y Alberto Adriani del estado Mérida-Venezuela, donde se realiza una evaluación hidrológica e hidráulica de las quebradas El Lirio y Caño Raicero, siendo estos cursos de agua los principales drenes de ambos lugares. En dicho trabajo se hace énfasis en dos eventos

extremos ocurridos en “La Guaiquera” y en la entrada del “Caño Raicero”, de fechas 28-04-1972 y 15-12-1975 respectivamente; obteniendo así las curvas Área-Profundidad-Duración (ADP o PDA) y las curvas de Profundidad-Duración-Frecuencia (PDF) ajustadas a distribución Extrema Tipo I o distribución de Gumbel, para las estaciones con los máximos valores de precipitación. Con base en esta información, se realizó la estimación de caudales máximos para diferentes frecuencias de ocurrencia, empleando el software HEC-HMS 3.5 y en lo referente a los aspectos hidráulicos se hizo uso del programa HEC-RAS 4.1 para el análisis a través de las secciones transversales, niveles máximos a ser alcanzados por el agua y sus posibilidades de desborde en el área de estudio.

En concordancia con los trabajos referentes a la temática de investigación, se encuentra el realizado por Delgadillo (2014), quien evaluó las amenazas por crecidas del río Mocotíes en Tovar y Santa Cruz de Mora del estado Mérida. El estudio hizo énfasis en el evento hidrometeorológico ocurrido en febrero del año 2005; fenómeno que afectó a la parte occidental de los Andes Venezolanos, el Sur del Lago de Maracaibo, los estados Falcón, Aragua, Carabobo y Vargas. Entre los aspectos importantes del trabajo, resaltan la falta de información hidrometeorológica de la zona en estudio, por lo cual hubo necesidad de trasponer dos tormentas tipo de lugares diferentes, así como el uso del modelo HEC-HMS 3.5 para la estimación de caudales máximos en diferentes períodos de retorno, con la finalidad de obtener el análisis hidrológico. Partiendo de esta información, fueron empleados conjuntamente los programas HEC-RAS 4.1, el complemento para ArcGis, HEC-GeoRAS 4.2.93 y el ArcGis 9.3, cuyos resultados permitieron definir los niveles de amenaza por crecidas en los casos específicos de las localidades de Tovar y Santa Cruz de Mora. Finalmente, se realizan una serie de conclusiones y recomendaciones con el propósito de prevenir a la población en lo que respecta a eventos futuros de esta magnitud.

### **2.3 Antecedentes del área en estudio**

Entre los trabajos relevantes concernientes a la zona en estudio, se resumen de manera general algunos detalles en cuanto a características físicas, hidrológicas, geológicas y los factores determinantes para realizar un análisis hidrológico e hidráulico de la quebrada La

Mucuy, citando los trabajos de manera cronológica desde los más antiguos hasta los más recientes, por lo que entre las primeras revisiones se tiene que Quijada (1963), describió el régimen hidrológico de la cuenca a base de los usuales parámetros estadísticos (descargas medias mensuales y descargas extremas), asimismo realizó la estimación de descargas aprovechables y predijo la magnitud de las crecidas utilizando métodos indirectos basados en estudios de las características biofísicas de la cuenca y su relación con las modalidades del régimen hidrológico. De manera esquemática, el trabajo se encuentra estructurado en tres partes: un estudio de las características pluviométricas, estudio de las características fluviométricas y, por último, correlaciona los factores físicos y fisiográficos con el régimen hidrológico a fin de mejorar y obtener datos de tipo hidrológico.

Posteriormente, Flórez y Manzanilla (1999) analizaron la problemática asociada a las crecientes más recientes del río Chama para ese entonces, en la parte alta de su cuenca, la cual tiene hasta el cierre del área de estudio en el poblado de Tabay, teniendo aproximadamente unos 500 km<sup>2</sup>. Se procedió a la simulación hidrológica de crecientes, empleando un modelo desarrollado en CIDIAT por Roberto Duque (1983), el cual es una adaptación del modelo de escorrentía urbana de Shaake (1971). Se determinaron hidrogramas en algunos sitios de interés como San Román y Tabay, así como caudales pico para períodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años en los segmentos de escorrentía del río Chama. Se explica que la mayor parte de los daños presentados en esa parte de la cuenca fue producto de las crecidas ocurridas el 26 y 8 de junio de 1993 y 1998 respectivamente; las cuales fueron causadas por factores físicos como lluvias de más de 8 horas de duración y fusionamiento de nieve sobre vertientes fuertemente inclinadas, desprovistas de vegetación, con suelos de alto potencial de escorrentía.

Por otro lado, Veliz (2001) destaca la importancia que tiene la geomorfología que predomina en el fondo del valle del río Chama, hasta llegar a Tabay, donde se amplían un poco más las acumulaciones transversales que surgen de los afluentes del río, en forma de abanicos o conos de deyección reducidos (a excepción del depósito del río La Mucuy). Se destacan las acumulaciones aluviales del fondo del Valle. En la margen izquierda del Chama, la acumulación más importante es el cono terraza de aportes laterales del río La Mucuy, Ño León y Desbarrancadero, y en menor importancia los depósitos de Mucunután. Se menciona la

hidrografía del Chama en la vertiente izquierda, donde se enfatizan las quebradas Monsalve, Pedregal, La Mucuy (El Oro, Coromoto, Ño León y Desbarrancadero); de igual forma se mencionan las quebradas Minubás, Mucunután, y La Calera o La Joya. Se tiene un reporte hemerográfico de las crecidas más importantes, donde se imponen los daños por crecidas de la quebrada La Mucuy. Entre los resultados evaluados se estima que el riesgo del sector medio de La Mucuy, se califica como de medio. Cabe resaltar que para ese momento la población seguía creciendo, y no existían normas restrictivas para la localización de actividades turísticas y de otro tipo sobre los lugares de alto riesgo. De igual manera se señala que el principal riesgo por inundación es el sector de Hacienda y Vega.

Haciendo referencia a la transformación del paisaje en el centro poblado La Mucuy, York (2007) realizó un estudio donde a partir de la interpretación de las variables cobertura natural y uso de la tierra, mediante el empleo fotografías aéreas, fueron generados los mapas de uso y cobertura para cada año. Estos mapas se trabajaron en formato digital, y fueron sometidos a procesos de cuantificación a partir del método de tabulación cruzada, permitiendo crear dos matrices de cambio, en las que se pudo observar las transformaciones que experimentó el área de estudio durante los períodos 1952-1989 y 1989-1998. Cabe destacar, que entre sus resultados se expresa una diversificación de las categorías de uso, ya que hubo una pérdida de áreas boscosas y a su vez aumentaron las áreas de ganadería, suelo descubierto, bosque ralo, entre otros cambios observados.

Posteriormente, Lacruz y Rondón (2008) realizaron el diagnóstico de la vulnerabilidad social ante amenazas por crecidas torrenciales en la cuenca de la quebrada La Mucuy, Municipio Santos Marquina, Mérida-Edo. Mérida. Se tiene una recopilación hemerográfica y etnográfica que permitió estructurar un método para cuantificar aproximadamente el grado de vulnerabilidad social ante desastres naturales. Enfatizan el estudio en que la mayoría de las infraestructuras ubicadas en la cuenca La Mucuy están expuestas a los eventos de crecida por su ubicación geográfica, cerca o a lo largo de las márgenes de las principales quebradas de dicha cuenca. En sus conclusiones señalan que los puentes que cruzan los ríos y que permiten la comunicación con otros subsectores han sido afectados por eventos de crecidas en años anteriores, ya que se han comportado como cuellos de botella donde se han represado árboles,

rocas y otros materiales que favorecen el desbordamiento de quebradas. Se tiene en cuenta el diseño y construcción de puentes de mayor amplitud y longitud.

En contraste con la investigación, Briceño y Molina (2008) realizaron la actualización de la cartografía geológica base del sector Tabay (Carta 5941 I NE), utilizando como soporte el mapa topográfico. De igual manera, se llevó a cabo un levantamiento de la información geológica para el área de estudio, con apoyo de fotografías aéreas e imágenes satelitales; posteriormente esta información fue confirmada con los respectivos chequeos de campo.

Seguidamente, Hernández y Serrentino (2009) evaluaron el impacto sobre el río Chama en su cuenca media-alta asociada a la extracción de áridos (arenas y gravas), sector El Palón, Tabay Edo. Mérida. En su estudio, se describe una caracterización de los materiales extraídos en el sector El Palón, denotando la importancia de realizar procedimientos responsables y correctos a la hora de extraer áridos (arenas y gravas) para llevar a cabo actividades relacionadas al funcionamiento de la industria de la construcción de cualquier país. Se recurre a la necesidad de evaluar los impactos físicos generados por dicha extracción, así como a establecer estrategias hidráulicas, hidrológicas, geológicas, y de otras índoles para aminorar la explotación de este recurso natural. En algunas de sus recomendaciones establecen medidas de protección para los puentes que se encuentran en el área de influencia perteneciente al proceso de incisión del cauce, se menciona la colocación de un enrocado transversal y enterrado cuya cota de coronamiento coincide con la cara superior de la zapata en que se apoyan las columnas del puente.

Más recientemente, Gallardo y Sánchez (2012) realizaron el registro de caudales y la evaluación hidráulica del Río La Mucuy. El objetivo principal de dicho estudio se enmarcó en determinar la capacidad hidráulica de La Mucuy Alta, mediante la medición de caudales empleando el método de aforo químico, donde también se estimó el estudio de las características de estabilidad del río. Finalmente, obtienen la curva de gasto de la quebrada La Mucuy en su cuenca alta, así como el correspondiente ajuste por medio de un análisis de regresión lineal simple, el cual sirve de apoyo para siguientes trabajos relacionados con la obtención estadística de caudales.

## **2.4 Bases teóricas y definición de términos básicos**

Considerando los estudios detallados anteriormente, y enmarcando la presente investigación en los términos referentes a la importancia de evaluar y generar información pertinente a las crecidas en cauces fluviales, se tienen algunos conceptos y características relevantes que permiten una mayor comprensión entre muchos de los parámetros que se evalúan tanto hidrológica como hidráulicamente en una cuenca. Es por ello que se definen a continuación las siguientes nociones:

### **2.4.1 Evaluación hidrológica.**

Consiste en la recopilación de información referente a parámetros hidrológicos para el caso de una cuenca en particular, cuyo propósito general es el de determinar los flujos de escorrentía existentes y los que pudieran ocurrir en tiempos futuros para distintos períodos de retorno. Secuencialmente, se requiere de la delimitación de la cuenca principal y las subcuencas que conforman el área de estudio; así como determinar los parámetros físicos y clasificación de los tipos de suelo en las subcuencas, determinación de los usos de la tierra, entre otros factores que propician la generación de resultados.

Asimismo, se debe contar para el estudio con la información pertinente al análisis del evento a considerar, tal como el tiempo de concentración del cauce más largo dentro de la cuenca y las intensidades máximas de lluvia, para así generar los hietogramas de precipitación correspondientes a la estación pluviográfica con mayor grado de incidencia sobre la zona prevista. Lo ideal es contar con las duraciones para al menos 1,3,6,9,12 y 24 horas, bajo los respectivos períodos de retorno de 25, 50 y 100 años. En concordancia, según sea el caso, se estiman de esta forma los niveles de crecida que podrían causar desborde, o bien sea estimación de las manchas de inundación (en caso de un río de llanura), cuyos resultados propician así la zona afectada por el aumento de dicho nivel sobre el cauce en consideración. Bajo esta perspectiva, se hace uso de un software que genere los caudales extremos (pico), cuyas magnitudes servirán de base para el estudio hidráulico.

### **2.4.2 Evaluación hidráulica.**

El estudio hidráulico se alimenta de los resultados obtenidos en el estudio hidrológico, y es por ello que durante dicha evaluación se obtiene una estimación de las capacidades hidráulicas de los tramos analizados, como los son, por ejemplo, los calados de agua, anchos y velocidades de flujo, así como las áreas afectadas por desborde (en caso de que lo produzca una crecida). Particularmente, Barros y Vallejo (2007), destacan lo siguiente:

La evaluación hidráulica consiste en la determinación de las capacidades hidráulicas de los tramos. Esta evaluación se hace con cálculos sencillos empleando la información geométrica, la característica del material del cauce, la información topográfica y la hidrológica. La capacidad hidráulica se determina para la condición de flujo uniforme o, si se prefiere, mediante el cálculo del perfil de flujo, para cada una de las crecientes correspondientes a los períodos de retorno de interés en los Planes Integrales de Ordenamiento y Manejo (p. 12).

El cálculo realizado para esta evaluación, dependerá de la condición de flujo escogida en el análisis, la cual puede ser condición de flujo uniforme o también flujo gradualmente variado. Esta elección dependerá de los datos disponibles, metodología a usar, herramientas de cálculo, entre otras consideraciones, sin dejar de lado que siempre debe estar justificada con criterio ingenieril. No obstante, las herramientas computacionales que se emplean actualmente para la evaluación hidráulica, muchas veces poseen limitaciones que restringen su aplicación en los tramos de alta pendiente, sobre todo si la condición de flujo escogida corresponde a flujo variado, que lógicamente es una aproximación más real de lo que se tiene; razón por la cual el criterio ingenieril incide significativamente en los resultados a obtener.

### **2.4.3 Eventos normales y extremos (Extreme and normal events).**

En lo que respecta a la parte hidrológica, los eventos extremos pueden ser causados por sucesos meteorológicos, es por ello que, desde el punto de vista hidrológico, las cuencas hidrográficas pueden verse afectadas por eventos extremos tales como tormentas severas, crecientes y sequías (Chow *et al.*, 1994). Generalmente, los eventos normales definidos desde el punto de vista meteorológico, geomorfológico y en términos de lluvias concentradas, son aquellos que ocurren cada año, cuyos efectos no presentan grandes intensidades de

precipitación, además de que el evento se adapta a las condiciones de equilibrio del sistema, las lluvias provocadas durante estos eventos pocas veces cubren toda la superficie de la cuenca afectada (Starkel, 1976, tomado de Delgadillo 2014).

Por otro lado, cuando se habla de eventos extremos se hace referencia a fenómenos que pudieran alterar desde el punto de vista natural la dinámica de un sistema, ya que las intensidades y profundidades de precipitación ocurren rara vez, y al ser de gran magnitud generan cambios importantes en el relieve del lugar, así como nuevos procesos erosivos. En este sentido, Delgadillo (2014), enfatiza la siguiente información:

Los dos términos esbozados hacen diferencia a dos conceptos disímiles y contrastantes, así en los eventos normales la frecuencia es anual y donde los procesos de sucesión ecológica tienden a lograr o alcanzar la madurez de los ecosistemas sin que se produzcan alteraciones importantes; mientras que los eventos extremos efectivamente sí pueden perturbar el equilibrio de las vertientes y generar alteraciones considerables en una comunidad clímax (p. 44).

Particularmente, existen ciertos términos que suelen confundirse tales como “crecida” e “inundación”, de los cuales se detallan sus características, así como también definiciones respectivas al flujo de detritos, abanicos aluviales, usos de la tierra entre otros. Entre los términos que se mencionaron se tienen:

#### **2.4.4 Crecidas o avenidas.**

De manera general, este término se refiere a la elevación del nivel de un curso de agua significativamente mayor que el flujo medio de éste. Las características que normalmente se presentan durante la ocurrencia de una crecida, es que el caudal se incrementa en grandes proporciones, tal que, el lecho del río puede resultar insuficiente para contenerlo; cuando esto ocurre, el agua desborda el lecho, e invade un espacio mucho mayor conocido como llanura o planicie aluvial. De manera conceptual se tiene la siguiente información:

El concepto de crecida, una avenida o crecida de un río, también llamada popularmente riada, es un proceso natural, sin periodicidad y de grandes consecuencias ambientales, constituido por un incremento importante y repentino de caudal en un sistema fluvial. Lleva consigo un ascenso del nivel de la corriente, que puede desbordar el cauce menor para ocupar

progresivamente el cauce mayor, hasta alcanzar un máximo o punta de caudal o caudal-punta y descender a continuación (Ollero, 1996, p.262).

Subsiguientemente, puede citarse de igual manera a Garzón (1987) quien expresa que “Son situaciones de estrés hídrico, sucesos hidrogeomorfológicos bien muy concentrados localmente, bien generalizados a nivel de cuenca, en los que el incremento de caudal supone un incremento de los flujos de energía (inputs y outputs) a través del sistema, que necesita estos procesos extremos para su propio equilibrio dinámico”. (p. 06)

Las definiciones que componen al término vienen acompañadas de otros factores que influyen durante el desarrollo de una crecida, sin embargo, existen diferencias entre términos similares, por lo cual se debe prestar atención cuando se describen estos eventos. En virtud de lo anteriormente mencionado, es relevante señalar que:

Para definir un proceso hidrológico como crecida es imprescindible diferenciarlo respecto de cualquier proceso de aguas altas ordinarias. Los hidrólogos no se han puesto de acuerdo al respecto, y suelen establecer el umbral en una cifra teórica resultante de multiplicar por 3, por 5, a veces por 10, el caudal medio anual. Para geógrafos como FRÉCAUT (1964) aguas altas son elevaciones anuales y relativamente regulares, mientras las crecidas son por definición excepcionales e irregulares, aunque precisamente suelen acontecer dentro del período de aguas altas. GUILCHER (1965) advierte de la dificultad de establecer la diferenciación, especialmente en sistemas fluviales de llanura alimentados por la fusión nival (Ollero, 1996, p.265).

Tomando en cuenta lo anteriormente expuesto, existen diversos tipos de crecientes o crecidas dependiendo de la dominancia del caudal líquido o sólido en el evento respectivo. Se mencionan los tres tipos de crecidas, según Hernández (1973):

- a) Crecidas no torrenciales.
- b) Crecidas torrenciales.
- c) Aludes de tierra o lavas torrenciales.

Para el presente caso de estudio, interesa describir las crecidas torrenciales, ya éstas se presentan en zonas de alta montaña, y a veces en colinas. Se caracterizan porque además de que el caudal líquido es extraordinario, también lo es el caudal sólido, siendo el

sedimento en suspensión y principalmente el arrastre del lecho los componentes dominantes.

Generalmente, este término suele confundirse con inundación, por lo que es importante diferenciar ambos significados, ya que dependiendo de las condiciones del flujo podrá determinarse de una u otra manera, tal y como se indica en la siguiente definición:

#### **2.4.5 Inundación.**

En lo que respecta a una inundación, ésta ocurre cuando las aguas cubren un terreno; en tal sentido, Whittow (1988) define el proceso como: “es la sumersión bajo el agua de una zona terrestre que normalmente no está cubierta por la misma, debido a un cambio relativamente rápido del nivel de la masa de agua en cuestión” (p.89).

Conceptualmente, López (2000) explica que el término inundación se refiere al “proceso de desbordamiento de las aguas de un río fuera de su canal natural o artificial, con anegamiento progresivo de superficies extensas, que puede afectar los territorios circundantes al cauce durante días, semanas o meses”. Asimismo, destaca en su definición que la inundación corresponde a un fenómeno generalmente producido en planicies aluviales y que se desarrolla lentamente, con excepción de aquellos casos que son consecuencia de la ruptura de presas o diques marginales.

No obstante, cabe destacar que en inglés se emplea el término “flood” para denotar tanto inundaciones como crecidas, pero no todas las crecidas producen inundaciones y no todas las inundaciones proceden de crecidas de sistemas fluviales. Lo que generalmente ocurre es que mientras las crecidas siempre tienen lugar en sistemas fluviales, aunque su mecanismo y sus efectos no afectan sólo a los cauces, las inundaciones pueden producirse por desbordamiento de un cauce, pero también por elevación del nivel del mar o del nivel freático, así como dificultades de drenaje, represamientos, entre otros factores. Por otro lado, en las crecidas fluviales las inundaciones reducen la punta de caudal, ya que expanden el flujo y ralentizan el paso del agua, retardan la descarga, constituyendo por tanto una laminación natural de la crecida.

Así pues, como punto importante podría concluirse de manera general, que las crecidas o avenidas son aquellas producidas en un sistema fluvial, es decir, flujo torrencial enmarcado en características físico-naturales de alta pendiente, granulometría y vegetación bajo esas condiciones; mientras que las inundaciones más bien se refieren a lugares llanos, de baja pendiente con características granulométricas, suelos y vegetación diferentes.

#### **2.4.6 Usos de la tierra y cobertura vegetal.**

Uno de los parámetros importantes para el presente estudio se refiere a todo aquello que ocupa la porción de superficie en estudio, y este concepto se generaliza en los usos que se le dan a la cobertura vegetal, y los fines para los cuales aún en día se mantienen. La cobertura puede originarse de ambientes naturales, producto de la evolución ecológica, ya sea bosque, sabana, lagunas, entre otros, o a partir de ambientes artificiales de origen antrópico tales como cultivos, represas, y ciudades (Martínez, 2004).

Adicionalmente, podría asignarse a este concepto el empleo o aprovechamiento, temporal o permanente, que el hombre da a los diferentes tipos de cobertura en virtud de satisfacer necesidades materiales o espirituales. Debido a esto, algunos de los usos que normalmente se dan a la superficie terrestre son: agricultura, pesca, vivienda, recreación, extracción de madera, extracción de agregados, ganadería, entre otros usos.

Respecto al estudio que se presenta, este concepto quiere enfocarse en los usos actuales que presentan las adyacencias en la cuenca baja de La Mucuy, con la finalidad de observar que sucedería bajo distintos escenarios de cambio; apreciar las variaciones que exterioriza el terreno y sus posibles modificaciones, bajo el efecto de un desborde. Para ello, es necesario el análisis multitemporal de la zona, con la ayuda de la cartografía, y material que será explicado más adelante.

#### **2.4.7 Abanicos aluviales (aluvial fans).**

Este término es muy empleado cuando se hace referencia coloquialmente a los conos de deyección, es por ello que entre algunas de las definiciones usuales se hace mención a la

formación de terreno que presenta una moderada inclinación en forma de abanico, la cual se origina a través del paso de miles y millones de años mediante el depósito de materiales sedimentarios que son el producto de la erosión originada en las zonas de la base de cordilleras montañosas. En este sentido, Ferrer y Dugarte (2009) describen un abanico aluvial como un depósito que ha sido transportado y acumulado, ya sea por procesos fluviales o por una mezcla de movimientos de masa tipo flujo de detritos (lodos), o a su vez por torrentes de detritos. Por otro lado, Delgadillo (2014), explica lo siguiente:

Los abanicos pueden experimentar procesos de avulsión, que implica un desplazamiento lateral del cauce de su canal principal para conformar un nuevo curso. Según Ferrer y Dugarte (2009) este tipo de procesos genera una de las mayores amenazas en los abanicos aluviales, constituyendo un factor de difícil predicción en el que es muy frecuente que el relleno de los cauces genere un abandono episódico y de esta forma se desarrolle uno nuevo, lo que a su vez produce condiciones de inestabilidad (p. 41).

Apreciando lo anteriormente expuesto, se muestra que estas formaciones, al estar conformadas por ambientes sedimentarios, resultan atractivos para el establecimiento y asentamiento de actividades socioeconómicas, lo cual aunado a sus bajas pendientes y cercanía a los cuerpos de agua, deriva a la necesidad de desarrollar actividades de índole agrícola, residencial, extracción de agregados, entre otros usos; implicando entonces que existan problemas relacionados a la distribución de precipitaciones y actividad sísmica, lo cual fue mencionado anteriormente, ya que estas formas del terreno son muy sensibles a experimentar violentas tasas de acumulación de sedimentos y procesos de avulsión.

#### **2.4.8 Flujo de detritos (debris flow).**

Esta denominación también recibe el nombre de colada de detritos, y generalmente se refiere a un flujo con elevada cantidad de materiales detríticos, es decir una mezcla de granulometrías diferentes que abarcan gravas, bloques y fragmentos rocosos, en lo que podría denominarse una matriz de arena, limo y arcilla, donde a su vez se encuentra la presencia de agua y aire en menor proporción (Corominas *et al.*, 1996). En el artículo realizado por Olivero, Aguirre y Moncada (2005), señalan que “el flujo de barros y escombros consiste en el

desplazamiento rápido y violento de masas de agua cargadas de sólidos de granulometría variada (arcilla, arena, gravas y piedras) provenientes de las nacientes de los cursos de agua en áreas montañosas inter fluviales” (p.26).

Como característica importante de este concepto para el presente estudio, es que los flujos de detritos normalmente ocurren a lo largo de canales o cauces con pendientes pronunciadas, y que a su vez se combinan por inestabilidad de segmentos del cauce en altas pendientes. Con base en unos de los propósitos del presente trabajo, se tiene el uso y manejo de algunos programas que permiten una mayor comprensión acerca del comportamiento de los eventos de crecida, así como también sobre la visualización de las zonas de desborde y la modificación de los parámetros hidráulicos del cauce bajo este efecto. Para este caso en particular, los siguientes programas permiten simular el comportamiento hidrológico de una cuenca en estudio, áreas de crecida de una zona determinada, así como los diversos factores que influyen en el cambio de uso de la tierra, patrones y características hidráulicas bajo un evento de crecida. Entre ellos se tienen:

#### **2.4.9 Modelo HEC-HMS.**

Descrito en inglés como el *Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System*, fue desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (US Army Corps), y tiene como función principal simular la respuesta que tendrá la cuenca de un río en lo que respecta a su escurrimiento y escorrentía superficial, debido a la ocurrencia de una precipitación y considerando ciertas pérdidas de agua. De manera general, corresponde a un modelo paramétrico que se basa en la estimación de hidrogramas de salida de una cuenca a partir de condiciones extremas de lluvia. Por otro lado, el modelo funciona también para simulación continua, es decir, trabaja con caudales promedios; pero para los efectos del presente trabajo interesa la generación de valores (caudales) máximos. Respecto a las funciones del programa, podrían nombrarse algunas como lo son: el diseño hidrológico que sirve para la obtención de valores previos al diseño de obras, análisis de avenidas (concerniente a cauces de crecida-crecientes), aplicaciones para las manchas de inundación, cambios de uso de la tierra, hidrología de áreas urbanas, diseño de riego y drenaje, operación de sistemas hidrológicos, entre otros.

En este sentido, al realizar un proyecto en HEC-HMS se agrupa la información que representa el sistema hidrológico en estudio ilustrada en la Figura 2.1, lo que podría desglosarse de la siguiente manera: 1) el modelo de la cuenca, 2) información de las diferentes subcuencas que conforman todo el sistema (cuenca en estudio), 3) el modelo meteorológico que contiene los registros de pluviógrafos y pluviómetros, así como tener datos de precipitaciones teóricas o tormentas de diseño y 4) especificaciones de control que relacionen los tiempos de simulación y optimización. Asimismo, el programa permite el uso de varias subcuencas y otros elementos hidrológicos presentes en el lugar de estudio, que podrían ser: tramos de quebradas y ríos, embalses, obras de toma, fuentes, uniones, derivaciones, sumideros, entre otros; los cuales pueden interconectarse entre sí para dar una conceptualización del sistema real.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

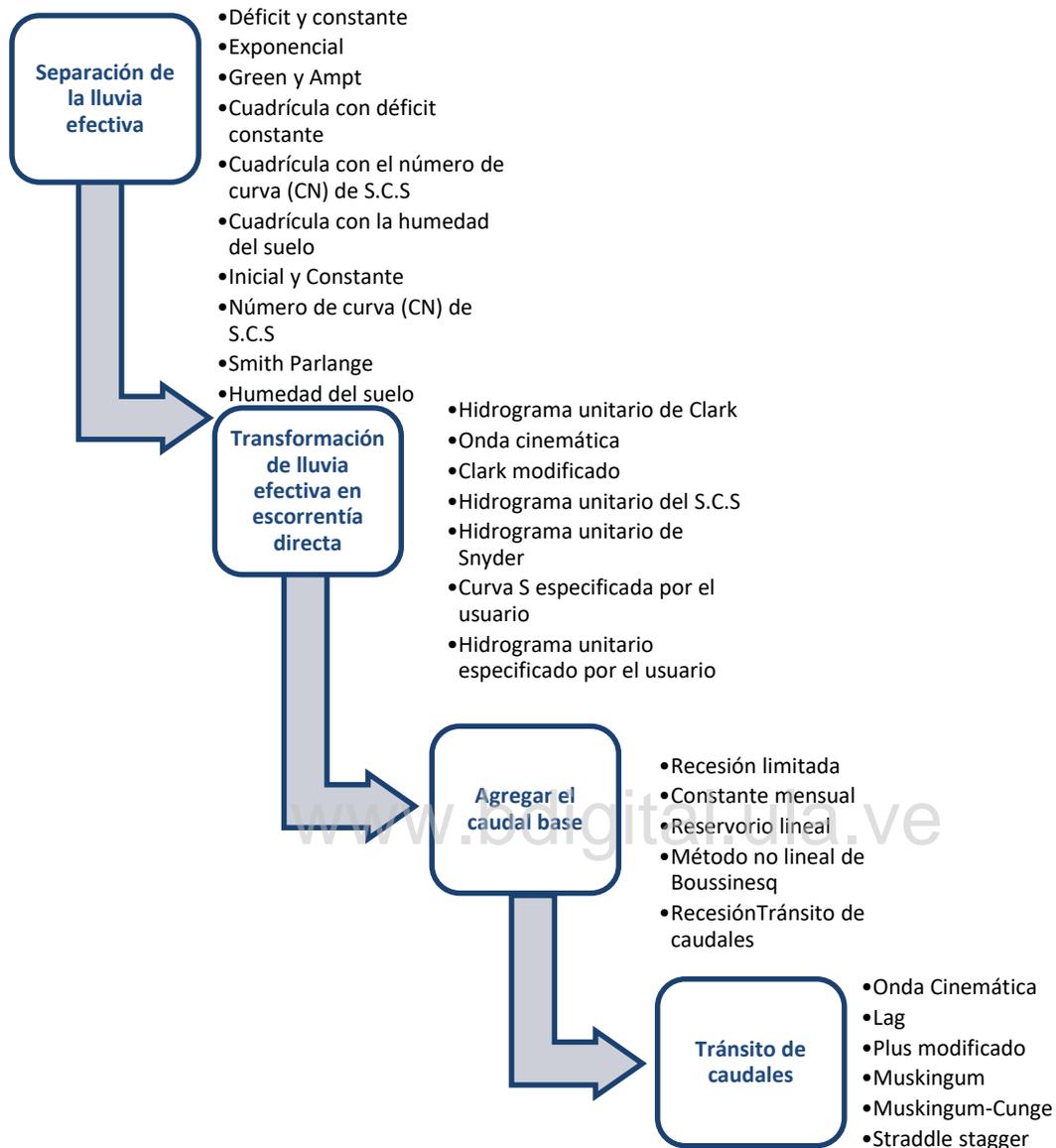


Figura 2.2.1 Fases del programa HEC – HMS. Modificado de Delgado (2014).

#### **2.4.10 Modelo HEC-RAS y su extensión HEC-GeoRAS.**

El programa HEC-RAS fue desarrollado por el *Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center* de los Estados Unidos. Este modelo realiza simulaciones de áreas inundables, detección de zonas de desborde, perfiles longitudinales, estudios y evaluaciones de avenidas (crecidas), introducción de obras hidráulicas en tramos de río, cálculo de encauzamientos, entre otras aplicaciones. Además de ello, el modelo permite tomar en cuenta la presencia de puentes, alcantarillas, vertederos, encauzamientos y estructuras en el cono de deyección.

Los cálculos de este modelo se basan en la solución de la ecuación unidimensional de la energía, y, cuando se presenta el caso de movimiento rápidamente variado es utilizada la ecuación de variación de cantidad de movimiento. Adicionalmente, las pérdidas de carga debidas a contracciones o expansiones, según sea el caso, son evaluadas con un coeficiente proporcional a la variación de cantidad de movimiento y para las pérdidas de energía por fricción mediante el coeficiente de Manning.

Cuando se hace referencia a la extensión para el software ArcGis, llamada HEC-GeoRAS, consiste en una herramienta desarrollada conjuntamente por el *Hydrologic Engineering Center* (HEC) del *United States Army Corps of Engineering* y el *Environmental System Research Institute* (ESRI). Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, puede decirse que dicha extensión consiste en un conjunto de procedimientos, herramientas y utilidades especialmente diseñadas para procesar datos georreferenciados que permiten bajo el entorno de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), facilitar y complementar el trabajo con el HEC-RAS. Para integrar esta información, cabe destacar que el HEC-GeoRAS crea un archivo para importar a HEC-RAS datos de geometría del terreno, incluyendo cauce del río, secciones transversales, entre otros datos. Posteriormente, los resultados obtenidos de calados (profundidades de agua) y velocidades se exportan desde HEC-RAS a ArcGis y pueden ser procesados para obtener mapas de inundación y riesgo (Nanía y Molero 2007).

Respecto a la formulación matemática del programa, Mora (2001), explica que el HEC-RAS calcula la cota de la superficie del agua (y por tanto profundidad) en cauces naturales o artificiales abiertos. Actualmente, la versión 5.0 del HEC-RAS, permite realizar modelos en dos

dimensiones, mediante una herramienta conocida como RAS Mapper para flujo permanente y no permanente.

Dicha herramienta, básicamente adecúa la malla 2D al terreno subyacente para la evaluación de grandes llanuras de inundación. Entre algunas de las particularidades destacadas, se tiene que, para este nuevo uso, el tiempo que tarda en dar respuesta el programa dependerá del área considerada (dimensión de la malla). Para complementar lo anteriormente dicho, Lluén (2015) expresa en su artículo que la nueva herramienta con flujo en 2D “basa su aplicación en las ecuaciones de Onda Difusiva y Saint Venant (a criterio del usuario) las cuales resuelve mediante el algoritmo de Volúmenes Finitos Implícitos”.

Entre uno de los primeros usos dados a este programa se enmarca el trabajo realizado por Dávila y Peñuela (2002), donde realizaron la evaluación de amenaza hidrológica en el cono de deyección de la quebrada La Fría en el estado Mérida, haciendo uso de la aplicación de modelos hidrológicos como el programa EVENTO (creado por Duque, 1983) y CAUDAL3 (creado por Mintegui y Robredo, 1993), para estimar los hidrogramas de crecida esperados para distintas probabilidades de ocurrencia; así como también fue usado el modelo hidráulico HEC-RAS, para la evaluación de las correspondientes zonas de inundación o desborde, es decir la determinación de la amenaza hidrológica (Mora, 2001).

#### **2.4.11 Modelo FLO-2D.**

Es un modelo hidrológico-hidráulico bidimensional capaz de simular la propagación de crecidas o flujo de escombros (detritos) en cuencas hidrográficas y su interacción con las diferentes estructuras y obstrucciones que caracterizan las zonas antropizadas, tales como puentes, alcantarillas y diques. Es un modelo de diferencias finitas que integra la ecuación de momento en forma completa, utilizando un esquema geométrico con celdas de dimensión constante y finalizando en el cálculo celda por celda y en 8 direcciones de las variables hidráulicas (profundidad, velocidad y caudal). Se clasifica en dos tipos:

- FLO-2D Basic: realiza verificaciones hidráulicas preliminares, estudios de factibilidad y también se usa para actividades académicas.

- FLO-2D PRO: aparte del Basic, simula transporte de sedimento, flujo de detritos o rompimiento de presas.

El modelo bidimensional de diferencias finitas FLO-2D (O'Brien *et al.*, 1988) simula flujo de fluidos no-newtonianos, como aludes torrenciales en conos de deyección. Permite simular flujos en topografías complejas, tales como áreas urbanizadas, terrazas y conos de deyección; así como el intercambio de fluido entre los canales y el cono de deyección. Puede modelarse flujo de agua y flujos hiperconcentrados (avenida de lodo, flujo de lodo y flujo de detritos). El modelo considera el fluido homogéneo (una sola fase) de concentración variable; esto significa que internamente no se hace distinción de los tamaños de sedimento (Castillo *et.al*, 2006, p.92).

En virtud de lo antes mencionado, el programa requiere como datos de entrada la topografía digital del terreno, la geometría del canal, valores estimados de la rugosidad del canal y de la planicie de inundación, hidrogramas de entrada (líquidos y sólidos); también son necesarios los datos de precipitación y propiedades reológicas de la mezcla agua-sedimento. Cabe destacar que la topografía para la modelación consiste en el detalle del cono de deyección y parte del canal adyacente, mientras que el hidrograma líquido calculado por procedimientos hidrológicos normales, es utilizado en la modelación de flujos hiperconcentrados. Finalmente, los parámetros reológicos (viscosidad y esfuerzo de cedencia) son estimados de manera indirecta, comparando muestras de la quebrada con muestras tipo.

En el presente trabajo, resulta importante el uso de los sistemas de información geográfica como complemento a todos los términos descritos anteriormente, es por ello que se determinan algunas características que abarcan este concepto tal como se indica a continuación:

#### **2.4.12 Consideraciones de los SIG.**

En la actualidad son muy manejados los sistemas de información geográfica, en este sentido, Bosque (1992) explica que representan sistemas computarizados que permiten la captura, almacenamiento, recuperación, análisis y presentación de información espacial y descriptiva; es por tanto una técnica donde se integran datos gráficos y textos, en una base de datos computarizada (Citado en Dávila y Requena, 2004).

En el marco de las necesidades que requiere el desarrollo de estos sistemas, se implementa el análisis y manejo de información espacial, lo que hace de estas herramientas informáticas un entorno adecuado para el diagnóstico de sensibilidad en los modelos mediante la manipulación de variables, tal como es el caso del estudio de una cuenca con distintas escalas, resoluciones, y sus efectos en la exactitud del modelo.

Conceptualmente, Parra y Salcedo (2015), detallan que:

La diferencia que existe entre un SIG y otros paquetes de software gráficos reside en que el SIG es esencialmente una base de datos espacial, lo que le otorga una cualidad incomparable en el desarrollo de análisis enfocados a resolver problemas reales que afectan el espacio geográfico (p. 95).

#### **2.4.13 Transformación lluvia-escorrentía.**

De las etapas más importantes dentro de la hidrología superficial es el poder calcular la cantidad de escorrentía que se va a producir cuando ocurre una precipitación determinada. Es un proceso bastante complejo basado en el cálculo del hidrograma que va a generar un hietograma. Actualmente existen muchas herramientas tecnológicas que automatizan este proceso mediante un modelo de simulación (tal como se nombró anteriormente el software HEC-HMS, por ejemplo), sin embargo, es importante conocer la zona y caracterizar algunos de sus aspectos más importantes, como lo son: subcuencas, áreas, longitudes de cauces, obstrucciones, vegetación, tipos de suelo, entre otros. De manera explicativa, las fases para este proceso se resumen en:

- 1) Separación de la lluvia neta, para ello se debe calcular la parte de la precipitación caída que va a generar escorrentía superficial.
- 2) Calcular la escorrentía producida por esa precipitación o lluvia neta, existen varios métodos de cálculo, como por ejemplo hidrograma unitario, formula racional, hidrograma unitario adimensional SCS, hidrograma unitario de Clark...
- 3) Calcular la variación del hidrograma a medida que el flujo circula a lo largo del cauce. A esto se le denomina “tránsito de avenidas” (*flood routing*).
- 4) Opcionalmente, y teniendo en cuenta la geometría del cauce en una zona específica, se deben calcular las áreas que quedarán inundadas cuando el hidrograma calculado en los

pasos anteriores pase por una sección determinada (se emplea algún software de simulación hidráulica como por ejemplo HEC-RAS, IBER, DELFT3D...)

Adicionalmente, existe una relación precipitación-escorrentía donde deben tomarse en cuenta aspectos tales como: tipo de caudal que se quiere calcular (caudales máximos, medios), la lluvia a considerar que llega al sistema en estudio (la lluvia neta que queda después de considerar intercepciones producidas por las superficies, la vegetación, infiltración, evapotranspiración...); y finalmente de se debe tener presente el diseño hidráulico a realizar, finalidad, funcionabilidad y factibilidad (Ruiz y Martínez, *sf*).

#### **2.4.14 Modelos de depósitos, modelo de onda cinemática.**

La modelación del proceso de transformación lluvia-escorrentía también puede efectuarse a través de la aplicación de las ecuaciones del movimiento del agua sobre la superficie de la cuenca. Esto permite el conocimiento en detalle de las características del flujo sobre la superficie de la cuenca, sin embargo, es necesario tener información de dicha superficie con el suficiente detalle espacial. La superficie de la cuenca es simulada a través de porciones de plano inclinado, definidos por una rugosidad, una longitud, un ancho y una pendiente; asimismo se requiere de las características del suelo, ya que se requiere de conocer la tasa de infiltración del mismo.

Bajo este orden de ideas, el comportamiento del flujo sobre estos planos inclinados se considerará equivalente al comportamiento del mismo sobre la superficie de la cuenca en estudio. Matemáticamente hablando el método trabaja con las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento (o equilibrio de fuerzas), donde finalmente mediante la combinación de estos conceptos se obtiene una ecuación que se resuelve proporcionando una condición de contorno, la de aguas arriba (Ruiz y Martínez, *sf*). Finalmente, el caudal unitario “q” obtenido a partir de esta metodología es el resultante en el extremo aguas abajo del plano inclinado y será el que reciba, por ejemplo, el cauce principal de alguna cuenca en estudio. Conceptualmente, partiendo de Chow *et al.* (1994) se determina que:

El modelo de onda cinemática del proceso lluvia-escorrentía ofrece la ventaja, sobre el método del hidrograma unitario, de que es una solución de las ecuaciones físicas que rigen el flujo superficial, pero la solución es solamente

para un flujo unidimensional, mientras que el flujo superficial real en la cuenca es bidimensional ya que el agua sigue el contorno superficial del terreno. Como consecuencia, los parámetros de onda cinemática, tales como el coeficiente de rugosidad de Manning, deben ajustarse para producir un hidrograma de salida realista (p. 299).

#### **2.4.15 Consideraciones básicas sobre medidas estructurales.**

Subsiguientemente, entre otros de los conocimientos importantes dentro del desarrollo principal del tema, se tiene la escogencia de diferentes medidas estructurales, que pueden ser utilizadas a lo largo de un cauce, con propósitos que van a depender del caso en estudio. En el marco de las crecidas, existen algunas medidas que pudieran utilizarse, dentro de las cuales se mencionan algunas, específicamente para el caso de control de torrentes, así como también estabilización de cauces producto de la extracción de áridos en sus adyacencias. Según la Comisión Nacional del Agua (2011), se tienen las siguientes:

- Construcción de una presa aguas arriba.
- Construcción de bordos marginales.
- Dragado y limpieza de cauces.
- Rectificación de cauces.
- Retención de sedimentos sobre el cauce, o en la cuenca aguas arriba.
- Construcción de cauces paralelos de alivio.

Estas medidas son apenas algunas, que pudieran desarrollarse para el control de torrentes. Cada una de ellas, tiene características particulares que inducen a la mitigación de algún problema originado por sedimentación, crecidas, o monitoreo de cuencas.

### CAPÍTULO 3

#### MARCO METODOLÓGICO

Existen diversos procedimientos a emplear para realizar una evaluación hidrológica e hidráulica. A medida que avanzan las nuevas tecnologías informáticas junto con los sistemas de información geográfica, se hace más extenso y diverso escoger que método aplicar. Cabe destacar que cada cuenca posee características particulares, en cuanto a condiciones físicas, hidrológicas, climáticas, topográficas, geológicas, entre otros aspectos; no obstante, en algunas oportunidades se observan ciertos patrones que pudieran repetirse dependiendo de las similitudes que se tengan para cada caso en particular. Tomando en cuenta lo anteriormente expuesto, al desarrollar el estudio desde la perspectiva hidrológica e hidráulica para una cuenca en específico, se contribuye a una mejor comprensión del sistema en general, donde partiendo del uso de las herramientas actuales (softwares, modelos numéricos, simuladores, SIG...) se logra obtener una aproximación bastante realista de lo que pudiera ser, por ejemplo, como es el caso del presente trabajo, la ocurrencia de desbordes del río La Mucuy (parte baja, en su confluencia con la quebrada Ño León), o también representar cartográficamente la extensión de áreas o terrenos que podrían verse afectados ante un evento extremo, y zonificar de esta forma los sitios más vulnerables.

Es así, como a través de la combinación de algunos programas se genera información relevante de lo que ocurre alrededor de un cauce de tipo torrencial, cuyo aporte representa un avance significativo a los planes de ordenación urbanística que se tengan actualmente, y a su vez, conlleven a una planificación territorial apropiada que logre un desarrollo sustentable.

Esquemáticamente se observan algunas de las fases más importantes desarrolladas para el presente trabajo, tomando en consideración que hubo actividades que se realizaron simultáneamente, mientras que algunos procesos fueron secuenciales, siguiendo un orden específico. Inicialmente, se enfatizó en la búsqueda de un modelo de elevación digital para la cuenca (DEM), se escogieron las estaciones pluviográficas cercanas a la zona en estudio, determinando así su área de influencia; por otro lado, el análisis de frecuencias fue necesario

para obtener el criterio bajo el cual se comportaron las intensidades máximas de lluvia analizadas. Posteriormente, se obtuvo un hietograma de lluvias que dio paso a la generación de un hidrograma de crecidas siguiendo la metodología del bloque alterno (haciendo uso del software HEC-HMS v4.1 y con ayuda de la extensión para ArcGis v10.2.2 denominada HEC-GeoHMS), y así fueron determinados los caudales picos para diferentes períodos de retorno. De igual manera, se incorporó la transposición de la tormenta del río Chama ocurrida el 28 de abril de 1972, con la finalidad de analizar la dinámica de la cuenca bajo dicha tormenta y cuyos datos hidrometeorológicos fueron proporcionados de trabajos anteriores.

Es de importancia destacar que, los métodos bajo los cuales los programas realizaron los análisis fueron sustentados en las bases teóricas del presente trabajo, y más adelante en el presente capítulo se mencionan algunas de las metodologías utilizadas para el desarrollo final, las cuales no son más que obtener una representación cartográfica de las zonas de desborde producidas en el tramo de estudio, y de ser el caso, propiciar pre-diseño de medidas estructurales que contribuyan a mitigar daños en las adyacencias a la zona en cuestión. En este sentido, se hace alusión a la Figura 3.1, la cual esquematiza de manera detallada la información referente a este capítulo.

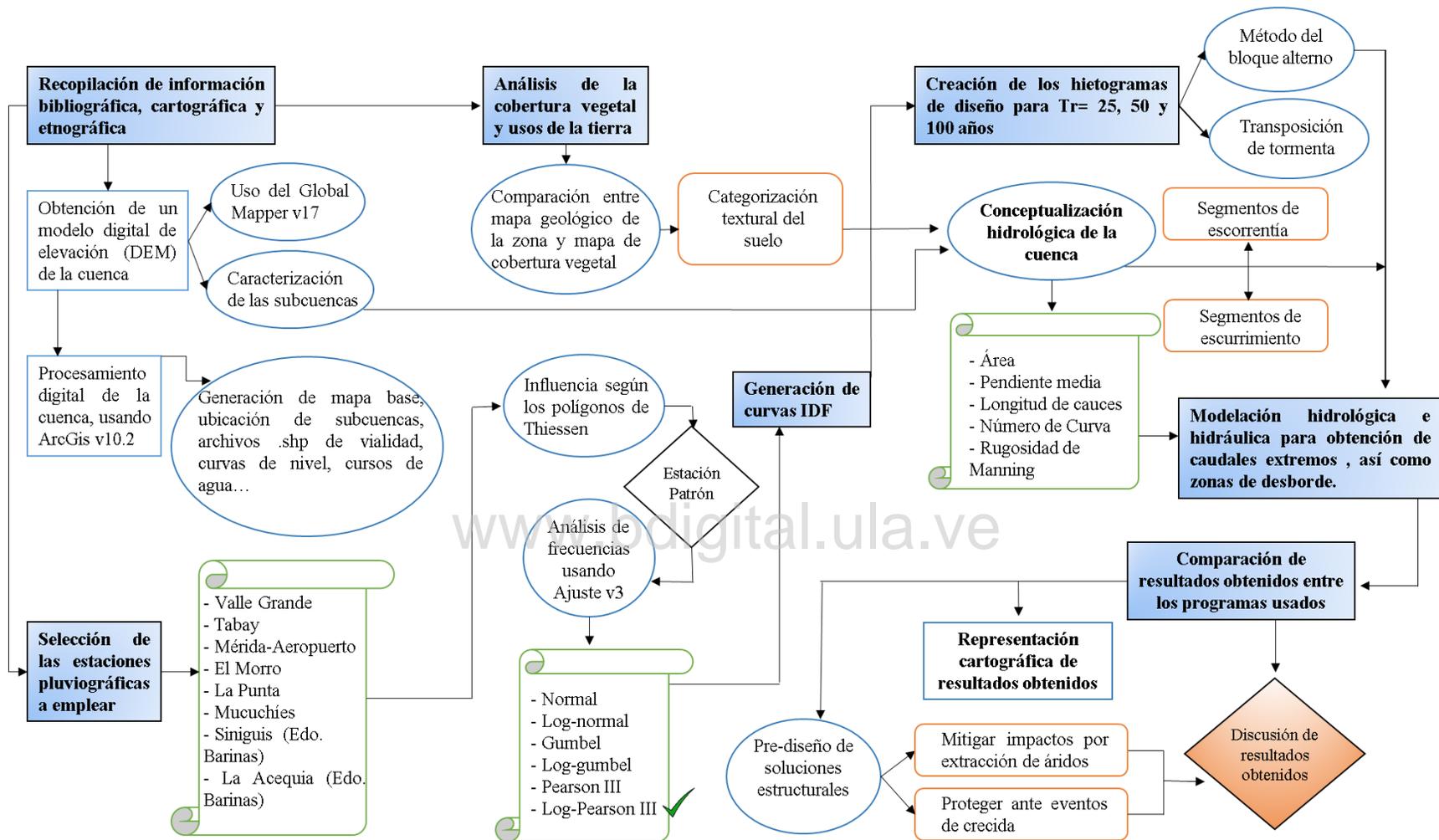


Figura 3.1 Esquema metodológico. Fuente: elaboración propia.

### 3.1 Recopilación de material e información bibliográfica, cartográfica y etnográfica

Inicialmente, fue requerida una búsqueda exhaustiva referente a las investigaciones realizadas dentro del área de estudio. La data de estos trabajos, radicó en la necesidad de generar información hidrológica principalmente para toda la cuenca. Es por ello que, los trabajos de investigación que abarcaron el tema principal de este estudio son bastante extensos, sin embargo, no se puede dejar de lado el hecho de resaltar las tecnologías actuales respecto a la búsqueda de información para el diseño hidrológico - hidráulico de algún proyecto en particular. En este sentido, surgió la necesidad de crear una metodología que permitiera comprender ciertos procedimientos de diseño y cálculo que son desarrollados bajo los softwares de aplicación mencionados anteriormente.

Bajo esta perspectiva, fueron necesarias las hojas cartográficas 5941 y 6041, correspondientes en parte al área en cuestión. Dicha información, fue obtenida de la cartografía nacional a escala 1:100000. Tomando en cuenta el área de interés pertinente, dichas hojas fueron georreferenciadas para posteriormente solapar sobre ellas la imagen satelital adecuada.

Siguiendo este orden de ideas, se hizo uso de la página <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/> bajo la denominación *Alaska Satellite Facility*, con la finalidad de obtener un modelo digital de elevación (DEM) adecuado para la zona. El satélite empleado fue el ALOS que significa *Advanced Land Observation Satellite (también llamado Daichi)*. Dicho satélite colecta imágenes de radar de todo el planeta cada 45 días aproximadamente a través de su sensor PALSAR (*Phased Array Type L-band Synthetic Aperture Radar*). Cabe destacar que el satélite ALOS tiene una mejor resolución espacial, con un tamaño de pixel de 12,5 m \* 12,5 m. Posteriormente, el DEM descargado fue procesado en el software Global Mapper v17 con el propósito de obtener las curvas de nivel que caracterizan dicho terreno de manera sencilla, y así determinar digitalmente la delimitación preliminar de las subcuencas objeto de estudio, teniendo curvas principales cada 200 m y secundarias cada 20 m; así como también la generación de los cursos de agua presentes.

Por otro lado, se realizó una investigación referente a los casos de crecida ocurridos en la zona de estudio. En este sentido, bajo diferentes autores y su recopilación de fechas, datos y otros parámetros de interés, se realizó una tabla resumen (etnográfica) con fechas importantes sobre la ocurrencia de eventos de crecida para la cuenca del río La Mucuy, abarcando cuenca alta, media y baja. Se hizo especial énfasis en el estudio realizado por Lacruz y Rondón (2008), de donde se tomaron la mayoría de los registros históricos obtenidos hasta el año 2007 en dicha cuenca.

### **3.2 Procesamiento digital mediante el ArcGis v10.2.2**

Para llevar a cabo este procesamiento, se hizo uso del software mencionado, donde a partir de la información anteriormente mencionada, se generaron en formato shapefile (.shp) las distintas capas correspondientes a: vialidad, cursos de agua (principales y secundarios), curvas de nivel (principales y secundarias), y se comenzó entonces con la delimitación de la cuenca. Para establecer la divisoria definitiva de la cuenca La Mucuy, se realizó un tratamiento en base a la topografía digitalizada, y fue analizada simultáneamente con el software Google Earth (solapando las hojas cartográficas 5941 y 6041), para observar mejor las cotas más altas del relieve, así como los detalles presentes en el terreno. Teniendo entonces la delimitación de la cuenca y la información desarrollada fue conformado un archivo con capas referentes a todas las características analizadas para la generación del mapa.

### **3.3 Selección de estaciones pluviográficas y sus características**

Las estaciones escogidas fueron aquellas que registraran máximos anuales, ya que se quieren obtener caudales extremos. Dentro de la selección se tienen 8 estaciones pluviográficas cercanas al área, las cuales fueron georreferenciadas en coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator) dentro del archivo generado. Esta información, se obtuvo del Ministerio del Ambiente para el estado Mérida, y también para el estado Barinas, con la finalidad de realizar la triangulación respectiva para los polígonos de Thiessen.

Respecto a las estaciones seleccionadas para el presente estudio, se tiene recopilada la siguiente información en la Tabla 3.1:

Tabla 3.1 Información referente a las estaciones escogidas.

Nombre de la estación	Serial	Ubicación			Años de Registro
		Norte (m)	Este (m)	Altitud (msnm)	
Valle Grande	3024	964159,61	270788,62	2515	1961-1995
Tabay	3038	955147,43	272298,84	1720	1961-1995
Mérida-Aeropuerto	3047	951314,64	259707,39	1479	1921-1992
El Morro	3080	934874,22	259492,07	1830	1962-1997
La Punta	8049	947292,34	259072,71	1300	1975-1997
Sinigüis	3230	929799,70	302607,45	600	1990-1998
Mucuchíes	3122	969583,97	290994,55	3100	1941-1985
La Acequia	3190	934462,73	311010,73	239	1970-1998

Fuente: elaboración propia.

Con base en la información mostrada anteriormente y con el propósito de seleccionar la estación pluviográfica con mayor influencia en el área de estudio, fueron generados los polígonos de Thiessen dentro del software ArcGis.

### 3.4 Usos de la tierra y clasificación textural de los suelos

Simultáneamente, fue empleado un mapa de uso y cobertura de la tierra para todo el municipio Santos Marquina, tomado de Parra y Salcedo (2015), imagen que fue posteriormente digitalizada para poder obtener las áreas destinadas a los diversos usos. De este mapa se hizo énfasis en la cuenca considerada, y se obtuvieron cartográficamente los usos actuales, cuyas características fueron caracterizadas según cuenca alta, media y baja. Bajo esta información, se comparó con el mapa geológico del municipio Santos Marquina, con el propósito de estimar una mejor clasificación textural de los suelos presentes en la cuenca.

En consecuencia, el tipo de suelo especificado para la zona en estudio, se determinó en 4 tipos, haciendo referencia al estudio de Parra y Salcedo (2015), mencionado en su capítulo I:

- 1) Franco
- 2) Franco-arenoso
- 3) Franco-arcilloso-arenoso
- 4) Areno-francosa

Cabe destacar que esta clasificación sirvió como apoyo para determinar de manera más profunda la categorización textural de los suelos presentes en la cuenca, análisis que se realizó con la ayuda del Profesor Jorge Carrero, especialista en geomorfología, quien describió con base en mapas geológicos y geomorfológicos existentes de la zona en estudio, una aproximación de las clases texturales presentes. Es necesario resaltar que este proceso fue realizado bajo la superposición del mapa geológico de la zona y el mapa de uso de la tierra y cobertura vegetal; los análisis realizados en la zona se basaron en la determinación del grupo de suelo según el potencial de escorrentía que tuvieran, lo cual se representa en la Figura 3.2 a continuación:

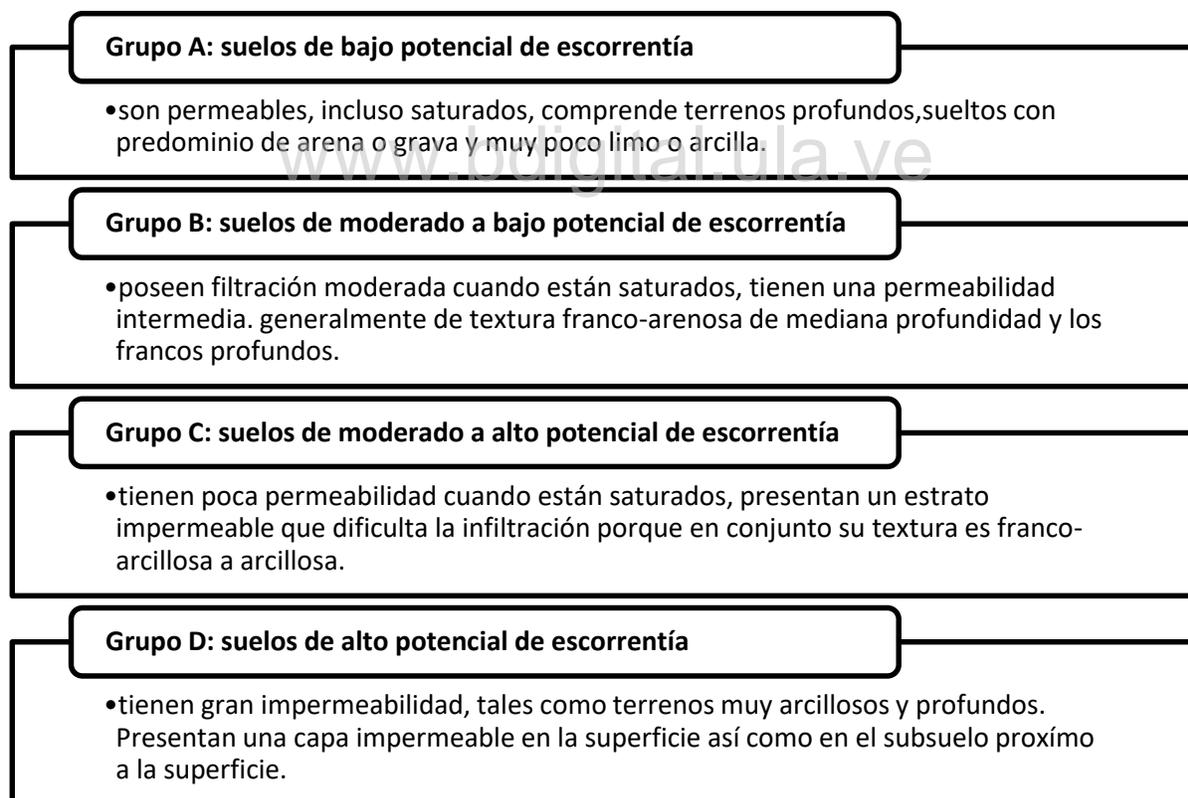


Figura 3.2 Clasificación de los suelos de acuerdo a grupos. Adaptado de Pimstein (2014).

### **3.5 Obtención de las curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia)**

El procedimiento seguido para la generación de las curvas IDF en la cuenca La Mucuy, se basó en el análisis de frecuencia, el cual permitió ajustar los datos observados a una distribución de probabilidad teórica apropiada. En este sentido, haciendo uso del archivo de datos históricos para intensidades máximas de la estación pluviográfica con mayor grado de influencia en el área de estudio, se realizó una selección para aquellos años de registros comunes y no comunes, teniendo en cuenta la mayor cantidad de datos presentes en la información consultada.

*Análisis de frecuencias:* Se efectuó el estudio a los datos seleccionados correspondientes a duraciones parciales y de máximos anuales, luego se hizo uso del programa AJUSTE v3 con la finalidad de escoger la distribución teórica más apropiada a los datos de intensidades máximas. En este sentido, se realizó el análisis para los seis (06) tipos de distribuciones de probabilidad teórica existentes, como lo son: normal, log-normal, gumbel, log-gumbel, Pearson III y log-Pearson III; y posteriormente se empleó la que mayor se ajustaba a los datos proporcionados, tomando como criterio el menor error cuadrático originado por cada distribución.

### **3.6 Estimación de hietogramas de diseño, método de los bloques alternos**

Un hietograma no es más que la representación gráfica de la precipitación en función del tiempo. Uno de los métodos más empleados para ello, es el de los bloques alternos; dicho método consiste en construir gráficas para cada período de retorno tratando de trabajar con intervalos de tiempo iguales; se basa en determinar los incrementos de lluvia entre las duraciones sucesivas, para estimar el comportamiento de la tormenta en el intervalo de estudio (Chow *et al.*, 1994). En este sentido, fueron tomadas las curvas IDF mencionadas anteriormente y de allí se obtuvieron los valores máximos de precipitación en la zona (para períodos de retorno de 25, 50 y 100 años).

A la vez, se calculó el tiempo de concentración de la cuenca para ser empleado durante la construcción de los hietogramas, cuyo objetivo fundamental fue seleccionar la duración de la lluvia necesaria para la simulación. En este sentido, para cada tramo seleccionado dentro del cauce más largo de la cuenca se obtuvo un tiempo de concentración parcial, y finalmente la sumatoria representó el tiempo de concentración a utilizar. La determinación de este parámetro se llevó a cabo estableciendo las características de longitud y desnivel del cauce más largo perteneciente a la cuenca en estudio mediante el uso del SIG. En contraste con ello, se realizó igualmente el mismo

procedimiento para los valores totales de longitud y desnivel del cauce más largo, siguiendo la ecuación de *California highways and Public Works (Kirpich)*, para cuencas con áreas superiores a 200 Ha, cuya expresión es la mostrada en la Ecuación 3.1 a continuación:

$$T_c = 0,9545 \cdot \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0,385} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Dónde:

$T_c$ = tiempo de concentración (h).

$L$ = longitud del cauce (km).

$H$ = desnivel (m).

### **3.7 Transposición de la tormenta del río Chama del 28 de abril de 1972 en la cuenca La Mucuy**

Con la finalidad de complementar el presente estudio, se decidió emplear los datos de la tormenta mencionada. Dado que este evento es uno de los más representativos cercanos al área de trabajo, y que ya se han obtenido en investigaciones previas todos los datos concernientes para su análisis, se consideró oportuno anexar los datos de dicha tormenta, por lo cual se ejecutó el procedimiento de transposición mediante el siguiente análisis:

- Obtención del hietograma de tormenta.
- Generación del hietograma porcentual de la tormenta.
- Creación de las curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) para el centro de tormenta establecido.
- Cálculo del factor de corrección o modificación del área “Ka”.
- Análisis de frecuencias para obtención de la probabilidad teórica mejor ajustada a los datos analizados.
- Transposición de la tormenta analizada a la cuenca en estudio haciendo uso del factor “Ka” y generación de nuevas curvas IDF corregidas.

Siguiendo entonces el procedimiento descrito, se obtuvieron caudales extremos transpuestos a partir de los datos de la tormenta del río Chama, determinando así bajo otra perspectiva como resultó el comportamiento de la cuenca con el análisis realizado.

### **3.8 Etapas del análisis hidrológico y determinación de los parámetros a emplear**

Tal como se explicó en las bases teóricas, el estudio hidrológico comprendió múltiples variables, por lo cual se hizo necesaria una investigación exhaustiva de los parámetros físico-naturales presentes en la cuenca mostrados en el capítulo 4 del presente trabajo. Con base en lo anteriormente mencionado, fueron considerados diversos aspectos referentes a las etapas del procesamiento en el software utilizado, acotando como se estableció en el capítulo anterior se utilizó para el análisis hidrológico el programa HEC-HMS v4.1 y una extensión para el software ArcGis denominado HEC-GeoHMS v3.5 (en base al DEM escogido generó la información topográfica respectiva de la cuenca de manera automatizada). Cabe resaltar que para el análisis del modelo lluvia-escurrentía se escogió como método de cálculo para la transición el de onda cinemática, y para las pérdidas por infiltración del suelo se usó el método del SCS (*Soil Conservation Service*) mediante la determinación del número de curva (CN) para cada vertiente (derecha e izquierda) de cada subcuenca. Algunos de los aspectos que intervinieron durante el cálculo fueron:

#### **3.8.1 Coeficiente de rugosidad de Manning.**

La rugosidad es uno de los elementos más importantes para el análisis hidrológico, de allí que resulta sustancial su determinación y caracterización para cada estudio. Con base en este valor, se evalúa la resistencia al flujo de acuerdo a la rugosidad o irregularidad de la superficie. En este sentido, fueron analizados distintos aspectos en este ámbito como lo son, el uso de la tierra existente, predominio textural del suelo y características físicas alrededor (arenas, lagunas de extracción, plantaciones, entre otros). Se emplearon valores típicos según recomendaciones en la tabla de coeficiente de rugosidad de Manning de *United States Geological Service* con sus siglas en inglés USGS (2001). Asimismo, se empleó un valor de rugosidad para cada segmento de escurrentía que compone la cuenca, los cuales fueron extraídos de tablas recomendadas por Duque (2010).

#### **3.8.2 Número de curva (CN).**

Para la obtención de este valor, se analizaron en conjunto el uso de la tierra en la zona y sus respectivos grupos hidrológicos de suelo explicados anteriormente en el apartado 3.4 del presente

capítulo (recordando que esta categorización se basó en el potencial de escorrentía de cada clase de suelo).

### 3.9 Obtención de los hidrogramas de crecida mediante el modelo hidrológico HEC-HMS v4.1

Una de las herramientas tecnológicas desarrolladas para ello fue el uso del complemento HEC-GeoHMS v3.5 dentro del programa ArcGIS v10.2.2, donde a partir de los datos obtenidos en el modelo digital de elevación (coordenadas y cotas), se llevó a cabo de manera automatizada los requerimientos necesarios para la generación de hidrogramas de crecida. Tal como se ha venido mencionando, los métodos escogidos fueron seleccionados en base a recomendaciones previas de autores y a las características que corresponden a cauces de montaña. Tomando en cuenta los aspectos relevantes de las técnicas empleadas por los métodos escogidos, se considera pertinente mencionar lo siguiente:

#### 3.9.1 Estimación de la lluvia efectiva.

Este análisis se llevó a cabo dentro del programa usando el método del antiguo SCS. Dicho método establece que la precipitación efectiva se calcula según la Ecuación 3.2 tal como se indica a continuación:

$$P_e = \frac{(P - 0,2S)^2}{(P + 0,8S)} \quad [\text{Ecuación 3.2}]$$

Dónde:

$P_e$  = precipitación efectiva (mm).

$P$  = precipitación total (mm).

$S$  = infiltración potencial (mm).

La infiltración potencial se calcula mediante la Ecuación 3.3:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad [\text{Ecuación 3.3}]$$

Dónde CN representa el parámetro del número de curva explicado anteriormente en el subapartado 3.8.2.

### 3.9.2 Descripción del método de onda cinemática.

Haciendo referencia al marco teórico del presente trabajo en el subapartado 2.4.14 se describió de manera sustentada las consideraciones que toma en cuenta el método. Ampliando esta información se representan los siguientes aspectos:

- El procedimiento de tránsito del escurrimiento superficial, a lo largo de las planicies, empleado por el método es conocido como la onda cinemática que considera, en primer lugar, la ecuación unidimensional de la continuidad de la masa para flujo no permanente con superficie libre; es decir, una de las ecuaciones de Saint Venant (Chow, 1959). Dicha ecuación puede expresarse como la mostrada en la Ecuación 3.4:

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = I \quad [\text{Ecuación 3.4}]$$

Dónde:

$q$ = gasto por unidad de ancho o caudal unitario ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ )

$y$ = profundidad de agua (m)

$x$ = distancia medida en el sentido del movimiento (m)

$t$ = tiempo (s)

$I$ = intensidad de la lluvia efectiva (m/s)

Por otra parte, la segunda ecuación de Saint Venant, se obtiene de la ecuación de cantidad de movimiento, la cual al despreciar los términos de inercia y presión (Chow, 1959), se reduce a la Ecuación 3.5 mostrada a continuación:

$$S_o = S_f \quad [\text{Ecuación 3.5}]$$

La expresión anterior representa que la pendiente del fondo del canal  $S_o$ , y la pendiente de la línea de energía  $S_f$  son iguales. El decir que estas pendientes son iguales significa que para cualquier instante de tiempo y en una misma sección, la ecuación anterior se cumple, pero los valores de esas pendientes se modifican de sección en sección. No obstante, la ventaja de estas suposiciones radica en que para cada sección existe una relación única entre gasto y profundidad y, por lo tanto, se puede escoger cualquier fórmula de flujo permanente para representar dicha

relación, por ejemplo, la ecuación de Manning, cuya expresión para flujo bidimensional viene dada por la Ecuación 3.6:

$$q = \frac{1}{n} \cdot y^{5/3} \cdot S_o^{1/2} \quad [\text{Ecuación 3.6}]$$

Dónde:

$n$ = coeficiente de rugosidad de Manning ( $s/m^{1/3}$ )

$q$ = gasto por unidad de ancho o caudal unitario ( $m^3/s/m$ )

$y$ = profundidad de agua (m)

$S_o$ = pendiente del fondo del canal (m/m)

Al sustituir el valor del caudal unitario que se obtiene de la ecuación de Manning en la Ecuación 3.4, se obtiene una ecuación diferencial representativa de la variación de la profundidad con el tiempo a lo largo del canal, la cual puede ser resuelta aproximadamente utilizando un esquema de diferencias finitas. Una vez que están resueltas estas ecuaciones, se procede a su solución en el cauce o canal, cambiando las variables " $q$ " y " $y$ " por gasto total en el cauce " $Q$ " y área " $A$ ", respectivamente. Además de ello, la intensidad efectiva de lluvia " $T$ " se reemplaza por el gasto lateral " $q$ ", que aportan las planicies contribuyentes al cauce, el cual resulta de la solución de las ecuaciones de Saint Venant en la planicie.

En este mismo orden de ideas, la metodología explicada anteriormente, desglosa entonces la forma en cómo las ecuaciones son desarrolladas internamente en el modelo hidrológico, con lo cual fueron secuencialmente generados los resultados que se presentarán más adelante.

### **3.10 Evaluación hidráulica de crecidas en el tramo de estudio de la Quebrada La Mucuy**

Bajo la misma perspectiva, y dando paso a la generación de datos hidráulicos importantes para el análisis de eventos de crecida en la zona, se procedió a un estudio basado en 2 etapas, donde fueron aplicados sucesivamente dos modelos de flujo como lo son el modelo unidimensional HEC-RAS v5.0 y posteriormente el modelo bidimensional FLO-2D Basic. Primeramente, se empleó el HEC-RAS con el propósito de estimar las profundidades de flujo para los caudales extremos de las crecientes en los tres períodos de retorno de 25, 50 y 100 años, con lo cual se observó la mancha de crecida para los 3 escenarios. Posteriormente, se hizo uso del modelo FLO-2D Basic, el cual

permitió de forma oportuna la visualización de las zonas de desborde, ya que al tratarse de un modelo bidimensional el análisis resultó más preciso.

### **3.10.1 Evaluación con modelo unidimensional.**

Tal como se explicó en el apartado 2.4.10, el modelo HEC-RAS calcula el perfil de agua para régimen permanente gradualmente variado y permite modelar mediante flujo subcrítico y supercrítico. Dicho modelo, se basa en la solución de la ecuación de energía en una dimensión, y a su vez utiliza la solución de la ecuación de cantidad de movimiento en los casos en que el perfil de agua es rápidamente variado. Conjuntamente con esta herramienta fue empleado el complemento denominado HEC-GeoRAS explicado anteriormente en el subapartado mencionado, el cual fue determinante para la obtención de una mejor y apropiada representación de los resultados, ya que los procedimientos permitieron de manera casi automatizada la generación de resultados gráficos. Con base en los aspectos más importantes surgieron las siguientes acotaciones:

#### **3.10.1.1 Pre procesamiento en ArcGis mediante la extensión HEC-GeoRAS.**

- Se definió la geometría del cauce (pendiente media, secciones transversales, longitud...).
- Se establecieron las características del material del río (rugosidad, número de curva).
- Se emplearon los hidrogramas de crecida (valores de caudales extremos) provenientes del modelo hidrológico HEC-HMS v4.1.
- Se llevó a cabo en ArcGIS v10.2.2 la delimitación del eje central del río, costados (*bank lines*) y límites de la crecida (*flow path centerlines*). Asimismo, se generaron de manera automática las secciones transversales del tramo en estudio (*XS cut lines*).

#### **3.10.1.2 Generación de parámetros hidráulicos en el modelo HEC-RAS v5.0.**

- Se exportaron los datos anteriores del HECGeo-RAS al modelo hidráulico.
- Conjuntamente con los datos de caudales extremos, se estipularon los alcances bajo un flujo o caudal líquido, y se dieron las especificaciones pertinentes para las condiciones de borde.
- Se generaron los parámetros hidráulicos y fueron exportados nuevamente al ArcGis para la obtención de manchas de crecida.

### 3.10.1.3 Post procesamiento en ArcGis y obtención de manchas de crecida.

- Importación del archivo *.sdf* generado en HEC-RAS al HEGeo-RAS en formato *.xml*.
- Configuración de las capas necesarias y verificación de los datos arrojados.
- Fueron generadas las manchas de crecida (*inundation mapping*).

### 3.10.2 Evaluación con modelo bidimensional.

La representación de la mancha de crecida en este modelo se ejecutó siguiendo un proceso más sencillo, ya que todos los datos requeridos se tenían previamente del modelo unidimensional. Se debe recordar que el modelo funciona con un mayor nivel de detalle y solicita mayor capacidad de cálculo ya que trabaja el flujo en 8 direcciones. Se emplearon entonces los parámetros hidrológicos ya mencionados, y se estipularon algunas de las características ya utilizadas en el modelo unidimensional. Para el desarrollo de este modelo fue empleada la herramienta integrada de sistemas de información geográfica del FLO-2D denominada GDS (*Grid Developers System*), cuyos análisis fueron evaluados posteriormente de manera numérica y gráfica. De manera general se estipula en la Figura 3.3 la metodología aplicada para el estudio hidráulico:

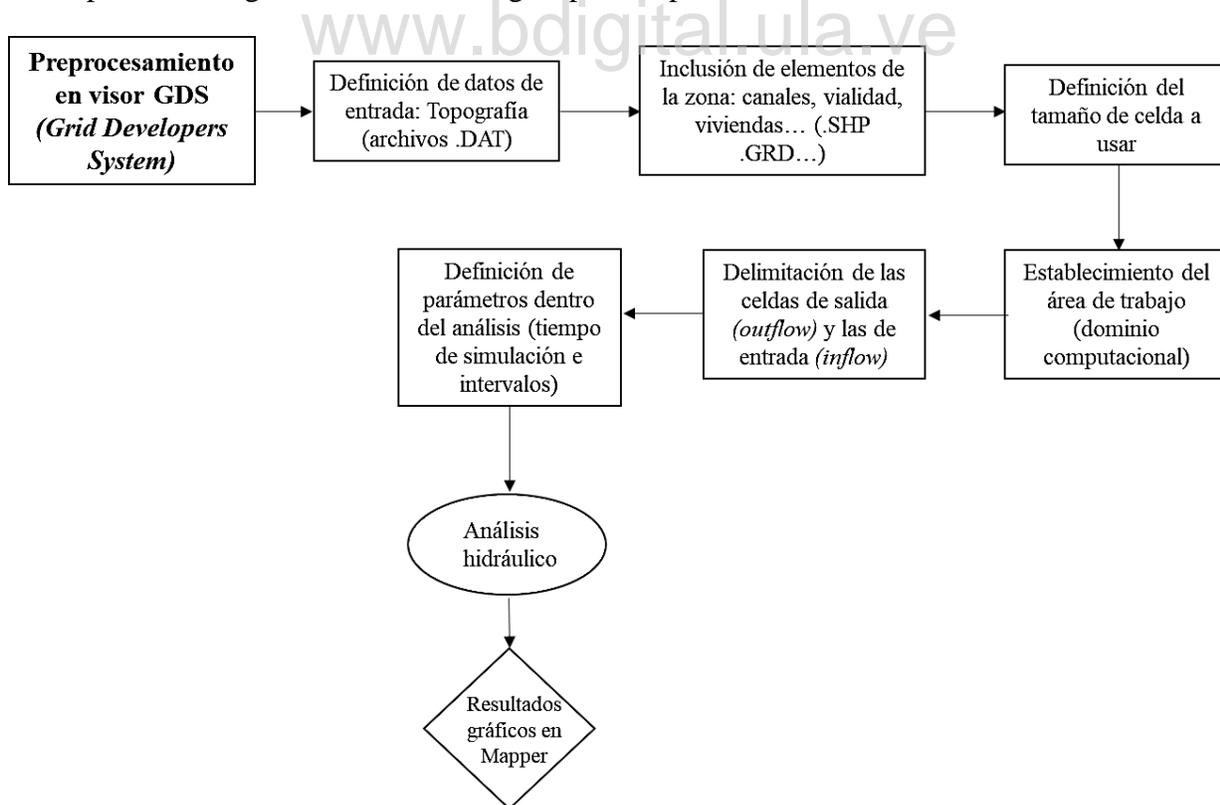


Figura 3.3 Etapas generales del proceso en el modelo bidimensional FLO-2D.

En este sentido, se desarrolló un procedimiento de análisis para cada uno de los valores determinados, tomando como base los resultados ya obtenidos en HEC-RAS para su posterior comparación entre variables hidráulicas de ambos modelos. Adicionalmente, fue recorrido en campo el tramo en estudio, y se tomaron algunos puntos de observación con evidencia fotográfica, así como también medición de algunos sitios de interés, los cuales serán mostrados en el capítulo 5 del presente trabajo.

### **3.11 Pre-diseño de medidas estructurales en el tramo de estudio**

Dentro de los alcances del presente trabajo se establecieron algunas de las limitantes para el desarrollo de un diseño definitivo en lo que respecta al diseño de obras para control de torrentes; por lo tanto, se generaron estudios preliminares de algunas alternativas estudiadas, así como el pre-dimensionamiento de algunas obras que resultaron de los análisis efectuados. Asimismo, mediante el uso de la información cartográfica obtenida se observaron las zonas con mayor área de desborde, y aquellas que estuvieran cercanas a poblaciones asentadas o cultivables.

Dentro de los aspectos más importantes destacados durante el análisis fue la identificación de lugares con un grado de afectación superior a las zonas con poco desborde, donde la intención final no fue más que aportar un instrumento preliminar sobre obras de control de torrentes que contribuyeron con parte importante de todos los estudios realizados previamente, como lo fueron la evaluación hidrológica e hidráulica de la quebrada La Mucuy. En tal sentido, se caracterizaron ciertos aspectos dentro de este capítulo que condujeron a un diseño previo el cual permitió comprender la magnitud de lo que significa un diseño definitivo. Dicho esto, se tienen los siguientes puntos tratados:

- Observación de las zonas de desborde mediante las herramientas cartográficas establecidas.
- Identificación de lugares propensos a sufrir daños considerables por efectos de una crecida.
- Evaluación de las alternativas estructurales en los tramos identificados con mayor área de desborde, así como profundidades y velocidades considerables de flujo.
- Caracterización general de las obras de control de torrentes evaluadas, así como aquellas zonas donde predomina el desequilibrio del cauce por la acción antrópica presente (albercas de sedimentación y extracción de áridos).

- Pre-dimensionamiento de medidas estructurales referentes al control de cauces torrenciales, considerando los análisis hidrológicos e hidráulicos realizados, con estricta acotación de ser un estudio preliminar (no se consideraron estudios de transporte de sedimentos ni estudios referentes a evaluación socioeconómica de las zonas a proteger).

Particularmente, para el caso de estudio, se debe hacer énfasis en que las medidas estructurales no garantizan una seguridad total por lo que solamente se puede mitigar una parte del riesgo y asumir la parte residual. Las medidas no estructurales apuntan entonces a reducir la vulnerabilidad mediante el manejo del riesgo residual (López, 2010).

La existencia de procedimientos que conllevan a la evaluación preliminar de medidas estructurales, tiene énfasis en los diversos estudios que se deben realizar para la obtención de resultados satisfactorios, y de esta forma conceptualizar de manera general lo que concierne a un estudio definitivo. Con base en ello, se presenta de manera esquemática la metodología mostrada en la Figura 3.4.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

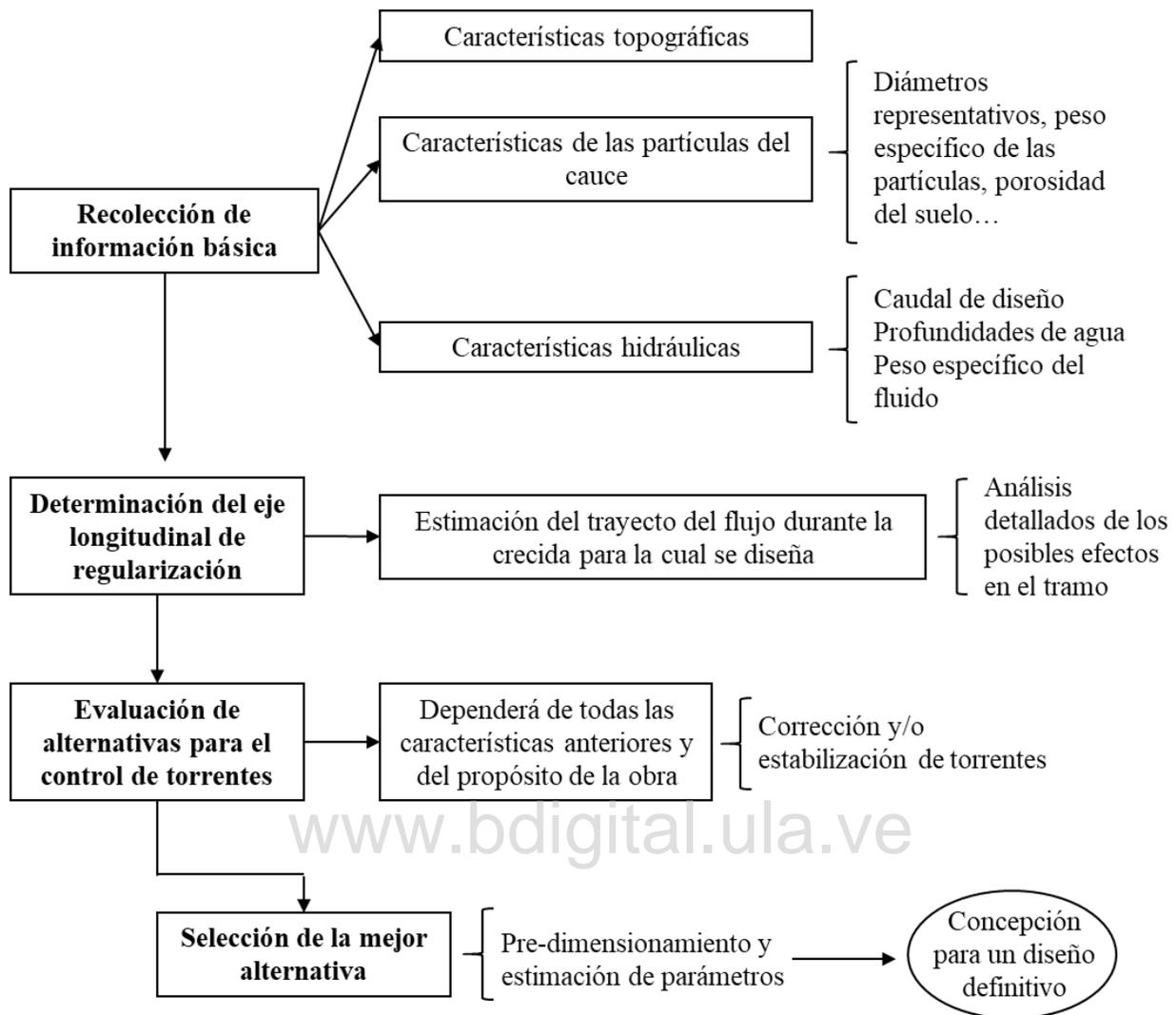


Figura 3.4 Procedimientos generales para el pre-diseño de medidas estructurales. Elaboración propia.

Con base en estos procedimientos, se establecieron los principios para el desarrollo de un pre-dimensionado de alternativas factibles dentro del área de estudio, y de esta forma se logró una mayor comprensión de las variables que involucra el diseño definitivo concerniente a obras para el control de torrentes.

## CAPÍTULO 4

### ÁREA DE ESTUDIO

Partiendo de las bases metodológicas explicadas anteriormente, y haciendo uso de los aspectos referenciados en el marco teórico, se da paso a la descripción de muchos detalles que se tienen dentro de la cuenca en estudio; complementos que son determinantes para los resultados a obtener más adelante. Realizar una evaluación hidrológica-hidráulica de la cuenca La Mucuy concibe aspectos propios del área que van desde su ubicación geográfica, pasando por características físico-naturales, aspectos hidrometeorológicos, usos actuales de la tierra, hasta la generación de factores hidráulicos que permiten observar el comportamiento de los cursos fluviales bajo distintos escenarios de estudio. Entre los aspectos a considerar dentro de la cuenca se tienen:

#### 4.1 Localización y extensión

La cuenca hidrográfica La Mucuy se encuentra en la vertiente norte de la Cordillera de los Andes Venezolanos, y forma parte de la cuenca media superior del río Chama. El área en estudio corresponde a una porción político-administrativa del Municipio Santos Marquina. Se localiza entre las coordenadas 270000 m y 287000 m de longitud este y 944000 y 959000 de latitud norte. Dicha cuenca, fisiográficamente, la conforman cuatro subcuencas: El Oro y La Coromoto localizadas en la Mucuy Alta, y las subcuencas Ño León y Desbarrancadero localizadas en La Mucuy Baja con un área aproximada total de 98, 44 km<sup>2</sup>. La situación relativa del área de estudio se presenta en la Figura 4.1 a continuación:



Figura 4.1 Situación relativa de la zona en estudio. Cuenca La Mucuy.

Es de importancia mencionar que muchas veces se confunde el término de río y quebrada por lo cual, Silva (1999, p.13) expresa “Así, la quebrada La Mucuy, ubicada en una zona húmeda y elevada, que tiene 15 km de longitud y 96 km<sup>2</sup> de cuenca, bien podría ser un río.”

## 4.2 Geología

La litología presente en la cuenca La Mucuy corresponde a la asociación Sierra Nevada, término introducido por Bass y Shagam (1960), sin definición formal, para designar las rocas más antiguas que se conocen en los Andes merideños constituidos principalmente según el léxico estratigráfico por gneises, esquistos y rocas graníticas. Asimismo, debe mencionarse que dicha asociación a su vez pertenece al complejo Iglesias, de posible edad precámbrica. Desde el punto de vista de la geología estructural, el área de estudio está atravesada por la traza sur de la falla de Boconó, como también por un conjunto de fallas inferidas que siguen la línea general del eje andino a lo largo del río Chama creando algunas morfoestructuras como lomos de falla observados en las cercanías del área de estudio (Lacruz y Rondón, 2008).

Al respecto de dos de las subcuencas estudiadas, York (2007) expresa que La Mucuy Baja por estar situada al fondo de un valle, está litológicamente compuesta por depósitos de origen fluvial y aluvial correspondientes al cuaternario. Asimismo, describe que los rasgos estructurales son complejos y están determinados principalmente por un intenso fallamiento, paralelo al eje mayor andino, en sentido SW-NE y en sentido perpendicular a éste, que cortan y pliegan las unidades estratigráficas, creando condiciones favorables a los agentes de alteración (Cabello, 1966 en York, 2007).

Con base en lo anterior, Ayala *et al.* (2013), especifican para la subcuenca Ño León lo siguiente:

Desde el punto de vista geológico, los materiales que conforman el sustrato por donde escurre sus aguas la quebrada Ño León están constituidos esencialmente de gneises bandeados, en el grado de la anfíbolita del metamorfismo regional; y en menor proporción, esquistos cuarzo-feldespáticos moscovíticos (p. 02).

## 4.3 Geomorfología

El área de estudio presenta un relieve irregular, de altitud que varía entre los 1700 hasta los 4800 m.s.n.m., diferenciando las unidades fisiográficas de fondo de valle y vertientes; en la parte superior de la cuenca coincide con los picos Humboldt, Agustín Codazzi y La Concha, presentando

en sus alrededores pendientes pronunciadas, desprovistas de vegetación. Asimismo, en la parte intermedia se siguen presentando pendientes fuertes de relieve accidentado con presencia de colinas provistas de vegetación, además se observan derrumbes como el Desbarrancadero ubicado a la margen izquierda de la quebrada que lleva el mismo nombre, aportando material a las partes más bajas y socavando el borde del abanico donde se encuentra la población de la Mucuy Baja. En la parte inferior de la cuenca, el relieve se hace menos accidentado, aspecto que explica la forma geomorfológica de fondo de valle y abanico aluvial, sitios que han permitido la mayor concentración de la población (Lacruz y Rondón, 2008).

De igual forma, Ayala *et al.* (2013), explican sobre los relictos de obturaciones (rocas que sobreviven a un proceso geológico destructivo) detectados en la sección media de la quebrada La Mucuy, reportados inicialmente por Ferrer y Liñayo (2009), lo cual pudo haber contribuido con volúmenes adicionales de materiales y favoreciendo tanto la evolución del abanico donde se encuentra emplazado Tabay y la Mucuy Baja, así como de sucesivos represamientos del río Chama.

Asimismo, dentro de este apartado se da lugar a los aspectos hidrogeomorfológicos presentes en la quebrada Ño León, donde se tiene del estudio anteriormente mencionado lo siguiente:

(...) la quebrada Ño León un curso fluvial de orden 4 que se comporta de manera torrencial, con un desnivel aproximado de 2400 m, desde su nacimiento (a una altitud aproximada de 4200 m.s.n.m.) hasta su confluencia con la quebrada La Mucuy (a una altitud aproximada de 1786 m.s.n.m.). Los mecanismos asociados con el desarrollo del abanico aluvial depositado por ambos drenes parecen estar asociados con eventos hidrometeorológicos de apreciable magnitud; y no se observan evidencias de aludes originados por influencia sísmica. No obstante, lo afirmado, la traza activa de la falla de Boconó muestra, en el sitio, nítidos rasgos de desplazamientos en sedimentos muy jóvenes (Ferrer *et al.*, 2009. Citado en Ayala *et al.*, 2013, p.42).

#### **4.4 Suelos**

Existe una clasificación determinada para el lugar de estudio, en lo que a suelos se refiere, sin embargo, según algunos datos importantes se tiene que:

Los suelos de la cuenca de La Mucuy pueden clasificarse como poco desarrollados y jóvenes, son materiales de acumulaciones cuaternarias proveniente de la asociación Sierra Nevada y que han estado expuestos a cambios climáticos, vegetación y relieve ocurridos en el área, dominando los suelos Entisoles e

Inseptisoles, los cuales se han desarrollado a partir del material depositado durante el cuaternario con un alto contenido de arena, estos suelos presentan buena profundidad, exceptuando los sitios de fuerte pendiente (Grecia y Duque, 2001, p. 67).

Asimismo, el área presenta una alta pedregosidad que no es una limitante para el crecimiento de las plantas, ni para el asentamiento y crecimiento de la población, existen muy pocos sitios de anegamiento durante épocas de lluvias, por las fuertes pendientes; estos suelos presentan un pH ácido con una fertilidad entre baja y moderada, presentando una alta erosión hacia las zonas de mayor pendiente, expuestos a los principales elementos (agua hielo, cambios de temperatura, vegetación, pendiente y tipo de suelo), disminuyendo la erosión hacia las zonas de menor pendiente con una vegetación espesa exceptuando los sectores de crecimiento urbano.

Consecuentemente, estos suelos se expresan como de naturaleza transportada, ya que los suelos representativos del fondo del valle están constituidos por materiales transportados y depositados por diferentes drenes que atraviesan el sector, los cuales, a su vez forman vegas, terrazas y conos de deyección, bajo diferente orden cronológico. Haciendo alusión a esto, Parra y Salcedo (2015), destacan algunos patrones de suelo para la Mucuy Baja (pendientes menores al 15 %) donde especifican que:

Los perfiles de estos suelos presentan en sus horizontes superficiales poca profundidad, con una amplia gama de texturas: franco, franco-arenosa, franco-arcillo-arenosa, arena-francosa, pedregosidad superficial de ligera a fuerte, lento escurrimiento superficial, y drenaje interno y externo de lento a rápido. En cuanto a la disponibilidad de nutrientes, se trata de suelos con moderados a bajos contenido de nutrientes, débilmente lixiviados y con una acidez de ligera a moderada (p. 48).

#### **4.5 Hidrografía**

El área de estudio se encuentra dentro de la cuenca media del río Chama, arteria del drenaje más importante de los Andes merideños; hacia él drenan algunos ríos y quebradas de la zona, como los son: quebrada La Mucuy, que está constituida por dos microcuencas, El Oro con una superficie de 42,718 km<sup>2</sup> y La Coromoto con una superficie de 27,81 km<sup>2</sup>, ambas provenientes de las partes altas de la Sierra Nevada y se unen en la cota 2100; la microcuenca Desbarrancadero con un área de 4,93 km<sup>2</sup> en unión con la microcuenca Ño León con un área de 12,53 km<sup>2</sup> son un verdadero torrente, uniéndose en la cota 2000 y posteriormente aguas abajo se unen a la quebrada La Mucuy

aproximadamente en la cota 1800 aumentando el caudal del río Chama. La cuenca donde se localizan estos ríos y quebradas, por encontrarse bajo condiciones climáticas muy particulares y debido a la presencia de un bosque hidrófilo en el Parque Nacional Sierra Nevada, se encuentran protegidos por el Área Bajo el Régimen de Administración Especial (ABRAE), permitiendo un régimen hídrico permanente, y limitando la intervención antrópica (Lacruz y Rondón, 2008).

Cabe destacar que la cuenca de La Mucuy presenta un patrón de drenaje dendrítico, con una forma ensanchada en las partes más altas y haciéndose más estrecha en las partes bajas, esto permite una mayor concentración del escurrimiento que puede originar grandes crecidas en las partes superiores de la cuenca, los valores de pendiente varían conforme al relieve, presentando pendientes accidentadas en las partes altas y relativamente pronunciadas en la parte baja, lo cual permite una mayor rapidez del flujo de agua a lo largo del cauce; esto a su vez incide en la fuerza erosiva del cauce y en el arrastre de materiales, así como la ocurrencia de crecidas torrenciales.

Tal como se ha mencionado anteriormente, la cuenca está conformada por cuatro microcuencas: Desbarrancadero, Ño León, El Oro y La Coromoto, estas dos últimas dan origen a la quebrada La Mucuy, razón por la cual se determinó el cálculo de algunos factores de tipo hidrográfico establecidos por Horton (1945), el cual ayuda a determinar la afectación a los sectores de la cuenca La Mucuy.

#### **4.6 Amenazas y riesgos**

Las características físico naturales de la zona permiten destacar los riesgos y amenazas naturales presentes en el área, adicionalmente, la torrencialidad en los abanicos aluviales debido a la acumulación de materiales indica un riesgo mayor en cuanto a crecidas. No obstante, Alarcón y Rondón (2009) destacan que:

Según propuesta Plan de Ordenación del Territorio y Gestión Ambiental (2004), la localidad de Hacienda y Vega, por su parte, para el año 1988, experimentó una crecida excepcional del río Chama, cuyos daños se resumen en la afectación a un total de 15 ha inundadas, la interrupción del servicio de agua durante dos días consecutivos y la afectación de 15 viviendas, las cuales fueron inundadas a un nivel de 0,5 m (p.46).

#### 4.7 Morfometría de la Cuenca La Mucuy

El factor de forma correspondiente a las subcuencas que conforman la cuenca de la quebrada La Mucuy se muestra a continuación, en la Tabla 4.1:

Tabla 4.1 Factor de forma para cada microcuenca que conforma la cuenca La Mucuy.

<b>Cuenca</b>	<b>Factor de Forma</b>	<b>Descripción</b>
Microcuenca La Coromoto	0,24	Alargada
Microcuenca El Oro	0,34	Alargada
Microcuenca Desbarrancadero	0,21	Alargada
Microcuenca Ño León	0,28	Alargada

Fuente: Lacruz y Rondón (2008).

#### 4.8 Propiedades del relieve

Los valores de pendiente, se obtienen de acuerdo a las relaciones entre el grado de pendiente y la escorrentía; además se debe recordar que dicha cuenca presenta condiciones montañosas, por lo cual han de esperarse pendientes fuertes. En este sentido, las pendientes medias de los cauces principales ubicados en el área de estudio se resumen en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Pendiente media de los cauces principales.

<b>Cauces</b>	<b>Pendiente Media</b>
Microcuenca La Coromoto	25,41%
Microcuenca El Oro	13,12%
Microcuenca Desbarrancadero	36,19%
Microcuenca Ño León	33,08%

Fuente: Lacruz y Rondón (2008).

Los valores de pendiente media comparados entre cada una de las microcuencas varían notoriamente, los valores mayores se reflejan en las microcuencas Desbarrancadero 36,19 % y Ño León 33,08 %, lo que indica una mayor rapidez de la velocidad del flujo sobre el cauce, incrementando así a lo largo del recorrido una mayor fuerza erosiva que aunado a patrones de precipitación máxima intensifican las crecidas torrenciales.

#### 4.9 Propiedades lineales de la red fluvial

Haciendo referencia a los parámetros establecidos, las quebradas La Coromoto, Ño León y El Oro comprenden el mayor orden de corriente con un orden tipo 4 de clase alto (ver Tabla 4.3 a Tabla 4.6), lo cual es una estructura bien definida, permitiendo mayores posibilidades de tendencia a la erosión a lo largo de su recorrido. Asimismo, la Tabla 4.7 muestra la densidad de drenaje para cada una de las microcuencas.

Tabla 4.3 Clasificación de Cauces para la microcuenca El Oro.

<b>Orden</b>	<b>Número de Cauces</b>	<b>Relación de Bifurcación</b>	<b>Longitud en Kilómetros</b>
<b>1</b>	99		61,40
<b>2</b>	45	2,20	16,40
<b>3</b>	28	1,60	11,12
<b>4</b>	25	1,10	10,45
<b>Totales</b>	197	1,63	99,37

Fuente: Lacruz y Rondón (2008).

Tabla 4.4 Clasificación de Cauces para la microcuenca Ño León.

<b>Orden</b>	<b>Número de Cauces</b>	<b>Relación de Bifurcación</b>	<b>Longitud en Kilómetros</b>
<b>1</b>	33		14,90
<b>2</b>	16	2,06	8,40
<b>3</b>	14	1,14	5,55
<b>4</b>	1	1,40	0,40
<b>Totales</b>	64	5,73	29,25

Fuente: Lacruz y Rondón (2008).

Tabla 4.5 Clasificación de Cauces para la microcuenca Desbarrancadero.

<b>Orden</b>	<b>Número de Cauces</b>	<b>Relación de Bifurcación</b>	<b>Longitud en Kilómetros</b>
<b>1</b>	13		7.07
<b>2</b>	10	1,30	2.02
<b>3</b>	2	5,00	2.25
<b>Totales</b>	25	3,15	11.34

Fuente: Lacruz y Rondón (2008).

Tabla 4.6 Clasificación de Cauces para la microcuenca La Coromoto.

<b>Orden</b>	<b>Número de Cauces</b>	<b>Relación de Bifurcación</b>	<b>Longitud en Kilómetros</b>
<b>1</b>	103		59,40
<b>2</b>	50	2,06	15,67
<b>3</b>	12	4,16	2,35
<b>4</b>	26	0,40	6,80
<b>Totales</b>	191	2,20	84,22

Fuente: Lacruz y Rondón (2008).

Tabla 4.7 Densidad de drenaje para las microcuencas el Oro, La Coromoto, Desbarrancadero y Ño León.

<b>Microcuencas</b>	<b>Densidad de Drenaje (Km/Km<sup>2</sup>)</b>
El Oro	2,32
La Coromoto	3,02
Desbarrancadero	2,30
Ño León	2,33

Fuente: Lacruz y Rondón (2008).

Los valores de densidad de drenaje obtenidos, para las diferentes microcuencas, observados en la Tabla 4.7 son catalogados como de clase moderada, es decir, existe una eficiencia de la red de drenaje en  $\text{km}/\text{km}^2$ , lo que expresa un incremento en los volúmenes de escurrimiento a lo largo del cauce produciendo así ascensos de las corrientes.

En líneas generales, la cuenca La Mucuy presenta una forma alargada, lo que hace que el recorrido del agua a través de la cuenca sea más largo y que los picos de crecida sean menos repentinos. Además, las pendientes medias presentes en dicha cuenca van de pronunciadas a fuertes, lo que da la probabilidad de producir crecidas, ya que la capacidad de arrastre de sedimentos y la velocidad del caudal en caso de tormentas será mayor en aquellos sectores que presentan valores altos de pendientes. Por ello, lo anteriormente expuesto, contribuye a que los picos de crecidas sean más violentos. También hay que acotar que la misma presenta una densidad de drenaje moderada, por lo que se puede inferir que está bien drenada, y que posee suficiente drenaje permitiendo el no estancamiento del agua, evitando así la infiltración superficial del agua, lo que a su vez da poca posibilidad de almacenamiento subterráneo.

#### **4.10 Climatología**

Existe un efecto importante del clima sobre el área en estudio, ya que éste incide sobre la producción de agua que puede determinarse en base a la precipitación y a la evaporación. En base a esto, según algunos estudios se tenía la siguiente estimación referente al clima de la cuenca:

...hacia la parte alta de la cuenca hay una incidencia más directa de los rayos solares y una atmósfera menos espesa, se debe considerar que, casi siempre, a partir de mediodía, la zona está cubierta de una densa neblina. En este caso, en las condiciones de precipitación alta y evaporación relativamente baja, es de esperarse un porcentaje de escorrentía útil y, por ende, un factor de clima alto (Quijada, 1963, p. 57).

Sin embargo, a lo largo del tiempo, ha existido una variabilidad de cambio climático que resulta determinante sobre la cuenca, por lo cual se tienen algunos registros actuales en cuanto a la precipitación y temperatura.

De acuerdo a las características del valle del río Chama, éste se encuentra encajado entre la Sierra de la Culata al Norte y la Sierra Nevada al sur, por lo que presenta ciertas características de abrigo, sin embargo, se encuentra abierto hacia la depresión del Lago de Maracaibo a través del cañón del Chama, entre Estanques y el Vigía, por donde penetran las influencias que determinan un tipo de clima andino lacustre, traducido en un régimen bimodal de pluviosidad, hacia la vertiente izquierda del río Chama. En este orden de ideas, la cuenca de La Mucuy presenta condiciones de humedad por tratarse de una vertiente de umbría favoreciendo la ocurrencia de precipitaciones debido al descenso del aire frío de la montaña hacia el valle; también se puede observar casi siempre a partir del mediodía un proceso de formación y descenso de neblina, debido al encajonamiento del valle del río Chama y a la humedad del aire.

#### **4.11 Uso de la tierra**

Tal como se explicaba anteriormente, acerca del clima del lugar, se hace mención a la escorrentía que posee la cuenca, la cual resulta aprovechable. No obstante, Quijada (1963), hace referencia a la parte alta de la cuenca como una porción grande, la cual, se encuentra totalmente desprovista de vegetación, sin embargo, se menciona que en tiempos pasados esta zona estaba destinada para campo de pastoreo y agricultura paramera. Considerando esto, debido a la devastación del área, y también debido a las condiciones climáticas severas para ese momento,

dichas tierras fueron abandonadas. La parte central de la cuenca, ofrece mejores condiciones en cuanto a la escorrentía, ya que además existe un campo experimental de la Facultad de Ciencias Forestales (actualmente en uso).

Bajo este orden de ideas, en la parte baja a lo largo del cauce principal, se ha implementado una vegetación baja, tipo matorral, aunque en las cercanías se han implantado cultivos: caña de azúcar, café, hortalizas. Adicionalmente, entre algunos registros se tiene que:

Existen 164 productores en este sector, con el cultivo de hortalizas, papa, flores y pastos entre otros, que están aprovechando 268,95 has del municipio. En el sector, existe buena organización de los productores, disponen de sistemas de riego, en virtud de la disponibilidad del recurso en la vertiente izquierda (Alarcón y Rondón, 2009, p. 158).

Este mismo autor, presenta la siguiente información en la Tabla 4.8:

Tabla 4.8 Relación de producción agrícola y pecuaria. La Mucuy.

Nombre del sector	N° de Productores	N° de Has Aprovechables	Rubros
Mucuy Alta	37	56,45	Mora, Hortalizas, papa, apio, maíz, caraota, pastos
Mucuy Baja	42	79,75	Hortalizas, pastos, maíz, caraota, pastos.
Hacienda y Vega	47	52,25	Café, cambur, maíz, apio, hortaliza, caraota, papa, flores.
Filo El Oro	38	80,50	Hortalizas y pastos
<b>Totales</b>	<b>164</b>	<b>268,95</b>	

Fuente: citado por Alarcón y Rondón (2009). Alcaldía Municipio Santos Marquina. Oficina de Desarrollo Agrícola 2007.

#### 4.12 Uso urbano-residencial

La creciente población en la zona se ha venido desarrollando a lo largo de los años, especialmente por las bondades del lugar, clima, vegetación, hidrografía entre otros. Sin lugar a dudas, La Mucuy Baja es el resultado de dicha consolidación urbana, y aún sigue creciendo en cuanto a uso residencial. Según Méndez (2003) citado por Alarcón y Rondón (2009), “la característica fundamental en el proceso de ocupación reciente del espacio viene a ser la sustitución de actividades que predominaban, en este caso particular lo representó el uso agrícola con el cultivo de café”. Asimismo, se hace referencia Plan de Ordenación del Territorio y Gestión Ambiental

(2004), el cual expresa que desde el punto de vista geomorfológico el abanico aluvial de la Mucuy Baja, por sus bajas pendientes, presenta aptitud favorable como unos de los sectores del municipio con mayor posibilidad para la expansión urbana.

#### 4.13 Uso minero

Actualmente, en la localidad de Hacienda y Vega en La Mucuy baja, se encuentra una empresa de extracción minera en las cercanías del río Chama, como se muestra en la Tabla 4.9:

Tabla 4.9 Extracción minera. La Mucuy.

Promotor	Ubicación	Tipo de Extracción	Situación Actual
Margarita Peña de Avendaño	Hacienda y Vega	Río Chama	Activa

Fuente: Ministerio del Poder Popular para el Ambiente-Dirección Estatal Ambiental Mérida (Comisión de Areneras).2007.

#### 4.14 Precipitación

Se tienen datos de precipitación de la Estación Truchícola La Mucuy del período comprendido entre 1960-1995 (Tabla 4.10) y del 2000 hasta el 2005 (Tabla 4.11), con el fin de tener una verificación de hechos relacionados con crecidas excepcionales. La mayor precipitación registrada es la del mes de octubre con 234,1 mm (período 1960-1995), y la menor precipitación corresponde al mes de enero con un valor de 34,7 mm.

Tabla 4.10 Precipitación (Pp) mensual y anual para el período 1960 - 1995, de la Estación Truchícola La Mucuy.

Meses	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
<b>Pp (mm)</b>	34,7	41,7	65,6	179,1	226,5	112,8	95,9	127,8	174,3	234,1	170,5	74,4	1537,4

Fuente: Estación truchicola La Mucuy.

Subsiguientemente, aunque existe un vacío de información para el periodo 1995 - 2000, con un lapso de 5 años, se observa que durante el periodo 2000 - 2005 no hay modificación notable en el régimen de precipitación, sin embargo, se mantiene el mayor valor para el mes de octubre con 456 mm y el menor valor corresponde al mes de febrero con 96 mm.

Tabla 4.11 Precipitación (Pp) mensual y anual para el período 2000 - 2005, de la Estación Truchícola La Mucuy.

Meses	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
<b>Pp (mm)</b>	134,7	96	189,6	449,1	350	211,2	181,9	183	339,4	456	398,3	166,2	3155,4

Fuente: Estación truchícola La Mucuy.

Adicionalmente, se tienen los registros de datos de precipitación mensuales y anuales de la estación Tabay (serial 3038) comprendidos entre los años 1948 - 1996, mostrados en la Tabla 4.12:

Tabla 4.12 Precipitación (Pp) mensual y anual para el período 2000 - 2005, de la Estación Tabay, Serial 3038.

Meses	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
<b>Pp (mm)</b>	33,7	41,9	65,9	180,0	223,2	113,9	98,0	129,6	172,1	230,3	169,3	75,1	1532,9

Fuente: Estación Tabay (serial 3038).

#### 4.15 Temperatura

Los valores de mayor temperatura se observan para el mes de mayo con 14,3°C (Tabla 4.13) y para el mes de septiembre con un valor de 14,1 °C. No obstante, los meses de junio, julio y agosto mantienen una temperatura no muy baja, que se mantiene con valores muy similares, tal como se muestra en la Tabla 4.13:

Tabla 4.13 Registro de temperatura para el período 1968-1977, de la Estación Truchícola La Mucuy.

Meses	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
<b>Tem (°C)</b>	12,55	12,85	13,38	13,87	14,37	13,9	14,01	13,93	14,1	13,76	12,97	13,28	12,55

Fuente: Estación La Mucuy (ULA-IGCRN) 08°38'N 70°14'W.

Cabe destacar, que existe una formación de neblina en la zona durante gran parte del año, lo cual incrementa la humedad ambiental. Dicha característica, es elevada entre los meses de noviembre a enero, y ocurre generalmente en horas de la tarde, lo que se debe al encajonamiento del río Chama, asociado a la humedad del aire después de las lluvias.

## CAPÍTULO 5

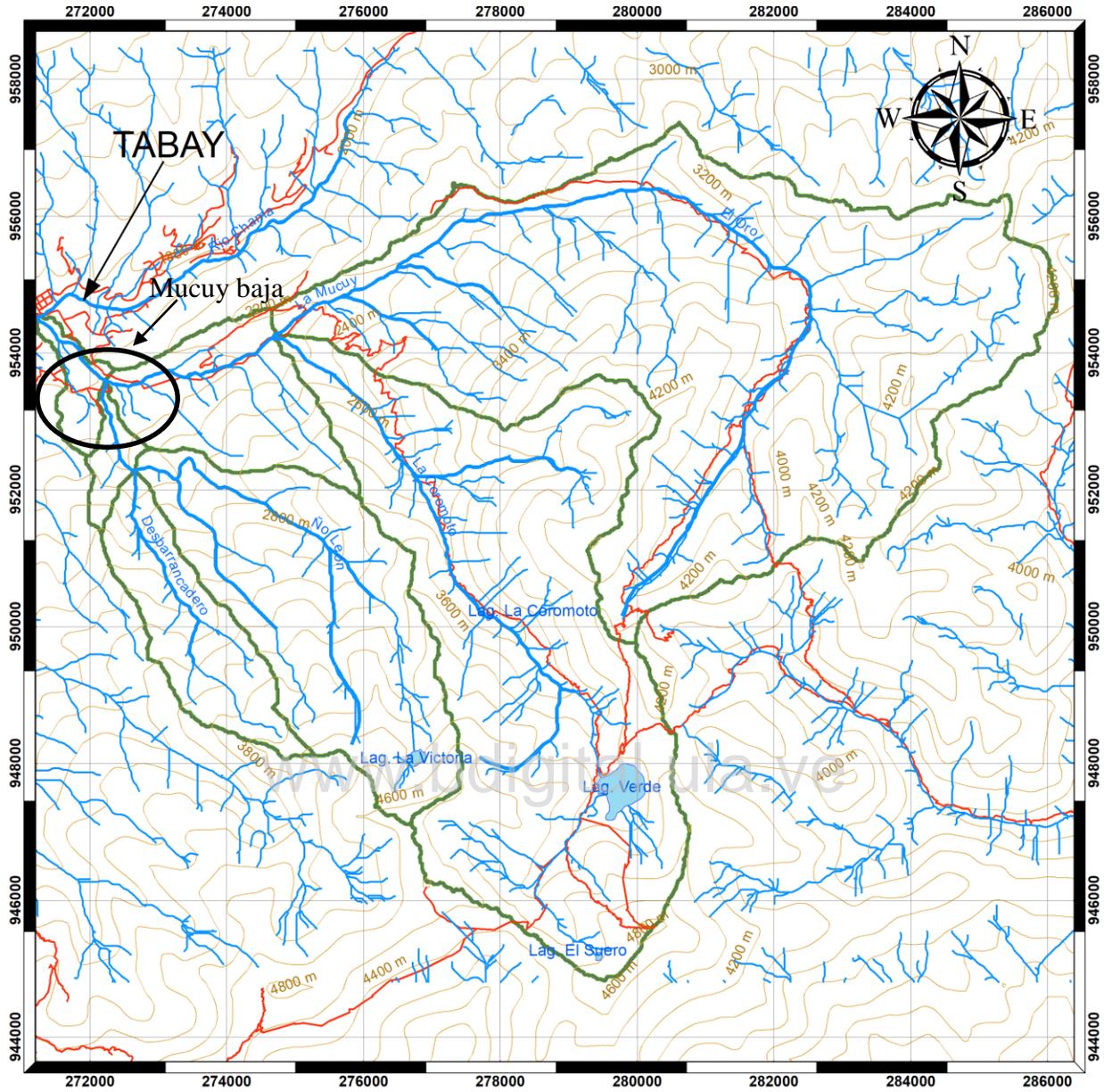
### ANÁLISIS Y RESULTADOS

La determinación de todos los aspectos recabados hasta el momento, aunados a la descripción metodológica de la investigación, conducen a la obtención de resultados que dan lugar al enfoque de los objetivos plasmados al inicio del presente trabajo. En virtud de esto, se muestran los análisis realizados, junto con sus respectivos resultados:

#### **5.1 Procesamiento de la información recopilada**

Partiendo de la cartografía nacional en sus hojas 5941 y 6041, escala 1:100000, estipuladas para la zona en estudio, se obtuvieron un compendio de mapas que permiten visualizar el área en cuestión; para el presente caso, se obtuvo el mapa base de la zona, constituido por las 4 subcuencas escogidas: subcuenca El Oro (41,8 km<sup>2</sup>), subcuenca La Coromoto (27,9 km<sup>2</sup>), subcuenca Ño León y Desbarrancadero (18,4 km<sup>2</sup>), y subcuenca La Mucuy (5,3 km<sup>2</sup>). Adicionalmente, la confluencia existente aguas arriba del río Chama corresponde a un área aproximada de 1 km<sup>2</sup> (tramo de unión de las 4 subcuencas anteriores antes de desembocar al río Chama).

En este sentido se tiene como cartografía base la Figura 5.1 la cual muestra la ubicación de las cuatro subcuencas que conforman el área de estudio, así como la delimitación generada de la cuenca principal. De igual manera se aprecian las curvas de nivel principales, representadas cada 200 m. Posteriormente, la Figura 5.2 muestra una perspectiva del modelo digital de elevación con los cursos principales de agua, denominados El Oro, La Coromoto, Ño León y Desbarrancadero; nombres que a su vez emplea la cartografía nacional para denotar las cuencas presentes. Se aprecia de manera relevante la topografía del lugar.



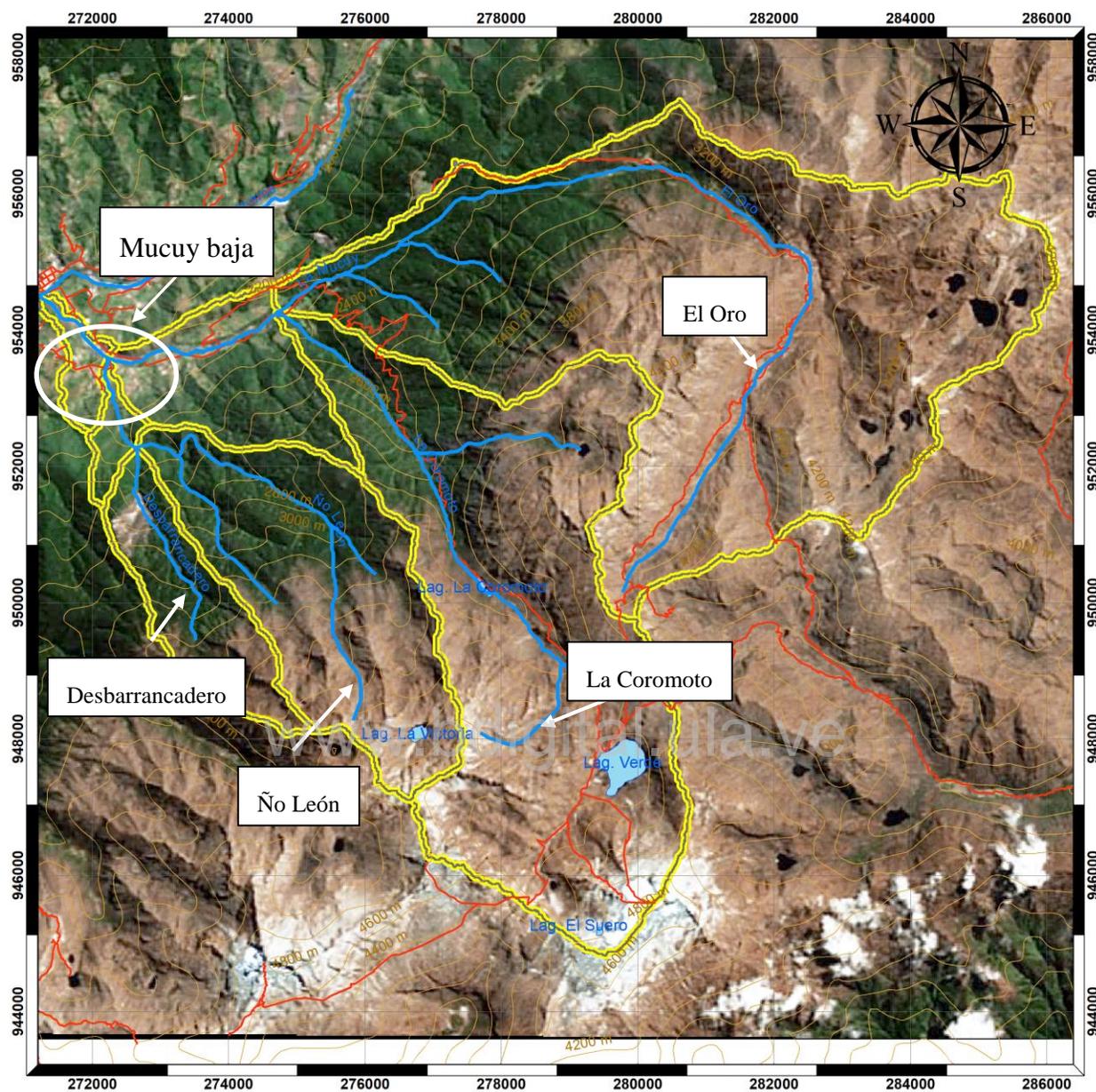
**Leyenda**

-  Vialidad
-  Curvas de Nivel
-  Cuerpos de Agua
-  Delimitación del Área de Estudio



 <b>Universidad de los Andes</b> <b>CIDIAT</b> 	
Proyecto: "Evaluación hidrologica hidraulica de La Quebrada La Mucuy"	<b>Cartografía Base</b> 1:75 000 
Tesista: Ing. Maria Andreina Arias Tutor: Prof. Ada Moreno	Proyección Mercator Transversal Universal (UTM) Lineas UTM cada 2000 metros Datum horizontal WGS 84 HUSO 19N Datum vertical nivel medio del mar Curvas de nivel a intervalos @ 200 metros

Figura 5.1 Mapa base de la cuenca La Mucuy. Elaboración propia.



**Leyenda**

- Vialidad
- Curvas de Nivel
- Cuerpos de Agua
- Delimitación del Área de Estudio

**OrtoFoto.tif**

- RGB**
- Red: Band\_1
  - Green: Band\_2
  - Blue: Band\_3



 <b>Universidad de los Andes</b> <b>CIDIAT</b>	
Proyecto: "Evaluación hidrológica hidráulica de La Quebrada La Mucuy"	<b>Vista Satelital del Área de Estudio</b>  1:75 000 
Tesista: Ing. Maria Andreina Arias Tutor: Prof. Ada Moreno	Proyección Mercator Transversal Universal (UTM) Líneas UTM cada 2000 metros Datum horizontal WGS 84 HUSO 19N Datum vertical nivel medio del mar Curvas de nivel a intervalos @ 200 metros

Figura 5.2 Representación de la topografía y subcuencas delimitadas. Elaboración propia.

## 5.2 Eventos de Crecida: registros históricos en el sector La Mucuy

Para realizar una evaluación más completa del lugar, se hace necesario el conocimiento sobre eventos de crecidas a lo largo del tiempo; es por ello que se destaca dicha información resumida en la Tabla 5.1 dónde se mencionan para distintas fechas los eventos ocurridos en la zona y sus adyacencias, así como algunas cuantías de daños ocasionados. Esta información es una recopilación hemerográfica y etnográfica realizada por Lacruz y Rondón (2008), donde se destacan los siguientes aspectos mostrados a continuación:

Tabla 5.1 Registros históricos de crecidas en La Mucuy (1940-2007).

ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE AFECTACIÓN POR CRECIDAS EN LA MUCUY PARA EL PERÍODO (1940-2003)											
Fuente	Localidad	Año de ocurrencia	Evento natural	Quebrada	Daños materiales						
					Víctimas	Viviendas	Puentes	Cultivos y act. Pisícolas	Vialidad	Unidades Educativas	Serv. Bas.
Lorenzo Maldonado	Mucuy Baja	1940	crecida	Desbarrancadero	0	x	0	0	0	0	0
diario el Vigilante	Los Llanitos	6/14/1941	crecida	Río Chama	0	0	0	pérdida de cultivos	0	0	0
Eloisa Moreno	Mucuy Baja	1944	crecida	Desbarrancadero	0	x	1	0	0	0	0
diario el Vigilante	Mucuy Alta	4/15/1946	crecida	La Mucuy	0	x	0	pérdida de cultivos	0	0	0
diario el Vigilante	Mucuy Alta	12/11/1946	crecida	La Mucuy	0	0	p	25 ha	Vía La Mucuy	0	0
Lorenzo Maldonado	Mucuy Baja	1950	crecida	Desbarrancadero	0	0	1	0	0	0	0
Carmen Villareal	Mucuy Alta	1956	crecida	Hierbabuena	0	x	0	0	Vía La Mucuy	0	0
Filia Rangel Marquina	Mucuy Baja	1966	crecida	Desbarrancadero	0	0	0	0	0	0	0
Juana Parra	Mucuy Baja	1968	crecida	Desbarrancadero	0	x	0	pérdida de cultivos	0	0	0
diario el Vigilante	Tabay	4/29/1971	crecida	El Cucharito y Aguas Calientes	1	x	0	0	0	0	0
diario el Vigilante	Tabay	5/19/1971	crecida	El Cucharito y Aguas Calientes	0	20	0	0	0	0	0
diario el Vigilante	Tabay	11/19/1971	crecida	El Cucharito y Aguas Calientes	0	0	1	0	0	0	0
diario el Vigilante	Mucuy Alta	4/4/1972	crecida	Filo El Oro	0	0	0	Destrucción de la Truchicultura	0	0	0
diario el Vigilante	Mucuy Alta	4/16/1972	crecida	Filo El Oro	0	0	0	Destrucción de la Truchicultura	0	0	0
diario el Vigilante	Tabay	5/11/1972	crecida	Aguas Calientes	0	0	0	0	T007	0	0
Sra. Magali	Mucuy Baja	1976	crecida	La Leona	0	2	0	0	0	0	0
Sr. Alfredo Maldonado	Mucuy Baja	1976	crecida	La Leona	0	x	0	pérdida de cultivos	0	0	0
Sra. Soreli	Mucuy Baja	1981	crecida	Desbarrancadero	0	2	0	0	Vía Mucuy Baja	0	0
Lorenzo Maldonado	Mucuy Baja	1981	crecida	Desbarrancadero	0	6	0	0	0	0	0
diario Frontera	Mucuy Baja	5/11/1981	crecida	Desbarrancadero	0	0	p	pérdida de cultivos	0	0	0
diario Frontera	Mucuy Alta	5/16/1981	crecida	La Mucuy y El Oro	0	0	0	pérdida de cultivos	Vía La Mucuy	0	x
Sra. Ligia	Mucuy Baja	May-83	crecida	Desbarrancadero	0	x	0	0	Vía Mucuy Baja	0	0

Continuación de la Tabla 5.1

ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE AFECTACIÓN POR CRECIDAS EN LA MUCUY PARA EL PERÍODO (1940-2003)											
Fuente	Localidad	Año de ocurrencia	Evento natural	Quebrada	Daños materiales						
					Víctimas	Viviendas	Puentes	Cultivos y act. Písicolas	Vialidad	Unidades Educativas	Serv. Bas.
Sra. Ligia	Mucuy Alta	1983	crecida	La Mucuy	0	0	0	pérdida de cultivos	0	0	0
diario Frontera	Mucuy Alta	5/23/1983	crecida	La Coromoto	0	x	1	0	Vía La Mucuy	0	0
Sra. María y Sr. Luis Parra	Mucuy Baja	1986	crecida	Desbarrancadero	0	3	0	0	0	0	0
Sr. Marcelo Peñaloza	Mucuy Alta	1991	crecida	Filo El Oro	0	0	0	Dstrucción de la Truchicultura	0	0	0
Diario Frontera	Tabay y Escaguey	28-06-1993	crecida	Río Chama	0	10	7	0	T007	0	0
Diario Frontera	Tabay	30-06-1993	crecida	Río Chama	0	7	0	0	0	0	0
Diario Frontera	Tabay	18-05-1995	crecida	Río Chama	1	0	0	0	0	0	0
Sra Ana, Alba y Sr Marcelo Peñaloza	Mucuy Alta	08-06-1998	crecida	La Mucuy	0	x	0	0	Vía La Mucuy	1	0
Diario Frontera	Mucuy Alta	9-06-1998	crecida	La Mucuy, La Coromoto, La Osa y el río Chama	0	x	Puentes	pérdida de cultivos	1	1	0
Diario Frontera	Mucuy Alta	13-06-1998	crecida	Río Chama	0	x	0	0	0	0	x
Diario Frontera	Tabay y Escaguey	15-06-1998	crecida	Río Chama	0	x	0	0	0	0	0
Diario Frontera	Tabay	17-06-1998	crecida	Río Chama	0	x	p	pérdida de cultivos	T007	0	0
Sr. Marcelo Peñaloza	Mucuy Alta	29-05-2003	crecida	La Mucuy	0	x	0	pérdida de cultivos	0	0	0
Diario Frontera	Mucuy Alta y Baja	23-05-2007			0	0	0	0	Vía La Mucuy	0	0

- Lugar de ocurrencia de los eventos de crecida
- Eventos de crecida que han afectado algunos sectores circunvecinos
- Eventos de crecida correspondientes al Sector La Mucuy
- x Cantidad de viviendas afectadas sin número exacto de ellas
- p Puentes afectados por crecidas torrenciales

La Tabla 5.1, resume de manera general la información obtenida mediante encuestas realizadas a los lugareños del sector, dónde a su vez se sustentan algunos hechos mediante la recolección hemerográfica. Cabe destacar que desde el punto de vista social se observa que para el año 1971 se habían visto afectadas un total de 20 viviendas, y para el año 1993 un aproximado de 10 viviendas (para ese entonces), actualmente ese número de afectaciones ha incrementado. Como se aprecia en la Tabla 5.1 los mayores daños han estado presentes en los puentes que comunican la arteria principal con las localidades de La Mucuy, así como las vías que permiten la comunicación

con otros subsectores. Adicionalmente, es de importancia mencionar que cada evento ocurrido presenta diversos patrones de precipitaciones, lo que diferencia la intensidad del evento ocurrido y por consecuencia el nivel de afectación. También debe tenerse en cuenta que los mayores picos de ocurrencia de crecidas en la quebrada La Mucuy, corresponden a los meses de febrero y mayo, ocasionando un mayor impacto en las localidades que se encuentran asentadas (Lacruz y Rondón, 2008).

### 5.3 Estaciones pluviográficas de la zona y polígonos de Thiessen

Como se indicó en la Tabla 3.1, se realizaron análisis a 8 estaciones pluviográficas cercanas de la zona, las cuales tuvieron registros de precipitaciones medias anuales la mayor cantidad de años posibles. Con base en la información mostrada, mediante el uso del software ArcGis v10.2.2 se realizó la triangulación respectiva para observar qué estación producía mayor influencia sobre la cuenca, obteniendo así que ésta correspondió a la estación Tabay (3038) tal como se indica en la Figura 5.3.

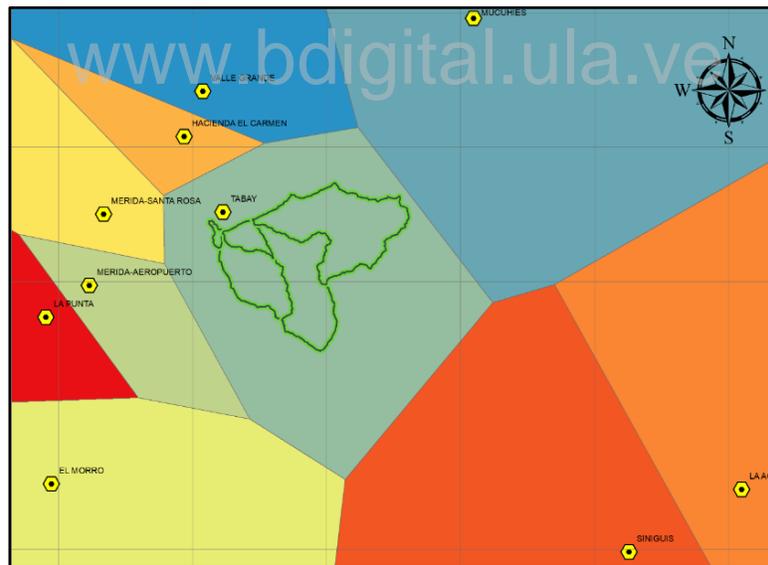


Figura 5.3 Áreas de influencia según los polígonos de Thiessen. Elaboración propia.

La influencia obtenida de la estación pluviográfica Tabay (3038) correspondió a un 100% del área en estudio, además de tener un total de 34 años de registro en cuanto a mediciones de precipitación. No obstante, se indican a continuación en la Tabla 5.2 las precipitaciones registradas para las estaciones analizadas:

**Tabla 5.2 Precipitaciones promedio (Pp) de las estaciones pluviográficas escogidas.**

<b>Estación Valle Grande, serial 3024 (Período 1961-1995)</b>													
Meses	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
<b>Pp (mm)</b>	54,8	60,0	107,1	248,3	250,4	111,0	79,6	128,1	174,4	218,2	164,8	73,7	1670,3
<b>Estación Tabay, serial 3038 (Período 1961-1995)</b>													
Meses	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
<b>Pp (mm)</b>	33,7	41,9	65,9	180,0	223,2	113,9	98,0	129,6	172,1	230,3	169,3	75,1	1532,9
<b>Estación Mérida-Aeropuerto, serial 3047 (Período 1921-1992)</b>													
Meses	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
<b>Pp (mm)</b>	47,8	46,0	62,8	166,8	247,2	164,3	121,4	141,6	193,5	266,1	209,8	87,4	1754,8
<b>Estación El Morro, serial 3080 (Período 1962-1997)</b>													
Meses	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
<b>Pp (mm)</b>	8,3	4,9	17,2	45,1	62,6	56,6	51,0	61,1	59,0	64,9	41,5	21,5	493,8
<b>Estación La Punta, serial 8049 (Período 1975-1997)</b>													
Meses	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
<b>Pp (mm)</b>	20,4	27,1	52,9	125,7	159,8	130,3	80,6	111,6	156,9	199,3	148,0	49,9	1262,8
<b>Estación Sinigüis, serial 3230 (Período 1990-1998)</b>													
Meses	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
<b>Pp (mm)</b>	82,5	118,7	177,7	460,4	538,5	592,8	523,7	465,1	534,5	466,5	375,7	135,1	4471,2
<b>Estación Mucuchíes, serial 3122 (Período 1941-1985)</b>													
Meses	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
<b>Pp (mm)</b>	5,7	9,5	19,4	80,4	98,8	94,5	95,1	87,1	74,9	70,7	37,2	9,2	682,6
<b>Estación La Acequia, serial 3190 (Período 1970-1998)</b>													
Meses	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
<b>Pp (mm)</b>	33,3	43,7	97,7	268,1	338,4	329,5	328,0	311,0	340,9	315,3	213,3	72,0	2691,0

Fuente: Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (1998).

#### 5.4 Usos de la tierra y cobertura vegetal

Para la superposición de mapas referentes a cobertura vegetal y clases texturales de los suelos, se deben enfatizar los factores bajo los cuales se obtuvieron los resultados, destacando que hubo un apoyo importante de la información geomorfológica de la zona.

Desde el punto de vista analítico, se describen ciertas características referentes a una de las unidades geomorfológicas del municipio Santos Marquina, como se indica en el estudio de Parra y Salcedo (2015):

Unidad geomórfica fluvial-aluvial; se extiende aguas abajo a partir de la cota de 3000 msnm, e involucra la zona de desembocadura del río La Mucuy en el río Chama. Es una extensa área donde los principales elementos que modelan el paisaje, son los mecanismos fluviales y gravitacionales. Se presentan así, procesos destructivos asociados a derrumbes, deslizamientos y cárcavamientos, originados por condiciones naturales y antrópicas. En esta vertiente es evidente el incremento de la erosión e incluso se observan derrumbes dispersos como, por ejemplo; el derrumbe denominado “El Desbarrancadero”, ubicado en la subcuenca de la quebrada Ño León, que aporta gran cantidad de material aluvial al río Chama, aguas debajo de Tabay, y el deslizamiento de “El Palón”, ubicado en el sector San Gerónimo. Debido a la estrechez de los valles fluviales, la posibilidad de acumulaciones cuaternarias está bastante restringida, es sólo en el sector Mucuy Alta, donde se inician las etapas proximales del complejo de abanicos aluviales de La Mucuy, relacionados con la tectónica activa de la falla de Boconó (traza sur). Estos abanicos son coalescentes caracterizados por abundante contenido de bloques y cantos (clastos > 8 cm) que conforman suelos poco profundos de elevada pedregosidad (p. 35).

Por otro lado, tal como se planteó en el marco metodológico del presente trabajo, la clasificación textural estuvo basada en el estudio realizado por Parra y Salcedo (2015) donde de manera general enmarcan las siguientes clases texturales de suelos: franco, franco-arenoso, franco-arcilloso-arenoso y areno-francosa.

Esta información fue corroborada en conversaciones con el Profesor Jorge Carrero, quien en su vasta experiencia como geomorfólogo, indicó que esta clasificación es debida principalmente a la antigua formación denominada asociación Sierra Nevada, en los andes venezolanos. Con base en dicha información, se hizo un análisis acerca de los tipos de rocas presentes en la zona de estudio, donde históricamente predominan los gneises de origen granítico y los esquistos. Bajo esta perspectiva, es de importancia mencionar que los gneises se componen en tres grupos de minerales esenciales como lo son: el cuarzo, el feldespato y la mica; es por ello que, dentro de los grupos de suelo señalados se posiciona el cuarzo como el mineral que aporta arena al suelo. Por otro lado, cuando se hace referencia al feldespato y la mica, éstos aportan el componente arcilloso (además hay que mencionar la tendencia que tienen los gneises de ser areno-arcillosos), y de aquí se obtuvo

uno de los rangos más importantes para la clasificación textural de los suelos presentes en la cuenca del río La Mucuy.

Conjuntamente, se hace referencia al mapa geomorfológico de la parte baja de la cuenca en estudio y sus alrededores obtenido previamente en el estudio de Dávila y Mora (2014). El mapa es mostrado en la Figura 5.4. Cabe resaltar, que existen diferentes edades geológicas que dan indicios sobre el tipo de suelo existente en la zona, por lo cual observando bajo el respectivo color amarillo se tiene la edad del holoceno, cuya descripción abarca la terraza aluvial albergando depósitos del río Chama (arrastre de materiales desde la Laguna Mucubají). Dicho material está conformado generalmente por gneises graníticos y bandeados (los esquistos se encuentran en menor proporción), por lo cual es un tipo de suelo arenoso principalmente cuando se habla de agregado fino. Asimismo, existe una colada fango-blocosa de origen antrópico, cuyo origen es debido a la extracción de finos en las adyacencias de la quebrada Ño León. Sobre la terraza aluvial se observan elementos clásticos, donde la característica principal corresponde a elementos de origen sedimentario, los cuales pueden estar consolidados en mayor o menor grado. Dichos elementos se aprecian en el mapa transportados longitudinalmente, y es por ello que existe una tendencia de material blocoso que acompaña inclusive donde se emplaza la población de Tabay. Sobre esta terraza se aprecian dos conos de deyección, proporcionando así la heterogeneidad del material aportada por la disgregación proveniente de la Sierra Nevada.

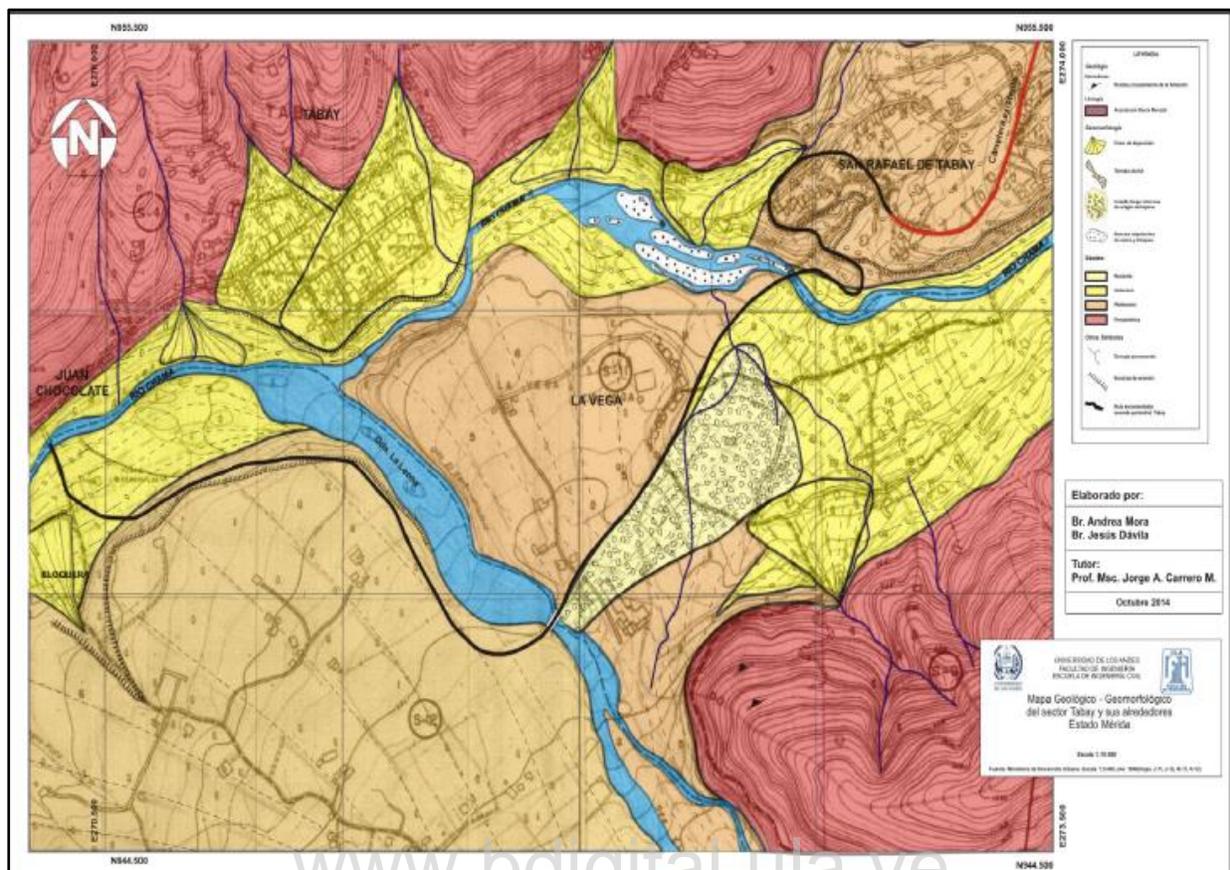


Figura 5.4 Mapa geomorfológico de la quebrada Ño León y adyacencias a Tabay.

Fuente: Dávila y Mora (2014).

Simultáneamente, se tiene en color beige la representación del pleistoceno, edad geológica que precede al holoceno explicado anteriormente (la más antigua dentro del cuaternario), donde se destaca un gran cono-terracea generado por la quebrada Ño León, valiendo destacar que estos suelos están consolidados para fines constructivos por lo que es importante fundar cualquier obra civil sobre esta época geológica. Cuando se habla del cono-terracea, se hace referencia a que existe una relación entre el cono de deyección generado por la quebrada y la terraza aluvial existente, primordialmente por la dinámica en la deposición de los materiales, los cuales en estos puntos comunes son uniformes. No obstante, la torrencialidad del agua en esta zona en años anteriores, produjo la diversidad de materiales encontrados, y es donde se generan distintas clasificaciones texturales de los suelos para zonas cercanas.

Subsiguientemente bajo el análisis, se encuentran los esquistos, responsables de agregar el componente arcilloso al suelo. Cabe destacar que, el esquisto posee una roca de alto grado de

metamorfismo, por lo tanto, es poco productor de suelos residuales y aunado al clima su alteración es lenta. Sin embargo, no hay que dejar de lado el hecho de que la Sierra Nevada bajo su formación granítica aporta mayor cantidad de detritos por lo cual existe un mayor porcentaje de arena en los suelos.

#### **5.4.1 Clasificación textural de los suelos en la cuenca La Mucuy.**

Con relación a los análisis efectuados anteriormente, se hizo una división para la cuenca en tres partes, donde se explican brevemente los resultados obtenidos:

1) *Parte alta de la cuenca:* es la zona mayormente representada por vegetación de páramo, y algunas partes ocupadas por matorral/arbustal. Existe poca infiltración de agua, y de igual forma las altas pendientes permiten que el agua escurra en mayor cantidad. De acuerdo a la geomorfología, el componente predominante en los suelos es la arena (debido al gneis), por lo que se establece una clase textural mayoritariamente franco-arenosa, lo cual representa en cuanto a cualidad una textura moderadamente gruesa. Haciendo referencia a la Figura 3.2, el grupo asignado de suelos para este caso es de tipo B (moderadamente bajo potencial de escorrentía).

2) *Parte media de la cuenca:* marcada principalmente por bosque denso y en menor proporción por bosque medio; simultáneamente en las cercanías de la quebrada El Oro se aprecia bosque ralo. Es de importancia mencionar que, al referirse a bosque denso y medio se hace alusión a la infiltración del agua en los suelos, así como la intercepción de la lluvia debido a árboles de gran tamaño. Debido al follaje cerrado que crean estos árboles en sus copas, donde las ramas superiores y las hojas forman un techo, la luz solar apenas alcanza a penetrar en el suelo, cuyo efecto, propicia que la cantidad de vegetación que crece debajo y entre los árboles maduros es escasa. Al solapar esta información con la geomorfología analizada, existe una variedad de clases texturales presentes, donde predomina el suelo franco (suelos de textura relativamente suelta) y nuevamente el componente arenoso, generando así la clase areno-francosa. Es por ello que la mayoría de los suelos en esta clasificación pertenecen al grupo B (moderadamente bajo potencial de escorrentía) y a su vez existen también suelos dentro del grupo A (bajo potencial de escorrentía).

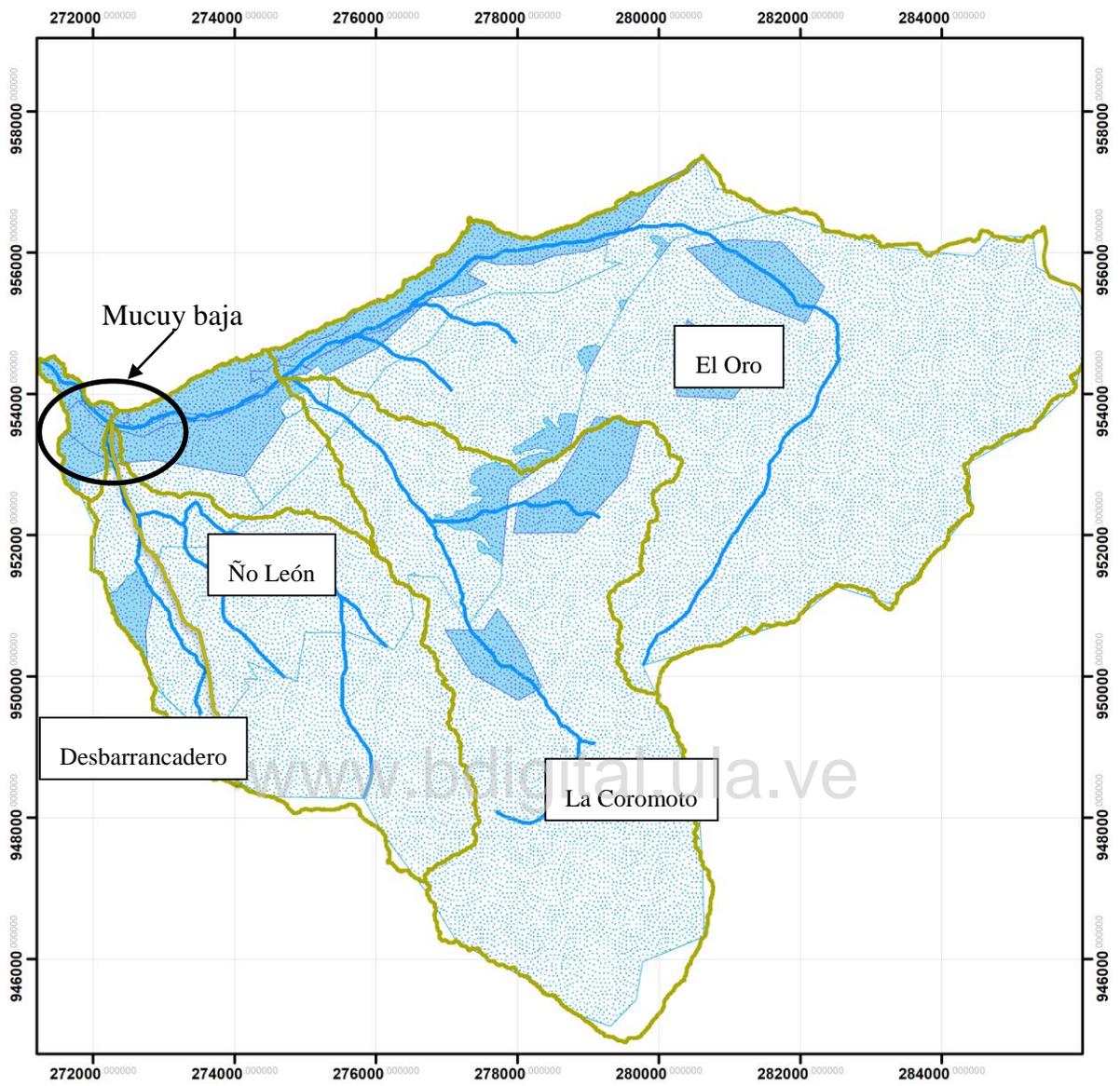
La pedregosidad de los suelos es notable en algunas zonas y existe el intercambio de clastos blocosos (detritos, roca fracturada) principalmente acarreados por los cursos torrenciales de la quebrada Ño León y durante el proceso geohistórico que emplaza el valle de la cuenca media del

río Chama; caracterizado además por presentar numerosas unidades geomorfológicas representadas mayoritariamente por conos de deyección y terrazas.

3) *Parte baja de la cuenca*: esta porción constituye un uso mucho más diverso y complejo de categorizar, sin embargo, bajo la información obtenida de los usos de la tierra y cobertura vegetal se aprecia un porcentaje de área importante destinado a usos agrícolas y agropecuarios, estableciendo estas actividades sobre suelos esencialmente del tipo franco-arcilloso-arenoso, teniendo de esta forma suelos de textura moderadamente fina. Cabe destacar, que existe un notorio acompañamiento de herbazales (gramínea), los cuales producen infiltración en una parte y por otra también propician la escorrentía (permiten al menos un 40 % de infiltración y un 60 % de escorrentía). Asimismo, la zona de matorrales y arbustos contribuye a una vegetación dispersa entre herbáceas y árboles, lo cual es aproximadamente un 50 % de escorrentía y un 50 % de infiltración; estimaciones pertinentes para determinar las clases texturales de suelos presentes. Otro de los parámetros importantes en la parte baja de la cuenca, es considerar el establecimiento de areneras empleadas para la extracción de agregado fino, cuya actividad por varios años como saque descontrolado y no planificado ha alterado de manera importante la dinámica del curso hídrico, generando a su vez capas sobre el suelo subyacente de arenas. Como complemento a este resultado se tiene también lo siguiente:

Respecto al caso de la Quebrada La Leona, sus perfiles transversales y longitudinales han sido alterados desde el punto de vista antrópico desde las medianerías del siglo pasado, razón por la cual su dinámica fluvial se ha visto modificada hacia el ámbito destructivo, siendo la causa que originó la colada fango-blocosa que se desprendió desde la ribera derecha con orientación noreste y que se esparció al sur de lo que hoy en día constituye el caserío La Vega. La actividad antrópica ha consistido en el desmedido, no planificado y no controlado saque de agregados para la construcción causando con impacto ambiental el cambio de la dinámica torrencial (Dávila y Mora, 2014, p. 23).

Con base en lo anteriormente expuesto, se estimó la clasificación de los suelos de acuerdo a grupos, y de esta forma se realizó una superposición entre los usos actuales de la tierra, su cobertura vegetal y las clases texturales de los suelos, lo cual también sirvió para determinar el número de curva (CN) del antiguo SCS (Soil Conservation Service), cuyo valor se utilizó para los softwares de simulación respectivos explicados más adelante (tablas de CN mostradas en Anexo 2). En virtud de esto, se representa en la Figura 5.5 el resultado cartográfico que muestra los tipos de suelos presentes en la cuenca:

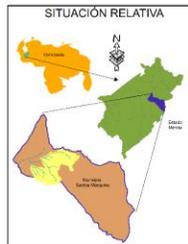


**Leyenda**

-  Delimitación de Cuencas
-  Quebradas Principales

**Grupos de Suelos**

- Grupo**
-  B
  -  C



 <b>Universidad de los Andes</b> <b>CIDIAT</b> 	
Proyecto: "Evaluación hidrológica hidráulica de La Quebrada La Mucuy"	<b>Clasificación Textural del Suelo</b> 1:75 000 
Tesista: Ing. Maria Andreina Arias Tutor: Prof. Ada Moreno	Proyección Mercator Transversal Universal (UTM) Líneas UTM cada 2000 metros Datum horizontal WGS 84 HUSO 19N Datum vertical nivel medio del mar Curvas de nivel a intervalos @ 200 metros

Figura 5.5 Clasificación textural de los suelos de la cuenca. Elaboración propia.

## 5.5 Curvas IDF de la cuenca, generación de hietogramas de precipitación máxima

Tal como se mencionó en el marco metodológico, se hizo uso de una data histórica referente a datos de intensidades máximas, donde la estación resultante con mayor área de influencia en la zona correspondió a la estación pluviográfica Tabay (3038). En efecto, se obtuvo un total de 18 años de registros, para duraciones de precipitaciones extremas de 15 y 30 minutos, y 1, 3, 6, 9, 12 y 24 horas. El análisis de frecuencias efectuado para las seis distribuciones de probabilidad teóricas existentes resultó en menor error el ajustado a la distribución Log-Pearson III (verificado mediante el test de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov); adicionalmente debe mencionarse que esta distribución es ampliamente utilizada para el análisis de frecuencias de caudales máximos. Asimismo, este estudio se ejecutó con la finalidad de estimar los hietogramas de precipitación máxima para tres períodos de retorno a estudiar: 25, 50 y 100 años. Se hizo uso del método de los bloques alternos como se explicó en la metodología, y se generaron de esta forma los hietogramas de entrada al programa HEC-HMS v4.1 para la posterior obtención de los hidrogramas de crecida, junto con los respectivos caudales extremos.

Simultáneamente, el tiempo de concentración de la cuenca se determinó tal como fue explicado en la metodología; con el uso de los segmentos parciales arrojó un valor superior a la Ecuación 3.1, mientras que con dicha expresión para toda la longitud y desnivel dio como resultado una hora con diez minutos. Al realizar el análisis por segmentos, hubo mayor apreciación ya que toma en cuenta mayor cantidad de tramos, por lo cual se trabajó con un tiempo de una hora con cuarenta minutos (1h:40 min), para el cauce de mayor trayecto dentro de la cuenca que fue la quebrada El Oro con 12,7 km aproximadamente. A manera ilustrativa se indican, en las Figuras 5.6 y 5.7, las curvas IDF generadas y posteriormente los hietogramas de lluvia para los tres períodos de retorno analizados.

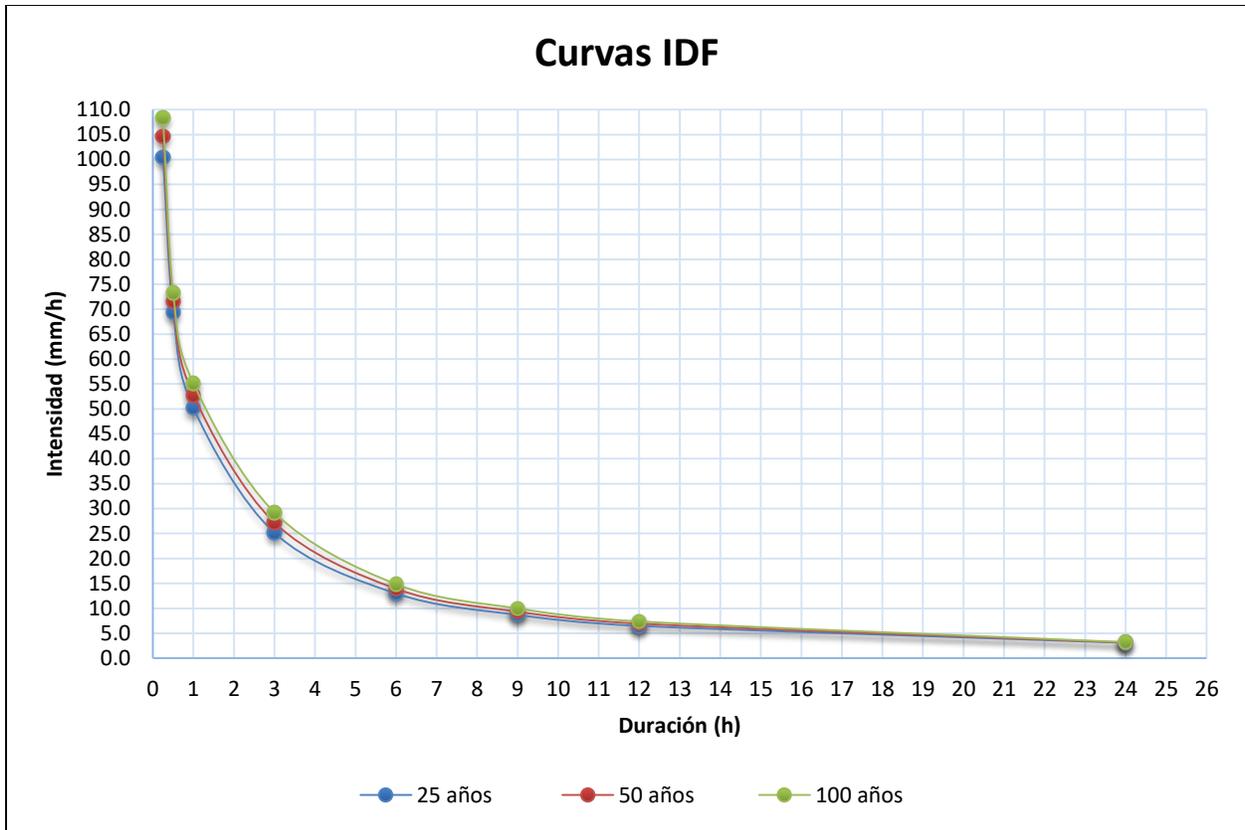


Figura 5.6 Curvas de intensidad-duración-frecuencia para la estación Tabay (3038). Elaboración propia.

La representación gráfica de las curvas IDF, permitió obtener posteriormente los hietogramas de diseño para ser introducidos en el modelo hidrológico HEC-HMS. Con base en los intervalos escogidos para el análisis de lluvia, fueron leídos sobre el gráfico cada intervalo de 10 minutos, y así se generaron los hietogramas para los tres períodos de retorno (bajo el método explicado de los bloques alternos), mostrados a continuación en la Figura 5.7:

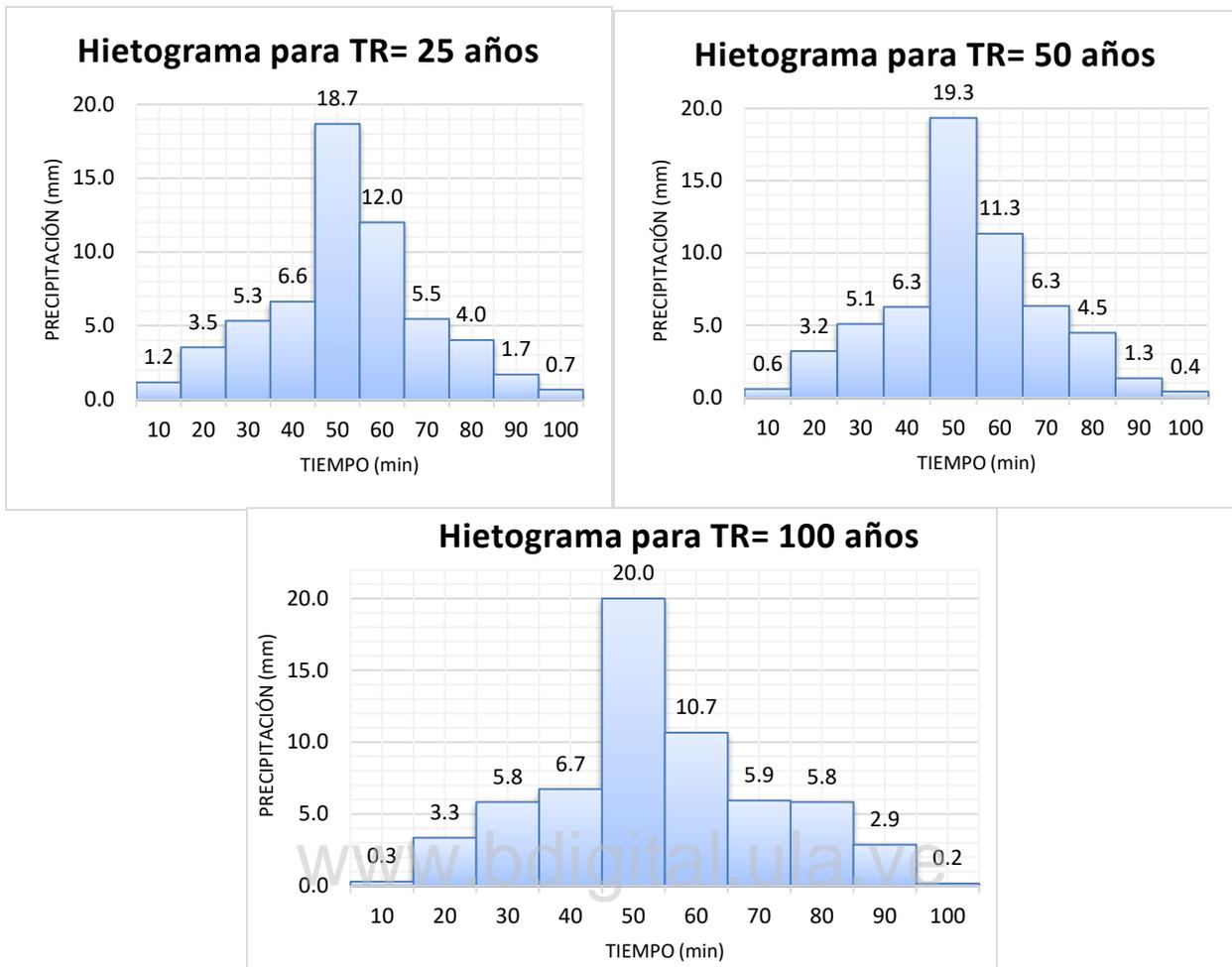


Figura 5.7 Hietogramas para los períodos de retorno señalados. Método de los bloques alternos. Elaboración propia.

Observando los hietogramas obtenidos, se aprecia que, para el tiempo de concentración calculado en el cauce más largo, los rangos de valores se estipularon hasta un máximo de 20 mm para un tiempo de retorno de 100 años. No obstante, existe una cercanía entre los resultados, lo que induce de alguna manera en que los hidrogramas de crecida a obtener posteriormente serán similares entre los tres períodos de retorno, y por ende los valores de caudales extremos sean cercanos. Asimismo, es de importancia mencionar que el proceso seguido se estableció para los hietogramas con bloques alternos de duración par, ya que el tiempo total resultante en minutos correspondió a un valor de 110 minutos. Igualmente, esto se observa en los gráficos indicados, dónde la mayor intensidad de la lluvia ocurre en el minuto 50 para los tres períodos de retorno.

## **5.6 Transposición de la tormenta del río Chama del 28 de abril de 1972 en la cuenca La Mucuy**

Con la finalidad de propiciar resultados en el marco de tormentas que ya hayan ocurrido anteriormente en las zonas aledañas a la cuenca La Mucuy, se decidió agregar, además de los hietogramas ya obtenidos con las intensidades máximas de la estación Tabay (3038), los generados por la transposición de la tormenta del río Chama ocurrida el 28 de abril de 1972. No obstante, es de hacer notar que, el presente estudio se basó en eventos extremos, por lo cual, los resultados de mayor magnitud entre ambas metodologías, fueron los adecuados para el análisis.

El trabajo de transposición de tormentas se efectuó con los datos obtenidos de Hernández y Andrade (2004), teniendo como centro de tormenta la estación Páramo La Culata (3027). Se determinó un factor de corrección por área ( $K_a$ ) resultando un valor de 0,891 para la obtención de hietogramas que fueron usados en la cuenca La Mucuy. De igual forma se hizo la respectiva corrección por área para los tres períodos de retorno, obteniendo así los valores porcentuales de la tormenta real. Cuando se realizó la transposición, los valores resultantes tuvieron órdenes de magnitud similares, pero inferiores a los ya obtenidos con los datos de intensidades máximas para la estación Tabay (3038), razón por la cual se decidió seguir trabajando con los hietogramas generados por el método de los bloques alternos explicados anteriormente.

## **5.7 Estimación de parámetros hidrológicos de la cuenca**

Con base en las investigaciones realizadas, algunos de los parámetros para el estudio hidrológico fueron estimados mediante estudios previos, así como revisión de material existente lo cual permitió establecer con criterio y soporte los valores escogidos. Es por ello que para la determinación de los valores de rugosidad de Manning fueron estudiadas las características referentes al uso de la tierra y cobertura vegetal, así como también la clasificación textural de los suelos obtenida anteriormente. Haciendo uso de esta información y de las tablas para valores representativos de la rugosidad ya mencionadas en el marco metodológico, se destacan más adelante los valores empleados. Asimismo, se tomó como referencia el valor representativo para cauces de montaña de  $n = 0,05$  (CIDIAT, *sf*, tomado de Pimstein, 2014).

Otro de los parámetros importantes para el estudio hidrológico se basa en el número de curva, donde el resultado comprendió valores correspondientes a una condición hidrológica II, lo cual

significa una precipitación acumulada de 5 días previos entre 33 y 52,5 mm. No obstante, se consideró trabajar con una condición hidrológica III (correspondiente a valores de precipitación acumulada que superan los 52,5 mm), ya que el estudio se enmarcó en eventos extremos de crecida, por lo que resultó significativo trabajar con valores más altos de escorrentía. Sin embargo, estas condiciones hidrológicas son difíciles de establecer, por lo cual es recomendable que sean revisados los registros históricos, con la finalidad de evaluar las precipitaciones diarias antecedentes, en los eventos hidrológicos más perjudiciales registrados en la zona de estudio.

### **5.8 Conceptualización hidrológica de la Cuenca La Mucuy**

Para cada uno de los procesos hidrológicos requeridos durante el cálculo de cualquier modelo de simulación a emplear (en este caso el HEC-HMS y la extensión para ArcGis, HECGeo-HMS) es importante tener claro cuáles son los cauces principales a analizar, así como sus respectivos segmentos de escurrimiento (generalmente catalogados como vertientes derecha e izquierda de cada cauce principal), así como también sus respectivas características, cuyas descripciones y usos fueron nombrados con anterioridad: rugosidad, pendiente longitudes, CN, entre otros.

Para ello, es de vital importancia conceptualizar de manera esquemática el sistema en estudio, por lo tanto, fueron representadas de esta manera las subcuencas principales, los tramos de unión entre ellas, las confluencias y la salida que constituye todo el sistema en general. La representación gráfica de la cuenca, permitió una mayor eficiencia para la comprensión del modelo hidrológico, bajo este orden de ideas se aprecian la Figura 5.8.

Asimismo, la Figura 5.9 señala de manera esquemática esta conceptualización, indicando mediante segmentos de escurrimiento y escorrentía el comportamiento general de la cuenca. En dicho esquema se aprecian las subcuencas denotadas con sus respectivas vertientes (derecha e izquierda), así como los tramos que transportan el flujo proveniente de la unión de quebradas principales.

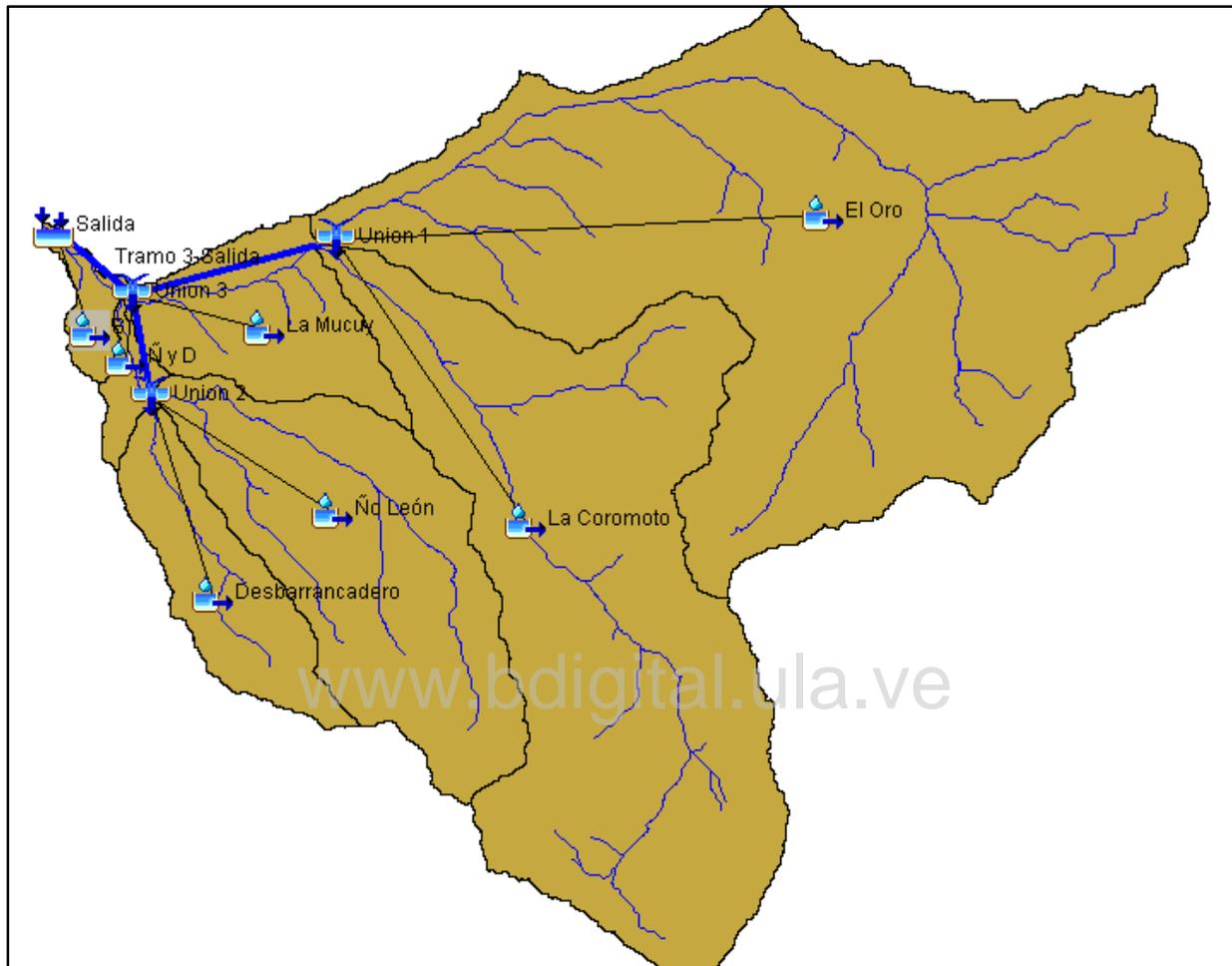


Figura 5.8 Conceptualización hidrológica de la cuenca La Mucuy, para el modelo HEC-HMS v4.1.

Elaboración propia.

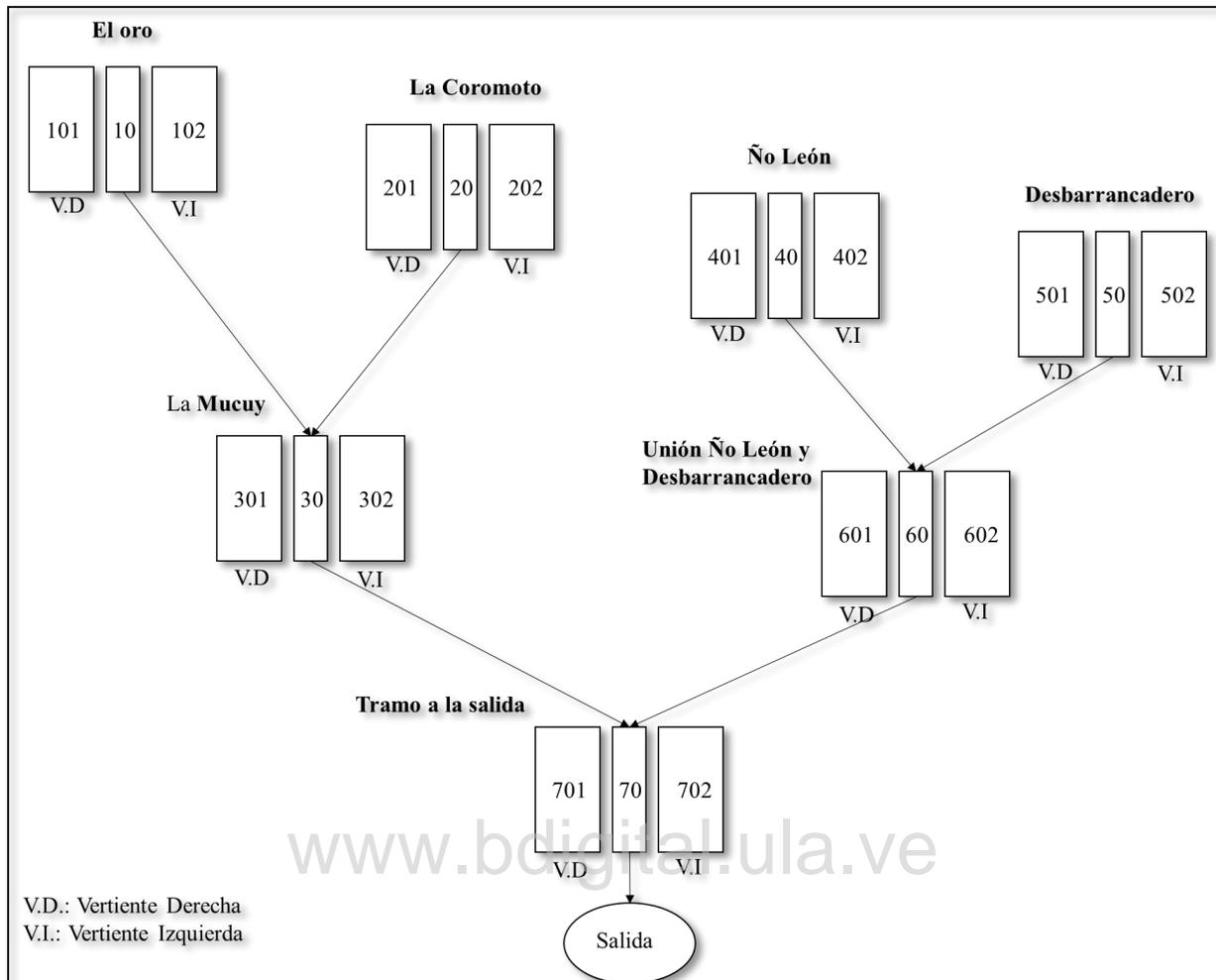


Figura 5.9 Conceptualización hidrológica cuenca La Mucuy. Elaboración propia.

En virtud de la información mostrada, para la obtención de resultados en el modelo hidrológico HEC-HMS v4.1, se hizo uso de la herramienta HecGeo-HMS v3.5 la cual con la ayuda del DEM (modelo digital de elevación) obtenido, y desarrollando diversos procesos en el software ArcGis v10.2.2, se generó toda la información topográfica necesaria para cada uno de los componentes de la cuenca (segmentos de escurrimiento y escorrentía), así como el uso de la tabla de valores de Manning recopilados en el manual del programa EVENTO del profesor Roberto Duque (Anexo 1), y la tabla de número de curva (CN) para condición de humedad antecedente III explicada anteriormente (Anexo 2). Conjuntamente los análisis de todos estos parámetros se resumen en la Tabla 5.3, mostrada a continuación:

Tabla 5.3 Parámetros hidrológicos de cada subcuenca.

AFLUENTE	VERT.	ISEG	Área (km <sup>2</sup> )	% Área	Longitud (m)	CN (II)	CN (III)	n Manning	Pendiente (m/m)
EL ORO	DER	101	21,66	52	1280,1	67	83	0,4	0,5984
	IZQ	102	20,19	48	1193,2	66	82	0,8	0,5984
	Subcuenca	10	41,85	100	16921,2	-	-	0,05	0,141
LA COROMOTO	DER	201	17,51	63	1285,6	69	84	0,24	0,6873
	IZQ	202	10,41	37	764,3	73	87	0,15	0,678
	Subcuenca	20	27,92	100	13620,1	-	-	0,05	0,195
LA MUCUY	DER	301	1,12	21	190,5	72	86	0,06	0,4995
	IZQ	302	4,21	79	715,9	73	87	0,07	0,5438
	Subcuenca	30	5,33	100	5880,6	-	-	0,05	0,246
ÑO LEÓN	DER	401	4,37	34	490,5	65	82	0,024	0,6446
	IZQ	402	8,5	66	954,1	68	84	0,029	0,6771
	Subcuenca	40	12,87	100	8909,0	-	-	0,05	0,309
DESBARRANCADERO	DER	501	2,1	45	349,0	64	81	0,13	0,6564
	IZQ	502	2,56	55	425,5	70	85	0,15	0,6659
	Subcuenca	50	4,66	100	6016,7	-	-	0,05	0,382
UNIÓN ÑO LEÓN Y DESBARRANCADERO	DER	601	0,24	27	81,6	73	87	0,15	0,5821
	IZQ	602	0,64	73	217,7	72	86	0,24	0,489
	Subcuenca	60	0,88	100	2939,4	-	-	0,05	0,282
TRAMO SALIDA	DER	701	0,0015	32	10,6	80	91	0,011	0,1027
	IZQ	702	0,0032	68	22,8	81	92	0,015	0,1646
	Subcuenca	70	0,0047	100	140,5	-	-	0,05	0,099

Con base en los resultados mostrados, fueron canalizados ciertos aspectos en el HEC-HMS v4.1, bajo lo cual se generaron los respectivos caudales de crecida (o caudales pico), correspondientes a tres períodos de retorno escogidos para el análisis los cuales fueron de 25, 50 y 100 años. Asimismo, fueron obtenidos los hidrogramas de crecida respectivos, donde de manera gráfica se apreciaron los máximos valores que se generaron bajo la transformación lluvia-escorrentía realizada anteriormente.

### 5.9 Evaluación hidrológica de la cuenca mediante HEC-HMS v4.1

Considerando los aspectos anteriormente explicados, y haciendo referencia a las bases teóricas del presente trabajo, la simulación hidrológica fue realizada en este software, el cual, requirió de ciertas características de la cuenca (algunas de ellas expresadas en la Tabla 5.3), especificaciones de tiempo, y los hietogramas de lluvia respectivos para cada período de retorno establecidos. Subsecuentemente, entre los resultados generados por dicho programa se tienen los caudales pico para los tres períodos de retorno analizados, mostrados en la Tabla 5.4 a continuación:

Tabla 5.4 Caudales pico generados en Unión 3.

<b>Tr (años)</b>	<b>Caudal extremo (m<sup>3</sup>/s)</b>
25	319,4
50	327,5
100	354,7

Con base en estos resultados y haciendo apoyo en la conceptualización hidrológica de la cuenca, se empleó el máximo caudal registrado en el punto denominado “Unión 3” (donde se unen las quebradas La Mucuy y Ño León, determinado en el esquema como tramo a la salida ISEG 70), designado de esta forma para seguir un orden respecto a los cauces presentes, indicados en la Figura 5.8. Apreciando los valores de caudales extremos arrojados, es bastante notorio que no cambian mucho respecto a la magnitud, siendo entonces un caudal representativo el que ocurre para un período de retorno de 25 años con un total de 319,4 m<sup>3</sup>/s. Con el propósito de visualizar de mejor forma los resultados obtenidos del hidrograma de crecida, se representa a continuación en la Figura 5.10 los valores obtenidos en el punto denominado “Unión 3”, y se desglosan los aportes más representativos que dieron lugar en este punto considerando un período de retorno de 25 años (resultados completos del análisis hidrológico mostrados en el Anexo 3).

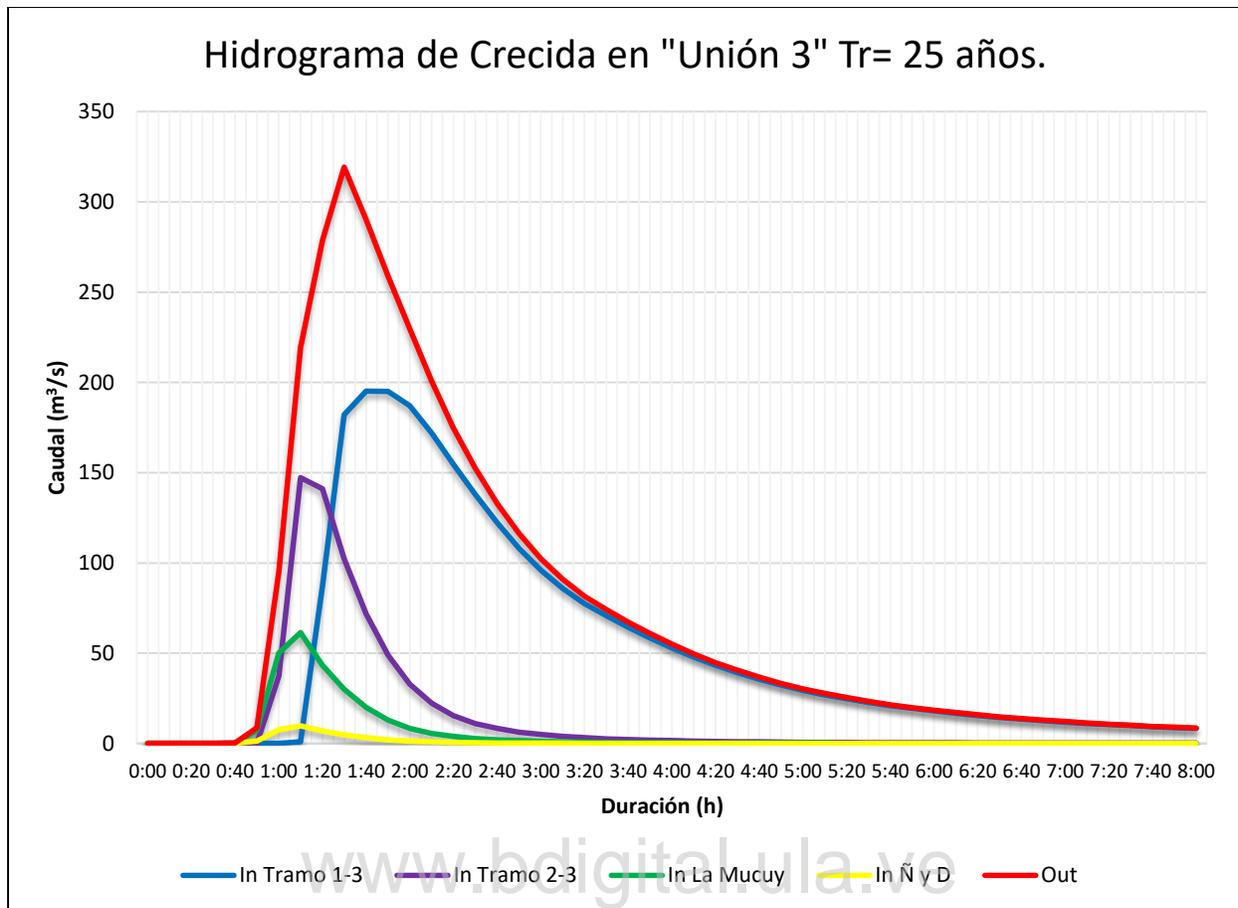


Figura 5.10 Hidrograma de crecida para el punto “Unión 3”, confluencia entre La Mucuy y Ño León.  
Elaboración propia.

En color rojo se visualiza el máximo caudal obtenido indicado anteriormente con un valor de  $319,4 \text{ m}^3/\text{s}$ , seguido por el color azul que indica el Tramo 1-3 en la designación (confluencia de las quebradas el Oro y La Coromoto), con un valor de  $195,2 \text{ m}^3/\text{s}$ ; y finalmente en orden la curva de color morado expresa el Tramo 2-3 (confluencia Ño León y Desbarrancadero) con un valor de  $147,2 \text{ m}^3/\text{s}$ .

El análisis para este hidrograma resultó ser el más representativo, puesto que indica órdenes de magnitud similares en lo que respecta a los tres períodos de retorno; o sea, los expresados en la Tabla 5.4 y la Figura 5.10 (para  $Tr=25$  años). El prefijo “In” significa *inflow* (entrada) y el prefijo “Out” representa las salidas, denominadas *outflow*. El mayor caudal pico se obtuvo en el punto designado como “Unión 3” con área estimada de la cuenca de  $93,5 \text{ km}^2$ , cuya ubicación se aprecia en la Figura 5.8 mostrada anteriormente. La localización de este punto, recoge los tramos

provenientes de las subcuencas aguas arriba tales como las ya indicadas anteriormente (Tramo 1-3 y Tramo 2-3), y adicionalmente las generadas por la subcuenca La Mucuy y la subcuenca conformada por Ño León y Desbarrancadero (Ñ y D).

### 5.10 Evaluación hidráulica de la quebrada La Mucuy

Tal como se determinó en la metodología del presente trabajo, se estipularon los procedimientos a seguir para la generación de resultados correspondientes a las características hidráulicas del tramo. Cabe destacar que, la información obtenida fue organizada de una forma apropiada para mejor comprensión, por lo cual se decidió dividir el tramo de estudio de la quebrada La Mucuy en tres sub-tramos representativos (con algunos puntos de referencia) los cuales se explican a continuación, y se representan mediante la Figura 5.11.

- Tramo 1: desde el inicio de la quebrada La Mucuy, es decir aguas abajo de la confluencia entre las quebradas El Oro y La Coromoto (cota aproximada de 2080 msnm), hasta aguas arriba del puente “Parque Los Corales” (cota aproximada de 1840 msnm).
- Tramo 2: desde aguas abajo del puente “Parque Los Corales” hasta aguas arriba de la confluencia de las quebradas La Mucuy y Ño León (cota aproximada 1770 msnm).
- Tramo 3: desde aguas abajo de la confluencia de las quebradas La Mucuy y Ño León, hasta un punto aguas arriba de la desembocadura de la quebrada La Mucuy al río Chama (cota aproximada 1690 msnm).



Figura 5.11 Localización de los tramos dentro de la quebrada La Mucuy. Elaboración propia.

Teniendo entonces estas acotaciones, los resultados se presentan a continuación bajo los dos modelos de simulación aplicados, tomando las características más relevantes para el estudio hidráulico, y con el propósito de apreciar de una mejor forma dichos resultados, se muestran los valores promedios por cada tramo. Los valores desglosados por sub-tramo se encuentran en el Anexo 4 del presente trabajo.

#### **5.10.1 Resultados obtenidos con el modelo unidimensional HEC-RAS v5.0.**

Mediante el procesamiento digital en el ArcGis v10.2.2 y haciendo uso de la extensión o complemento denominado HEC-GeoRAS v3.5 (considerando toda la información y datos explicados hasta los momentos), se realizó el modelado del tramo correspondiente para el análisis, abarcando desde el inicio de la quebrada La Mucuy hasta un punto aguas arriba de la confluencia de ésta con el río Chama.

La generación de estos resultados se vio antecedida por una serie de procedimientos, como lo son, por mencionar algunos: definición del canal principal (quebrada La Mucuy), definición de sus márgenes derecha e izquierda (generalmente denominadas *bank lines*), delimitación de las márgenes inundables (denominadas *flow paths*), generación de las secciones transversales, entre otros. Con respecto a los resultados generados se obtuvieron un total de 157 secciones transversales separadas cada 25 m para una longitud total analizada de 4080 m aproximadamente. La separación entre secciones fue escogida bajo criterio propio, considerando que en el tramo en estudio posee pendientes desde 25 % aguas arriba hasta valores de 10 % aproximadamente aguas abajo.

Una vez realizado este pre-procesamiento, los datos de geometría se llevaron al HEC-RAS, donde fueron introducidos los valores correspondientes a las secciones transversales para complementar su información (valores de rugosidad, distancias aguas abajo de los tramos...), así como también fueron incluidos los puentes bajo las mediciones realizadas en campo, y de esta manera se definieron los datos de flujo pertinentes (de la simulación hidrológica) obtenidos anteriormente y mostrados en la Tabla 5.3, seleccionado además el tipo de flujo a estudiar para los tres períodos de retorno, el cual fue considerado flujo mixto (entre flujo supercrítico y subcrítico). Fueron elaborados varios archivos de ensayo y error para corroborar los resultados hidráulicos obtenidos, ya que en muchas oportunidades se observó la generación de errores referentes a la

exportación de archivos de extensión *.xml* (reconocidos en ArcGis y generados con el HEC-GeoRAS).

Finalmente, esta etapa se concertó en el post-procesamiento nuevamente en el ArcGis, donde partiendo de los resultados obtenidos en el HEC-RAS (velocidades, anchos, calados de agua, tipo de escurrimiento) se procedió a la representación de la mancha de crecida o zona de desborde generada en la parte media y baja de la quebrada La Mucuy.

Entre los parámetros escogidos desde el punto de vista hidráulico, se decidió tomar para el modelo unidimensional los valores máximos, mínimos y porcentajes representativos de profundidad o tirante de agua (Y), velocidad total (V) y el área de desborde estimada ( $A_d$ ). Con base en esta información se representan a continuación los resultados mostrados en las Tablas 5.5, 5.6 y 5.7 para períodos de retorno de 25, 50 y 100 años, así como los caudales máximos correspondientes a cada escenario analizado:

Tabla 5.5 Parámetros hidráulicos para  $T_r=25$  años y  $Q_{m\acute{a}x}=319,4\text{ m}^3/\text{s}$ .

Sub-tramo 1				Sub-tramo 2				Sub-tramo 3			
Valor	Y (m)	V (m/s)	A ( $\text{km}^2$ )	Valor	Y (m)	V (m/s)	A ( $\text{km}^2$ )	Valor	Y (m)	V (m/s)	A ( $\text{km}^2$ )
Máx.	4,74	9,31	0,14	Máx.	3,37	7,58	0,08	Máx.	3,15	9,13	0,13
Mín.	0,86	1,67		Mín.	0,99	1,29		Mín.	0,50	1,35	

Observando los resultados obtenidos, se aprecia que las mayores velocidades ocurren para el tramo 1, mientras que las más bajas ocurren en los sub-tramos 2 y 3, lo cual es lógico ya que el primer intervalo tiene mayores pendientes. Por otro lado, analizando los valores de profundidad, se observaron mayores calados en el sub-tramo 2, sin embargo, no varían mucho en los tres intervalos estudiados (tomando valores representativos). En este mismo orden de ideas, el tipo de flujo representado, se aprecia para valores de números de Froude subcríticos y supercríticos, teniéndose así que para los 3 sub-tramos ocurre flujo supercrítico con valores que oscilan entre 1,5 a 3, cuyo resultado es esperado por la condición de cauce de montaña. Asimismo, se generó una casilla para la información correspondiente al área de desborde estimada por el modelo, la cual se obtuvo haciendo uso de las herramientas en el ArcGis. Dichos valores, tal y como se aprecian

mantienen un orden casi similar, destacándose la mayor parte en el sub-tramo 1, por tratarse de la mayor cantidad de área estudiada aguas arriba del ya mencionado puente “Parque los Corales”.

Bajo la misma perspectiva, se muestran a continuación las Tablas 5.6 y 5.7 para los restantes escenarios:

Tabla 5.6 Parámetros hidráulicos para  $T_r= 50$  años y  $Q_{m\acute{a}x}= 327,5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Sub-tramo 1				Sub-tramo 2				Sub-tramo 3			
Valor	Y (m)	V (m/s)	A (km <sup>2</sup> )	Valor	Y (m)	V (m/s)	A (km <sup>2</sup> )	Valor	Y (m)	V (m/s)	A (km <sup>2</sup> )
Máx.	4,76	9,38	0,14	Máx.	3,42	7,58	0,09	Máx.	3,18	9,17	0,14
Mín.	0,87	1,70		Mín.	1,01	1,31		Mín.	0,51	1,37	

Tabla 5.7 Parámetros hidráulicos para  $T_r= 100$  años y  $Q_{m\acute{a}x}= 354,7 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Sub-tramo 1				Sub-tramo 2				Sub-tramo 3			
Valor	Y (m)	V (m/s)	A (km <sup>2</sup> )	Valor	Y (m)	V (m/s)	A (km <sup>2</sup> )	Valor	Y (m)	V (m/s)	A (km <sup>2</sup> )
Máx.	4,86	9,62	0,15	Máx.	3,57	7,55	0,10	Máx.	3,30	9,31	0,16
Mín.	0,92	1,77		Mín.	1,06	1,36		Mín.	0,55	1,43	

Como complemento al análisis de los resultados, se decidió realizar una tabla que abarcó los porcentajes representativos de los parámetros hidráulicos con base en un valor estimado de 1,5 m para las profundidades hidráulicas y de 1,5 m/s para las velocidades de flujo; de esta forma se consideraron sólo aquellos valores superiores a los mencionados, con el propósito de establecer un patrón de análisis para el total de resultados obtenidos a lo largo del tramo. Tomando en cuenta lo anteriormente expuesto, se muestra a continuación en las tablas 5.8, 5.9 y 5.10 dichos porcentajes, haciendo referencia a que fueron contabilizados para cada sub-tramo. Los valores de referencia escogidos, se basaron en los utilizados dentro del trabajo realizado por la Universidad Central de Venezuela en el año 2004, con el denominado Subproyecto Caracas.

Tabla 5.8 Porcentaje de datos representativos. Tr= 25 años y Q<sub>máx</sub>= 319,4 m<sup>3</sup>/s.

Sub-tramo 1			Sub-tramo 2			Sub-tramo 3		
% de datos representativos por parámetro			% de datos representativos por parámetro			% de datos representativos por parámetro		
Cantidad de datos analizados	Y > 1.5 m	V > 1.5 m/s	Cantidad de datos analizados	Y > 1.5 m	V > 1.5 m/s	Cantidad de datos analizados	Y > 1.5 m	V > 1.5 m/s
52	63%	100%	59	90%	90%	44	82%	98%

La Tabla 5.8, muestra entonces los valores superiores a uno de referencia escogido (bajo los criterios considerados en el Subproyecto Caracas (2004)), con la finalidad de establecer de forma más clara la tendencia que tienen los valores particulares de profundidades de flujo y velocidades obtenidos. En este sentido, las profundidades mayores a 1,5 m representan un valor del 63% para el primer tramo, un 90% en el segundo tramo y un 82% en el tercer tramo. Asimismo, se aprecia de manera notoria que las velocidades de flujo en los 3 tramos coinciden en su mayoría en valores superiores a 1,5 m/s. Esta información también fue representada en las tablas 5.9 y 5.10 a continuación, donde no hay prácticamente variación de cambios en los porcentajes de estos valores representativos para los parámetros hidráulicos analizados.

Tabla 5.9 Porcentaje de datos representativos. Tr= 50 años y Q<sub>máx</sub>= 327,5 m<sup>3</sup>/s.

Sub-tramo 1			Sub-tramo 2			Sub-tramo 3		
% de datos representativos por parámetro			% de datos representativos por parámetro			% de datos representativos por parámetro		
Cantidad de datos analizados	Y > 1.5 m	V > 1.5 m/s	Cantidad de datos analizados	Y > 1.5 m	V > 1.5 m/s	Cantidad de datos analizados	Y > 1.5 m	V > 1.5 m/s
52	63%	100%	59	90%	90%	44	82%	100%

Tabla 5.10 Porcentaje de datos representativos. Tr= 100 años y Q<sub>máx</sub>= 354,7 m<sup>3</sup>/s.

Sub-tramo 1			Sub-tramo 2			Sub-tramo 3		
% de datos representativos por parámetro			% de datos representativos por parámetro			% de datos representativos por parámetro		
Cantidad de datos analizados	Y > 1.5 m	V > 1.5 m/s	Cantidad de datos analizados	Y > 1.5 m	V > 1.5 m/s	Cantidad de datos analizados	Y > 1.5 m	V > 1.5 m/s
52	63%	100%	59	90%	90%	44	82%	100%

Al observar las tablas 5.9 y 5.10, se aprecia que no hay cambio entre los períodos de retorno de 50 y 100 años, apenas se nota una variación en el sub-tramo 3 donde el 100% de velocidades son valores por encima de 1,5 m/s.

En virtud de toda la información recabada, analizada y procesada con el modelo unidimensional, fue generada una salida cartográfica que representa la mancha de crecida en el tramo de estudio de la quebrada La Mucuy, tomando como referencia el período de retorno de 25 años para un caudal de 319,4 m<sup>3</sup>/s. Fue seleccionado este período, debido a que para 50 y 100 años los resultados fueron prácticamente los mismos, tanto gráfica como numéricamente. Esto significa que, al momento de analizar las zonas de desborde, no hubo diferencia notable entre los tres escenarios descritos, razón por la cual el resultado fue enfocado para este período de retorno. Cartográficamente, la mancha de crecida obtenida se observa a continuación en la Figura 5.12:

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

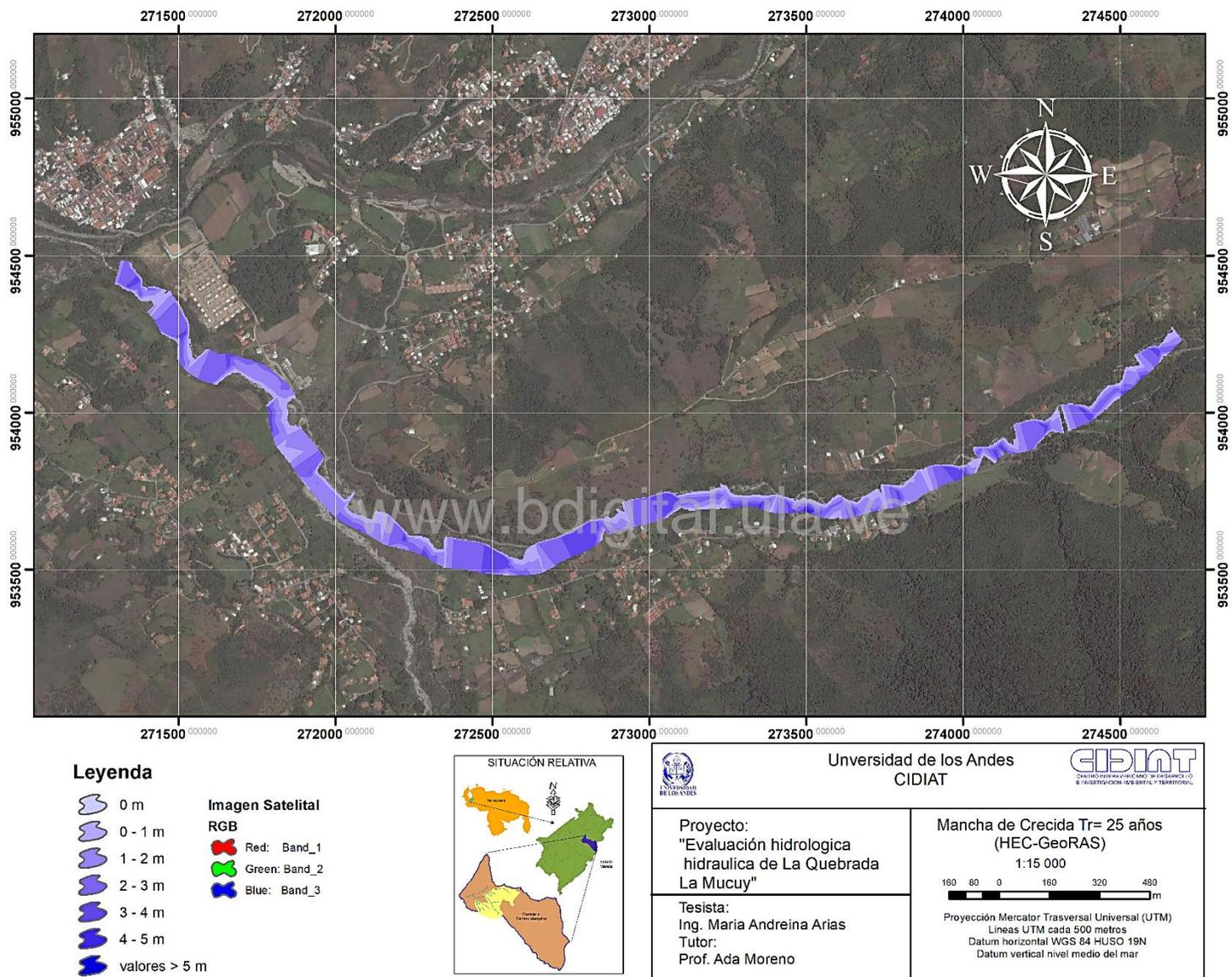


Figura 5.12 Mancha de crecida para Tr= 25 años. Salida en ArcGis, con uso de HEC-GeoRAS. Elaboración propia.

Apreciando los valores para los períodos de retorno de 50 y 100 años en las Tablas 5.6 y 5.7 respectivamente, resultaron ser muy cercanos entre sí, por lo que se consideró pertinente tomar como representativo el análisis efectuado al período de retorno de 25 años, tal como se explicó anteriormente. Además, esto se evidenció en las tablas de resultados, donde comparando los valores de calados y velocidades no varían significativamente. Con base en la Figura 5.12 son pocas las áreas de desborde afectadas, pero en principio se debe tener claro que la escala de trabajo no permite apreciar mayor detalle ya que para el tramo considerado la escala fue de 1:15000.

### **5.10.2 Resultados obtenidos con el modelo bidimensional FLO-2D Basic.**

Siguiendo el procedimiento establecido en la metodología, y previamente teniendo las estimaciones hidráulicas generadas en el modelo unidimensional, se generaron resultados bajo la noción anteriormente explicada. Sin embargo, la forma en como fueron analizados los resultados cambió un poco, ya que se debió tomar en cuenta que el FLO-2D concibe la perspectiva hidráulica en dos direcciones, y adicionalmente otorga valores representativos a cada celda o pixel establecidos por el usuario antes de comenzar a modelar. Con base en esto, el DEM sobre el cual se trabajó desde el inicio de este estudio, generó curvas de nivel cada 200 m las principales, y cada 20 m las secundarias; además de ello, el tamaño del pixel o celda requerida por el modelo fue considerado en 40 m de ancho (celdas de 40 m \* 40 m), previendo la capacidad de cálculo del ordenador utilizado (a menor tamaño del pixel escogido incrementa el nivel de detalle, pero mayor tiempo en producir resultados). Cabe destacar que, según el tamaño de celda escogido, y el área de dominio computacional definido, el análisis se realizó para un total de 864 celdas.

Los hidrogramas de creciente utilizados provienen del estudio hidrológico anteriormente explicado. Fueron empleados algunos datos ya levantados en ArcGis, como el tramo de la quebrada La Mucuy y los valores de rugosidad, longitudes y pendientes señalados en la Tabla 5.3 (los que fueron utilizados en el modelo unidimensional).

Se debe recalcar, que el modelo bidimensional trabaja el flujo en 8 posibles direcciones, por lo que se previó tener una idea de las zonas de desborde ya generadas en el HEC-RAS, y así observar con mayor detalle (celda por celda) la información hidráulica suministrada. Para el caso particular de este modelo, se mantienen algunas de las variables analizadas anteriormente. Esto se presenta en la Tabla 5.11:

Tabla 5.11 Parámetros hidráulicos para  $T_r= 25$  años y  $Q_{m\acute{a}x}= 319,4$  m<sup>3</sup>/s.

Sub-tramo 1				Sub-tramo 2				Sub-tramo 3			
Valor	Y (m)	V (m/s)	A (km <sup>2</sup> )	Valor	Y (m)	V (m/s)	A (km <sup>2</sup> )	Valor	Y (m)	V (m/s)	A (km <sup>2</sup> )
Máx.	4,79	6,24	0,16	Máx.	2,17	3,50	0,08	Máx.	0,95	1,55	0,13
Mín.	0,20	0,15		Mín.	0,30	0,60		Mín.	0,10	0,30	

Apreciando los valores obtenidos del modelo bidimensional, fueron considerados el tirante de aguas máximo y mínimo, así como los valores correspondientes a las velocidades máximas y mínimas para cada sub-tramo en estudio; cabe destacar que estos valores sólo representan el rango en el cual se encuentran los datos. La versión FLO-2D Basic utilizada es una versión limitada, por lo cual estos valores se obtuvieron de los archivos .DAT generados por el modelo en un directorio de salida. Por otra parte, se hace énfasis en que la forma en cómo el modelo calcula estos parámetros, es mediante el análisis de cada celda en base a las variables asignadas para cada una de ellas, es decir celdas de entrada de datos (*inflow*), celdas de salida (*outflow*), y celdas sin entradas ni salida de datos (*no inflow/outflow condition*). De igual forma se presentan a continuación en las Tablas 5.12 y 5.13 los resultados para los períodos de retorno de 50 y 100 años respectivamente.

Tabla 5.12 Parámetros hidráulicos para  $T_r= 50$  años y  $Q_{m\acute{a}x}= 327,5$  m<sup>3</sup>/s .

Sub-tramo 1				Sub-tramo 2				Sub-tramo 3			
Valor	Y (m)	V (m/s)	A (km <sup>2</sup> )	Valor	Y (m)	V (m/s)	A (km <sup>2</sup> )	Valor	Y (m)	V (m/s)	A (km <sup>2</sup> )
Máx.	4,82	6,28	0,16	Máx.	2,19	3,60	0,08	Máx.	0,99	1,59	0,13
Mín.	0,22	0,17		Mín.	0,30	0,60		Mín.	0,12	0,33	

Tabla 5.13 Parámetros hidráulicos para  $T_r= 100$  años y  $Q_{m\acute{a}x}= 354,7$  m<sup>3</sup>/s.

Sub-tramo 1				Sub-tramo 2				Sub-tramo 3			
Valor	Y (m)	V (m/s)	A (km <sup>2</sup> )	Valor	Y (m)	V (m/s)	A (km <sup>2</sup> )	Valor	Y (m)	V (m/s)	A (km <sup>2</sup> )
Máx.	4,89	6,56	0,17	Máx.	2,32	3,72	0,08	Máx.	0,97	1,65	0,13
Mín.	0,43	0,52		Mín.	0,41	0,66		Mín.	0,13	0,41	

Analizando los valores arrojados por el modelo bidimensional, se generaron valores menores en cuanto a los parámetros correspondientes a tirantes de agua y velocidades, sin embargo, a nivel de zonas de desborde se incrementó un poco el área, teniéndose un mayor reflejo en el sub-tramo 3, es decir aguas debajo de la confluencia entre las quebradas La Mucuy y Ño León. En principio, esto pudiera deberse a que en este sub-tramo se ubican las albercas de sedimentos, y por supuesto son más apreciables las zonas de baja pendiente y mayor explayamiento. Por otro lado, los sub-tramos 1 y 2, presentaron condiciones similares en las profundidades de agua, teniéndose valores entre 2,32 m y 4,89 m para el período de retorno de 100 años.

Bajo la perspectiva analizada, se presenta de igual forma la salida cartográfica del modelo bidimensional, teniendo como base el período de retorno de 25 años, con un caudal extremo de 319,5 m<sup>3</sup>/s, representada en la Figura 5.13.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

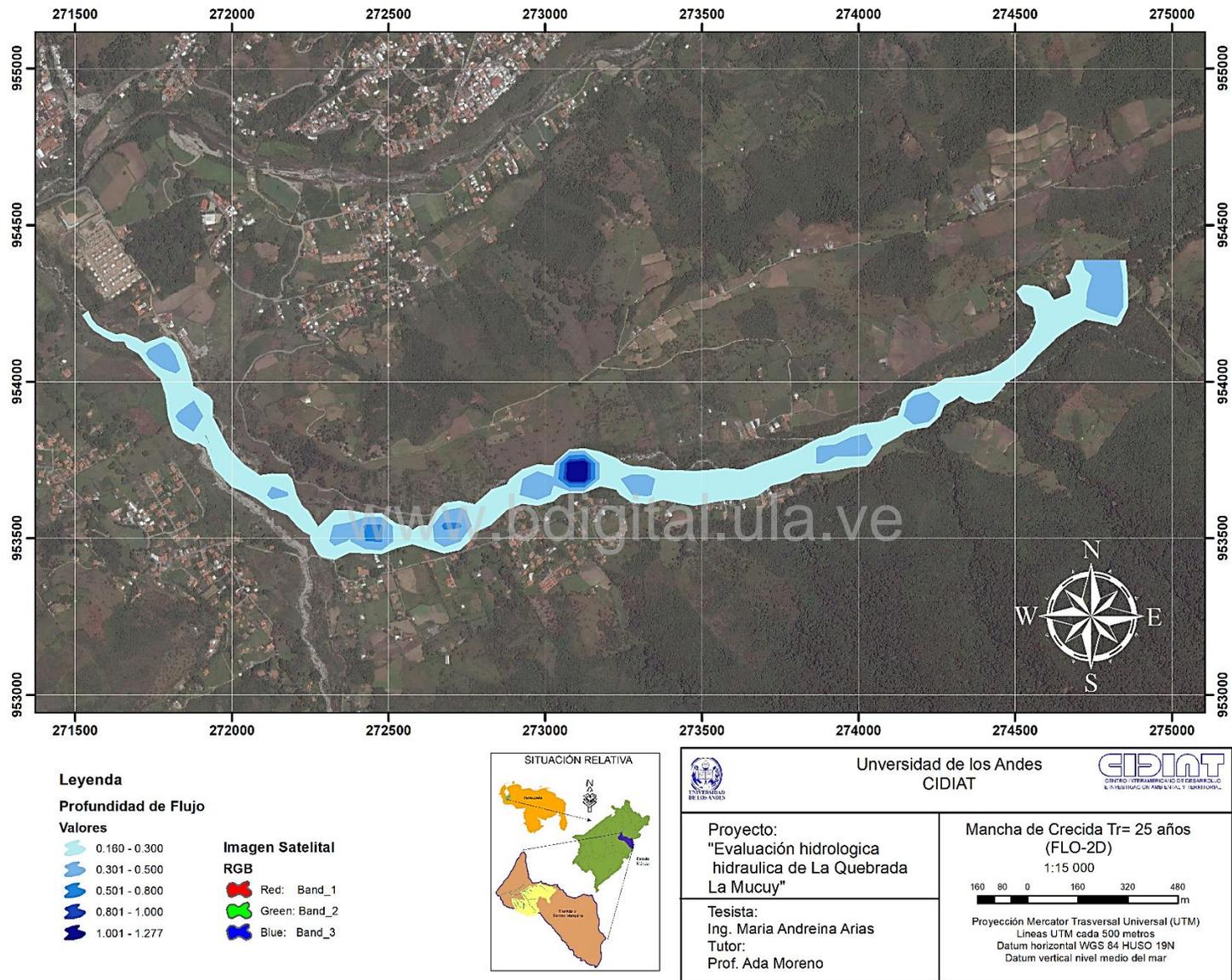


Figura 5.13 Mancha de crecida para Tr= 25 años. Salida en ArcGis, con uso de FLO-2D. Elaboración propia.

Observando la mancha de crecida obtenida bajo el uso del modelo bidimensional, fueron trasladados dichos resultados al ArcGis para una mejor visualización cartográfica. Las zonas de desborde se mantienen casi constantes respecto al modelo unidimensional; sin embargo, los valores de profundidad señalados en la leyenda de la Figura 5.13 muestran rangos de valores inferiores a los obtenidos con el HEC-RAS. Bajo esta perspectiva se observa que la zona de color azul intenso denotada por valores de profundidad desde 1 m hasta 1,3 m aproximadamente, se ubica en una extensión aguas arriba del puente “Parque Los Corales”. Por otro lado, las zonas de color azul intermedios designan valores intercalados que van desde los 0,3 m hasta 0,8 m de profundidad de flujo.

### **5.11 Análisis de zonas de desborde estimadas a partir de la mancha de crecida**

Partiendo del resultado cartográfico, arrojado por el modelo unidimensional, mostrado anteriormente en la Figura 5.12, se realizó una estimación de las zonas de desborde con mayor relevancia en las cercanías de la quebrada La Mucuy, con la finalidad de tener presente la ubicación de estos lugares y dejar reseñado junto a las observaciones en campo las áreas de mayor afectación (viviendas, cultivos, vialidad), que pudieran generarse bajo un evento de crecida con período de retorno de 25 años y un caudal extremo de  $319,4 \text{ m}^3/\text{s}$ . Este análisis se realizó con especial apoyo en el trabajo realizado por Ayala *et al.*, (2013), del cual se obtuvo gran aporte para el presente estudio. Particularmente, se hizo énfasis en 2 zonas referidas en la Figura 5.14. El zoom 1, enmarcado en color amarillo, abarca parte importante de las viviendas y zonas de cultivos ubicadas en la margen izquierda de la quebrada La Mucuy. Muchas de estas viviendas, incluida la carretera de la Mucuy Alta, están a escasos metros de la quebrada, y en eventos anteriores ya se han visto afectadas. Inclusive dentro del mencionado estudio de Lacruz y Rondón (2008), se encuentra gran parte de las afectaciones producidas en esta zona, por causas de desborde en la quebrada. La mayoría de estas viviendas cuentan con terrenos que son linderos al cauce, los cuales son bastante productivos, en cuanto al cultivo de algunas hortalizas. Refiriendo la ubicación al sub-tramo 1, la mayor parte de afectación estaría localizada aguas abajo del puente “Mesa Los Leones”, especialmente los asentamientos cercanos a la margen izquierda, así como también la vía de acceso existente hacia La Mucuy Alta. Actualmente, se están construyendo viviendas con estructura de acero en esta área, así como también fueron observadas parcelas en preparación para cultivo. Esta información se aprecia a continuación en la Figura 5.14:



Figura 5.14 Zonas estimadas por desborde, imágenes actuales del lugar. Elaboración propia.

Bajo las observaciones realizadas, se aprecia en las imágenes algunas de las zonas concernientes a las estimaciones por desbordes, realizadas dentro del modelo unidimensional HEC-RAS. Subsiguientemente, el zoom 2 denotado en color rojo hace referencia a la zona aguas debajo de la confluencia de las quebradas La Mucuy y Ño León, en donde se encuentran emplazadas las albercas de sedimentación, y hacia la margen derecha de la quebrada, se ubica el sector Hacienda y Vega. De igual forma, se aprecia sobre la imagen el conjunto residencial Las Margaritas, localizado justo aguas debajo de las albercas. En este sentido, siguiendo el estudio de Ayala *et al.*, (2013), mencionaron que esta zona corresponde al abanico depositado por ambas quebradas, destacándose así un sitio especialmente crítico desde el punto de vista hidrológico y geomorfológico, existiendo altas probabilidades de desborde con el desplazamiento lateral del cauce (fenómeno de avulsión), debido a la poca altura del talud de corte en ese lugar, específicamente en la margen derecha del cauce. Bajo esta perspectiva, el estudio indica que podría verse afectada la urbanización Las Margaritas, las instalaciones deportivas (estadio de softball) y los cultivos hidropónicos allí ubicados. Con base en este estudio, fueron estipuladas entonces, algunas de las estimaciones para las zonas analizadas. Finalmente, cabe resaltar una de las acotaciones realizadas por Ayala *et al.*, (2013), tal como se indica a continuación:

Se debe proteger todas las edificaciones (viviendas e instalaciones) que se encuentran en ambas márgenes de las dos quebradas; además de la infraestructura vial. En este orden de ideas, es necesario el diseño de obras de protección de márgenes contra la erosión, que pueden ser muros longitudinales de enrocado o de gaviones y diques longitudinales y marginales. Dichas obras deben contar con los siguientes estudios: estimación de socavación general y transversal, así como de socavación local al pie de muros; determinación del espesor de los recubrimientos y de la granulometría del material utilizado para su construcción, con la finalidad de que resistan la fuerza de arrastre de las quebradas. Adicionalmente se debe realizar el diseño de filtros, en caso de ser necesario, a ser colocados como material de transición entre la margen a proteger y el enrocado que constituyen los muros, todo esto a fin de evitar el lavado de sedimentos finos a través de las partículas gruesas (p. 06).

En este sentido, se hace necesario considerar todas las estimaciones realizadas para la zona, tanto a nivel hidrológico como hidráulico, destacando adicionalmente, que las cercanías a la quebrada La Mucuy, especialmente en la parte baja, ya han presentado afectaciones producto de crecidas ocurridas en años anteriores. Además de ello, el avance desmedido de extracción de sedimentos, vuelve aún más vulnerable las zonas cercanas.

## 5.12 Comparación entre los resultados obtenidos con el modelo unidimensional HEC-RAS y el modelo bidimensional FLO-2D Basic

Con base en los resultados obtenidos, y previendo dar cumplimiento a uno de los objetivos del presente trabajo, se decidió realizar una comparación entre 2 de los parámetros hidráulicos de ambos modelos, como lo son el tirante o profundidad del agua, y la velocidad obtenida en cada sub-tramo. Esta comparación se realizó para el tramo completo en estudio (4 km aproximadamente), tomando como período representativo el de 25 años. Gráficamente, los resultados se muestran en las Figuras 5.15 y 5.16, a continuación:

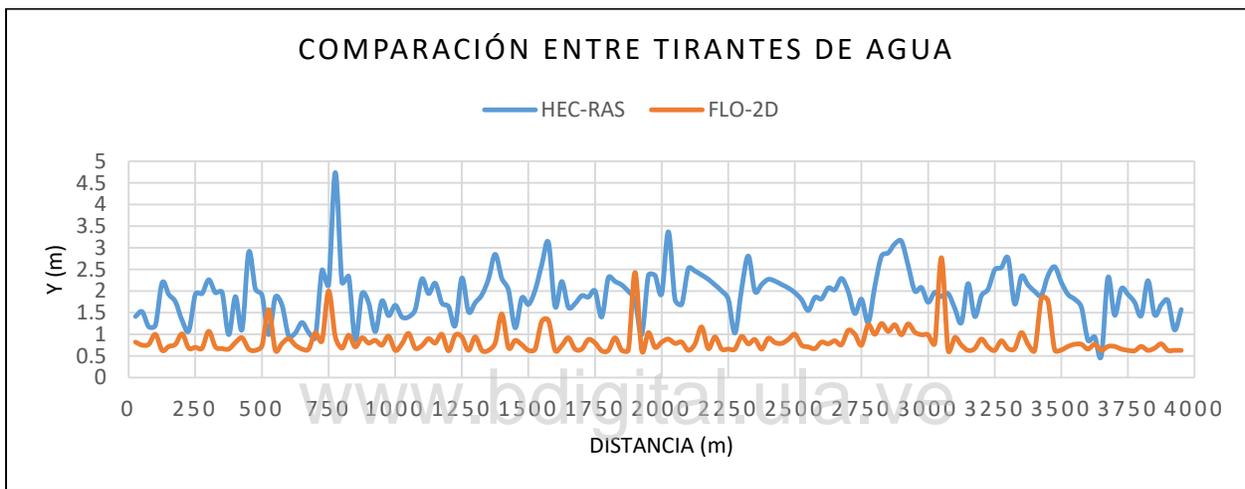


Figura 5.15 Comparación entre profundidades de flujo según HEC-RAS y FLO-2D.

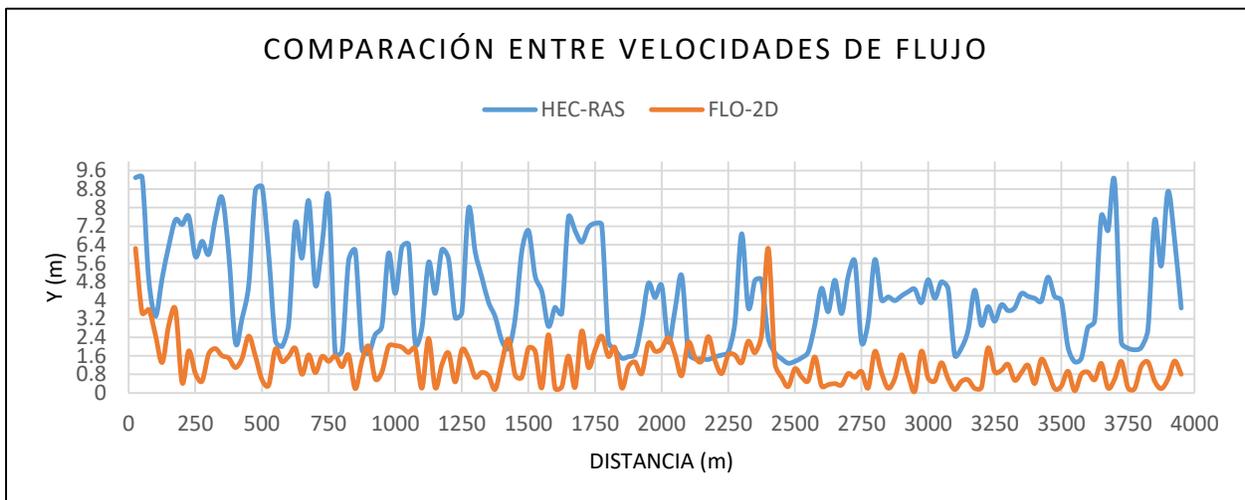


Figura 5.16 Comparación entre velocidades de flujo según HEC-RAS y FLO-2D.

Haciendo referencia a los valores obtenidos, se consideró para el presente estudio abarcar todo el tramo escogido, dónde las profundidades de agua guardan cierta relación bajo las dos perspectivas estudiadas. En contraste con ello, los rangos de velocidad presentan mayor diferencia entre sí, observándose valores mucho mayores en el modelo unidimensional que en el bidimensional. Asimismo, se resalta el aspecto de que en el sub-tramo 3 (al final del gráfico) según el modelo bidimensional las velocidades son notablemente menores, atribuyendo esta condición a pendientes menores en conjunto con el incremento de sedimentos para esta zona. De igual forma se mantuvo un patrón estándar que define valores menores para el modelo bidimensional, mientras que los resultados de mayor magnitud se observaron en el modelo unidimensional.

Haciendo referencia primeramente a la Figura 5.15, las profundidades de flujo toman valores cercanos, apreciándose valores entre 1,0 m hasta 4.5 m en el modelo unidimensional y de 0,7 m a 3,0 m en el modelo bidimensional aproximadamente, ambos valores para un período de retorno de 25 años. Cabe destacar, que estos valores aun cuando son un promedio de todos los valores analizados, muestran un significado bastante relevante, y es que, la tendencia a aumentar para cada período de retorno es baja. Con base en ello, se reafirma nuevamente la semejanza existente para los tres escenarios estudiados. Lo que sucede con ambos modelos, en cuanto al análisis de profundidades hidráulicas, se infiere de las perspectivas bajo las cuales cada modelo realiza los procesos. Es decir, el FLO-2D, por ejemplo, parte de las características dadas por un modelo digital de elevación (MDE), lo cual significa que es la información más sensible en la modelación hidráulica bajo análisis bidimensional. En contraparte, el HEC-RAS mostró un comportamiento adecuado para las condiciones de flujo permanente, indicando entonces las zonas de desborde mostradas en la Figura 5.12 junto con la imagen satelital obtenida.

En la Figura 5.16, se representa la variación del parámetro de velocidad y las diferencias existentes en cuanto al análisis de éstas para cada modelo, lo cual se debe principalmente a que los enfoques tradicionales para ríos se realizan mediante el uso de modelos unidimensionales, sin embargo, cuando se desea obtener mayor detalle en cuanto a velocidades y localización de fuerzas sobre estructuras, por ejemplo, se requiere de un análisis más completo y de mayor complejidad, por lo cual el uso de los modelos bidimensionales se hace necesario. En este sentido, si se comparan para un período de retorno de 25 años las velocidades bajo ambos modelos, se nota una discrepancia notoria en las magnitudes a lo largo del tramo, ya que HEC-RAS arrojó valores

superiores a 3,0 m/s, mientras que en FLO-2D abarca valores entre los 0,8 m/s y 2,5 m/s principalmente.

Parte importante de estos resultados, radica en que el modelo bidimensional realiza la ruta del flujo en ocho direcciones; además, la resolución espacial y temporal depende del tamaño de celda y la tasa de crecimiento del hidrograma. Adicionalmente, el programa se basó en el cálculo del promedio geométrico entre dos celdas vecinas (coeficiente de Manning y pendiente), por lo cual cada paso se estima a partir del paso anterior y de la entrada de caudal, así como también la profundidad de flujo para calcular la velocidad a través del límite entre celdas para el siguiente lapso de tiempo. Con base en esto, el modelo bidimensional realiza una aproximación más cercana a lo que ocurre en el cauce, ya que estima mayor cantidad de parámetros que el modelo unidimensional.

### **5.13 Análisis de sensibilidad para el parámetro de rugosidad, dentro del modelo HEC-RAS**

Dentro de algunos aspectos considerados para realizar el análisis de sensibilidad de parámetros, se decidió tomar en cuenta la influencia de la rugosidad de Manning en los resultados obtenidos de parámetros relevantes en algunas secciones transversales, escogidas como referencia a lo largo del tramo estudiado. Entre dichas variables se tienen: la velocidad del flujo, la profundidad del flujo y el número de Froude. Este análisis tiene por objeto observar la tendencia de los valores mencionados, en función de la variación de la rugosidad “n” de Manning, y de esta manera comprender que tanto pueden, o no, diferenciarse dichos parámetros. Gráficamente, se muestra a continuación el tramo en estudio, en la Figura 5.17, con sus respectivas secciones transversales, y aquellas escogidas como referencia para la sensibilización de la rugosidad de Manning.

Cabe resaltar, que dichas secciones fueron escogidas bajo las observaciones realizadas en campo, tratando de abarcar puntos de interés, como lo son, por ejemplo, los dos puentes ubicados a lo largo de la quebrada la Mucuy, así como también parte alta, media y baja y las albercas de sedimentación. La salida mostrada se obtuvo del software HEC-RAS v5.0, y sobre ella se indican las secciones transversales cada 25 m, tomando como referencias las siguientes: 3250, 1950 y 100. Asimismo, debe mencionarse que el estudio de sensibilidad realizado para el valor de la rugosidad de Manning, fue efectuado para el período de retorno escogido como representativo, correspondiente a 25 años.

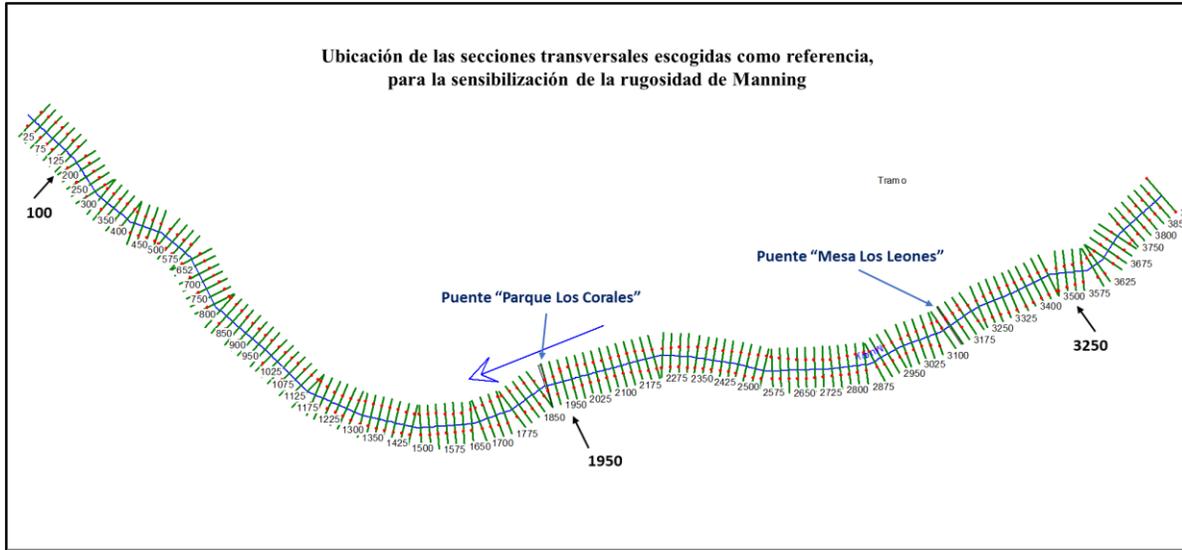


Figura 5.17 Ubicación de secciones transversales y puntos referenciales. Modificado de HEC-RAS v5.0.

Tomando en cuenta la Figura 5.17, se generó la información proveniente del modelo HEC-RAS para cada una de las secciones mostradas, destacando los parámetros hidráulicos indicados con anterioridad. En este sentido, se elaboraron gráficos que representan la sensibilidad de las variables hidráulicas previamente mencionadas, en función del parámetro de rugosidad de Manning, tomando variaciones porcentuales del mismo desde un 10% hasta un 80%, según el valor escogido como referencia para cauces de montaña correspondiente a  $n = 0,05$ . Bajo esta perspectiva, se indica la Figura 5.18, cuyo resultado muestra la variación de la velocidad del flujo contra la variación de la rugosidad de Manning:

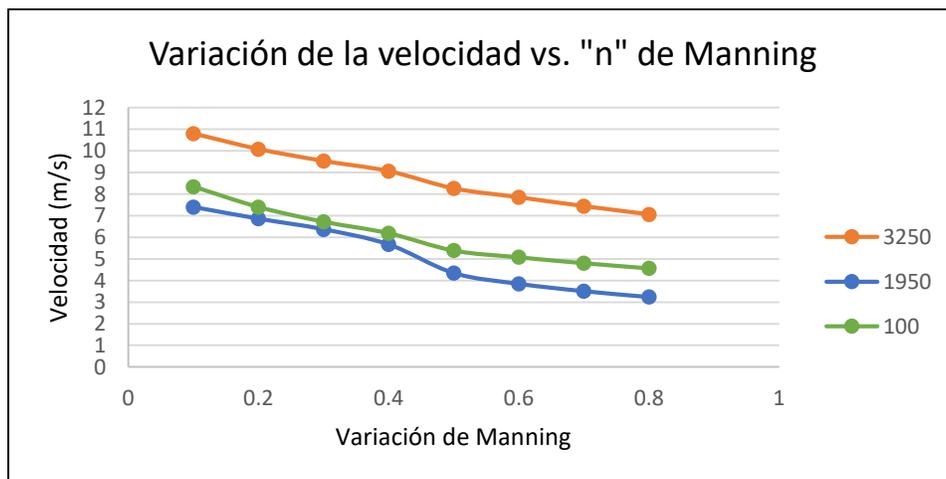


Figura 5.18 Variación de la velocidad contra la rugosidad de Manning. Elaboración propia.

Apreciando la Figura 5.18, se generó una variación representativa para las tres secciones analizadas, obteniendo un comportamiento similar, donde resultaron valores de velocidades mayores, para menores valores de rugosidad. Esta tendencia, es bastante lógica, ya que a medida que se tenga una rugosidad menor, (como, por ejemplo, arenas, o superficies de grano fino) se tendrán valores mayores en la velocidad del flujo analizado. De igual forma, otro de los parámetros analizados fue la profundidad del flujo y su variación con la “n” de Manning, tal como se indica en la Figura 5.19:

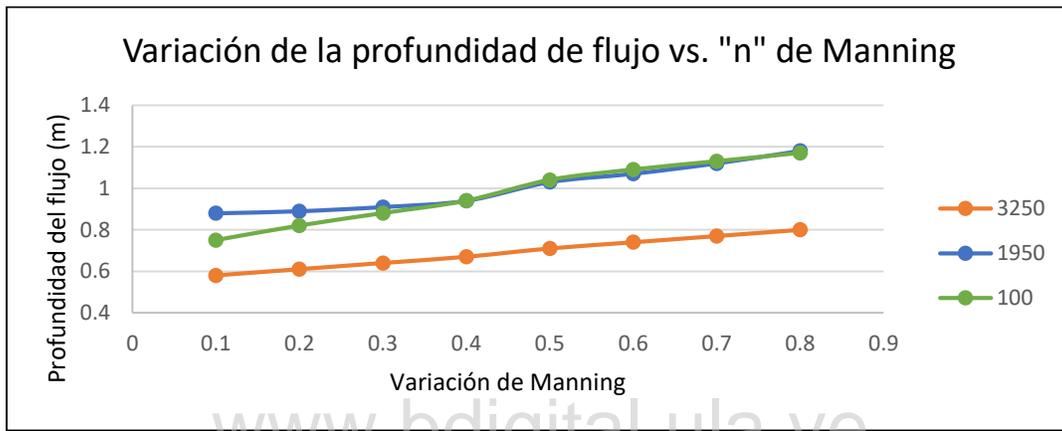


Figura 5.19 Variación de la profundidad contra la rugosidad de Manning. Elaboración propia.

Para el caso de la Figura 5.19, la tendencia general muestra que a mayores valores de rugosidad la profundidad del flujo tiende a crecer, en prácticamente todas las secciones transversales. Esto es debido a que, cuando la rugosidad es mayor, existen gran cantidad de espacios entre rocas de gran tamaño, lo que implica la probabilidad a que existan profundidades de flujo elevadas.

Por otra parte, fue de importancia destacar la variación del número de Froude, contra los cambios de rugosidad generados a lo largo de la quebrada La Mucuy. Particularmente, se hace mención a la Figura 5.20, cuyos resultados gráficos, muestran la tendencia de los valores estudiados y la sensibilidad que presentan los mismos dentro del modelo unidimensional HEC-RAS.

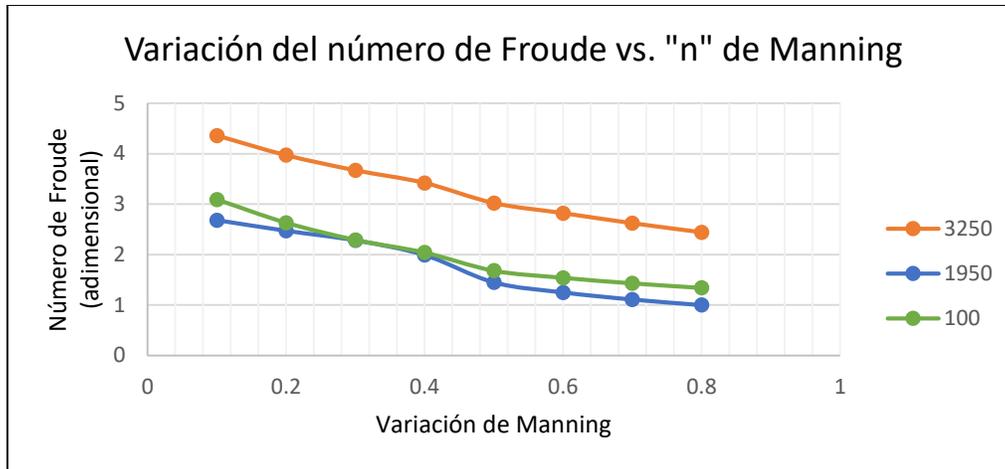


Figura 5.20 Variación del número de Froude contra la rugosidad de Manning. Elaboración propia.

Finalmente, dentro de la sensibilidad de la rugosidad de Manning, el número de Froude indica en la Figura 5.20, la tendencia a disminuir, conforme aumentan los valores de rugosidad. Dicha tendencia se mantiene en todas las secciones transversales, y esto se debe a que el número de Froude es un valor proporcional a la velocidad de flujo e inversamente proporcional a la raíz de la profundidad hidráulica de flujo. Se aprecian mayores cambios respecto a la variación de la rugosidad en las secciones transversales ubicadas en cotas mayores (3250 y 1950), mientras que en las secciones de menor pendiente y menor cota, los valores del número de Froude no sufrieron mayores cambios.

Concluyentemente, este subapartado dejó muestra importante respecto a la sensibilidad que tiene uno de los parámetros más influyentes dentro del modelo unidimensional, como lo es la rugosidad de Manning. Los resultados analizados, representan la tendencia de los valores estudiados a variaciones intermedias en algunos casos, así como de baja influencia en otros casos; sin embargo, es de hacer notar que las variaciones llevadas a cabo, fueron estipuladas con base en valores porcentuales hacia arriba y hacia abajo del orden de magnitud de 0,05.

#### 5.14 Pre-diseño de medidas estructurales

Con base en la metodología expuesta y tomando en consideración que la quebrada La Mucuy se trata de un cauce torrencial, implica establecer ciertas condiciones hidrodinámicas de flujo que garanticen una disminución importante de la energía cinética de la corriente. En relación a esto, los diques para el control de torrentes parecen ser una solución a la estabilidad del cauce del

torrente, pero sin dejar de lado que de igual forma deben implementarse medidas de conservación en la cuenca tributaria.

Aunado a esto, Mora (1999) establece que “en los torrentes con alta carga de sedimentos de fondo, los diques transversales son la solución, ya que retienen los sedimentos que forman el abanico aluvial en las zonas de menor pendiente” (p. 207), lo que significa entonces que de esta forma se logra reducir la pendiente del cauce y a su vez elevar el fondo del mismo, cuyo propósito se traduce en un mejor soporte para los taludes de las vertientes.

Se tienen varios aspectos analizados para este pre-diseño, no obstante, resultan importante las acotaciones sugeridas por el estudio anteriormente mencionado, dónde se expresa lo siguiente:

La función de la presa se puede considerar en dos etapas. La primera, de retención, ocurre una vez construido el dique. Durante la presencia de avenidas se almacenan los sedimentos transportados y se mitigan los picos, por lo que una adecuada ubicación debe garantizar un vaso de almacenamiento suficientemente grande con dimensiones del dique que resulten relativamente económicas. La segunda etapa es la de consolidación, se establece una condición de estabilidad en la pendiente que controla la capacidad del flujo a transportar sedimentos especialmente por el fondo. En algunos casos, dada la importancia de las obras a proteger aguas abajo se recomienda extraer con cierta periodicidad el material depositado (pozos de retención), el cual puede servir con fines de construcción. Cuando el aspecto económico es una limitante se recomienda, desde el punto de vista constructivo, comenzar las obras de aguas abajo hacia aguas arriba y se colocan los diques en una primera etapa al doble del espaciamiento calculado (p. 207).

Es de importancia resaltar que dependiendo del objetivo de la obra podrán seleccionarse diques cerrados o abiertos. Generalmente, los diques cerrados se utilizan para consolidación de la pendiente y de los taludes del torrente, mientras que los diques abiertos (aberturas centrales) se usan para la retención de sedimentos durante las crecidas, sin dejar de lado que para estos casos se debe realizar la limpieza del vaso de almacenamiento una vez que se alcanzan los niveles normales de flujo. No obstante, para el caso de diques abiertos, se pueden cumplir ambos propósitos (consolidación y retención) en función de la altura del cimacio.

En este sentido, se hace mención al trabajo realizado por Aguilar (1990), quien estableció una metodología para la sistematización del diseño de diques para el control de torrentes, siendo estas las medidas estructurales que para el presente trabajo se consideraron idóneas respecto al nivel preliminar establecido. Con base en esto, se destacan los siguientes parámetros respectivos al pre-

dimensionado, siguiendo la metodología explicada en el apartado 3.11 del Capítulo 3, la cual es una adaptación de las consideraciones realizadas en el trabajo mencionado. En primer lugar, se debe establecer la recolección de información básica, la cual se muestra a continuación:

#### **5.14.1 Características topográficas y escala de trabajo**

Desde el inicio del presente trabajo, se hizo mención a que fueron utilizados los sistemas de información geográfica (SIG), para la obtención de curvas de nivel del tramo en estudio, siendo este desde aguas abajo de la confluencia de las quebradas El Oro y La Coromoto (conocida como quebrada La Mucuy) hasta aguas arriba de la desembocadura al río Chama. Dicho esto, el pre-diseño se traduce en algo bastante somero ya que la escala de trabajo proporcionada por el modelo digital de elevación corresponde a un valor de 1:15000 para una longitud de 4 km aproximadamente. Asimismo, bajo esta información se estimaron las secciones transversales para la ubicación de los diques.

#### **5.14.2 Características de las partículas del cauce.**

Resulta necesario conocer el tamaño de las partículas del lecho del cauce a través de su distribución granulométrica, no obstante, para efectos prácticos de la presente metodología se estimará el diámetro que represente el tramo en análisis, pudiendo tomarse un diámetro medio. Tomando como referencia la escala granulométrica de Wentworth y apoyando el estudio en el trabajo realizado por Mora y Dávila (2014) en las inmediaciones de la Quebrada Ño León, se determinaron los siguientes aspectos granulométricos:

- El sub-tramo 1 considerado desde la confluencia entre las quebradas El Oro y la Coromoto hasta aguas arriba del puente “Parque Los Corales”, presenta un rango de pendientes entre 12-20 %, con una predominancia granulométrica de grava gruesa de tamaños mayores a 64 mm. Asimismo, como se observa en la Figura 5.21 se tiene un lecho macro rugoso, cuyos estudios deben realizarse de manera más detallada. Del mismo sub-tramo se tiene la Figura 5.22 en las ubicaciones ya mencionadas.



Figura 5.21 Características de los granos del cauce, ubicación aguas arriba del puente Mesa Los Leones. Cota aproximada 1950 msnm.



Figura 5.22 Características de los granos del cauce, ubicación puente "Parque Los Corales". Cota aproximada 1840 msnm.

- El sub-tramo 2, comprende desde aguas abajo del puente "Parque Los Corales" hasta aguas arriba de la confluencia de las quebradas La Mucuy y Ño León, con pendientes promedios entre el 5 y 12 %. Tomando como referencia el estudio de suelos realizado por Mora y Dávila (2014), indican que en esta zona el diámetro medio arrojó un valor de 14 mm, sin embargo, se considera que predominan partículas de grava gruesa y arena gruesa, que varían desde 1 mm hasta 60 mm según la escala granulométrica de Wentworth. Se aprecia en la Figura 5.23 parte representativa del este sub-tramo.



Figura 5.23 Características de los granos del cauce, ubicación aguas abajo del puente Parque Los Corales. Cota aproximada 1830 msnm.

Resultó bastante importante la observación en campo para validar la estimación de la granulometría conseguida en investigaciones previas desarrolladas en el área analizada, sin embargo, se hizo especial apoyo en un estudio de suelos realizado en el trabajo de Mora y Dávila (2014), siendo este más amplio por considerar los diámetros de los tamices representativos como los son el  $D_{10}$ ,  $D_{60}$  y  $D_{90}$  en las adyacencias del cono de deyección de la quebrada Ño León, lugar que guarda estrecha relación con el sub-tramo 2 descrito anteriormente. Asimismo, de las observaciones en campo se ilustran en las Figura 5.24 y 5.25 apenas una muestra de los tamaños que mayormente fueron apreciados en el lugar:



Figura 5.24 Relación de los tamaños, ubicación aguas abajo del puente Parque Los Corales. Partículas entre 30 y 100 mm aproximadamente.



Figura 5.25 Características de los granos del cauce, ubicación confluencia entre las quebradas La Mucuy y No León. Cota aproximada 1770 msnm.

Tomando en cuenta las observaciones mencionadas, pudieran emplearse además valores típicos para este tipo de torrentes, donde generalmente prevalecen características similares de acuerdo a las condiciones ya señaladas. Entre los valores referenciales explicados anteriormente y los tomados de las tablas del trabajo de Aguilar (1990), se destacan los siguientes en la Tabla 5.14:

Tabla 5.14 Características de los granos del cauce.

Característica	Valor de referencia	Unidad	Observaciones
Diámetro representativo	64	mm	Según observaciones y estudios previos.
Peso específico de las partículas	2,65	T/m <sup>3</sup>	Considerando gravas y arenas.
Porosidad promedio del suelo	30	%	Considerando arena graduada, densa.
Ángulo de fricción del suelo	30	°	Considerando arena suelta.

### 5.14.3 Características hidráulicas.

Con base en el estudio hidrológico-hidráulico realizado, y bajo la perspectiva de un diseño preliminar, se tienen 3 características claves dentro de las consideraciones hidráulicas como lo son:

- Caudal de diseño: este valor corresponde al caudal máximo para un período de retorno establecido en base a la importancia del proyecto y a las características hidrológicas de la cuenca e incluye tanto el caudal líquido como el caudal sólido que arrastra la corriente (Aguilar, 1990).

Cabe destacar que para el presente trabajo sólo se consideró caudal líquido; sin embargo, el caudal sólido en todo caso deberá estimarse mediante procesos de transporte de sedimentos que presenta la hidráulica.

- Profundidad aguas abajo: este valor establece un orden de magnitud del tirante aguas abajo del dique. Puede calcularse por ejemplo haciendo uso de la ecuación de Manning. Para el caso en particular, se obtuvo de estimaciones del estudio hidráulico realizado en los modelos explicados anteriormente.
- Peso específico del fluido: corresponde al peso específico del agua con materiales en suspensión, y será igual o mayor a  $1 \text{ T/m}^3$ , según la cantidad de finos acarreados y conforme se produzca el azolvamiento (aumento del depósito de sedimentos en el fondo de un río por acarreo natural o voluntario). En este sentido, se resumen las siguientes características a considerar en la Tabla 5.15 mostrada a continuación:

Tabla 5.15 Características hidrológico-hidráulicas del cauce.

Característica	Valor de referencia	Unidad	Observaciones
Caudal de diseño	319,4	$\text{m}^3/\text{s}$	Considerado para un $\text{Tr}= 25$ años
Profundidad aguas abajo	1,90	m	Se consideró un valor promedio del estudio hidráulico
Rugosidad del cauce	0,05	$\text{s}/\text{m}^{1/3}$	Valor representativo para cauces de montaña

#### 5.14.4 Pendiente de compensación.

Este valor representa la pendiente de equilibrio que ha de existir una vez construido el dique y que ocurra el azolvamiento. Bajo estas consideraciones, el dique transversal de consolidación de acuerdo a sus características permite compensar el desequilibrio entre las fuerzas de arrastre de la corriente y la resistencia del contorno debido a que establece un punto fijo en el lecho del cauce controlando su descenso, además disminuye la pendiente original del cauce, con lo cual se reduce la velocidad del agua y por lo tanto el efecto erosivo provocado por las mismas. Finalmente, la pendiente de compensación aumenta la sección del cauce dándole mayor anchura.

Existen varios procedimientos para el cálculo de este valor, cuyos pasos están reflejados en algunos estudios referentes al diseño de diques. Para los alcances de este estudio, sólo se nombrarán 3 procedimientos establecidos en el trabajo de Aguilar (1990) tal como se indican a continuación:

- Cálculo en función del radio hidráulico de la sección.
- Cálculo en función de un ancho promedio del cauce.
- Cálculo en función de su perímetro mojado.

En contraste con lo anterior, también debe hacerse énfasis que en el caso de tramos con variaciones bruscas de la sección transversal y en aquellos donde sea difícil asumir que se cumplan las hipótesis de cada procedimiento, es recomendable realizar mediciones en el cauce directamente, en lugares que correspondan a flujos tranquilos y/o en tramos detrás de grandes rocas o cualquier tipo de represamiento natural. Otra de las consideraciones importantes para este valor, es el mencionado en el Manual de Diseño de Obras Fluviales, realizado por Mejía y Lara (1998), donde se establece que

La pendiente longitudinal de la superficie de los sedimentos depositados tiende a un valor cercano a la pendiente crítica, por lo que una vez que esa pendiente se alcanza, sólo pueden ser retenidas algunas piedras de mayor tamaño que el promedio de las depositadas (p.41).

Para efectos del pre-dimensionado, hay que resaltar que la pendiente de compensación corresponde a un valor estimado y que resulta ser cercano a la pendiente crítica del cauce. En este sentido, el valor estimado para los tres sub-tramos fue calculado según el procedimiento 3 mencionado anteriormente, es decir mediante el perímetro mojado de la sección a considerar; para esto fue tomado como referencia un valor de la velocidad límite en el fondo para grava gruesa de 1,20 m/s (velocidad límite en el fondo, calculada en función de la textura del material que forma el lecho). Dicho valor fue obtenido de Cuomo y Palermo (1987), citado en Aguilar (1990).

Seguidamente, con la salvedad de que el procedimiento de cálculo de la pendiente de compensación, en función de su perímetro mojado es bajo estricta consideración de flujo uniforme, de la ecuación de Manning se puede establecer la Ecuación 5.1:

$$S_c = \frac{(C_v \cdot V_1)^{10/3} \cdot P_m^{4/3} \cdot n^2}{Q^{4/3}} \quad \text{Ecuación 5.1}$$

Dónde:

$S_c$ = pendiente de compensación (m/m).

$C_v$ = coeficiente que relaciona la velocidad media del agua y la velocidad en el fondo (varía entre 1,3 y 1,5).

$P_m$  = perímetro mojado de la sección considerada (m).

$n$  = rugosidad de Manning para el cauce.

$Q$  = caudal circulante ( $m^3/s$ ).

Tomando en cuenta estas consideraciones, y apoyando el cálculo en los datos obtenidos del estudio hidráulico realizado, la pendiente de compensación para los tres sub-tramos se indica a continuación en la Tabla 5.16:

Tabla 5.16 Pendiente de compensación para cada sub-tramo.

Sub-tramo	Sc (m/m)	Sc (%)
1	0,00059357	0,059
2	0,00075692	0,076
3	0,00092963	0,093

#### **5.14.5 Determinación del eje longitudinal de regularización.**

Este eje corresponde al tramo donde serán ubicados los diques, con base en las características topográficas del lugar. Lo ideal es que sean colocados en tramos rectos, y que a su vez sean estimados los lugares ideales para que cumplan su objetivo. Para el presente estudio, dentro de los propósitos planteados corresponden a la mitigación del impacto generado por los saques de agregado en las márgenes de la quebrada La Mucuy, y que a su vez sirvan como estabilizadores del cauce obteniendo efectos amortiguadores en caso de que se produzcan desbordes por efectos de una crecida.

El eje de regularización fue definido con base en los resultados obtenidos para el cauce, ilustrados en la Figura 5.26. Referente a ésta, el análisis realizado se basó en observación directa sobre la imagen satelital de la zona; además, resultó ideal la estimación del eje de regularización con base en el cauce definido desde el inicio del trabajo. Se muestran un total de siete diques enumerados desde aguas abajo hacia aguas arriba, con especial mención en que la ubicación del primero (dique 1) definió la ubicación de los diques posteriores. Asimismo, en la figura fueron colocados de manera aproximada los puentes presentes en la zona de estudio, correspondientes al puente “Mesa Los Leones” y al puente “Parque Los Corales”. Se tomó como referencia una perspectiva de la zona, para abarcar todos los sub-tramos y evaluar de mejor manera lo explicado.



Figura 5.26 Eje longitudinal de regularización y ubicación de los diques en el tramo. Elaboración propia.

#### **5.14.6 Altura efectiva del dique.**

Esta altura es la que corresponde a la sección del dique que sobresale del nivel natural del cauce, medido desde su parte más profunda. Según Aguilar (1990), este valor dependerá de varios factores influyentes, entre el que destaca el uso del dique. En este sentido, para diques de consolidación la altura se hallará de forma que el azolvamiento llegue al pie del próximo dique aguas arriba, o en el caso de consolidación de laderas hasta la altura de cuña de azolvamiento en su sección media para que cumpla con la estabilización prevista.

#### **5.14.7 Separación entre diques.**

Siguiendo las recomendaciones de Mejía y Lara (1998), se estipula que la finalidad de la regulación de un cauce es producir artificialmente una condición de equilibrio en un tiempo relativamente corto. Esto puede lograrse a través del escalonamiento de diques alternados, implementados en diversas fases, lo cual dependerá de las necesidades de cada proyecto. Considerando estos aspectos, para una correcta corrección es recomendable como primera fase la implantación de grandes diques, en términos relativos, con lo que se espera disminuir en el tiempo, el volumen y el tamaño de los materiales acarreados por el agua. Dicho esto, la separación entre dos diques no debe ser menor que la distancia horizontal de desarrollo de la socavación producida por el flujo del agua al caer al pie del dique. Como etapa preliminar, la separación entre ellos fue considerada de manera somera basando el análisis en la topografía del terreno y los posibles lugares tal como se indicó anteriormente en la Figura 5.26.

#### **5.14.8 Elección del tipo de dique.**

Una vez que establecida la ubicación de los diques con base en su altura efectiva, en las condiciones topográficas, entre otros aspectos mencionados anteriormente, se escogió el tipo de dique de acuerdo a los requerimientos solicitados. Para el presente caso, fue seleccionada la alternativa de diques de gaviones con recubrimiento de mallas metálicas, donde se destacan algunas razones y ventajas de la elección:

- Existe disponibilidad en el tramo estudiado de material granular adecuado para rellenar las redes metálicas (rocas y cantos rodados).

- Los gaviones son altamente permeables, lo que significa que el agua puede fluir a través de ellos quedando retenidos los sedimentos.
- No requieren de equipos ni mano de obra especializada, ya que sólo se requiere transportar las redes metálicas (o también conocidas como jaulas), y el alambre para su unión.

#### 5.14.9 Pre-diseño de los diques.

En la Tabla 5.17 se resumen las dimensiones pre-diseñadas para los valores mostrados, tomando en consideración tanto los aspectos recabados hasta los momentos como las recomendaciones dadas por Suarez (1993), para el pre-dimensionado de diques en gaviones. Se indica además que los diques fueron enumerados de aguas abajo hacia aguas arriba, por lo tanto, la progresiva 0+000 corresponde al dique 1 en la cota más baja.

Tabla 5.17 Resumen de ubicación y características de los diques.

Dique	Progresiva (m)	Altura efectiva (m)	Altura total (m)	Base (m)
1	0+000	2,00	3,50	2,45
2	0+300	2,00	3,60	2,50
3	0+685	2,00	3,40	2,40
4	0+861	2,00	3,70	2,70
5	0+1101	2,50	4,10	3,00
6	0+1462	2,50	4,10	3,00
7	0+1904	2,50	4,30	3,20

Cabe resaltar que estas características representan simplemente una aproximación de lo que podrían ser un diseño definitivo. Adicionalmente, son necesarios los niveles de detalle en campo para una aproximación más real del pre-diseño. Sin embargo, se representan en las Figuras 5.27 y 5.28 algunos complementos visuales importantes, cuyo propósito es representar la forma en cómo estos diques deben ser colocados para cumplir con sus objetivos planteados.

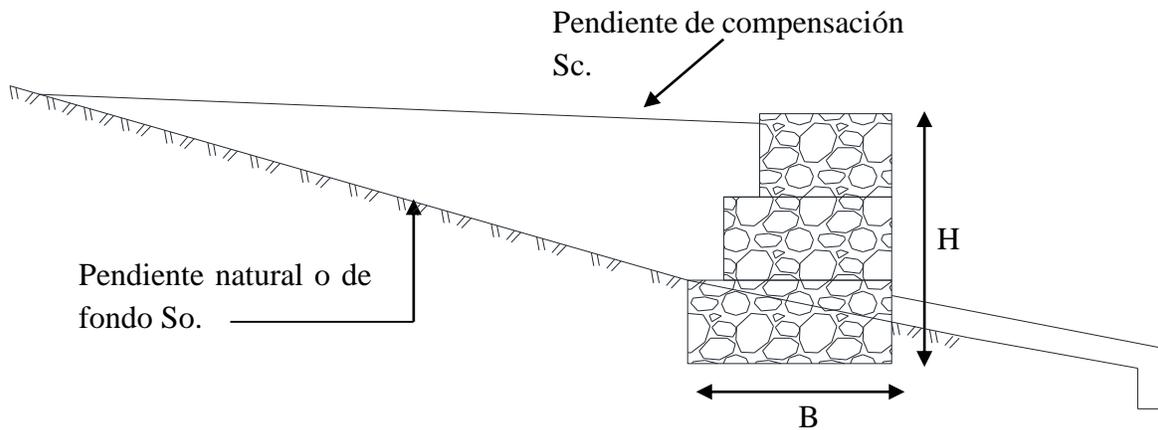


Figura 5.27 Vista longitudinal para la pendiente natural y de compensación.

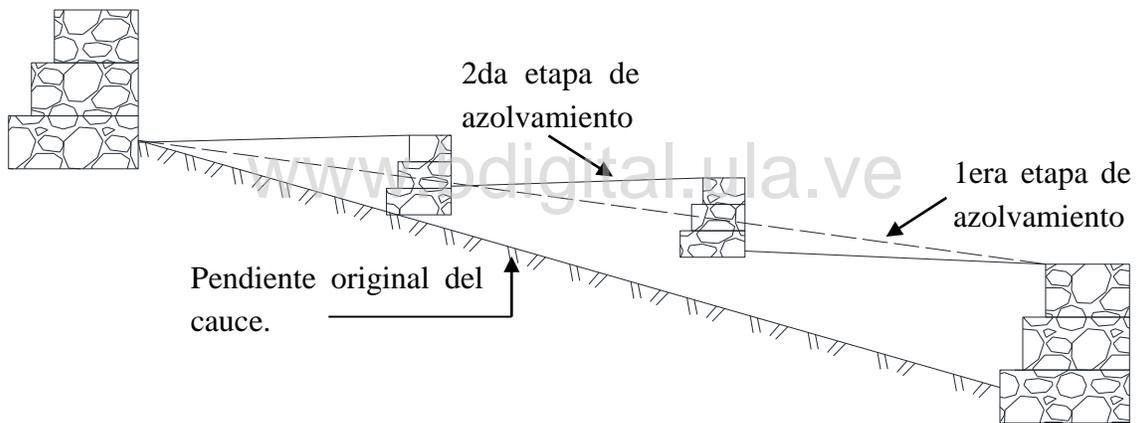


Figura 5.28 Etapas de azolvamiento en diques para control de torrentes.

Asimismo, con base en la Tabla 5.17 se representa la información de manera gráfica, con el perfil longitudinal obtenido en el SIG, bajo los parámetros establecidos de cotas y progresivas representativas del tramo en estudio. Cabe resaltar que, los puntos de ubicación de los diques transversales fueron escogidos con base en la topografía arrojada por el DEM, así como también bajo el análisis de la imagen satelital y observación en campo de algunos sub-tramos “accesibles” dentro del cauce de la quebrada La Mucuy. Esta información se representa en la Figura 5.29, tal como se muestra a continuación:

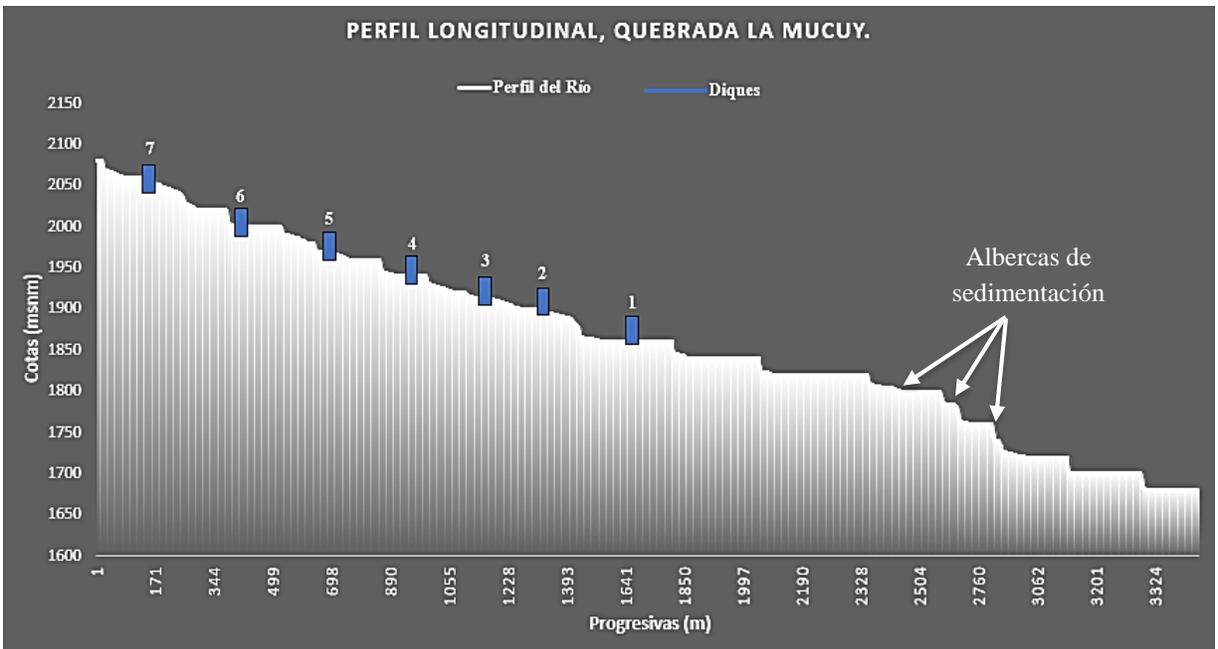


Figura 5.29 Perfil longitudinal de la quebrada La Mucuy, y ubicación de los diques transversales. Elaboración propia.

La vista longitudinal del tramo en estudio, permite una mejor perspectiva respecto a la vista en planta mostrada en la Figura 5.26. Observando algunos de los detalles, la ubicación correspondió en primera instancia al lugar apropiado para el primer dique. Se localizó aproximadamente unos 1000 m aguas arriba de las albercas de sedimentación (areneras), con la finalidad de alejar la estructura de la perturbación presente. La existencia de estas albercas constituye un impacto negativo que afecta el régimen hidráulico de las quebradas la Mucuy y Ño León, ya que se ven modificadas la pendiente, ancho y calado en dichas secciones. El problema no es que existan estas extracciones de agregados, sino la desmedida y no planificada extracción del recurso. De igual manera, en el perfil longitudinal se aprecian incluso unas “caídas” de agua en el lugar de emplazamiento de las albercas, cuyo estado original no es éste, ya que fue evidenciada en campo la generación de presas con las rocas de mayor tamaño, empozando de esta forma el agua, lo que en consecuencia generó una afectación marcada para el lecho de la quebrada La Mucuy.

Asimismo, la ubicación de los diques restantes se determinó con base en los lugares de pendiente constante, tratando de analizar igualmente las curvas de nivel generadas por el DEM. Al inicio del dique 1 (desde aguas abajo hacia aguas arriba), fue estipulada una distancia de aproximadamente 300 m para el dique 2, previendo también que entre el dique 2 y el 3 se ubica el

ponte “Parque Los Corales”. Sucesivamente, los demás diques 5, 6 y 7 se encuentran en una zona más encajonada, por lo cual fueron separados a distancias entre 300 y 500 m aproximadamente, previendo además que deben ser de mayor altura por ser más angosta la sección.

Como complemento adicional, se presenta a continuación en la Figura 5.30 una vista transversal del dique 4, escogido como ejemplo para su representación. Adicionalmente, se utilizó una sección típica suministrada por el HEC-RAS para esta ubicación. Es simplemente una estimación muy somera de las características geométricas del dique, pero donde se aprecian los elementos más importantes para esta sección y la estructura.

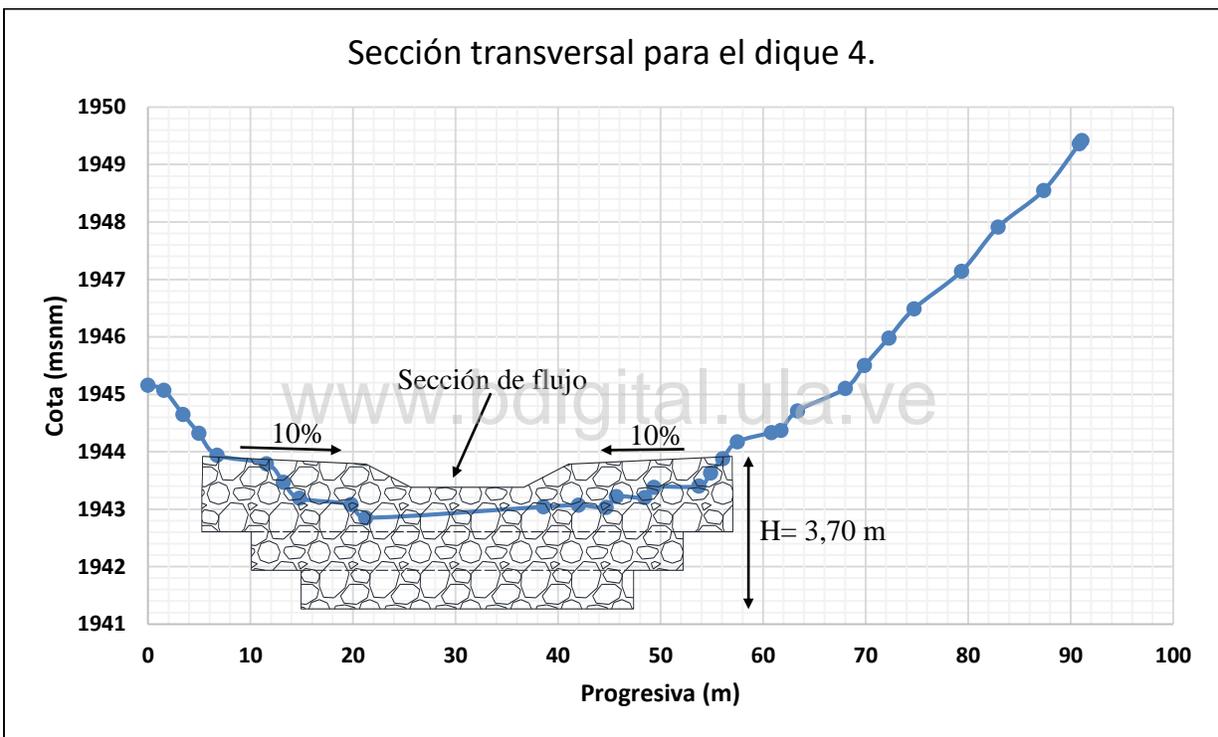


Figura 5.30 Vista transversal para el dique 4, junto con la sección transversal tipo. Elaboración propia.

Algunos de los elementos mostrados, fueron descritos anteriormente; no obstante, cabe destacar que la sección de flujo se recomienda que sea una sección de tipo trapezoidal cuya base inferior sea lo más ancha posible, con el propósito de disminuir los efectos de socavación y evitar erosión en las laderas (Aguilar, 1990). Además debe ubicarse simétricamente sobre el eje longitudinal de regularización del torrente (exceptuando aquellos casos donde la topografía no lo permita u otros casos). Igualmente, se recomienda que las alas del dique tengan una pendiente del 10% hacia las laderas del cauce.

Posteriormente, este pre-dimensionamiento contempla algunas de las obras complementarias que se deben considerar al momento de un diseño definitivo, teniendo como base de partida que cada una de las medidas estructurales deben ir acompañadas de obras suplementarias, sean estas estructurales o no. En virtud de esto, Aguilar (1990) y Suarez (1993) consideran las siguientes concepciones, adaptadas al presente trabajo:

- **Mechinales:** pueden ser utilizados a través del dique permitiendo el escurrimiento del flujo de infiltración. Para el presente estudio se consideraron diques transversales de gaviones por lo que pareciera que no hacen falta los mechinales en este tipo de diques ya que el gavión representa una estructura permeable. Sin embargo, se debe recordar que además de la retención de sedimentos aguas arriba del dique, se busca mitigar los picos ocurridos en crecientes, por lo cual se justifica adicionar mechinales al dique. Estos mechinales pueden ser hechos con tuberías de acero, concreto o PVC (policloruro de vinilo).
- **Alas del dique:** éstas son generalmente de sección prismática, de ancho igual al de la cresta de coronación del dique. Se recomienda que tengan una pendiente del 10% hacia las laderas del cauce. Además, Aguilar (1990), estipula que el empotramiento en las márgenes dependerá de la forma de la sección transversal del cauce y de la altura del dique.
- **Protección aguas abajo del dique:** existen varias medidas que pueden emplearse con la finalidad de brindar mayor protección al dique que se requiera (generalmente el primero de aguas abajo hacia aguas arriba). Algunas de las obras de protección podrían ser losetas de concreto aguas abajo del dique, o también el diseño de un contradique. El propósito principal de estas protecciones es amortiguar el impacto que genera el agua una vez que cae del dique, disminuyendo así la socavación que se genera en estas estructuras.
- **Control de la tubificación:** es un fenómeno que se acentúa conforme aumentan las dimensiones del dique. Lo ideal es realizar un análisis detallado al dique con mayores dimensiones y procurar en la medida de lo posible evitar diques tan largos o tan altos.

Dentro de las justificaciones de este tipo de medidas estructurales, radican en que el fenómeno torrencial se caracteriza porque la capacidad erosiva del flujo, generalmente representada por el esfuerzo cortante del fondo supera la capacidad de resistencia al movimiento de las partículas que conforman el contorno del cauce, lo cual provoca la profundización del mismo, así como también el transporte masivo de material por el fondo y en suspensión, erosión de márgenes y

desestabilización de las laderas adyacentes (Vidal, 2004). En este sentido, los diques transversales constituyen la etapa inicial de una estrategia estructural, que permiten la regulación de los caudales líquidos y sólidos, además de retener de forma temporal el material de arrastre, retiran de circulación los tamaños grandes, contribuyen a disminuir el poder erosivo de la corriente y protegen la infraestructura localizada en la parte baja del cauce, de daños ocasionados por crecientes y flujos de lodos que puedan presentarse. No obstante, esta medida no debe desligarse de otro tipo de protecciones, tales como enrocados laterales, coberturas vegetales, o diques longitudinales.

Finalmente, bajo la perspectiva de estudio descrita cabe resaltar que la concepción inicial estuvo basada en un pre-dimensionamiento que diera noción sobre las posibles medidas estructurales a emplear. No obstante, se decidió tomar diferentes puntos de vista de trabajos anteriores, complementando toda la información recabada para una mejor y mayor comprensión sobre los factores que influyen en el control de torrentes.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La elaboración de metodologías que permiten la evaluación a nivel hidrológico e hidráulico en las distintas cuencas a nivel nacional son objeto importante y necesario para el desarrollo oportuno en cuanto al recurso hídrico se refiere. En este sentido, la cuenca La Mucuy ha sido valorada desde tiempos anteriores bajo perspectivas descriptivas, geográficas e hidrológicas; manteniendo constante enfoque en la dinámica cambiante del sistema integrado de la cuenca, sobre todo por la presencia antrópica que ha contribuido significativamente en dicha variabilidad. Es por ello que, el estudio efectuado trajo consigo diferentes consideraciones durante la obtención de resultados, los cuales abarcan además de los aspectos ya mencionados, la evaluación hidráulica de la quebrada La Mucuy bajo dos perspectivas, y adicionalmente la generación de un pre-diseño de medidas estructurales que contribuyan como instrumento orientador para posibles avances a futuro.

Respecto a la evaluación hidrológica realizada, se tuvo oportunidad de evidenciar la necesidad de datos hidrometeorológicos actualizados para la zona, ya que se contaba con registros muy antiguos, y esto forma parte de un proceso acelerado de desinformación que conlleva muchas veces a la sobreestimación, o peor aún, a subestimar datos de este tipo. Respecto a esto, la estación Tabay (3038) contaba con data casi constante de 34 años, para datos pluviográficos hasta el año 1995, lo que quiere decir que se tiene un estimado para la fecha de más de 20 años sin registros completos, lo cual repercute de manera importante en los estudios hidrológicos que deban realizarse para lugares aledaños a la población de Tabay. Con base en esta data, los hidrogramas de crecida generados con el uso del HEC-HMS, se consideraron válidos en este rango de aplicación, sin dejar de lado la tendencia progresiva que se contempla actualmente respecto a la variabilidad y cambio climático al que se encuentran sometidos todos los sistemas naturales.

Los resultados inherentes a caudales extremos para los tres períodos de retorno analizados, se vieron supeditados a las características físicas, geológicas, topográficas y naturales de la zona; sin embargo, como factores determinantes se debe enfatizar el uso de parámetros concernientes a la hidrología como lo fueron la rugosidad de Manning y el valor del número de curva. La escogencia de estos valores debe ir más allá de los ya estandarizados para distintas características; sin

embargo, para un nivel de estudio con mayor detalle se hace necesario el análisis profundo de estas variables tomando en consideración las tipologías que envuelven estos valores. Para el presente caso, el apoyo en estudios anteriores y cuencas similares, fue determinante para una aproximación más real de lo que ocurre en la cuenca. Bajo este mismo orden de ideas, es importante precisar que la variación de estos parámetros afecta significativamente un estudio hidrológico-hidráulico, ya que bajo la concepción de estos valores se tiene mayor comprensión del sistema en general. Asimismo, los valores de caudales extremos como lo fueron  $319,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $327,5 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $354,7 \text{ m}^3/\text{s}$  para los períodos de retorno escogidos de 25, 50 y 100 años respectivamente, terminaron siendo muy similares entre sí, lo que de alguna forma produjo una similitud hidrológica en cuanto a eventos extremos de crecida se refiere la cuenca y a sus correspondientes zonas de desborde.

Posteriormente, la evaluación hidráulica realizada en la cuenca no tiene antecedentes registrados, por lo que representa una herramienta inicial para la valoración de los parámetros que pudieran darse bajo la condición hidrológica analizada, y genera una idea sobre los calados de agua, áreas de desborde, regímenes de escurrimiento y velocidades de flujo producto de una crecida. A nivel hidráulico la producción de estos factores contribuye de manera relevante en lo concerniente a variables probables, que bajo distintos escenarios analizados pudieron ser evaluadas con mayor detalle. Desde el punto de vista unidimensional, el software HEC-RAS v5.0, brindó un apoyo trascendente para la generación de resultados, sobre todo porque se trata de un software libre ampliamente utilizado y con gran aceptación por parte de los expertos en el área. No obstante, como punto importante, debe hacerse mención a que el mismo fue desarrollado para zonas con baja pendiente o lo que normalmente se le denomina llanuras, y su uso debe hacerse con cuidado a zonas con topografía accidentada o que tengan pendientes pronunciadas. Bajo esta perspectiva, el complemento HEC-GeoRAS v3.5, sirvió como soporte gráfico para la representación de las manchas de crecida, y esto motivó a un uso general de la herramienta, tomando en consideración los aspectos ya mencionados para cauces de montaña.

Por otra parte, la evaluación hidráulica realizada con el modelo bidimensional FLO-2D Basic, aportó un conocimiento nuevo bajo la perspectiva ideada al inicio de este trabajo, aun cuando no se tenía mayor conocimiento ni material “libre” para su desarrollo. A pesar de ello, fue una herramienta enriquecedora para la investigación, ya que es un modelo de diferencias finitas que integra la ecuación de momento en forma completa, lo que aproxima de manera más realista el estudio concerniente a cauces de montaña y sus dinámicas torrenciales.

Aunado a la evaluación hidrológica e hidráulica de la cuenca, bajo los modelos unidimensional y bidimensional explicados anteriormente, las zonas de desborde obtenidas resultaron ser bastante similares entre sí, lo que conduce a una verificación pertinente de ambos modelos aun cuando realizan análisis distintos. No obstante, esto se debió en gran parte a la escala de trabajo utilizada, ya que se observó durante la ejecución de los modelos que existieron variaciones para escalas mayores, pero desde un principio se tuvo en consideración este pormenor. Con relación a esto, las áreas de desborde no cambiaron significativamente entre un modelo y otro; no siendo así para los valores de calados y velocidades analizados. Bajo el enfoque unidimensional, el HEC-RAS interpoló muchos de los valores existentes entre las secciones transversales establecidas, y en las tablas generales de resultados se indicó la necesidad de más secciones transversales (aun cuando ya se habían establecido en un valor de separación de 25 m), pero se decidió trabajar con este valor, dada la escala de trabajo ajustada que fue de 1:15000. En contraparte, el modelo bidimensional estableció un estudio con mayor detalle, teniendo como referencia que el análisis fue efectuado para un total de 864 celdas, donde a cada uno de estos pixeles les fue agregado un valor de coordenadas y cotas, que terminaron siendo analizados con una celda de flujo de entrada bajo el hidrograma obtenido en el HEC-HMS previamente explicado. Se observó que el programa consume bastante memoria del ordenador, siendo esta una limitante para computadores de baja memoria RAM.

Existieron similitudes entre ambos modelos para algunas zonas; no obstante, dentro de las variables significativas evaluadas, el HEC-RAS resultó ser más conservador en cuanto a las variables hidráulicas, sobre todo respecto a los calados de agua, arrojando valores de hasta 0,8 m de altura cuando el modelo bidimensional consideraba 0,3 m. Igualmente ocurrió con las velocidades estipuladas, donde fue mayor la discrepancia observada, obteniéndose valores para los tramos de mayor pendiente entre 6 y 9 m/s según el HEC-RAS, y valores entre 4 y 6 m/s según el FLO-2D.

En virtud de los aspectos señalados, el objetivo fundamental de la presente investigación radicó en la producción de un material aportante a la comunidad actualmente asentada en las adyacencias de la quebrada La Mucuy y los organismos públicos cercanos como lo es la Alcaldía del Municipio Santos Marquina, con el propósito de incluir a los estudios ya realizados en esta zona, los factores influyentes en la evaluación de posibles desbordes del cauce, sin dejar de mencionar que la data histórica referente a eventos de crecida ya ocurridos, generaron parte primordial del objeto

investigativo; puesto que es de esperarse un evento extremo en tiempos posteriores. Aunado a esto, no se puede obviar el hecho de que en caso de que esto ocurra, la intervención antrópica de las albercas de sedimentación ya existentes, acelerarían el proceso de desborde, sobre todo en la margen derecha de la quebrada, donde se localiza un talud de poca altura de estas areneras, teniendo actualmente en estas inmediaciones el sector Hacienda y Vega.

Respecto al pre-diseño de las medidas estructurales se hace necesario enfatizar que no hubiera sido posible llegar al cumplimiento de este objetivo sin haber realizado la respectiva evaluación hidrológica e hidráulica de la cuenca. Factor que actualmente está siendo “abandonado” en la mayoría de los proyectos de esta índole. El nivel preliminar permitió una mejor comprensión de todos los aspectos que se involucran en un trabajo de esta magnitud, siendo importante tener presente que todo inicio de una obra hidráulica debe comenzar por el reconocimiento de la problemática existente en campo, y con base en la importancia del estudio deben considerarse aspectos estrictamente en detalle. Para el presente caso, la medida estructural seleccionada correspondió a la ubicación de diques transversales permeables, construidos con gaviones, los cuales representan sólo una alternativa de las muchas que fueron consultadas en lo que respecta al control de torrentes y a su vez amortiguación de crecidas. Se consideró que el nivel alcanzado estuvo acorde al planteamiento inicial, tomando como base las investigaciones de autores anteriores para el pre-dimensionado.

Finalmente, dentro de todos los aspectos recabados y haciendo alusión a los alcances y limitaciones del presente trabajo indicados en el apartado 1.3, fueron estipuladas las siguientes recomendaciones que dieron lugar a un complemento adicional para la investigación:

- El uso de los softwares de modelación requiere de datos verificables en campo, y es allí donde entra en juego la importancia actual de los sistemas de información geográfica (SIG). A pesar de ello, se recomienda un levantamiento topográfico en campo de cada una de las secciones transversales utilizadas, ya que al momento de un proyecto definitivo es determinante contar con data levantada en el lugar.
- Este estudio puede ampliarse con la información referente a estimación del transporte de sedimentos, considerando los métodos aportados por la hidráulica para cauces de montaña. Resulta necesario la adopción de enfoques actuales, dónde a partir de los datos de granulometría se generen diferentes perspectivas que pueden ser de mucha utilidad en la investigación. Asimismo, establecer

estudios particulares a las quebradas Ño León y Desbarrancadero, ya que ambas proporcionan gran carga de sedimentos a la zona estudiada, lo que a su vez contribuye a mayor acumulación aguas abajo en las albercas de sedimentación.

- Aun cuando ya existe un estudio previo sobre la vulnerabilidad social ante amenazas por crecidas torrenciales en la cuenca La Mucuy, se hace pertinente sugerir el enfoque a una nueva perspectiva, que involucre lo concerniente a la variabilidad y cambio climático dentro de esta zona, lo cual aportaría en mayor complejidad un estudio integrado a las tendencias que actualmente se buscan en investigaciones de esta índole.
- Las medidas estructurales son apenas una parte de lo que constituye el presente trabajo. Aun cuando se hizo mención de medidas complementarias dentro de la investigación, se recomienda una profundización en lo concerniente a medidas no estructurales como, por ejemplo: sistemas de alerta temprana, planes de desarrollo urbano-rationales, reforestación (o restitución de la cobertura vegetal del terreno), así como también el uso de medidas agro-culturales y vegetativas sobre toda la cuenca de drenaje del torrente.
- El pre-diseño de los diques transversales con gaviones, debe complementarse con un estudio de impacto ambiental que sustente la necesidad o no de éstos a lo largo del cauce. Y que, a su vez, proporcionen los efectos provocados por este tipo de medidas en la quebrada La Mucuy, previendo que existe actualmente una dinámica constante de cambios inherentes al ecosistema integral (flora, fauna, áreas de cultivo, zonas para riego, asentamientos humanos, extracción minera, entre otros factores).
- Es pertinente que, para un diseño definitivo de los diques transversales en caso de ser necesario, conlleve un estudio a nivel socioeconómico (comparación costo-beneficio), lo cual, para el presente trabajo, no se consideró conveniente tratándose de un diseño preliminar.
- La presencia de las albercas de sedimentación, corresponde a un factor determinante en cuanto al comportamiento torrencial de la quebrada La Mucuy. Se exhorta a las autoridades competentes, y comunidad adyacente a las mismas, a evaluar, controlar y monitorear la extracción de áridos en esta zona; especialmente con el propósito de mitigar los efectos negativos que esta actividad acarrea en casos extremos, como pudiera ser un evento de crecida.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilar, C. (1990). *Metodología para la sistematización del diseño de diques para el control de torrentes y su aplicación en un caso específico*. CIDIAT. Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela.

Armento, M., Genevois, R. y Tecca, P. (2008). *Comparisson of numerical models of two debrisflows in the Cortina d'Ampezzo area, Dolomites, Italy*. *Landslides*, v. 5, p. 143-

Ayala et al., (2013). *Informe preliminar sobre los procesos hidromorfológicos localizados en la quebrada Ño León. Sector La Mucuy Baja*. Instituto de Geografía y Conservación de Recursos Naturales y de la Escuela de Geografía, Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela.

Ayala, L. y Ferrer, P. (1973). *Análisis de frecuencias de datos hidrológicos mediante computación*. Santiago de Chile: Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Obras Civiles.

Barrios, M. y Olaya, E (2007). *Calculo y Análisis de Hidrogramas para el Flujo Torrencial del 22 de junio de 2006 ocurrido en la Microcuenca "El Salto", Ibagué-Colombia*. Disponible: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/arh/article/view/9311> [Consulta: 17-05-2017].

Barros, J. y Vallejo, L. (2007). *Metodología para evaluación de la condición de corrientes urbanas*. Disponible: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1794-12372007000100007](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372007000100007). [Consulta: 09-04-2017].

Bertolo, P. y Bottino, G. (2008). *Debris-flow event in the Frangerello Stream-Susa Valley (Italy)—calibration of numerical models for the back analysis of the 16 October, 2000 rainstorm*. *Landslides*. 5 (1): 19 – 30.

Briceño, M. y Molina, G. (2008). *Actualización y automatización de la cartografía geológica base del sector Tabay (carta 5941 I NE)*. Universidad de los Andes. Mérida-Venezuela.

Chow, V., Maidment, D. R, y Mays, L.W. (1994). *Hidrología aplicada*. Santafé de Bogotá: McGraw-Hill.

Campos, J. y Bravo, L. (2011). *Eventos catastróficos por inundaciones y deslaves en Venezuela*. Universidad Simón Bolívar. Disponible:

[http://www.ucv.ve/fileadmin/user\\_upload/comir/documentos/I1\\_EVENTOS\\_CATASTROFICO\\_S\\_JM\\_CAMPOS\\_USB.pdf](http://www.ucv.ve/fileadmin/user_upload/comir/documentos/I1_EVENTOS_CATASTROFICO_S_JM_CAMPOS_USB.pdf). [Consulta: 01-04-2017].

Castillo, N. *et al.* (2006). *Modelado de flujos de lodo usando FLO-2D en la quebrada Paihua: Impacto en la ciudad de Matucana, Lima-Perú*. Disponible: <http://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/ingemmet/446> [Consulta: 01-05-2017].

CIDIAT (*sf*). *Manual escrito del modelo EVENTO*. Universidad de los Andes. Mérida-Venezuela.

CIEPA (2013a). *Estudio hidrológico - hidráulico terreno la Guaiquera. Municipio Libertador del Estado Mérida*. Asociación Cooperativa de Ingeniería para Estudios y Proyectos en Agua y Ambiente. Mérida - Venezuela. Informe final. 53 p. (Inédito).

CIEPA (2013b). *Estudio hidrológico – hidráulico terreno Don Pepe Rojas. El Vigía. Municipio Alberto Adriani del Estado Mérida*. Asociación Cooperativa de Ingeniería para Estudios y Proyectos en Agua y Ambiente. Mérida - Venezuela. Informe final. 45 p. (Inédito).

Comisión Nacional del Agua (2011). *Manual para el control de inundaciones*. Subdirección General Técnica. Coyoacán-México D.F.

Corominas, J. *et al* (1996). *Debris flow. En: Dikau, R., Brundsen, D., Schrott, L., e Ibsen, M.L., (Eds). Landslide recognition. Identification, movement and causes*. 161-187. John Wiley & Sons. Chichester. New Cork. Brisbane. Toronto. Singapore.

CORPOVARGAS, Instituto de Mecánica de Fluidos y Departamento de Ingeniería Hidrometeorológica de la Universidad Central de Venezuela UCV, y Unión Europea (2007). *Evaluación y prevención del riesgo de origen hidrometeorológico y geodinámico de las cuencas de Tacagua, La Zorra y Mamo en el Estado Vargas” Venezuela*. Informe final. 610 p. + Anexos. (Inédito).

Cuervo, V. (2007). *Zonificación de amenaza por movimientos de masa con aplicación de tecnología de sistemas de información geográfica: caso: cuencas del Río Montalbán y Quebrada La Portuguesa, Ejido, estado Mérida*. Universidad de los Andes. Mérida-Venezuela.

Dávila, J. y Mora, A. (2014). *Anteproyecto integral avenida perimetral de la población de Tabay municipio Santos Marquina*. Universidad de los Andes, Mérida-venezuela.

Dávila, M. y Peñuela, T. (2002). *Determinación de hidrogramas de crecidas a través de la aplicación de dos modelos de simulación hidrológica en la microcuenca La Fría. Estado Mérida.* Universidad de Los Andes. Mérida-Venezuela.

Dávila, M. y Requena, M. (2004). *Zonificación de la amenaza hidrológica en un cono de deyección usando modelo de simulación hidrológica e hidráulica. Aplicación a la quebrada La Pedregosa. Sector La Pedregosa, Estado Mérida.* Escuela de Ingeniería Forestal. Universidad de Los Andes. Mérida-Venezuela. Trabajo Especial de Grado.

Delgadillo, A. (2014). *Evaluación de las amenazas por crecidas del río Mocotíes en Tovar y Santa Cruz de Mora, con especial énfasis en el evento hidrometeorológico de febrero de 2005.* Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de los Andes. Mérida-Venezuela.

Duque, R. y Barrios, A. (1987). *Actualización del estudio de las crecidas de la zona sur del Lago de Maracaibo, estado Zulia.* Centro Interamericano de Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT) y Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables. Tomos 1 y 2.

Duque, R. (2006b). *Análisis de tormenta. (Material de Enseñanza de Diseño Hidrológico).* Maestría en Desarrollo de los Recursos de Aguas y Tierras. Mención: Ingeniería de Riego y Drenaje. Centro Interamericano de Investigación Ambiental y Territorial CIDIAT. Universidad de los Andes. Mérida-Venezuela.

Ferrer, C. y Dugarte, M. (2009). *Abanicos aluviales y conos de deyección, desde el punto de vista geomorfológico. Flujos de detritos. Represamientos y aludes sísmicos (Material de enseñanza).* Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de los Andes. Mérida-Venezuela.

Flórez, I. y Aguirre, J. (2006). *Hidráulica Fluvial.* Mérida, Venezuela: Publicaciones Facultad de Ingeniería Universidad de Los Andes. 215p.

Flórez, N. y Manzanilla, G. (1999). *Análisis de la problemática originada por las crecidas del río Chama en la parte alta de la cuenca.* Universidad de los Andes. Mérida-Venezuela.

Flores, J. y Sendín, P. (2007). *Inundaciones en la cuenca del Ebro.* Universidad de Salamanca. Disponible: [https://issuu.com/josedavidfloresfelix/docs/inundaciones\\_ebro](https://issuu.com/josedavidfloresfelix/docs/inundaciones_ebro) [Consulta: 14-06-2017].

- Galantón, E. y Romero, L. (2007). *Descripción de las Defensas Ribereñas*. Barcelona-Venezuela: Universidad de Oriente.
- Gallardo, O. y Sánchez, E. (2012). *Registro de Caudales y Evaluación Hidráulica del Río La Mucuy*. Universidad de los Andes. Mérida-Venezuela.
- Garzón, G. (1987). *Las avenidas como fenómeno geológico. Geología y prevención de daños por inundaciones*. IGME, 5-54.
- G.J. Arcement, Jr. and V.R. Schneider, USGS (sf). Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. United States Geological Survey Water-supply Paper 2339. Disponible:  
<https://wwwrcamnl.wr.usgs.gov/sws/fieldmethods/Indirects/nvalues/>
- Guevara, E. y Cartaya, H. (1991). *Hidrología. Una Introducción a la Ciencia Hidrológica Aplicada*. Valencia-Venezuela: Universidad de Carabobo.
- Hernández, E. (1973). *Regionalización del fenómeno torrencial en la cuenca alta del río Chama*. Universidad de los Andes. Mérida-Venezuela.
- Hernández, N. y Serrentino M. (2009). *Evaluación del impacto sobre el río Chama en su cuenca media-alta asociada a la extracción de áridos (arenas y gravas), sector El Palón-Tabay estado Mérida*. Universidad de los Andes. Mérida-Venezuela.
- Lacruz, J. y Rondón, L. (2008). *Diagnóstico de la vulnerabilidad social ante amenazas por crecidas torrenciales. Caso: Cuenca La Mucuy, Municipio Santos Marquina; Mérida, Edo. Mérida*. Mérida-Venezuela: Universidad de los Andes.
- Landaeta, Y. (2004). *Aplicación de los modelos: Caudal 3, HEC – HMS, SMADA y métodos empíricos para la determinación de caudales máximos. Caso cuenca río La Pedregosa, Mérida, Estado Mérida. Evento máximo del 30-10-2001*. Escuela de Ingeniería Forestal. Universidad de Los Andes. Mérida – Venezuela. Trabajo Especial de Grado.
- López, J. (ed.). (2010). *Lecciones aprendidas del desastre de Vargas. Aportes Científico - tecnológicos y experiencias nacionales en el campo de la prevención y mitigación de riesgos*. Editorial Gráficas Lauki. Caracas-Venezuela. 808 p.

- Lluén, W. (2015). *Aplicación de la nueva herramienta HEC-RAS 5.0 para cálculos bidimensionales del flujo de agua en ríos*. Disponible: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:Hb3iHHEQhoJ:www.uco.es/jia2015/po nencias/a/a009.pdf+&cd=3&hl=es-419&ct=clnk&gl=ve&client=firefox-b-ab> [Consulta: 23-10-2017].
- Martínez, C. (2004). *Valoración económica de áreas verdes urbanas de uso público en la comuna de La Reina*. Universidad de Chile. Santiago de Chile.
- Mejía, R. y Lara, B. (1998). *Manual de diseño de obras fluviales*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Ministerio del Poder Popular para el Ambiente, (2013). *Diagnóstico preliminar de la zona Sur del Lago de Maracaibo-estado Zulia, para la elaboración de los términos de referencia del convenio Venezuela-Japón*. Viceministerio del Agua. Dirección General de Equipamiento Ambiental. Dirección de Operación y Mantenimiento de Obras. Caracas-Venezuela. 403 p. + Anexos. (Inédito).
- Molina, A. (2006). Determinación de áreas de inundación por crecidas Qda. "El rincón" y Qda. "El salado", Canaguá Estado Mérida. Universidad de los Andes. Mérida-Venezuela.
- Mora, J. (1999). *Elementos de hidrología aplicados a la corrección de torrentes*. Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela.
- Mora, R. (2001). *Zonificación de Amenazas Hidrológicas en Conos de Deyección. Caso de la Microcuenca Quebrada La Fría, Sector Chamita Edo. Mérida*. ULA. Mérida – Venezuela.
- Olivero, M., Aguirre, J. y Moncada, A. (2005). Fenómenos relacionados con los movimientos de barro y escombros ocurridos en la zona del páramo de Mérida en junio 2003. Disponible: <http://bdigital.ula.ve/index.php/documento/19781> [Consulta: 18-06-2017].
- Ollero, A. (1997). *Crecidas e inundaciones como riesgo hidrológico, un planteamiento didáctico*. Disponible: <http://www.ingeba.org/lurralde/lurranet/lur20/200oller/ollero20.htm>. [Consulta: 03-04-2017].
- Parra, L. y Salcedo, M. (2015). *Evaluación multitemporal de la cobertura de la tierra, en el Municipio Santos Marquina del Estado Mérida, períodos 1988-2001 y 2001-2013*. Mérida-Venezuela: Universidad de los Andes.

Pimstein, L. (2014). Plan de gestión de riesgo local ante un evento hidrológico en la quebrada El Rincón. Municipio Libertador. Estado Mérida. Universidad de Los Andes. Mérida-Venezuela.

Quiñones, Esneira, Dal Pozzo, Francesco (2012). *Visualización de zonas de desborde usando HEC-GeoRAS. Microcuenca del río la Pedregosa, estado Mérida-Venezuela*. Revista Geográfica Venezolana [en línea], 53 (enero-junio): [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2018] Disponible en:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=347730388005>> ISSN 1012-1617.

Silva, G. (1999). *Análisis hidrográfico e hipsométrico de la cuenca alta y media del río Chama, estado Mérida, Venezuela*. Revista Geográfica Venezolana. 40 (1): 9-42.

SLZ. (2010). *Estudio hidrológico y de hidráulica fluvial del río Carapo aplicado a la evaluación del impacto ambiental del desarrollo urbanístico “ciudad de las casas” La Polonia, municipio Junín, estado Tachira - Venezuela*. Salomón López Zerpa. Ing. Cosultor. Informe final. 54 p. (Inédito).

Stolz, A. y Huggel, C. (2008). *Debris flows in the Swiss National Park: the influence of different flow models and varying DEM grid size on modeling results*. Landslides. 5 (3): 311 – 319.

Suárez, L. (1993). *Presas de corrección de torrentes y retención de sedimentos*. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables. Primera Edición.

Superlano, W. (2010). *Estudio de crecidas máximas usando el modelo de simulación hidrológica HEC-HMS en la Subcuenca San Francisco, Municipio Tovar, Estado Mérida*. Universidad de los Andes. Mérida-Venezuela.

Torres, E. y González, E. (2010). *Aplicación del modelo de simulación hidráulica HEC-RAS para la emisión de pronósticos hidrológicos de inundaciones en tiempo real, en la cuenca media del río Bogotá - sector Alicachin*. Disponible:

<http://www.unilibre.edu.co/revistaingenioliberal/revista10/articulos/aplicaci%C3%B3n-del-modelo-de-simulacion-hidr%C3%A1ulica-hec-ras.pdf> [Consulta: 17-05-2017].

Universidad Central de Venezuela, (2004). *Subproyecto Caracas*. Centro de Excelencia en Dinámica y Control de Inundaciones y Aludes Torrenciales. Informe final. 145 p.

Valencia, F. y Guevara, E. (2014). *Validación del modelo HEC-HMS en la cuenca del río Cabriales para el análisis hidrológico*. Centro de investigaciones Hidrológicas y Ambientales, Valencia-Venezuela. Universidad de Carabobo.

Valderrama *et al.*, (2006). Mapa de peligros y simulación del flujo FLO-2D en la quebrada Runtumayo (Cusco): alud y flujo de detritos del 12 de octubre del 2005. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/237394429\\_mapa\\_de\\_peligros\\_y\\_simulacion\\_del\\_flujo\\_flo2d\\_en\\_la\\_quebrada\\_runtumayo\\_cusco\\_alud\\_y\\_flujo\\_de\\_detritos\\_del\\_12\\_de\\_octubre\\_del\\_2005](https://www.researchgate.net/publication/237394429_mapa_de_peligros_y_simulacion_del_flujo_flo2d_en_la_quebrada_runtumayo_cusco_alud_y_flujo_de_detritos_del_12_de_octubre_del_2005) [Consulta: 01-05-2017].

Veliz, L. (2001). *Amenazas y riesgos a las inundaciones en el Valle del Chama del Municipio Santos Marquina, Estado Mérida*. Universidad de los Andes. Mérida-Venezuela.

Vidal, R. (2004). Diseño de un programa bajo ambiente Windows para el Cálculo de diques en la corrección de torrentes. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Grupo de Estudio de Cuencas de Altas Tropicales, Mérida-Venezuela.

Whittow, J. (1988). *Diccionario de Geografía Física*. Alianza Ed., 557 p., Madrid.

York, E. (2007). *Estudio de la transformación del paisaje en el centro poblado de La Mucuy, municipio Santos Marquina, estado Mérida. periodos: (1952 - 1989) - (1989 - 1998)*. Universidad de los Andes. Mérida-Venezuela.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

## ANEXOS

**ANEXO 1. Coeficientes de rugosidad de Manning para segmentos de escorrentía. Fuente: Duque (1987).**

### Coeficientes de Rugosidad para Segmentos de Escurrimiento

Descripción de la Superficie	n <sup>1</sup> de Manning
Superficies lisas como concreto, asfalto, o suelo limpio	0,011
Barbecho sin residuo	0,050
<b>Suelos Cultivados</b>	
Cubiertos con 20 % o menos de residuos	0,060
Cubiertos con más del 20 % de residuos	0,170
<b>Superficies cubiertas de Pasto</b>	
Pasto corto	0,150
Pasto denso	0,240
Pasto bermuda	0,410
Superficies cubiertas de Pastizal natural	0,130
<b>Superficies cubiertas de Bosques</b>	
Soto bosque ligero	0,400
Soto bosque denso	0,800

<sup>1</sup> Valores recopilados por Engman (1986)

**ANEXO 2. Tablas para el número de curva (CN), condiciones hidrológicas I, II y III.**

**Fuente: Duque (2010).**

**Tabla N° 4. Número de curva para la condición de humedad antecedente I y III (CHA=I y CHA=III)**

CN para CHA= II	CN para las condiciones		CN para CHA= II	CN para las condiciones	
	CHA = I	CHA = III		CHA = I	CHA = III
100	100	100	62	42	79
99	97	100	61	41	78
98	94	99	60	40	78
97	91	99	59	39	77
96	89	99	58	38	76
95	87	98	57	37	75
94	85	98	56	36	75
93	83	98	55	35	74
92	81	97	54	34	73
91	80	97	53	33	72
90	78	96	52	32	71
89	76	96	51	31	70
88	75	95	50	31	70
87	73	95	49	30	69
86	72	94	48	29	68
85	70	94	47	28	67
84	68	93	46	27	66
83	67	93	45	26	65
82	66	92	44	25	64
81	64	92	43	25	63
80	63	91	42	24	62
79	62	91	41	23	61
78	60	90	40	22	60
77	59	89	39	21	59
76	58	89	38	21	58
75	57	88	37	20	57
74	55	88	36	19	56
73	54	87	35	18	55
72	53	86	34	18	54
71	52	86	33	17	53
70	51	85	32	16	52
69	50	84	31	16	51
68	48	84	30	15	50
67	47	83			
66	46	82	25	12	30
65	45	82	20	9	22
64	44	81	15	7	13
63	43	80	5	2	0

**ANEXO 3. Resultados obtenidos de caudales extremos para los tres períodos de retorno adaptados del HEC-HMS. Elaboración propia.**

Tr= 25 años			Tr= 50 años			Tr= 100 años		
Elemento Hidrológico	Area de drenaje (km2)	Caudal pico (m3/s)	Elemento Hidrológico	Area de drenaje (km2)	Caudal pico (m3/s)	Elemento Hidrológico	Area de drenaje (km2)	Caudal pico (m3/s)
El Oro	41.85	89	El Oro	41.85	85.8	El Oro	41.85	99.9
La Coromoto	27.92	162.5	La Coromoto	27.92	163.6	La Coromoto	27.92	179.1
Union 1	69.77	196.5	Union 1	69.77	193.5	Union 1	69.77	223.4
Tramo 1-3	69.77	195.2	Tramo 1-3	69.77	193.2	Tramo 1-3	69.77	221.1
Ño León	12.87	124.3	Ño León	12.87	123	Ño León	12.87	121.2
Desbarrancadero	4.66	45	Desbarrancadero	4.66	43.3	Desbarrancadero	4.66	43.7
Union 2	17.53	169.3	Union 2	17.53	166.2	Union 2	17.53	164.9
Tramo 2-3	17.53	147.2	Tramo 2-3	17.53	143.6	Tramo 2-3	17.53	146.2
La Mucuy	5.33	61.4	La Mucuy	5.33	60.5	La Mucuy	5.33	59.6
Ñ y D	0.88	9.8	Ñ y D	0.88	0	Ñ y D	0.88	9.5
<b>Union 3</b>	<b>93.51</b>	<b>319.4</b>	<b>Union 3</b>	<b>93.51</b>	<b>327,5</b>	<b>Union 3</b>	<b>93.51</b>	<b>354.7</b>
Tramo 3-Salida	93.51	318.5	Tramo 3-Salida	93.51	314.9	Tramo 3-Salida	93.51	353.4
S	0.005	0.1	S	0.005	0	S	0.005	0
Salida	93.515	318.5	Salida	93.515	314.9	Salida	93.515	353.4

**ANEXO 4. Resultados hidráulicos para HEC-RAS, en cada sub-tramo analizado. Para los tres períodos de retorno. Elaboración propia.**

**HEC-RAS. Tr= 25 años.**

TRAMO 1					TRAMO 2					TRAMO 3				
River Sta	Max Chl Dpth (m)	Vel Total (m/s)	Top Width (m)	Fr.	River Sta	Max Chl Dpth (m)	Vel Total (m/s)	Top Width (m)	Fr.	River Sta	Max Chl Dpth (m)	Vel Total (m/s)	Top Width (m)	Fr.
3900	1.41	9.29	37.75	3.11	2600	2.28	3.92	56.75	1.2	1125	2.88	4.15	43.31	1
3875	1.52	9.31	30.3	2.79	2575	2.85	3.29	47.68	0.78	1100	3.09	3.99	43.61	0.95
3850	1.17	4.88	59.3	1.52	2550	2.29	2.26	70.55	0.61	1075	3.15	4.19	42.77	1.03
3825	1.21	3.31	83.26	1.04	2525	2.02	1.93	86.85	0.52	1050	2.59	4.37	50.92	1.17
3800	2.19	4.95	57.45	1.69	2500	1.15	3.21	89.36	1.11	1025	2	4.48	49.15	1.42
3775	1.92	6.35	50.95	2.15	2475	1.84	6.12	56.04	1.94	1000	2.08	3.9	53.73	1.21
3750	1.75	7.47	46.93	2.46	2450	1.69	7.01	52.62	2.52	975	1.74	4.89	52.56	1.7
3725	1.32	7.27	48.61	2.44	2425	2.02	5.05	52.38	1.78	950	1.97	4.09	56.72	1.35
3700	1.08	7.62	54.15	2.73	2400	2.61	4.39	41.68	1.14	925	1.87	4.8	56.95	1.71
3675	1.93	5.89	45.46	1.87	2375	3.12	2.88	48.18	0.69	900	1.94	4.5	74.1	1.66
3650	1.94	6.55	41.3	2.05	2350	1.64	3.7	60.3	1.18	875	1.6	1.63	130	0.47
3625	2.26	5.99	44.19	1.76	2325	2.22	3.44	96.11	1.08	850	1.27	1.94	130	0.62
3606.3	1.96	7.52	41.4	2.35	2300	1.62	7.58	48.7	2.51	826	2.17	2.71	126.8	0.91
3575	1.97	8.43	31.88	2.47	2275	1.71	7	50.51	2.26	800	1.41	4.44	102.43	1.79
3550	0.99	6	57.04	2	2250	1.89	6.51	48.21	2.06	775	1.89	2.92	126.28	1.06
3525	1.87	2.18	82	0.55	2225	1.86	7.14	44.26	2.27	750	2.04	3.73	108.49	1.4
3500	1.11	3.23	91.18	1.05	2200	2	7.32	38.88	2.21	725	2.49	3.1	113.86	1.05
3475	2.9	4.66	47.03	1.15	2175	1.4	7.26	37.32	2.14	700	2.54	3.81	89.77	1.17
3450	2.05	8.75	35.19	2.89	2150	2.31	2.23	68.82	0.5	675	2.76	3.56	77.93	1.02
3425	1.9	8.9	30.8	2.59	2125	2.22	1.87	83.26	0.45	652	1.7	3.68	79.31	1.22
3400	0.99	5.98	56.46	2.04	2100	2.14	1.51	101.83	0.38	625	2.34	4.29	49.46	1.04
3375	1.86	2.27	79.84	0.57	2075	1.99	1.57	103.56	0.41	600	2.14	4.17	51.84	1.05
3350	1.67	2.01	98.58	0.53	2050	1.79	1.69	106.5	0.47	575	1.99	4.09	54.56	1.09
3325	0.96	3	112.94	1.05	2025	0.99	3.02	107.38	1.11	550	1.9	3.97	57.65	1.11
3300	1.03	7.33	86.37	3.26	2000	2.36	4.73	57.22	1.47	525	2.36	5	48.38	1.31
3275	1.27	5.83	62.37	1.99	1975	2.36	4.12	61.64	1.5	500	2.56	4.16	46.77	1.03
3250	1.04	8.3	55.77	3.22	1950	1.94	4.63	70.36	1.7	475	2.2	3.98	61.3	1.16
3225	0.92	4.66	78.99	1.71	1925	3.37	2.2	77.74	0.6	450	1.92	1.97	96.77	0.52
3200	2.48	6.37	40.13	2	1900.5	Bridge				425	1.81	1.35	130	0.37
3175	2.15	8.45	36.02	2.65	1900	1.69	5.06	46.48	1.35	400	1.63	1.5	130	0.43
3150	4.74	1.67	78.43	0.45	1875	2.52	1.73	87.03	0.4	375	0.86	2.84	130	1.12
3125.5	Bridge				1850	2.46	1.48	90.42	0.35	350	0.94	3.12	113.26	1.2
3125	2.34	5.72	45	1.98	1825	2.37	1.48	94.35	0.35	325	0.5	7.64	88.05	3.89
3100	0.86	6.14	63.54	2.16	1800	2.27	1.45	99.61	0.35	300	2.31	7.01	39.08	2.07
3075	1.93	1.88	92.78	0.49	1775	2.14	1.57	97.3	0.39	275	1.44	9.13	33.93	2.87
3050	1.73	1.7	112.17	0.49	1750	2	1.64	99.32	0.42	250	2.05	2.2	77.89	0.52
3025	1.06	2.53	120.75	0.93	1725	1.81	1.78	101.37	0.48	225	1.92	1.94	91.97	0.5
3000	1.77	2.89	124.79	1.05	1700	1.03	3.05	103.25	1.1	200	1.74	1.87	105.95	0.52
2975	1.43	6.03	76.48	2.29	1675	2.05	6.87	45.24	1.1	175	1.43	1.97	123.17	0.62
2950	1.67	4.3	83.94	1.5	1650	2.81	3.68	61.82	1.03	150	2.24	2.75	125.2	0.94
2925	1.4	6.31	60.45	2.31	1625	1.99	4.86	64.48	1.63	125	1.45	7.45	56.29	2.98
2902.5	1.4	6.41	49.58	2.1	1600	2.15	4.87	50.47	1.49	100	1.68	5.49	58.59	1.84
2875	1.57	2.15	99.89	0.63	1575	2.27	2.38	71.59	0.59	75	1.78	8.69	30.49	2.53
2850	2.28	2.8	122.27	0.99	1550	2.23	1.74	93.83	0.42	50	1.1	6.63	47.49	2.08
2825	1.94	5.64	58.33	2.03	1525	2.15	1.48	111.09	0.37	25	1.57	3.67	61.17	1.02
2800	2.18	4.3	66.63	1.45	1500	2.07	1.29	121.26	0.33					
2775	1.72	6.18	54.89	2.25	1475	1.96	1.37	120.4	0.36					
2750	1.64	5.79	50.44	2.09	1450	1.8	1.52	117.9	0.41					
2725	1.2	3.25	85.37	1.12	1425	1.55	1.78	116.51	0.52					
2700	2.3	3.48	106.89	1.01	1400	1.85	2.96	116.41	1.09					
2675	1.52	7.96	50.8	2.78	1375	1.82	4.52	77.45	1.61					
2650	1.73	6.09	57.73	2.07	1350	2.07	3.51	87.7	1.18					
2625	1.91	4.99	63.54	1.9	1325	2.03	4.87	56.38	1.56					
					1300	2.29	3.43	78.17	1.17					
					1275	1.99	5.04	55.76	1.6					
					1250	1.48	5.67	49.88	1.67					
					1225	1.81	2.19	95.45	0.62					
					1200	1.27	3.08	103.3	1.1					
					1175	2.11	5.76	38.98	1.4					
					1150	2.81	4.02	44.64	0.99					

## HEC-RAS. Tr= 50 años.

TRAMO 1				TRAMO 2				TRAMO 3			
River Sta	Max Chl Dpth (m)	Vel Total (m/s)	Fr.	River Sta	Max Chl Dpth (m)	Vel Total (m/s)	Fr.	River Sta	Max Chl Dpth (m)	Vel Total (m/s)	Fr.
3900	1.42	9.37	3.11	2600	2.3	3.96	1.21	1125	2.91	4.19	1.01
3875	1.54	9.38	2.8	2575	2.88	3.32	0.79	1100	3.12	4.02	0.96
3850	1.18	4.95	1.54	2550	2.32	2.29	0.62	1075	3.18	4.22	1.04
3825	1.23	3.33	1.04	2525	2.04	1.95	0.52	1050	2.61	4.43	1.19
3800	2.21	4.99	1.69	2500	1.17	3.23	1.11	1025	2.03	4.49	1.41
3775	1.94	6.37	2.15	2475	1.86	6.14	1.93	1000	2.09	3.96	1.23
3750	1.77	7.51	2.46	2450	1.71	7.04	2.52	975	1.77	4.9	1.69
3725	1.34	7.33	2.45	2425	2.04	5.1	1.79	950	1.98	4.15	1.36
3700	1.09	7.68	2.74	2400	2.64	4.42	1.15	925	1.89	4.82	1.7
3675	1.96	5.94	1.87	2375	3.15	2.92	0.7	900	1.95	4.55	1.67
3650	1.97	6.58	2.05	2350	1.66	3.72	1.18	875	1.62	1.64	0.47
3625	2.28	6.03	1.76	2325	2.23	3.48	1.09	850	1.28	1.96	0.62
3606.302	1.98	7.55	2.35	2300	1.64	7.58	2.49	826	2.19	2.73	0.91
3575	1.99	8.48	2.47	2275	1.73	7.06	2.27	800	1.42	4.48	1.8
3550	1	6.07	2.02	2250	1.91	6.56	2.07	775	1.91	2.93	1.05
3525	1.9	2.21	0.55	2225	1.88	7.18	2.27	750	2.04	3.8	1.42
3500	1.13	3.26	1.05	2200	2.02	7.38	2.21	725	2.51	3.1	1.05
3475	2.93	4.67	1.15	2175	1.42	7.32	2.14	700	2.55	3.85	1.18
3450	2.07	8.81	2.9	2150	2.34	2.26	0.5	675	2.79	3.56	1.01
3425	1.92	8.97	2.6	2125	2.25	1.9	0.46	652	1.71	3.74	1.24
3400	1	6.06	2.05	2100	2.17	1.53	0.39	625	2.38	4.28	1.04
3375	1.88	2.3	0.58	2075	2.01	1.59	0.42	600	2.15	4.26	1.07
3350	1.69	2.04	0.53	2050	1.81	1.72	0.47	575	2.03	4.08	1.07
3325	0.98	3.03	1.05	2025	1.01	3.04	1.11	550	1.9	4.06	1.14
3300	1.04	7.39	3.28	2000	2.38	4.76	1.48	525	2.4	4.97	1.3
3275	1.28	5.88	2	1975	2.39	4.15	1.7	500	2.61	4.15	1.03
3250	1.05	8.34	3.21	1950	1.95	4.66	1.7	475	2.2	4.07	1.19
3225	0.93	4.71	1.72	1925	3.42	2.2	0.59	450	1.94	2	0.52
3200	2.5	6.45	2.02	1900.5	Bridge			425	1.84	1.37	0.37
3175	2.17	8.49	2.65	1900	1.7	5.13	1.36	400	1.66	1.52	0.43
3150	4.76	1.7	0.46	1875	2.55	1.75	0.4	375	0.88	2.87	1.12
3125.5	Bridge			1850	2.49	1.5	0.35	350	0.95	3.16	1.2
3125	2.36	5.78	1.99	1825	2.4	1.49	0.35	325	0.51	7.66	3.86
3100	0.87	6.18	2.16	1800	2.3	1.47	0.36	300	2.33	7.06	2.08
3075	1.95	1.9	0.49	1775	2.17	1.59	0.39	275	1.46	9.17	2.87
3050	1.76	1.72	0.49	1750	2.03	1.66	0.42	250	2.08	2.23	0.53
3025	1.07	2.56	0.93	1725	1.83	1.8	0.48	225	1.95	1.97	0.5
3000	1.79	2.91	1.05	1700	1.04	3.08	1.1	200	1.76	1.89	0.52
2975	1.44	6.08	2.3	1675	2.07	6.92	1.35	175	1.45	1.99	0.62
2950	1.69	4.34	1.51	1650	2.84	3.69	1.03	150	2.25	2.78	0.94
2925	1.42	6.33	2.31	1625	2.01	4.92	1.64	125	1.47	7.47	2.97
2902.533	1.42	6.45	2.1	1600	2.18	4.89	1.48	100	1.69	5.55	1.85
2875	1.59	2.18	0.64	1575	2.3	2.41	0.59	75	1.81	8.71	2.52
2850	2.29	2.84	1	1550	2.25	1.76	0.43	50	1.12	6.69	2.09
2825	1.96	5.65	2.03	1525	2.18	1.49	0.37	25	1.6	3.69	1.01
2800	2.19	4.34	1.46	1500	2.1	1.31	0.33				
2775	1.74	6.21	2.24	1475	1.98	1.39	0.36				
2750	1.66	5.85	2.1	1450	1.82	1.54	0.42				
2725	1.22	3.28	1.12	1425	1.57	1.8	0.52				
2700	2.32	3.49	1.01	1400	1.86	2.98	1.09				
2675	1.54	7.97	2.76	1375	1.84	4.56	1.62				
2650	1.75	6.14	2.08	1350	2.09	3.54	1.18				
2625	1.93	5.02	1.9	1325	2.05	4.9	1.57				
				1300	2.31	3.45	1.17				
				1275	2.01	5.06	1.59				
				1250	1.5	5.7	1.67				
				1225	1.83	2.22	0.63				
				1200	1.29	3.1	1.1				
				1175	2.14	5.79	1.42				
				1150	2.84	4.05	0.99				

HEC-RAS. Tr= 100 años.

TRAMO 1				TRAMO 2				TRAMO 3			
River Sta	Max Chl Dpth (m)	Vel Total (m/s)	Fr.	River Sta	Max Chl Dpth (m)	Vel Total (m/s)	Fr.	River Sta	Max Chl Dpth (m)	Vel Total (m/s)	Fr.
3900	1.47	9.62	3.14	2600	2.38	4.07	1.22	1125	3.03	4.26	1.02
3875	1.6	9.61	2.82	2575	2.97	3.45	0.82	1100	3.2	4.19	1
3850	1.22	5.19	1.59	2550	2.41	2.38	0.63	1075	3.3	4.28	1.06
3825	1.29	3.42	1.04	2525	2.12	2.02	0.53	1050	2.68	4.57	1.21
3800	2.28	5.08	1.7	2500	1.23	3.32	1.11	1025	2.11	4.59	1.42
3775	2	6.49	2.15	2475	1.93	6.17	1.91	1000	2.16	4.11	1.25
3750	1.83	7.62	2.46	2450	1.77	7.13	2.53	975	1.85	4.99	1.68
3725	1.39	7.54	2.46	2425	2.1	5.25	1.8	950	2.04	4.3	1.39
3700	1.14	7.86	2.75	2400	2.74	4.53	1.16	925	1.97	4.91	1.69
3675	2.03	6.07	1.88	2375	3.25	3.03	0.72	900	1.99	4.72	1.7
3650	2.04	6.69	2.05	2350	1.75	3.81	1.17	875	1.69	1.7	0.48
3625	2.36	6.15	1.77	2325	2.28	3.6	1.11	850	1.35	2.02	0.63
3606.302	2.05	7.64	2.34	2300	1.71	7.55	2.43	826	2.23	2.82	0.93
3575	2.07	8.64	2.47	2275	1.78	7.24	2.3	800	1.47	4.54	1.79
3550	1.04	6.3	2.05	2250	1.97	6.7	2.08	775	1.98	2.95	1.04
3525	1.97	2.3	0.56	2225	1.95	7.32	2.27	750	2.06	4	1.49
3500	1.19	3.34	1.05	2200	2.08	7.54	2.22	725	2.57	3.15	1.05
3475	3.03	4.73	1.15	2175	1.48	7.52	2.16	700	2.6	3.96	1.22
3450	2.13	9	2.91	2150	2.42	2.35	0.51	675	2.87	3.59	1.02
3425	1.99	9.2	2.61	2125	2.34	1.97	0.47	652	1.84	3.51	1.15
3400	1.04	6.32	2.11	2100	2.25	1.59	0.39	625	2.46	4.41	1.06
3375	1.95	2.39	0.59	2075	2.1	1.65	0.43	600	2.23	4.37	1.09
3350	1.76	2.12	0.54	2050	1.89	1.78	0.48	575	2.1	4.21	1.09
3325	1.03	3.1	1.05	2025	1.06	3.13	1.11	550	1.97	4.18	1.15
3300	1.07	7.53	3.29	2000	2.45	4.86	1.49	525	2.47	5.1	1.32
3275	1.32	6.07	2.02	1975	2.45	4.26	0	500	2.64	4.42	1.09
3250	1.1	8.47	3.19	1950	2.02	4.74	1.7	475	2.26	4.24	1.22
3225	0.97	4.89	1.76	1925	3.57	2.2	0.58	450	2.02	2.07	0.53
3200	3.43	2.46	0.84	1900.5	Bridge			425	1.91	1.43	0.38
3175	2.13	9.48	2.99	1900	1.76	5.32	1.39	400	1.72	1.58	0.44
3150	4.86	1.77	0.47	1875	2.65	1.81	0.41	375	0.93	2.94	1.12
3125.5	Bridge			1850	2.59	1.56	0.36	350	0.99	3.26	1.21
3125	2.42	5.95	2.02	1825	2.49	1.55	0.36	325	0.55	7.75	3.78
3100	0.92	6.33	2.15	1800	2.39	1.53	0.36	300	2.39	7.24	2.1
3075	2.03	1.98	0.5	1775	2.26	1.66	0.4	275	1.53	9.31	2.85
3050	1.83	1.78	0.5	1750	2.11	1.73	0.43	250	2.15	2.32	0.54
3025	1.12	2.64	0.95	1725	1.91	1.87	0.49	225	2.02	2.05	0.51
3000	1.84	2.97	1.06	1700	1.1	3.15	1.1	200	1.82	1.97	0.53
2975	1.48	6.23	2.32	1675	2.14	7.07	1.77	175	1.51	2.07	0.63
2950	1.73	4.48	1.53	1650	2.93	3.75	1.04	150	2.31	2.84	0.95
2925	1.47	6.42	2.3	1625	2.05	5.1	1.68	125	1.52	7.6	2.98
2902.533	1.48	6.57	2.1	1600	2.26	4.97	1.48	100	1.74	5.75	1.88
2875	1.65	2.26	0.65	1575	2.38	2.5	0.61	75	1.89	8.8	2.51
2850	2.34	2.92	1.02	1550	2.34	1.83	0.43	50	1.17	6.9	2.11
2825	2.03	5.68	2	1525	2.26	1.55	0.38	25	1.68	3.78	1.01
2800	2.24	4.51	1.5	1500	2.18	1.36	0.34				
2775	1.8	6.28	2.21	1475	2.06	1.44	0.37				
2750	1.71	6.06	2.15	1450	1.89	1.6	0.43				
2725	1.28	3.38	1.13	1425	1.64	1.87	0.53				
2700	2.39	3.51	1.02	1400	1.91	3.08	1.1				
2675	1.6	7.99	2.7	1375	1.89	4.66	1.63				
2650	1.8	6.27	2.11	1350	2.14	3.65	1.2				
2625	1.99	5.13	1.9	1325	2.13	4.98	1.57				
				1300	2.38	3.52	1.17				
				1275	2.09	5.14	1.59				
				1250	1.58	5.79	1.66				
				1225	1.9	2.3	0.64				
				1200	1.35	3.18	1.1				
				1175	2.24	5.87	1.47				
				1150	2.92	4.2	1.03				