

Informe Final:
**Estudio de zonas de amenazas por inundación
usando sensores remotos, análisis hidrológico
e hidráulico para mejorar la cuantificación y
gestión del riesgo en la Cuenca del Río Zapote**

Proyecto N°340-B7-522, Universidad de Costa Rica



Preparado para: Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias

Elaborado por: Alejandra María Rojas González, Ph.D. Escuela de Ingeniería de Biosistemas, Universidad de Costa Rica.

San José, 03 de marzo, 2020

TABLA DE CONTENIDO

1	Resumen Ejecutivo.....	1
2	Introducción	2
2.1	Propósito del estudio.....	2
2.2	Alcance del trabajo	2
3	Descripción del área de estudio.....	3
3.1	Antecedentes en la cuenca y datos históricos	3
3.2	Clasificación de cuencas según vulnerabilidad e información hidrometeorológica.....	4
3.3	Localización.....	6
3.4	Características Climáticas.....	8
3.4.1	Precipitación	9
3.4.2	Temperatura.....	9
3.4.3	Radiación solar	11
3.4.4	Velocidad viento.....	12
3.4.5	Evapotranspiración	12
3.5	Características morfológicas de las subcuencas y red de drenaje.....	14
3.5.1	Delimitación del área de estudio	14
3.5.2	Red Hidrográfica	14
3.5.3	Parámetros de forma de las subcuencas	18
3.5.4	Parámetros de relieve de las subcuencas	21
4	Análisis Hidrológico	25
4.1	Cobertura del terreno de cuenca Zapote	28
4.2	Tipo de Suelos	33
4.3	Numero de curva.....	36
4.4	Tiempo de concentración.....	39
4.5	Datos de Precipitación y tormenta de diseño.....	41
4.5.1	Caracterización del Huracán Otto.....	42
4.5.2	Hidroestimador	43
4.6	Resultados de Simulación Hidrológica.....	44



5	Modelación Hidráulica.....	45
5.1	Zona de estudio hidráulico.....	45
5.2	Visitas de Campo.....	47
5.3	Geometría del río y de las planicies para la modelación	53
5.3.1	Estructuras hidráulicas.....	56
5.4	Coefficientes de rugosidad.....	61
5.5	Condiciones de borde y régimen de flujo	64
5.6	Escenarios hidráulicos	68
5.6.1	Análisis hidráulico para condiciones de Otto y agua limpia	68
5.6.2	Análisis hidráulico para condiciones de Otto y flujo de lodos.....	74
5.6.3	Análisis hidráulico de las condiciones existentes para 100 años de periodo de retorno 77	
5.6.4	Análisis hidráulico de las condiciones existentes para 50 años de periodo de retorno 79	
5.6.5	Análisis hidráulico de las condiciones existentes para 25 años de periodo de retorno 81	
5.6.6	Resumen de Análisis Hidráulicos.....	85
6	Conclusiones	88
7	Referencias	7-89
8	Equipo de trabajo	8-90
9	Apéndices	9-1

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 3-1. Índice de vulnerabilidad integrado por cuenca.</i>	5
<i>Figura 3-2. Índice para eventos extremos lluviosos.</i>	5
<i>Figura 3-3. Clasificación por información disponible general por cuenca Hidrográfica.</i>	6
<i>Figura 3-4 Mapa de localización de la Cuenca del Río Zapote.</i>	8
<i>Figura 3-5 Precipitación promedio mensual para la Cuenca del Río Zapote.</i>	9
<i>Figura 3-6. Temperatura promedio mensual para la Cuenca del Río Zapote.</i>	10
<i>Figura 3-7. Temperatura máxima promedio mensual para la Cuenca del Río Zapote.</i>	11
<i>Figura 3-8 Temperatura mínima promedio mensual para la Cuenca del Río Zapote.</i>	11
<i>Figura 3-9 Radiación solar para la Cuenca del Río Zapote.</i>	12
<i>Figura 3-10 Velocidad del viento Cuenca del Río Zapote.</i>	12
<i>Figura 3-11 Evapotranspiración potencial mensual promedio para la Cuenca del Río Zapote.</i>	13
<i>Figura 3-12. Subcuencas de la cuenca del Río Zapote y Chimurria</i>	15
<i>Figura 3-13. Factor de forma de las subcuencas del Río Zapote.</i>	19
<i>Figura 3-14 Curvas hipsométricas de la Cuenca Baja del Río Zapote.</i>	22
<i>Figura 3-15 Curvas hipsométricas de la Cuenca Media del Río Zapote.</i>	23
<i>Figura 3-16 Curvas hipsométricas de la Cuenca Alta del Río Zapote.</i>	23
<i>Figura 4-1. Configuración del modelo hidrológico en HEC-HMS.</i>	27
<i>Figura 4-2. Composición de Bandas en imagen satelital del WorldView 3</i>	28
<i>Figura 4-3 Porcentaje de cobertura de subcuencas de la cuenca del Río Zapote.</i>	32
<i>Figura 4-4. Usos de suelo Cuenca del Río Zapote.</i>	32
<i>Figura 4-5. Puntos de muestreo de suelo en la cuenca del Río Zapote.</i>	36
<i>Figura 4-6. Precipitación acumulada del Hidroestimador para los puntos característicos de la zona de estudio.</i>	43
<i>Figura 4-7 Gráfico del hidrograma de salida de la cuenca para el huracán Otto con 5 minutos de intervalo.</i>	44
<i>Figura 4-8 Hidrograma del caudal de salida del período de retorno de 100 años.</i>	45
<i>Figura 5-1. Mapa de ubicación de las modelaciones hidráulicas en la cuenca del Río Zapote.</i>	46
<i>Figura 5-2. Fotos de la zona de Bijagua para la visita del 20 al 22 de Febrero del 2019.</i>	47
<i>Figura 5-3 Fotos de la zona de Upala para la visita del 20 al 22 de Febrero del 2019</i>	48
<i>Figura 5-4 Fotos de la zona de Bijagua para la visita del 5 al 6 de Marzo del 2019</i>	49
<i>Figura 5-5. Mapa de nivel de agua registrado por la población de Upala para el huracán Otto.</i>	50
<i>Figura 5-6. Mapa de inundación registrada por la población de Bijagua para el huracán Otto.</i>	51

<i>Figura 5-7 Mapa de inundación registrada por la población de Bijagua para el huracán Otto.</i>	52
<i>Figura 5-8. Modelo de elevación digital en el área del estudio bidimensional para Bijagua.</i>	53
<i>Figura 5-9. Componentes que conforman la modelación bidimensional en el programa Flo2D para Bijagua.</i>	54
<i>Figura 5-10. Mallado del modelo bidimensional para la Bijagua.</i>	55
<i>Figura 5-11. Perfil del DISTO 2910 y perfil del río de las curvas de nivel.</i>	55
<i>Figura 5-12 Vista aguas arriba y aguas debajo de la alcantarilla ubicada en Bijagua.</i>	56
<i>Figura 5-13 Curva de descarga de la alcantarilla en la calle principal de Bijagua.</i>	57
<i>Figura 5-14 Perfil del puente ubicado en Bijagua aguas arriba del pueblo.</i>	57
<i>Figura 5-15 Perfil del puente ubicado en Bijagua a un costado alejado del pueblo.</i>	58
<i>Figura 5-16 Perfil del puente ubicado en Bijagua más cercano del pueblo.</i>	58
<i>Figura 5-17 Perfil del puente ubicado en Canalete.</i>	59
<i>Figura 5-18 Perfil del río donde se ubica el puente del río Zapote en Upala.</i>	59
<i>Figura 5-19 Puente de Upala aguas arriba y aguas abajo.</i>	60
<i>Figura 5-20 Curva de descarga para el puente del Río Zapote en Upala.</i>	60
<i>Figura 5-21 Puente del río Chimurria aguas arriba y aguas abajo.</i>	61
<i>Figura 5-22. Mapa de uso de suelos afinado para la zona de Bijagua.</i>	62
<i>Figura 5-23. Mapa de uso de suelos afinado para la zona de Canalete.</i>	63
<i>Figura 5-24 Mapa de uso de suelos afinado para la zona de Upala.</i>	64
<i>Figura 5-25 Ubicación de las entradas y salidas de agua en la zona de Bijagua.</i>	65
<i>Figura 5-26 Ubicación de las entradas y salidas de agua en la zona de Canalete.</i>	66
<i>Figura 5-27 Condiciones de borde de la subcuenca de Upala.</i>	67
<i>Figura 5-28. Profundidad de agua a la derecha y velocidad de agua a la izquierda para Bijagua con agua limpia y CN II.</i>	68
<i>Figura 5-29 Perfil del canal para la modelación de agua limpia y CN II.</i>	69
<i>Figura 5-30 Hidrograma de una sección del canal para la modelación de agua limpia y CN II.</i>	70
<i>Figura 5-31 Hidrograma para una sección de la llanura de inundación para la modelación de agua.</i>	70
<i>Figura 5-32 Profundidad de agua a la derecha y velocidad de agua a la izquierda para Bijagua con agua limpia y CN III.</i>	71
<i>Figura 5-33 Profundidad de agua a la derecha y velocidad de agua a la izquierda para Canalete con agua limpia y CN II.</i>	72
<i>Figura 5-34 Profundidad de agua a la derecha y velocidad de agua a la izquierda para Canalete con agua limpia y CN III.</i>	73

<i>Figura 5-35 Profundidad de agua a la derecha y velocidad de agua a la izquierda para Upala con agua limpia y CN II.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 5-36 Perfil del canal para la modelación de agua limpia y CN II.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 5-37 Profundidad de agua a la derecha y velocidad de agua a la izquierda para Bijagua con agua limpia CN II y CV: 0.45.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 5-38 Profundidad de agua a la derecha y velocidad de agua a la izquierda para Canalete con agua limpia CN II y CV: 0.45.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 5-39 Profundidad de agua a la derecha y velocidad de agua a la izquierda para Bijagua periodo de retorno de 100 años y CN II.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 5-40 Profundidad de agua a la derecha y velocidad de agua a la izquierda para Canalete periodo de retorno de 100 años y CN II.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 5-41 Profundidad de agua a la derecha y velocidad de agua a la izquierda para Bijagua periodo de retorno de 50 años y CN II.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 5-42 Profundidad de agua a la derecha y velocidad de agua a la izquierda para Canalete periodo de retorno de 50 años y CN II.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 5-43 Profundidad de agua a la derecha y velocidad de agua a la izquierda para Upala periodo de retorno de 50 años y CN II.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 5-44 Profundidad de agua a la derecha y velocidad de agua a la izquierda para Bijagua periodo de retorno de 25 años y CN II.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 5-45 Profundidad de agua a la derecha y velocidad de agua a la izquierda para Canalete periodo de retorno de 25 años y CN II.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 5-46. Ubicación de perfiles de nivel de agua de la inundación para un periodo de retorno de 100 años para la zona de Bijagua.....</i>	<i>84</i>

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 3-1. Información consultada que contempla el distrito de Upala, Bijagua y Canalete.....</i>	<i>3</i>
<i>Tabla 3-2 Parámetros de longitud y pendiente promedio para cauces principales</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 3-3 Densidad de drenaje para las subcuencas de la Cuenca del Río Zapote.....</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 3-4. Valores de interpretación de índice de forma.</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 3-5 Índice de compacidad para las subcuencas del Río Zapote.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 3-6. Características de las subcuencas del Río Zapote.</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 3-7. Índice de pendiente para los cauces de las subcuencas del Río Zapote.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 4-1. Distribución del junction del modelo hidrológico de Zapote</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 4-2 Distribución de los Reach del modelo hidrológico de Zapote.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 4-3. Valores de precisión global y kappa de la clasificación supervisada.</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 4-4. Uso de suelo de las subcuencas del Río Zapote</i>	<i>31</i>

Tabla 4-5. Puntos de muestreo de suelo en área de influencia de la cuenca del Río Zapote.	34
Tabla 4-6. Conductividad Hidráulica de suelos muestreados en la cuenca del Río Zapote.....	35
Tabla 4-7. Número de curva para las subcuencas del Río Zapote	38
Tabla 4-8. Tiempo de concentración en la cuenca del Río Zapote.	40
Tabla 4-9. Intensidades máximas de precipitación para tormenta de diseño.....	42
Tabla 4-10 Caudales y volúmenes máximos de los escenarios establecidos	44
Tabla 5-1 Caracterización del modelo bidimensional en Flo2D.....	53
Tabla 5-2. Valores de N de Manning para las diferentes coberturas de suelo.....	61
Tabla 5-3 Caracterización de los perfiles de nivel de agua de inundación para un periodo de retorno de 100 años para la zona de Bijagua.	85
Tabla 5-4 Área de afectación por escenario estudiado para la zona de Bijagua.....	85
Tabla 5-5 Área de afectación por índice de amenaza para la zona de Bijagua	86
Tabla 5-6 Estadísticas de los modelos para profundidad de inundación en la zona de Bijagua.	86
Tabla 5-7 Estadísticas de los modelos para velocidad de inundación en la zona de Bijagua.....	87

LISTA DE APÉNDICES

Apéndice A: Anotaciones de campo del GPS.....	9.1
Apéndice B: Información adicional de la malla.	9.20
Apéndice C: Descripción visual de los puentes de la zona.	9.22
Apéndice D: Modelaciones hidráulicas adicionales.....	9.26
Apéndice E: Verificación de resultados de Flo2D para cada modelación bidimensional.9.31	¡Error! Marcador no definido.
Apéndice F: Matrices de confusión para cada imagen.....	9.42
Apéndice G. Secciones de cotas de inundación	9.47
Apéndice H. Resumen de Análisis Hidráulicos.....	9.63
Apéndice I. Mapas de profundidad, velocidad y peligrosidad de Upala para distintos escenarios.....	9.67
Apéndice J. Mapas de profundidad, velocidad y peligrosidad de Bijagua para distintos escenarios.....	9.89
Apéndice K. Mapas de profundidad, velocidad y peligrosidad de Canalete para distintos escenarios.....	9.114

1 Resumen Ejecutivo

Este proyecto se está realizando bajo la coordinación de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas, la cuál es la encargada de gestionar y desarrollar el Proyecto 340-B7-522: Estudio de zonas de amenazas por inundación usando sensores remotos, análisis hidrológico e hidráulico para mejorar la cuantificación y gestión del riesgo. Este estudio proveerá a la Comisión Nacional de Emergencias de una actualización de los mapas de inundación oficiales del país.

Este informe presenta el trabajo desarrollado que cubre desde la elaboración de los mapas de inundación del río Zapote, desde su parte alta con el Río Bijagua, la cuenca media en Canalete hasta la cuenca baja con el modelado de Upala.

Para representar hidrológicamente las subcuencas se calcularon las características fisiográficas, se elaboraron mapas de relieve, suelos, uso de suelo e hidrografía. Se calcularon los parámetros hidrológicos de las cuencas y se elaboró un análisis hidrológico. Adicionalmente se realizó una modelación hidráulica bidimensional con el software Flo2D incluyendo el evento del Huracán Otto y los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años con flujo Newtoniano (agua limpia) y modelaciones de flujo no Newtoniano o flujo de lodos y detritos con concentraciones de volumen de sedimentos que varían de 0.45 a 0.5 para la parte alta, media y baja (modelo de Upala).

2 Introducción

2.1 Propósito del estudio

El propósito de este estudio es evaluar las condiciones hidrológicas e hidráulicas del lugar para desarrollar mapas de inundación para diferentes periodos de retorno con modelación bidimensional de los ríos Zapote, Canalete y Bijagua, ubicados en el cantón de Upala. Esto como apoyo a la actualización de los mapas de inundación de la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE) en respuesta a los últimos eventos extremos y a la necesidad de mejorar las condiciones de la evaluación del riesgo.

2.2 Alcance del trabajo

Este trabajo tiene como alcance la actualización de los mapas de inundación oficiales de la CNE con la incorporación de cartografía actualizada, modelación hidrológica e hidráulica bidimensional de eventos climáticos en las zonas de estudio. Estos mapas son necesarios para gestionar de manera adecuada, preventiva y sobre todo predictiva la gestión del riesgo ante posibles escenarios a presentarse en una zona de alta vulnerabilidad que ha sido devastada con anterioridad por eventos extremos, como es el caso de los más recientes huracanes Otto en el año 2016 y Nate en el 2017.

3 Descripción del área de estudio

3.1 Antecedentes en la cuenca y datos históricos

Se elaboró una búsqueda bibliográfica de diversas fuentes de información que abarcó estudios hidrológicos e hidráulicos previos de la zona de estudio. Se encontró que, para la zona del río Zapote, hay una ausencia de información y estudios previos detallados. La información disponible contempla en su totalidad la cuenca hidrográfica del río Zapote y lo relacionado con el cantón de Upala de forma general.

Las fuentes bibliográficas que se encontraron y que incluyen el área de interés corresponden a:

Tabla 3-1. Información consultada que contempla el distrito de Upala, Bijagua y Canalete.

Año	Autores	Nombre del Estudio	Breve descripción
2009	Ministerio de Hacienda	Mapa de valores de terrenos por zonas homogéneas Cantón de Upala	El documento es un mapa de valores de terreno de infraestructura del cantón Upala.
2010	Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias	Mapa de Amenazas Naturales Potenciales Cantón de Upala	El mapa general que presenta las potenciales zonas de amenaza en relación con inundaciones, deslizamientos y flujos de lodo en el cantón de Upala.
2010	Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias	Amenazas de Origen Natural Cantón de Upala	El documento presenta una descripción de las zonas afectadas por amenazas de origen natural (hidrometeorológicas y geológicas) correspondientes al cantón de Upala.
2011	Nazareth Rojas	Cuenca Río Zapote	El estudio presenta la caracterización de las cuencas hidrográficas del país en términos de geografía, geología estructural, susceptibilidad a inundaciones, climatología, demanda hídrica de la cuenca y su influencia en aspectos socioeconómicos de los habitantes del lugar.
2013	Roberto Villalobos Estafanía Jiménez Karina Hernández Johan Córdoba Paula Solano	Descripción del clima Cantón de Upala	Este estudio presenta la descripción climática del cantón de Upala en términos de temperatura, precipitación, heliofanía, radiación solar, humedad relativa, viento y balance hídrico del suelo.

3.2 Clasificación de cuencas según vulnerabilidad e información hidrometeorológica.

Con el objetivo de conocer las cuencas con mayor riesgo y que se encuentran más desatendidas a nivel de información básica para realizar los estudios hidrológicos a nivel de cuenca, se integró el índice de vulnerabilidad y riesgo climático por cantón con la información hidrometeorológica ubicada en cada cuenca.

Se trabajó con el informe: Adaptación del recurso hídrico al cambio climático en Costa Rica del 2012, elaborado por el Instituto meteorológico (IMN), el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). Este documento cuenta con información de índice de vulnerabilidad integrado, riesgo climático ante eventos extremos lluviosos y secos por cantón. La vulnerabilidad se define a partir de 14 indicadores sociales y económicos, agrupados en tres componentes: infraestructura, servicios y condición humana (IMN, 2012).

Esta información se encuentra a nivel de cantón por lo que se trabajó para llevar los datos a nivel de cuenca hidrográfica. Los datos se digitalizaron en la capa de cantones del Atlas de Costa Rica, 2014 y se realizó un promedio ponderado, donde se tomó en consideración el peso de las áreas de los cantones, asociados a las cuencas hidrográficas.

En el caso del índice de vulnerabilidad integrado por cuenca (ver Figura 3-1), el área de estudio se encuentra en una de las zonas más vulnerables del país, ya que está catalogada como un nivel cinco, por lo que presenta problemas económicos, sociales y de infraestructura. Esto puede ocasionar una deficiente toma de decisiones durante una emergencia por desastre natural.

En el caso del índice para eventos extremos lluviosos (ver Figura 3-2) se repite la problemática anterior, ya que la zona de estudio está catalogada como una de las más vulnerables a eventos lluviosos. Nuevamente, el desarrollo de este proyecto en el área, beneficiará a las comunidades localizadas en las zonas propensas a problemas de inundación, evitando la pérdida de vidas humanas.

La cantidad de información disponible por cuenca se clasificó de acuerdo con los datos encontrados (cantidad de estaciones meteorológicas e hidrológicas). Considerando como un 100% las cuencas que cuentan con toda la información recopilada (ver Figura 3-3). En el caso de la zona de estudio se encuentra en una región catalogada como tipo B, por lo que hay información disponible, pero con la problemática de ser datos muy generales o con pocas estaciones, los cuales apenas permiten tener un conocimiento general de la cuenca hidrográfica.

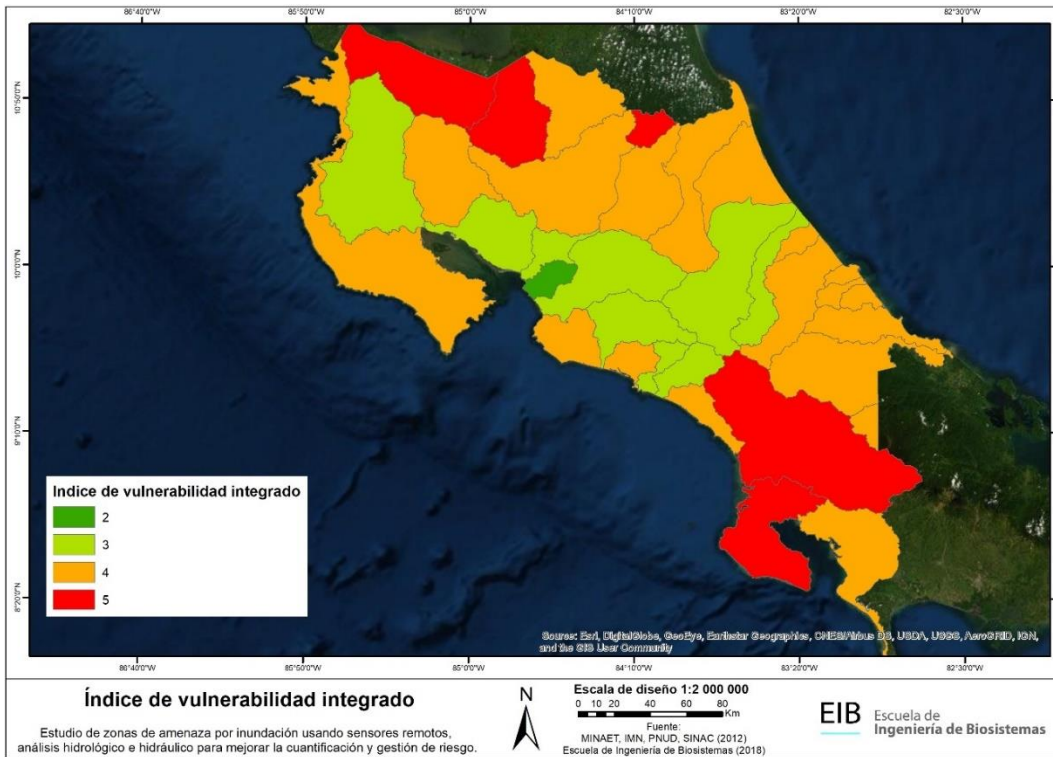


Figura 3-1. Índice de vulnerabilidad integrado por cuenca.

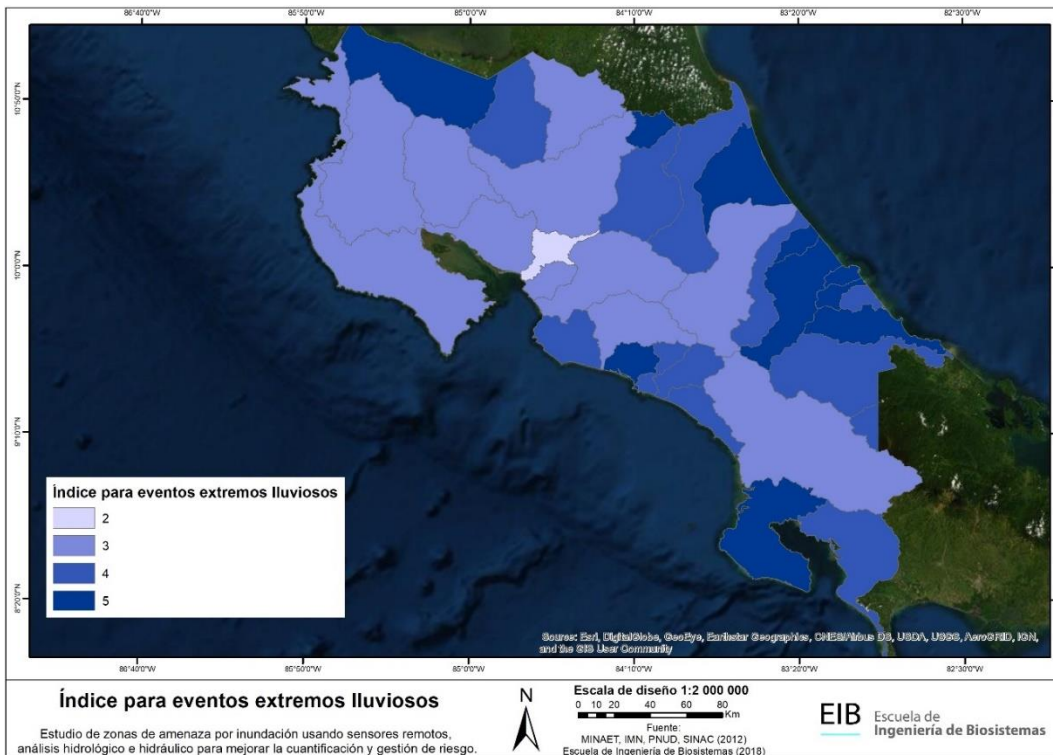


Figura 3-2. Índice para eventos extremos lluviosos.

Para el desarrollo del estudio es importante mencionar que se debería de contar con información más detallada a nivel meteorológico, ya que la actual no permite conocer las características particulares de cada subcuenca. En este caso esta figura solo nos permite tener una noción global sobre el estado de la información de las cuencas hidrográficas del país, con el detalle que son extensiones de terreno muy amplias y poco funcionales.

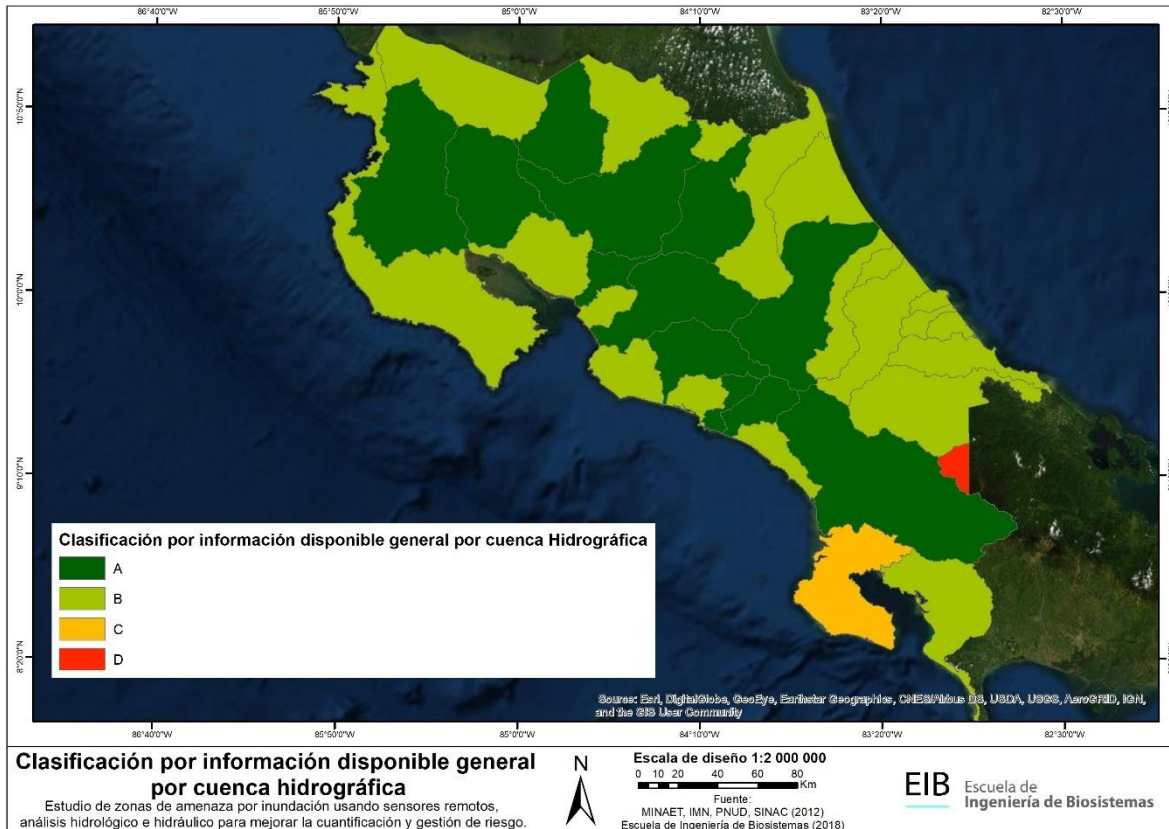


Figura 3-3. Clasificación por información disponible general por cuenca Hidrográfica.

3.3 Localización

La zona de estudio se encuentra en la región Huetar Norte y la Subvertiente Norte de Costa Rica, corresponde al área de influencia de los ríos Zapote, Canalete y Bijagua, ubicada en la cuenca hidrográfica de Zapote, perteneciente al cantón de Upala que posee un área de 1582,24 Km², específicamente se ubican los distritos de Upala, Bijagua y Canalete (Ver Figura 3-4)

El distrito de Upala posee una extensión de 147.4 Km², es caracterizado por ser la cabecera del cantón, poseer el mayor centro urbano y por ende la mayor población. Este distrito limita al norte con los distritos de Yolillal y Delicias, al sur con el distrito Bijagua al oeste con el distrito de Canalete y al este con los cantones de Guatuso y Los Chiles.

En tanto el distrito de Bijagua poseen una extensión de 180 Km², limitando al norte con los distritos de Upala y Canalete, al sur con los cantones de Cañas y Bagaces de la provincia de Guanacaste, al oeste con el distrito de Aguas Claras y al este con el cantón de Guatuso de la provincia de Alajuela. El distrito de Canalete, con una extensión de 106.5 Km², limita al noreste con el distrito de Upala, al sur con el distrito de Bijagua y al oeste con los distritos de San José y Aguas Claras.

Según datos del INEC para el año 2000 la población del cantón de Upala era de 37679 habitantes de los cuales 12372 pertenecen al distrito de Upala lo que representa alrededor del 33% de la población del cantón, en tanto la población de Bijagua era de 4642 habitantes y 6777 habitantes en Canalete lo que representa un 12% y 18% respectivamente.

La zona de estudio se caracteriza por presentar una topografía variable, desde las zonas altas las cuales se encuentran en las faldas del volcán Miravalles, hasta aquellas áreas llanas en las cuales la mayoría de los asentamientos se encuentran ubicados, tal es el caso del poblado de Aguas Claras y San Isidro. Estos poblados, al estar en una zona de baja altitud, durante eventos extremos son propensos a inundaciones. Uno de los más recientes corresponde al huracán Otto, en el 2016, el cual ha sido uno de los eventos de mayor impacto, dejando pérdidas considerables tanto económicas como humanas. Además, debido a este evento, los cauces de los ríos se han visto modificados en su geomorfología.

De acuerdo con el mapa de amenazas naturales potenciales del cantón de Upala elaborado por la CNE, la zona de estudio que contempla los distritos de Upala, Bijagua y Canalete se encuentra dentro del área con amenaza potencial de inundación. Las áreas que presentan manchas de inundación corresponden a las zonas bajas del territorio, contemplando así parte de los ríos Zapote, Canalete y Bijagua.

Para conocer las condiciones en las que se encuentra la zona de estudio, se realizó una gira de reconocimiento (abril del 2018). Se observó que el terreno de las zonas bajas del distrito de Upala corresponde en su mayoría a pastizales y zonas de producción agrícola de subsistencia y ganadería.

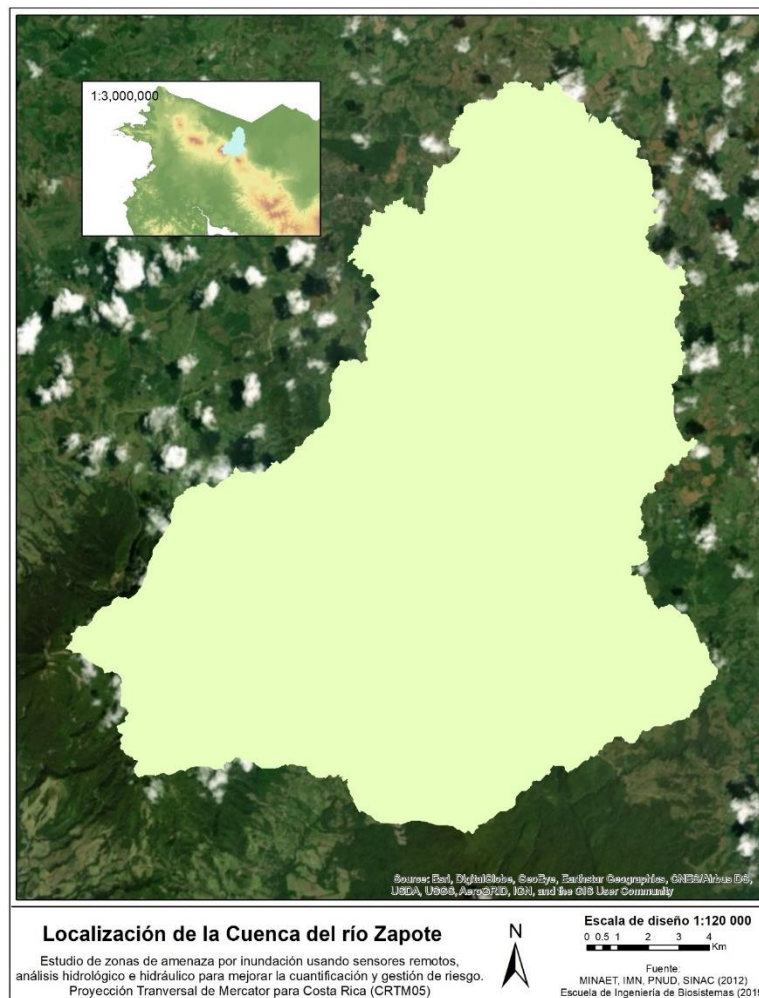


Figura 3-4 Mapa de localización de la Cuenca del Río Zapote.

3.4 Características Climáticas

La cuenca del Río Zapote ubicada en la región Huetar Norte del país, presenta una influencia importante de la vertiente del Caribe, pero presenta un período relativamente seco durante el año en los meses de febrero, marzo y abril.

En esta cuenca el rasgo típico climático es el régimen de precipitación del Caribe, el cual para Costa Rica se caracteriza por presentar una estación lluviosa a lo largo de casi todo el año, con disminución y lapsos cortos sin precipitación en los meses de febrero, marzo y abril al menos para esta cuenca (Rojas, s.f.).

Para la Cuenca del Río Zapote se cuentan con estaciones meteorológicas de ICE con influencia directa, ubicadas propiamente en los poblados de Bijagua (ICE-69576) y Canalete (ICE-69574) y la estación perteneciente al Instituto Meteorológico (IMN-679)

ubicada en Upala. Para la determinación de las condiciones climáticas en la zona de estudio se utilizaron datos del WorldClim con datos temporales promedio del periodo 1970 al 2000.

3.4.1 Precipitación

Se obtuvieron datos temporales (1970-2000) de precipitación del WordClim para la determinación de la precipitación promedio mensual en la cuenca del Río Zapote, la cual se presenta en la Figura 3-5.

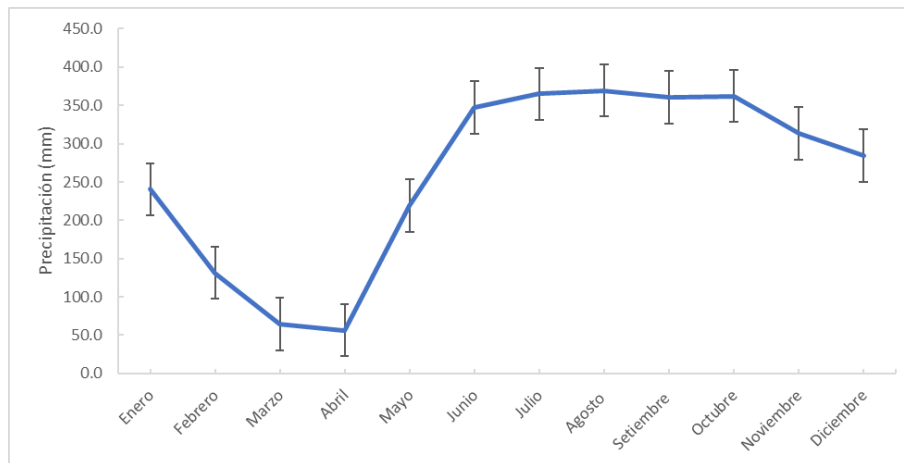


Figura 3-5 Precipitación promedio mensual para la Cuenca del Río Zapote.

Se observan dos épocas bien definidas, la época seca en los meses de febrero, marzo y abril, con una precipitación promedio mensual de aproximadamente 50 mm, mientras que la época lluviosa inicia entre los meses de mayo y junio, extendiéndose hasta el mes de diciembre, presentado una precipitación entre 350 a 400 mm mensuales aproximadamente. Los meses de enero y mayo son la transición entre las épocas seca y lluviosa.

Por la distribución de la precipitación se concluye que la época más lluviosa del año corresponde con los meses de junio a octubre, período que en promedio se acumula un 64% del total anual de precipitación. Entre los meses de febrero, marzo y abril (la estación relativamente seca) la precipitación promedio acumulada representa tan sólo un 6,7% del total anual (Villalobos, Jiménez, Hernández, Córdoba, & Solano, 2013).

3.4.2 Temperatura

La determinación de temperatura promedio, temperatura máxima y temperatura mínima se alcanzó a partir de datos de temperatura para la zona de estudio, obtenidos de WorldClim para el periodo de 1970-2000.

A continuación, en la Figura 3-6 se presenta el comportamiento de temperatura promedio mensual en la Cuenca del Río Zapote.

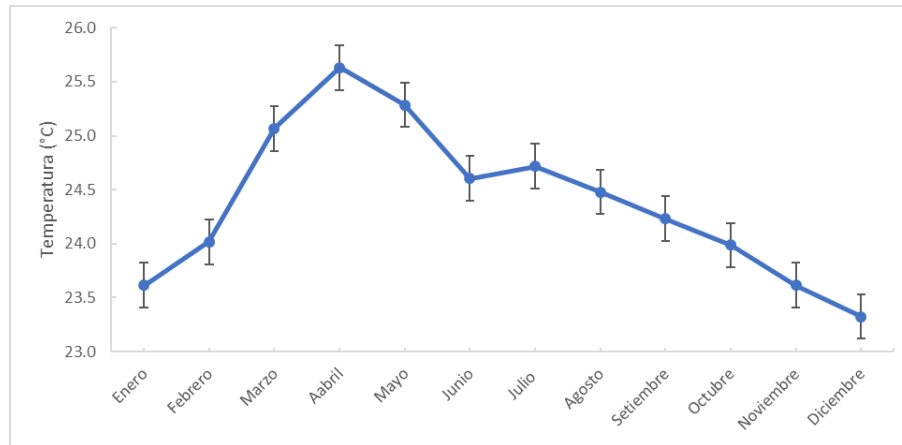


Figura 3-6. Temperatura promedio mensual para la Cuenca del Río Zapote.

Se observa una variación de aproximadamente 2.2°C entre el mes con la temperatura promedio reportada más baja y la temperatura promedio más alta, las cuales son 23.3°C para el mes de diciembre y 25.5°C para el mes de abril respectivamente. Además, se observa una tendencia de incremento de la temperatura desde el mes de enero hasta alcanzar el pico de temperatura mensual promedio de 25.5°C en el mes abril, donde a partir de este mes se da una disminución casi constante de la temperatura hasta alcanzar la menor temperatura el mes de diciembre con 23.3°C .

La temperatura media anual en la parte alta se da entre los 22 a 24°C , en la parte media y baja es de 24 a 26°C , sí ocurre una apreciable oscilación aproximada de (12°C) en cualquier mes entre la temperatura máxima y la mínima del día (Rojas, s.f.).

Paralelamente se obtuvieron las temperaturas promedio mensual máxima y mínima, obtenido una similitud en el comportamiento con la de temperatura promedio mensual, pero con la diferencia evidente en las temperaturas. En la Figura 3-7 se presenta la temperatura máxima promedio mensual para la Cuenca del Río Zapote.

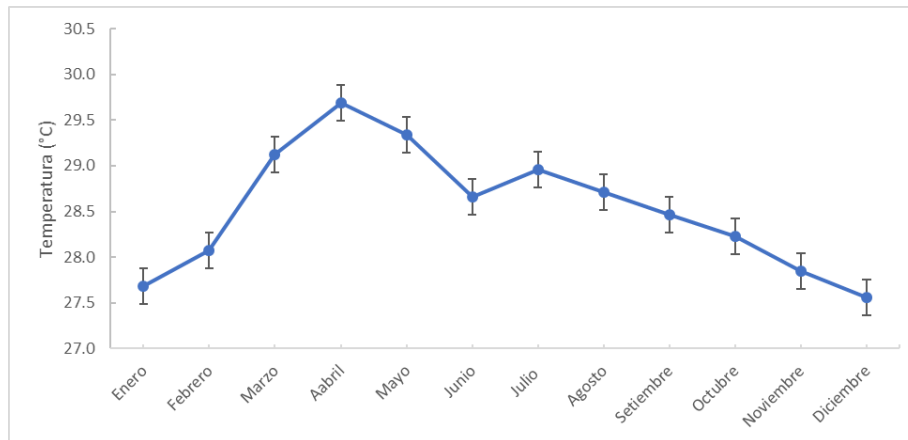


Figura 3-7. Temperatura máxima promedio mensual para la Cuenca del Río Zapote.

Se observa una variación de aproximadamente 2.1°C entre la temperatura máxima y mínima, presentando la temperatura mayor en el mes de abril con 27.7°C y la mínima en diciembre con 27.6°C . Conforme a la temperatura mínima promedio mensual para la Cuenca del Río Zapote, se presenta su comportamiento en la Figura 3-8.

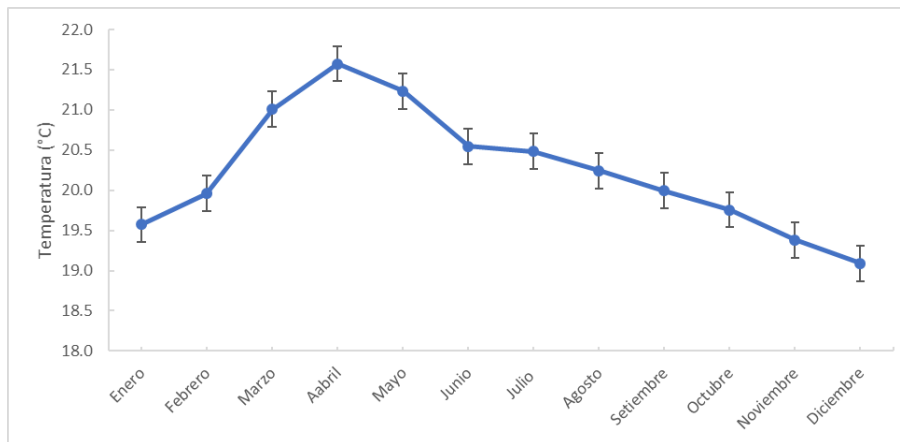


Figura 3-8 Temperatura mínima promedio mensual para la Cuenca del Río Zapote.

El comportamiento es similar a las anteriores, considerando que para la temperatura mínima promedio la variación entre la temperatura máxima y mínima es de aproximadamente 2.3°C , de igual manera se presenta una tendencia de aumento de temperatura desde enero hasta abril donde se alcanzó 21.6°C , a partir de este mes se tiene una disminución casi constante hasta alcanzar la menor temperatura en diciembre con 19.2°C .

3.4.3 Radiación solar

La radiación solar se presenta en la Figura 3-9, se muestra un comportamiento similar al de la temperatura, consecuente a la relación entre ambos parámetros. Se tiene un

incremento de la radiación desde el mes de enero hasta alcanzar el valor máximo en el mes de abril, los meses siguientes se da una disminución alcanzando el menor valor de radiación el mes de diciembre.

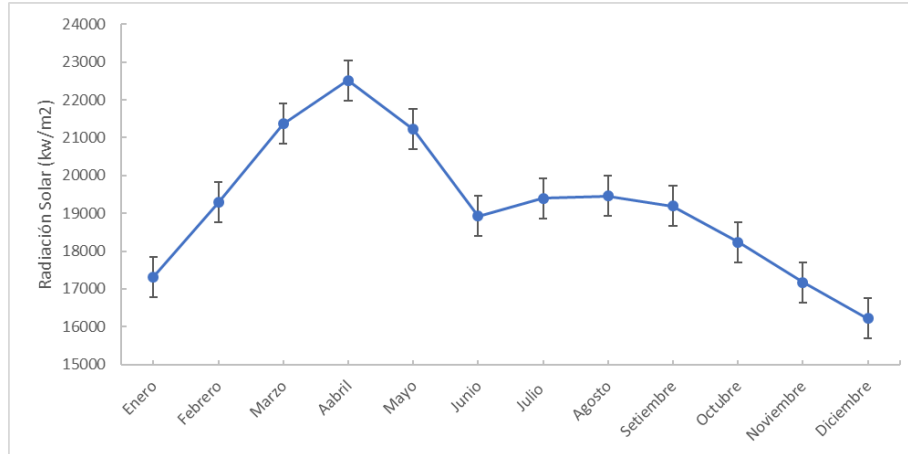


Figura 3-9 Radiación solar para la Cuenca del Río Zapote.

3.4.4 Velocidad viento

La velocidad del viento se presenta en la Figura 3-10, se presenta una variación de la velocidad del viento teniendo la mayor velocidad los primeros tres meses del año, los meses que presentan menor velocidad son septiembre y octubre.

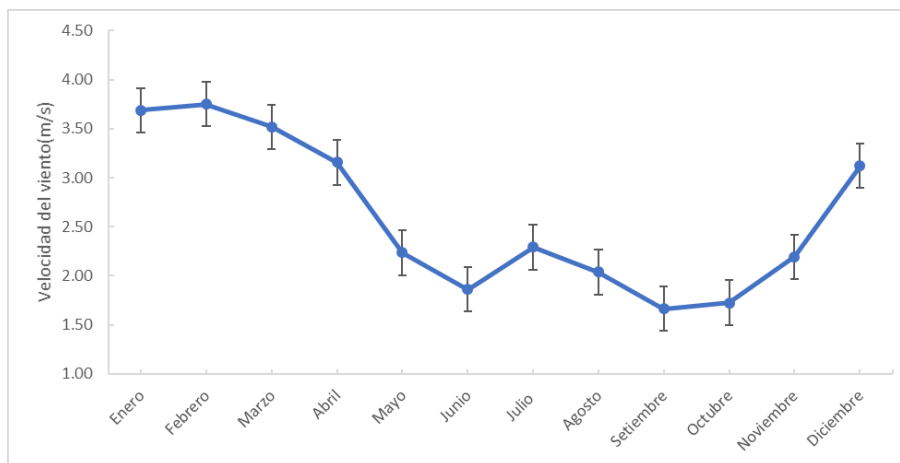


Figura 3-10 Velocidad del viento Cuenca del Río Zapote.

3.4.5 Evapotranspiración

La evapotranspiración es la pérdida de la humedad del suelo debido a la evaporación y la transpiración de la vegetación. El cálculo se elaboró aplicando la ecuación de Holdridge, mediante el concepto de biotemperatura.

$$EVT_{potencial} = 58.93 * t_b * \frac{(\# \text{ días mes})}{365} \quad (1)$$

Donde t_b es la biotemperatura la cual se calcula según los siguientes criterios.

Si la temperatura media del mes se encuentra entre 6°C y 24°C, la Biotemperatura Media es igual a la Temperatura media

Si la temperatura media es mayor a los 24°C, la biotemperatura se calcula de la siguiente manera, donde t_m es la temperatura media.

$$t_b = t_m - \left| \frac{3 * \text{Latitud} * (t_m - 24)^2}{100} \right| \quad (2)$$

Si la temperatura promedio mensual es menor a 6°C, la biotemperatura media mensual es igual a la siguiente ecuación.

$$t_b = \frac{t_{max}^2}{2 * (t_{max} - t_{min})} \quad (3)$$

Bajo las condiciones de temperatura para la Cuenca del Río Zapote se calculó la evapotranspiración potencial mensual promedio, la cual se presenta en la Figura 3-11.

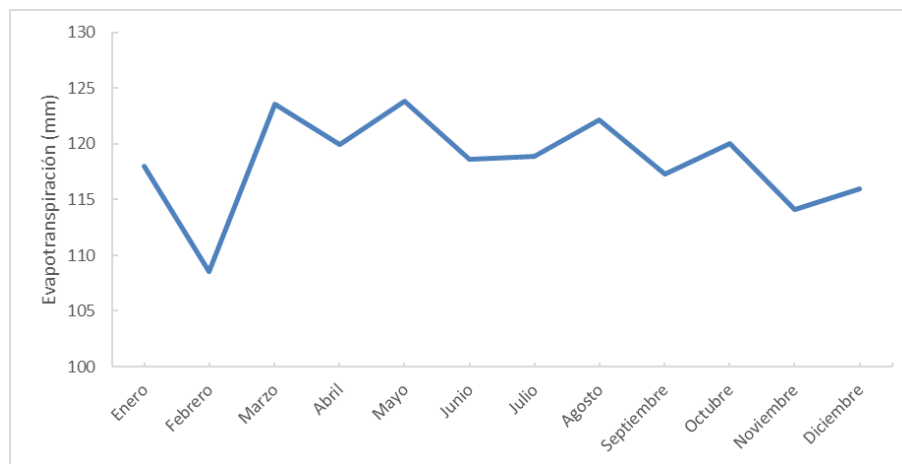


Figura 3-11 Evapotranspiración potencial mensual promedio para la Cuenca del Río Zapote.

3.5 Características morfométricas de las subcuencas y red de drenaje

3.5.1 Delimitación del área de estudio

Para la delimitación del área de estudio, se utilizó la información de modelos de elevación digital (DEM por sus siglas en inglés) a partir de orto-fotogrametría de imágenes satelitales del WorldView3, provistos por la Comisión Nacional de Emergencia (CNE) y levantadas en febrero del 2017. La información presenta una resolución espacial de 1 m por 1 m. Se realizó un mosaico con los bloques de la zona, el cual abarcó un área total de 732,573 Km². Este contempla las áreas de interés que corresponden a las zonas de afectación por inundación de los ríos Zapote, Canalete y Bijagua. Dentro de estas zonas se encuentran los poblados de Upala, Canalete y Bijagua.

Posteriormente a la generación del mosaico, se prosiguió a delimitar las cuencas y las subcuencas mediante el uso de la herramienta ArcHydro Tools y ArcGIS 8.3. Con la cual se determinó un total de 2 cuencas importantes con aporte a la población de Upala: Zapote y Chimurria, las cuales se subdividen en 29 subcuencas en total. Con respecto a la cuenca Chimurria, si bien es cierto no presenta poblados que se hayan visto afectados por el evento extremo Otto, el río Chimurria tiene una conexión con el río Zapote después del poblado de Upala, por lo cual es posible que este tenga una influencia en la afectación directa de Upala y por ello que se incluyó el aporte del río Chimurria.

3.5.2 Red Hidrográfica

El sistema fluvial del Cantón de Upala, corresponde a la subvertiente norte de la Vertiente del Caribe; el cual pertenece a las cuencas de los ríos Zapote y Frío. La primera es drenada por el Río Pizote al que se le unen los ríos Bochinche, Caño Blanco, Cucaracho y sus afluentes los ríos Blanco, Azul, Francia, Mariposa, Elba, Negro y Pénjamo; así como por el Río Caño Negro y sus tributarios Jalapiedra, Frijoles, Aguas Verdes, Negro y Raudales. Lo mismo que para el Río Zapote con sus afluentes los ríos Bijagua, Oro, Higuerón, Canalete, Salto, Chimurria y Achiote; al igual por ríos Las Haciendas, Guacalillos, Caño Negro, Rito, Cabeza de León y el Caño Aguas Negras. Estos cursos de agua nacen en la zona y presentan un rumbo de sur a norte y de suroeste a noreste, hasta desembocar en el Lago de Nicaragua (Comité Sectorial Regional Agropecuario., 2011).

La Cuenca del Río Zapote está conformada por siete ríos de importancia, a mencionar el Río Zapote con un cauce de 29.83 km de longitud, el Río Achiote con 14.31 km, Río Bijagua 11.48, Río Canalete con 13.10 km Chimurria con 34.61km, Río Higuerón con 10.40 km y Río Salto con 7.84 km. Aunado a este conjunto también aportan la Quebrada Zapotillo con un cauce de 14.58 km y la Quebrada Patriota con 10.98 km. La significativa cantidad de cauces presentes generan en primera instancia una conformación de la Cuenca del Zapote en cuatro grandes segmentos, Cuenca Alta del Zapote, Cuenca

Media, Cuenca Baja y Cuenca del Río Chimurria, que a su vez se dividió en 28 subcuencas para la realización del estudio hidrológico e hidráulico de la cuenca madre.

En la Figura 3-12 se presentan las subcuencas y los respectivos cauces que definan tal división.

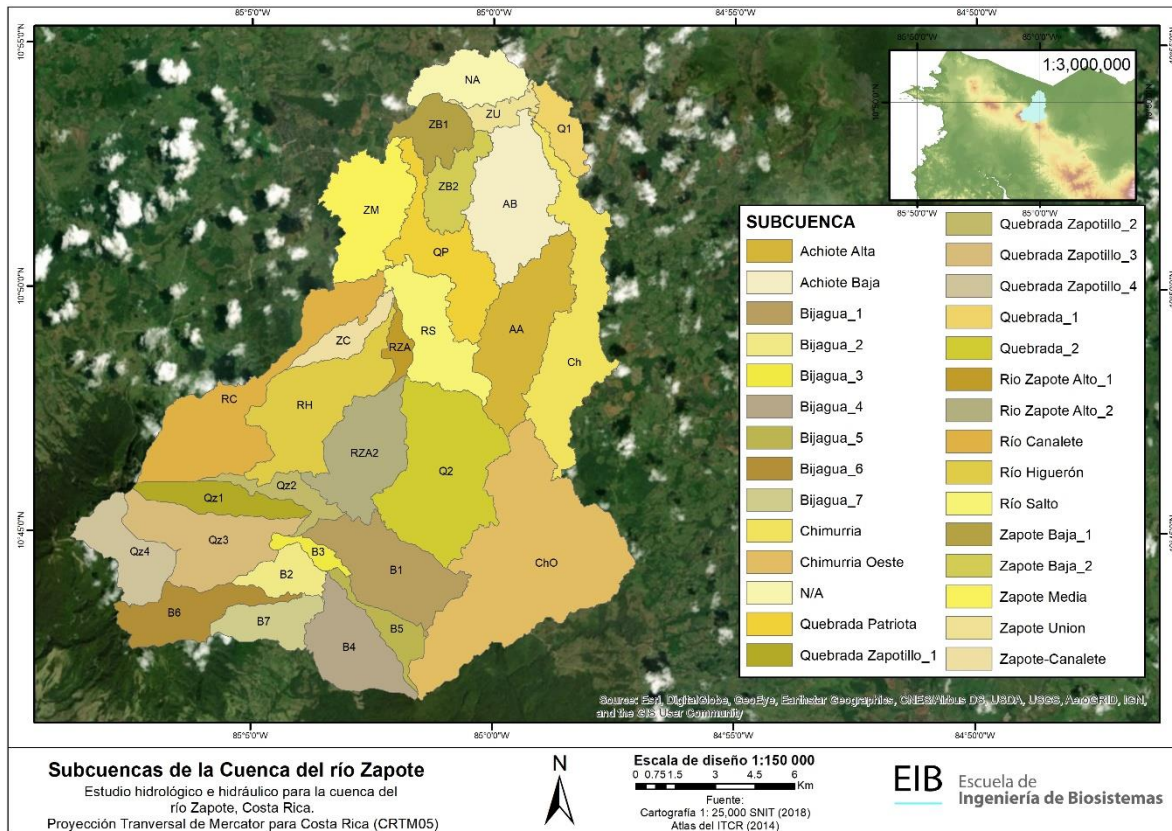


Figura 3-12. Subcuencas de la cuenca del Río Zapote y Chimurria

Se establecen parámetros para la clasificación de las cuencas y sus respectivos cauces, los cuales son mencionados a continuación.

La *longitud del cauce principal* (L_r) es la longitud total en kilómetros de la corriente principal de la cuenca, la cual es la que pasa por el punto de salida de esta.

La *pendiente media del río* (I_r) se define como la diferencia entre la elevación máxima del río (H_M) y la mínima (H_m) dividida entre la longitud del río en kilómetros (L_r : longitud del cauce principal):

$$I_r = \frac{H_M - H_m}{1000 * L_r} \quad (4)$$

Donde H_M hace referencia a la cota máxima de elevación y H_m para menor elevación del cauce principal. A continuación, se presenta la longitud del cauce principal y la pendiente promedio.

Tabla 3-2 Parámetros de longitud y pendiente promedio para cauces principales

Subcuenca	Simbología	Longitud de cauce (Km)	Hmin (m)	Hmax (m)	Ir
Zapote Unión	ZU	5.63	39.5	50.13	0.2
Quebrada 1	Q1	0.82	39.5	41.47	0.2
Zapote Baja 1	ZB1	2.89	43.14	50.13	0.2
Zapote Media	ZM	8.09	49.98	76.31	0.3
Quebrada Patriota	QP	11.26	49.71	98.29	0.4
Achiote Baja	AB	8.09	40.28	44.73	0.1
Zapote Baja 2	ZB2	2.79	43.56	52.33	0.3
Río Zapote Alto 1	RZA	3.85	80.67	119.65	1.0
Chimurria	Ch	22.03	40.56	154.39	0.5
Río Salto	RS	7.85	76.29	108.4	0.4
Zapote-Canalete	ZC	1.44	76.55	88.93	0.9
Achiote Alta	AA	7.42	44.65	118.64	1.0
Río Higuierón	RH	10.40	80.68	381.72	2.9
Quebrada 2	Q2	8.68	119.65	348.3	2.6
Bijagua 1	B1	5.13	363.76	580.8	4.2
Río Zapote Alto 2	RZA2	7.66	119.65	363.76	3.2
Bijagua 3	B3	1.04	410.45	413.94	0.3
Bijagua 2	B2	1.80	415.4	424.2	0.5
Chimurria Oeste	ChO	13.15	154.39	655.35	3.8
Quebrada Zapotillo 2	Qz2	1.86	363.76	431.2	3.6
Río Canalete	RC	12.35	76.55	601.2	4.2
Bijagua 4	B4	2.82	415.42	505.36	3.2
Bijagua 6	B6	5.41	424.2	979.18	10.3
Quebrada Zapotillo 3	Qz3	6.67	431.72	806.14	5.6
Bijagua 5	B5	1.90	413.94	511.04	5.1
Quebrada Zapotillo 1	Qz1	2.44	431.72	577.1	6.0
Quebrada Zapotillo 4	Qz4	2.38	806.14	1309.07	21.1
Bijagua 7	B7	1.30	424.15	711.09	22.1
NA	NA	1.67	36.25	39.02	0.2

De los cauces principales para cada subcuenca se tiene que el 46% de estos poseen un tipo de relieve plano, 17.8% con relieve suave, 32% con tipo de relieve mediano y solo un cauce principal con un relieve tipo accidentado, esto para la Quebrada Zapotillo4, la cual se encuentra en la parte más alta de la cuenca.

La *densidad de drenaje* (D_d) se define como la longitud total de cauces dentro de la cuenca (L_s) entre el área(A) total de drenaje:

$$D_d = \frac{\sum L_s}{A} \quad (5)$$

Se calculó la densidad de drenaje para las subcuencas, las cuales son presentadas en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3 Densidad de drenaje para las subcuencas de la Cuenca del Río Zapote

Condición	Subcuenca	Dd	Ls(km)	A(km ²)
Baja $0.1 < D_d < 1.8$	Quebrada_1	0.21	0.82	3.87
	Zapote Baja 3	0.24	1.67	6.88
	Bijagua_4	0.30	2.92	9.88
	Quebrada_2	0.42	9.33	21.96
	Quebrada	0.44	2.5	5.72
	Zapotillo_1			
	Quebrada	0.45	3.49	7.72
	Zapotillo_4			
	Bijagua_6	0.65	5.41	8.31
	Bijagua 7	0.24	1.30	5.44
	Zapote Baja_2	0.50	2.57	5.19
	Chimurria Oeste	0.58	22.1	38.04
	Río Higuerón	0.68	10.4	15.34
	Bijagua_1	0.70	9.2	13.22
	Río Canalete	0.70	13.45	19.17
	Achiote Alta	0.73	10.93	14.95
	Quebrada	0.79	10.21	12.98
	Zapotillo_3			
	Quebrada Patriota	0.98	10.98	11.26
	Río Zapote Alto_2	1.02	12.33	12.1
Río Salto	1.06	10.89	10.23	
Zapote Media	1.48	17.94	12.13	
Achiote Baja	1.57	23.64	15.04	
Moderada $1.8 < D_d < 3.6$	Chimurria	1.85	34.34	18.61
	Bijagua_3	2.01	3.38	1.68
	Bijagua_5	2.03	7.07	3.48
	Bijagua_2	2.05	8.51	4.16
	Quebrada	3.05	11.09	3.64
	Zapotillo_2			
	Río Zapote Alto_1	3.13	5.76	1.84
	Zapote Baja_1	3.23	17.34	5.37
Alta $D_d > 3.6$	Zapote-Canalete	4.68	16.11	3.44
	Zapote Unión	10.64	25.96	2.44

Si la densidad de drenaje es baja es de esperarse que la cuenca sea pobremente drenada, ya que hay pocos ríos en comparación con el área de la cuenca; por el contrario, para una densidad de drenaje alta se puede deducir que existe un mayor drenaje de la cuenca debido a la cantidad de afluentes que se presentan, esto es un indicador de una posible respuesta rápida ante una tormenta.

Los factores que controlan la densidad de drenaje son: la litología de la región, la facilidad de infiltración del agua de lluvia bajo la superficie del terreno y la presencia o ausencia de cobertura vegetal entre otros.

3.5.3 Parámetros de forma de las subcuencas

El *factor de forma* relaciona los dos parámetros anteriores para definir la forma de la cuenca. Y se calcula como:

$$F = \frac{A}{P} \quad (6)$$

La clasificación del índice de forma se basa según lo presentado en la siguiente tabla.

Tabla 3-4. Valores de interpretación de índice de forma.

Valores aproximados	Forma de la cuenca
> 0.22	Muy alargada
0.22 - 0.30	Alargada
0.30 - 0.37	Ligeramente alargada
0.37 - 0.45	Ni alargada ni ensanchada
0.45 - 0.60	Ligeramente ensanchada
0.60 - 0.80	Ensanchada
0.80 - 1.20	Muy ensanchada
>120	Rodeada de desagüe

Fuente: (Pérez, 1979)¹

Se clasificaron las subcuencas del Río Zapote según el índice de forma correspondiente, obteniendo predominancia de forma ligeramente ensanchada con un 25% del total de las subcuencas pertenecientes a la Cuenca del Río Zapote, el 21.4% hace referencia a subcuencas con forma muy alargada, mientras que el 17.8% corresponde a subcuencas con forma ligeramente alargada, tanto la forma alargada, como ni alargada ni ensanchada poseen un 14.3% de la totalidad de las subcuencas presentes en la Cuenca del Río Zapote, únicamente las subcuencas de Chimurria Oeste y Quebrada 2 poseen forma ensanchada, lo que corresponde aproximadamente al 7% de la totalidad de las subcuencas.

¹ Pérez J. 1979. Fundamentos del ciclo hidrológico. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Departamento de Meteorología e Hidrología. Caracas-Venezuela. 1-38.

En la siguiente figura se muestra el Índice de forma para las subcuencas estudiadas.

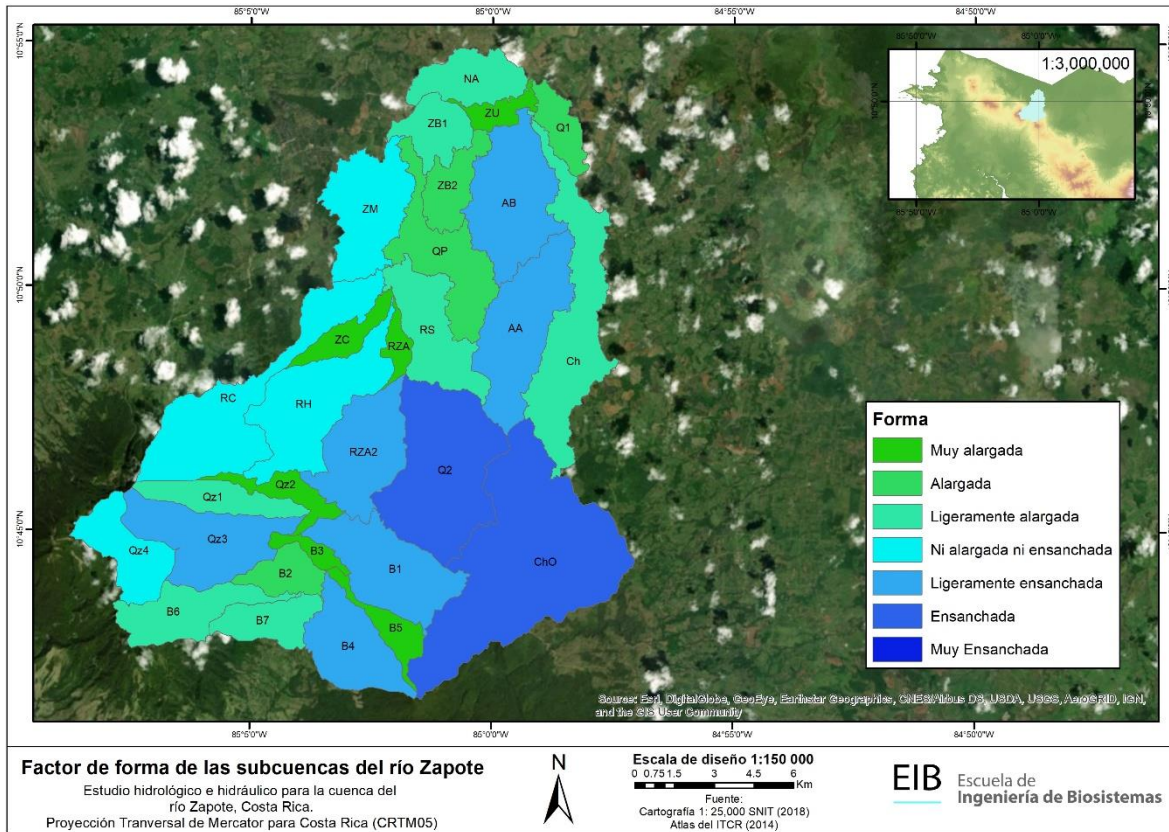


Figura 3-13. Factor de forma de las subcuencas del Río Zapote.

El *índice de compacidad* (I_c), parámetro que relaciona el efecto de la forma de la cuenca con el patrón de la escorrentía. Se define como el cociente adimensional del perímetro de la cuenca (P) y el perímetro de un círculo (P_c) que tenga una superficie igual a la de la cuenca:

$$I_c = 0.282 * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (7)$$

El valor que toma esta expresión es siempre mayor que la unidad y crece con la irregularidad de la forma de la cuenca, para este índice se establece la siguiente clasificación:

- $1 < I_c < 1,25$; la forma de la cuenca es ovalada.
- $1,25 < I_c < 1,50$; la forma de la cuenca es oblonga.
- $1,50 < I_c < 1,75$; la forma de la cuenca es alargada.
- $I_c > 1,75$; la forma de la cuenca es rectangular o rectangular alargada.

Cuando el índice de compacidad es igual a 1 la cuenca tiene forma circular y posee la mayor área posible para su perímetro. Esta forma hace más probable que una tormenta cubra toda la cuenca. Adicionalmente conforme el índice de compacidad es mayor los cauces tienden a ser más largos y la cuenca responde de forma más lenta ante una precipitación, esto trae consigo caudales picos más altos que suelen reflejarse en problemas de inundación en las partes bajas de la cuenca (Ver Tabla 3-5).

Tabla 3-5 Índice de compacidad para las subcuencas del Río Zapote

Subcuenca	Área (Km ²)	Perímetro (Km)	Ic	Forma de cuenca
Bijagua 4	9.88	21.05	1.89	Rectangular alargada
Quebrada 2	21.96	31.96	1.92	Rectangular alargada
Quebrada Zapotillo 4	7.72	19.20	1.95	Rectangular alargada
Bijagua 7	5.44	16.23	1.96	Rectangular alargada
Bijagua 2	4.16	14.53	2.01	Rectangular alargada
Quebrada Zapotillo 3	12.98	26.40	2.07	Rectangular alargada
Río Zapote Alto 2	12.10	25.50	2.07	Rectangular alargada
Quebrada Zapotillo 1	5.72	17.78	2.10	Rectangular alargada
Bijagua 1	13.22	27.20	2.11	Rectangular alargada
Zapote Baja 1	5.37	17.87	2.18	Rectangular alargada
N/A	6.88	20.52	2.21	Rectangular alargada
Achiote Baja	15.04	31.01	2.25	Rectangular alargada
Chimurria Oeste	38.04	49.53	2.26	Rectangular alargada
Quebrada 1	3.87	15.92	2.28	Rectangular alargada
Achiote Alta	14.95	31.47	2.30	Rectangular alargada
Bijagua 6	8.32	24.72	2.42	Rectangular alargada
Zapote Media	12.13	30.95	2.51	Rectangular alargada
Bijagua 3	1.68	11.72	2.55	Rectangular alargada
Río Higerón	15.34	35.52	2.56	Rectangular alargada
Zapote Baja 2	5.19	20.66	2.56	Rectangular alargada
Río Salto	10.23	29.27	2.58	Rectangular alargada
Río Zapote Alto 1	1.84	12.56	2.61	Rectangular alargada
Zapote-Canalete	3.44	17.86	2.71	Rectangular alargada
Río Canalete	19.17	44.37	2.86	Rectangular alargada
Bijagua 5	3.48	19.30	2.92	Rectangular alargada
Zapote Unión	2.44	16.16	2.92	Rectangular alargada
Quebrada Zapotillo 2	3.64	21.69	3.21	Rectangular alargada
Quebrada Patriota	11.26	41.18	3.46	Rectangular alargada
Chimurria	18.61	57.43	3.75	Rectangular alargada

3.5.4 Parámetros de relieve de las subcuencas

Se estimaron características de cada una de las subcuencas como se observa en la Tabla 3-6, donde se tiene diversidad en la totalidad de las subcuencas, teniendo subcuencas con áreas de menos de 5km² hasta subcuencas con áreas mayores a los 30km², la elevación entre las subcuencas en la parte alta de la cuenca y la parte baja es de aproximadamente 1230 m. Se presenta relieve plano y suave en la parte con pendientes promedio menor a 7%, hasta relieve accidentado y fuerte con pendientes promedio superiores a 35% en la parte alta de la cuenca.

Tabla 3-6. Características de las subcuencas del Río Zapote.

Subcuenca	Pendiente promedio	Tipo de relieve
Zapote Baja 3	1.93	Plano
Quebrada 1	3.12	Suave
Zapote Unión	3.76	Suave
Zapote Baja 1	4.85	Suave
Río Zapote Alto 1	5.18	Suave
Zapote Baja 2	6.44	Suave
Zapote-Canalete	7.26	Mediano
Achiote Baja	7.73	Mediano
Zapote Media	9.44	Mediano
Quebrada Patriota	9.91	Mediano
Chimurria	11.23	Mediano
Achiote Alta	11.69	Mediano
Río Salto	12.21	Mediano
Bijagua 3	14.88	Mediano
Quebrada 2	17.93	Mediano
Quebrada Zapotillo 2	19.34	Mediano
Río Higuerón	20.34	Accidentado
Bijagua 2	23.38	Accidentado
Chimurria Oeste	24.87	Accidentado
Río Canalete	25.45	Accidentado
Río Zapote Alto 2	26.26	Accidentado
Quebrada Zapotillo 1	26.59	Accidentado
Bijagua 1	26.60	Accidentado
Bijagua 4	28.60	Accidentado
Bijagua 7	31.63	Accidentado
Quebrada Zapotillo 3	33.20	Accidentado
Bijagua 5	37.65	Fuerte
Quebrada Zapotillo 4	43.43	Fuerte
Bijagua 6	46.22	Fuerte

La **curva hipsométrica** es la relación entre la altitud y la superficie de la cuenca que se encuentra a mayor altura. Se define en función del área acumulada sobre una determinada altura. A partir de la curva hipsométrica se puede determinar la **elevación media** de la cuenca, la cual equivale a la elevación correspondiente al 50% del área de la cuenca.

Debido a la extensa cantidad de subcuencas y a la diferencia de elevación entre estas, se decidió dividir la Cuenca del Río Zapote en tres grupos dependientes de la elevación. Con esto se presentan a continuación (Ver Figura 3-14) las curvas hipsométricas de la Cuenca baja del Río Zapote.

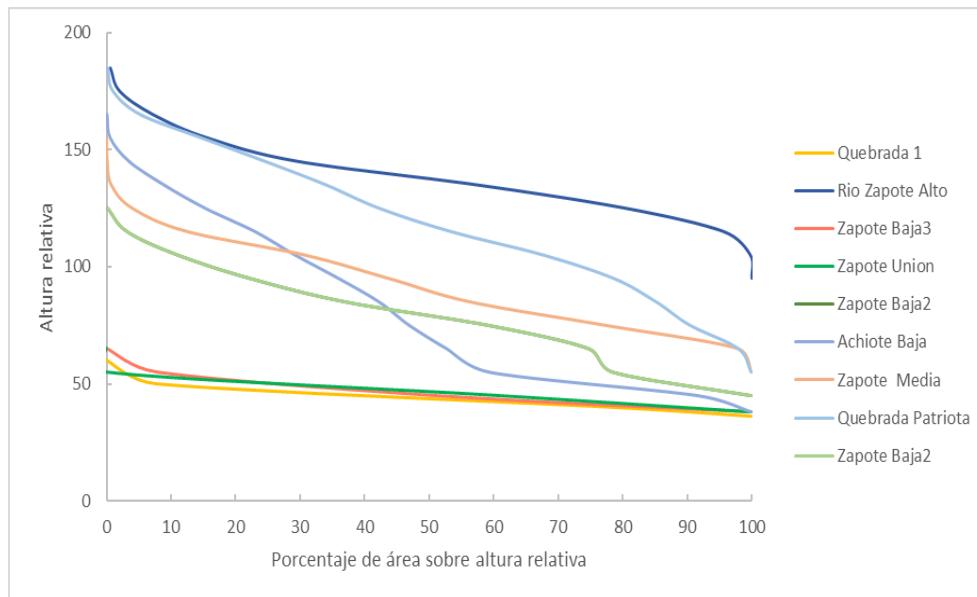


Figura 3-14 Curvas hipsométricas de la Cuenca Baja del Río Zapote.

Las subcuencas de menor elevación presentan un comportamiento de cuencas sedimentarias, típicas de cuencas en estado de vejez como se presenta en la figura, donde se tiene la subcuenca Quebrada 1, Zapote Baja 3 y Zapote Unión en esta condición.

De la totalidad de las subcuencas analizadas en este rango de elevación, únicamente la subcuenca Río Zapote Alto presenta una condición de inestabilidad singular de una cuenca joven, esto aunado al cambio de elevación de 100 metros para una superficie relativamente pequeña. El resto de las cuencas analizadas en este intervalo de elevaciones presenta un comportamiento estable consecuente con su estado de madurez.

Al intervalo de elevación definido entre los 300 y los 1800 msnm, concretamente, Cuenca Media del Río Zapote, se dispusieron once subcuencas cuatro presentan un comportamiento de madurez y el resto con condición de vejez, según se observa en la Figura 3-15.

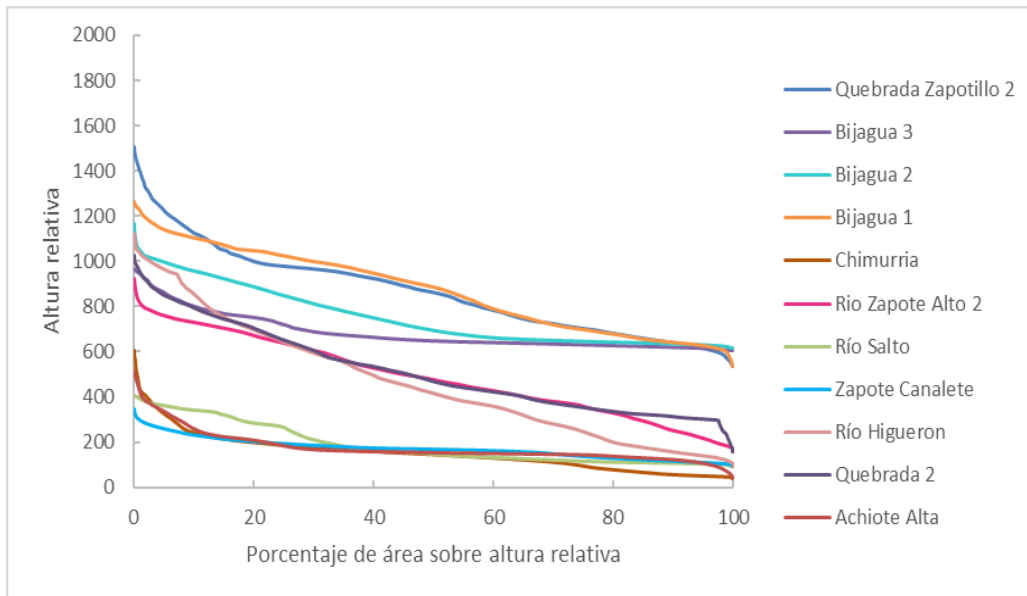


Figura 3-15 Curvas hipsométricas de la Cuenca Media del Río Zapote.

Por último, se conformó la Cuenca Alta del Río Zapote con elevaciones superiores a los 2000msnm, donde el comportamiento es similar al de cuencas en estado de madurez y cuencas en vejez, únicamente la subcuenca la Quebrada Zapotillo presenta una inestabilidad propia de cuencas jóvenes. (Ver Figura 3-16)

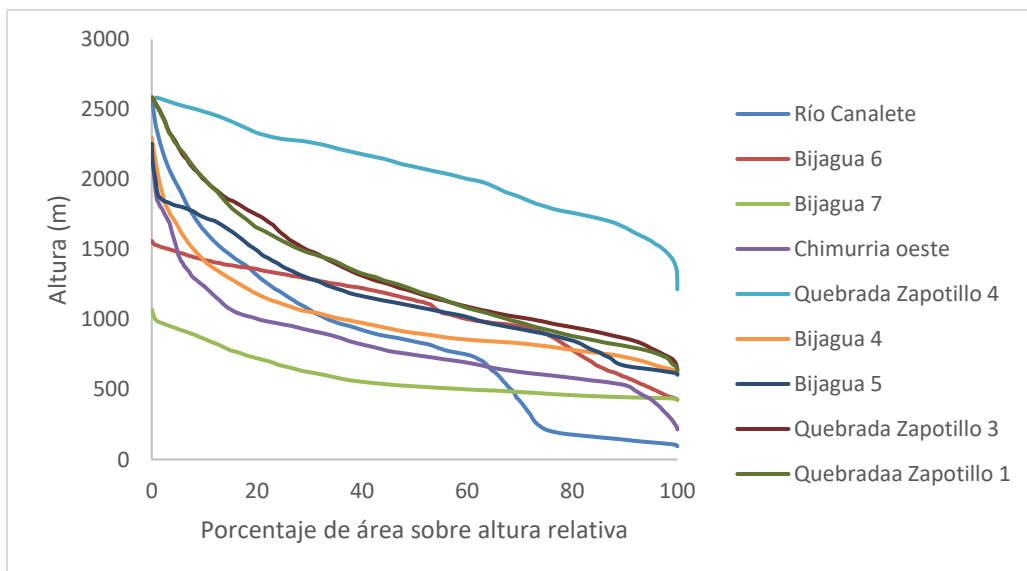


Figura 3-16 Curvas hipsométricas de la Cuenca Alta del Río Zapote.

El *índice de pendiente* (I_p), es una ponderación que se establece entre las pendientes y el tramo recorrido por el río. Además, expresa en cierto modo, el relieve de la cuenca. Se obtiene utilizando el rectángulo equivalente:

$$I_p = \sum \sqrt{\beta_i}(\alpha_i - \alpha_{i-1}) * \frac{1}{\sqrt{L}} \quad (8)$$

Dónde:

L = longitud del lado mayor del rectángulo equivalente (km)

n = número de curvas de nivel existente en el rectángulo equivalente, incluido los extremos.

$a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ = cotas de las n curvas de nivel consideradas (km)

β_i = fracción de la superficie total de la cuenca comprendida entre las cotas n y $n-1$ de curvas de nivel.

$$\beta_i = \frac{A_i}{A_T} \quad (9)$$

Dónde:

A_i = área i entre cotas de curvas de nivel

A_T = área total de la cuenca

El índice de pendiente se puede ver en Tabla 3-7.

Tabla 3-7. Índice de pendiente para los cauces de las subcuencas del Río Zapote.

Subcuenca	Área (km ²)	Perímetro (km)	L (km)	IP
Río Zapote Alto 1	1.84	12.56	5.97	0.28
Zapote Unión	2.44	16.16	7.77	0.36
Quebrada 1	3.87	15.92	7.44	0.38
Zapote-Canalete	3.44	17.86	8.53	0.39
Zapote Baja 1	5.37	17.87	8.29	0.43
Zapote Media	12.13	30.95	14.65	0.49
Zapote Baja 2	5.19	20.66	9.80	0.5
Achiote Baja	15.04	31.01	14.47	0.53
Quebrada Patriota	11.26	41.18	20.03	0.55
Bijagua 3	1.68	11.72	5.56	0.65
Río Salto	10.23	29.27	13.90	0.66
Achiote Alta	14.95	31.47	14.72	0.66
Chimurria	18.61	57.43	28.05	0.69
Bijagua 2	4.16	14.53	6.64	0.72
Bijagua 1	13.22	27.2	12.55	0.81
Río Zapote Alto 2	12.1	25.5	11.72	0.82
Quebrada 2	21.96	31.96	14.46	0.83
Río Higuerón	15.34	35.52	16.85	0.84
Quebrada Zapotillo 2	3.64	21.69	10.50	0.85
Bijagua 4	9.88	21.05	9.48	0.94
Bijagua 5	3.48	19.3	9.27	0.97

Chimurria Oeste	38.04	49.53	23.12	0.98
Quebrada Zapotillo 4	7.72	19.2	8.71	1
Bijagua 6	8.32	24.72	11.64	1.02
Bijagua 7	5.44	16.23	7.38	0.76
Quebrada Zapotillo 3	12.98	26.4	12.13	1.06
Quebrada Zapotillo 1	5.72	17.78	8.19	1.06
Río Canalete	19.17	44.37	21.28	1.07

4 Análisis Hidrológico

Para la modelación hidrológica de las subcuencas del Río Zapote y Chimurria se utilizó el programa HEC-HMS v.4.3, la capa de ríos y las subcuencas correspondientes a dicha zona. Se definió la red de conexión y las herramientas de cuenca (basins), uniones (junctions) y tránsito de avenidas (reach) necesarias para la elaboración del modelo. Se ubicó a cada subcuenca el centroide para asignar posteriormente la información de precipitación más cercana. En total se elaboraron 28 subcuencas, se utilizaron 16 uniones y 15 tránsitos de avenida. Por lo tanto, la configuración del modelo hidrológico quedó estructurada de la siguiente manera conectando los elementos desde aguas arriba hasta aguas abajo, desembocando en una única unión denominada “Salida”. Las configuraciones de las descargas se pueden visualizar en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1. Distribución de las uniones del modelo hidrológico de Zapote

Junction	Alimentación (Aguas Arriba)	Descarga (Aguas Abajo)
1	Quebrada Zapotillo 4	Reach 1
2	Bijagua 6 y Bijagua 7	Reach 2
3	Bijagua 2, Bijagua 4 y Reach 2	Reach 3
4	Bijagua 3, Bijagua 5 y Reach 3	Reach 4
5	Quebrada Zapotillo 1 y Reach 1	Reach 5
6	Bijagua 1, Quebrada Zapotillo 2, Reach 4 y Reach 5	Reach 6
7	Río Zapote Alto 2, Quebrada 2 y Reach 6	Reach 7
8	Río Higuerón, Río Zapote Alto 1 y Reach 7	Reach 8
9	Río Canalete, Zapote-Canalete, Río Salto y Reach 8	Reach 9
10	Zapote Media, Quebrada Patriota y Reach 9	Reach 10
11	Zapote Baja 1, Zapote Baja 2 y Reach 10	Reach 12
12	Chimurria Oeste	Reach 11
13	Achiote Alta	Reach 13
14	Achiote Baja, Reach 12 y Reach 13	Reach 14
15	Chimurria, Reach 11 y Reach 14	Reach 15
16	Zapote Unión, Quebrada 1 y Reach 15	Salida

En el caso de los tránsitos de avenida o *reach*, estos pasan por algunas subcuencas del modelo, las cuales tienen una conexión o unión “*junction*” de conexión aguas arriba a aguas abajo permitiendo trasladar el flujo de agua a lo largo de la subcuenca. (Ver Tabla 4-2). La configuración del modelo completo se puede ver en la Figura 4-1, donde se observan los basins, junctions y reach para toda la cuenca.

Tabla 4-2 Distribución de los Reach del modelo hidrológico de Zapote.

Reach	Subcuenca	Unión Aguas Arriba	Unión Aguas Abajo
1	Quebrada Zapotillo 3	Juntion 1	Juntion 2
2	Bijagua 2	Juntion 2	Juntion 3
3	Bijagua 3	Juntion 3	Juntion 4
4	Bijagua 1	Juntion 4	Juntion 6
5	Quebrada Zapotillo 2	Juntion 5	Juntion 6
6	Río Zapote Alto 2	Juntion 6	Juntion 7
7	Río Zapote Alto 1	Juntion 7	Juntion 8
8	Zapote-Canalete y Río Canalete	Juntion 8	Juntion 9
9	Zapote Media	Juntion 9	Juntion 10
10	Zapote Baja 1	Juntion 10	Juntion 11
11	Chimurria	Juntion 12	Juntion 15
12	Zapote Unión	Juntion 11	Juntion 14
13	Achiote Baja	Juntion 13	Juntion 14
14	Achiote Baja	Juntion 14	Juntion 15
15	Zapote Unión	Juntion 15	Juntion 16

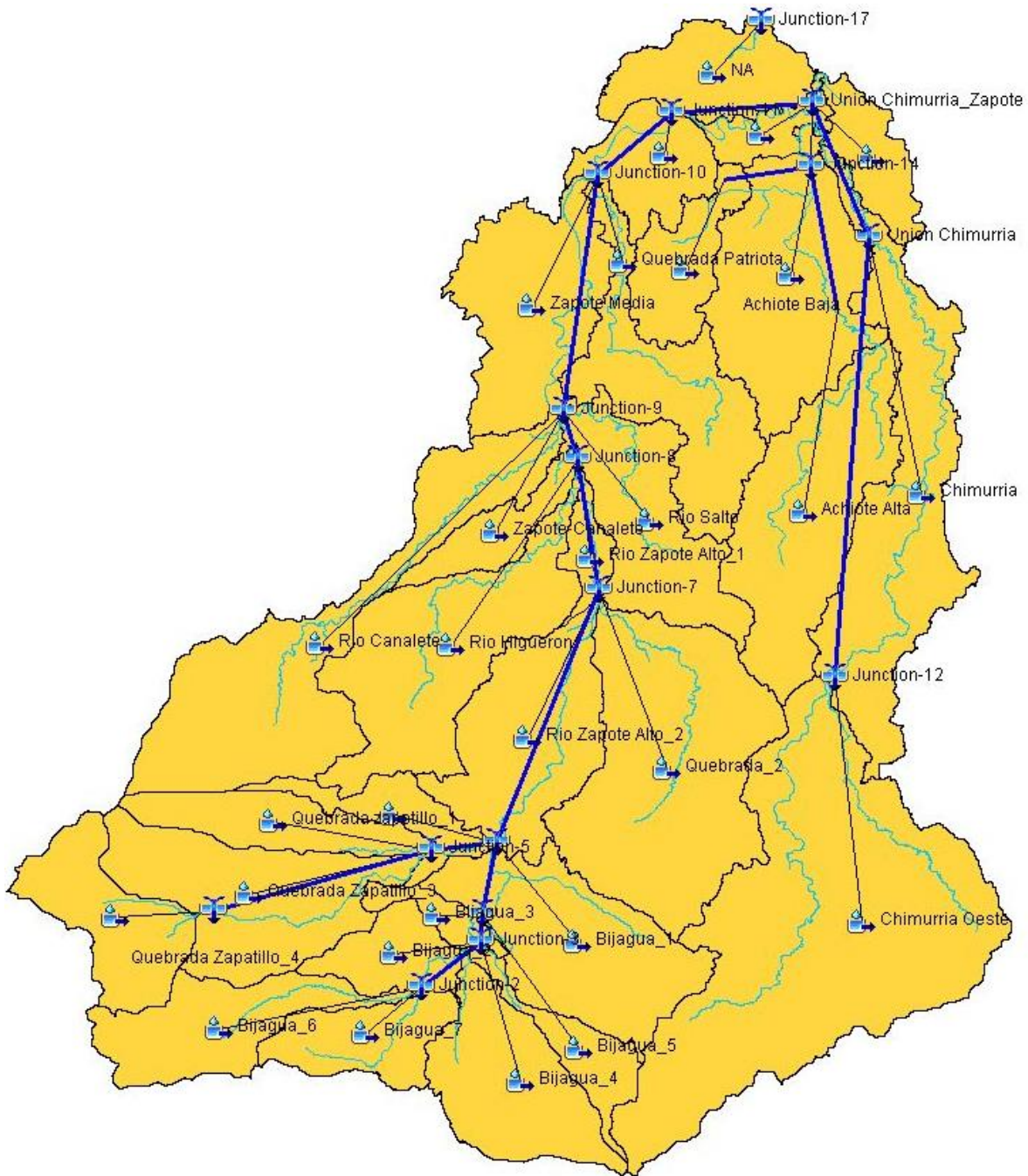


Figura 4-1. Configuración del modelo hidrológico en HEC-HMS

4.1 Cobertura del terreno de cuenca Zapote

Se utilizaron cuatro imágenes satelitales del WorldView3 (P001, P003, P004 y P005) del año 2017, dadas por la Comisión Nacional de Emergencias (CNE), las cuales tienen una resolución espacial de 30 cm por 30 cm. Con las imágenes se realizó una composición de bandas, de manera que se obtuvieron imágenes de color falso infrarrojo, donde se combinaron las bandas de infrarrojo cercano (NIR) (banda 4), color rojo (banda 3) y color verde (banda 2) e imágenes de color natural, el cual consta de la combinación de los colores rojo (banda 3), verde (banda 2) y color azul (banda 1). Estas imágenes satelitales en conjunto con fotos obtenidas de una gira de reconocimiento realizada el 19 y 20 de abril de 2018, se utilizaron para diferenciar de una mejor manera la cobertura del suelo presente en la zona de estudio (Ver Figura 4-2).

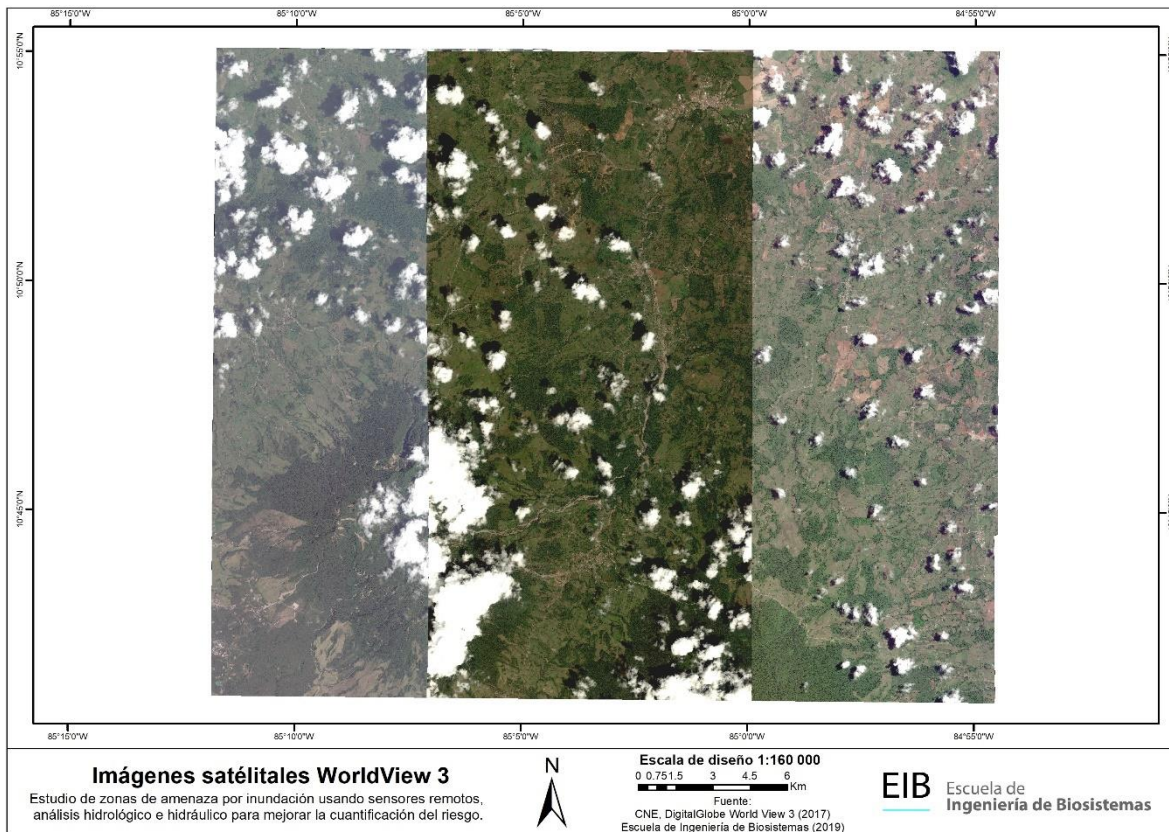


Figura 4-2. Composición de Bandas en imagen satelital del WorldView 3

Las clases seleccionadas para la clasificación de la cobertura del suelo fueron: nubes, sombra de nubes, agua, área impermeable, zona agrícola, bosque, pastizal y suelo desnudo. Se consideró para la clasificación de agua los ríos y las lagunas presentes en la zona. Para el caso de zona agrícola, se identificó en la mayoría de los casos las zonas correspondientes al cultivo de piña; sin embargo, también se identificaron, pero en menor cantidad áreas donde hay presencia de arroz y banano. Como es difícil diferenciar entre zona de pastoreo con

áreas de pastizal de corte bajo, se tomó la decisión de contemplar ambas zonas como pastizal.

Una vez establecidas las clases para el uso del suelo, se utilizó la herramienta *Training Sample Manager* del ArcGIS 10.6 para elaborar una clasificación supervisada mediante el algoritmo de máxima verosimilitud. Esta herramienta usa la imagen compuesta por todas las bandas y los polígonos circulares, los cuales funcionan como zonas de entrenamiento de las clases de la cobertura del suelo para elaborar la clasificación.

Posteriormente con el uso de una malla de puntos de referencia de las clases de cobertura del suelo y en conjunto con el raster de clasificación y la herramienta *Extract Values to Points*, se extrajo el valor de la celda del raster clasificado para cada uno de los puntos de la malla. Dicha malla de puntos está compuesta por un total de aproximadamente 80 puntos para cada clase, exceptuando aquellas zonas que eran pequeñas en comparación con el resto, y por ende se tiene menor número de puntos. Después, se elaboró una matriz de confusión para evaluar la clasificación del uso del suelo de la imagen (ver Apéndice A).

Con ello se calculó la precisión global mediante la ecuación (10), el cual utiliza los valores de la diagonal de la matriz de confusión.

$$Precisión\ Global = \frac{Clase_i}{\sum_j Clase_{i-j}} * 100 \quad (10)$$

Finalmente, se utilizó el método del cálculo del coeficiente de kappa como un criterio adicional para la evaluación de la precisión de la clasificación de la imagen, para ello se utilizó la ecuación (11).

$$k = \frac{N * \sum_{i=1}^r X_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})} \quad (11)$$

Debido a que existen traslapos entre imágenes, para no perder información debido a la presencia de nubes (valor 1) y sombras de nubes (valor 2) en dicha sección, se implementó el siguiente código con la calculadora ráster:

$$Con(("RasterA"==1) \text{ I } ("RasterB"==2), "RasterB", "RasterA") \quad (12)$$

Donde, si se cumple la condición que el ráster A presenta valores de 1 o 2, se extrae la información del ráster B, sino se mantienen los valores originales.

Posteriormente se elaboró un mosaico con todos los rústers clasificados a una resolución de 30 cm. Después, se hizo un *resample* del ráster clasificado para pasar de una resolución de 30 cm a 3 m, esto con el fin de poder obtener los polígonos necesarios para

calcular el área correspondiente a cada clase en la zona de estudio. Lo anterior, debido a que 30 cm es una resolución muy fina para el procesamiento realizado por ArcGIS. Es importante mencionar que debido a que los rásters clasificados vienen de imágenes individuales, a la hora de realizar el mosaico los píxeles de tres imágenes se vieron desplazadas de la siguiente manera: ráster de imagen P001, 0.115 m en eje X y 0.019 m en eje Y; ráster de imagen P004, 0.088m en X y 0.023 en Y. Lo que corresponde a P005 esta se movió 0.111 m en X y 0.035 m en Y. Lo anterior para efectos de la cobertura del suelo, no presenta algún inconveniente ya que el desplazamiento es pequeño.

Por último, debido a que el resultado se basa en puntos de entrenamiento, para finalizar el proceso correspondiente a la clasificación de la cobertura del suelo se realizó un afinamiento visual utilizando las imágenes satelitales mencionadas anteriormente.

De las matrices de confusión se obtuvo para las cuatro imágenes clasificadas los siguientes porcentajes de precisión global y los valores Kappa (Ver Tabla 4-3).

Tabla 4-3. Valores de precisión global y kappa de la clasificación supervisada.

Imagen Satelital WorldView 3	Precisión Global (%)	Kappa
P001	90.395	0.889
P003	84.724	0.823
P004	89.744	0.882
P005	81.991	0.792

Para la totalidad de la cuenca del Río Zapote se obtuvo una cobertura mayoritariamente de bosque con un total de 135.29 ha, lo que corresponde al 46%, seguidamente de 24% de pastizales con 70.58 ha, mientras 41.17 ha de zona agrícola corresponde al 14%, suelo desnudo tiene 17.64 ha correspondiente a 6%, nubes y sombra de nubes aportan en conjunto 9% de la totalidad de la superficie de la cuenca mientras el área impermeable correspondiente a centros urbanos y caminos es menor al 1%.

El uso de suelo presentado para las 28 subcuencas de la cuenca del Río Zapote se presenta en la, según la clasificación expuesta anteriormente.

Se tiene que 25 de las 28 subcuencas estudiadas presentan predominancia de cobertura boscosa, donde únicamente las subcuencas Quebrada 1, Río Zapote Alto 1 y Zapote Baja 3, presentan predominancia de zona agrícola para la primera y suelo desnudo para las dos restantes.

Se tiene que porcentualmente la subcuenca Bijagua 5 posee mayoritariamente cobertura boscosa con 80.8% y la subcuenca con menor cobertura boscosa es la subcuenca Zapote Baja 3 con solo 11.2% se su área total.

La subcuenca con mayor cobertura de pastizal es Zapote-Canalete con 39.4%, mientras Quebrada Zapotillo 4 posee apenas 8.7% para esta cobertura, la subcuenca con mayor cobertura agrícola es Quebrada 1 con 38.3% y Bijagua 5 solo posee 3.9% de esta cobertura, mientras que para suelo desnudo y área impermeable la subcuenca Zapote Baja 3 presenta porcentajes respectivos de 36.3% y 9% respectivamente.

Tabla 4-4. Uso de suelo de las subcuencas del Río Zapote

Simbología	Área Impermeable (ha)	Zona Agrícola (ha)	Bosque (ha)	Pastos (ha)	Suelo desnudo (ha)
AA	1.58	247.37	783.69	417.05	35.08
AB	3.89	328.95	679.89	324.65	140.60
B1	4.93	118.58	605.22	346.83	43.90
B2	5.31	62.40	185.81	125.65	30.50
B3	1.20	24.73	64.71	56.28	14.42
B4	7.02	88.41	549.17	300.71	22.01
B5	4.03	13.50	278.77	39.33	9.47
B6	3.11	17.69	486.75	23.65	63.50
B7	3.02	57.09	321.81	97.72	35.44
Ch	8.39	304.80	782.38	511.39	170.23
ChO	4.65	494.31	1924.47	1297.79	46.97
NA	61.25	112.90	76.04	181.77	245.64
Q1	0.74	133.61	93.91	87.59	32.63
Q2	3.46	226.92	1074.67	804.22	44.52
QP	4.55	276.31	458.82	325.42	57.38
Qz1	3.16	112.06	196.22	126.03	9.66
Qz2	2.89	74.35	142.77	83.00	16.12
Qz3	33.27	182.53	562.03	127.89	57.66
Qz4	16.87	22.15	258.09	31.80	36.86
RC	7.41	189.95	1002.98	354.47	65.54
RH	4.18	194.90	721.69	302.43	32.88
RS	3.47	159.54	443.48	321.48	89.42
RZA	2.61	31.01	38.73	38.61	40.91
RZA2	6.65	105.87	730.05	150.83	55.66
ZB1	10.46	124.87	173.61	112.51	93.54
ZB2	1.60	115.41	234.70	114.69	33.87
ZC	1.19	60.45	133.00	130.69	6.24
ZM	8.79	317.35	493.39	195.66	92.84
ZU	3.25	43.49	55.95	44.26	35.80

En la Figura 4-3 se presenta el porcentaje de cobertura para cada subcuenca de la cuenca del Río Zapote.

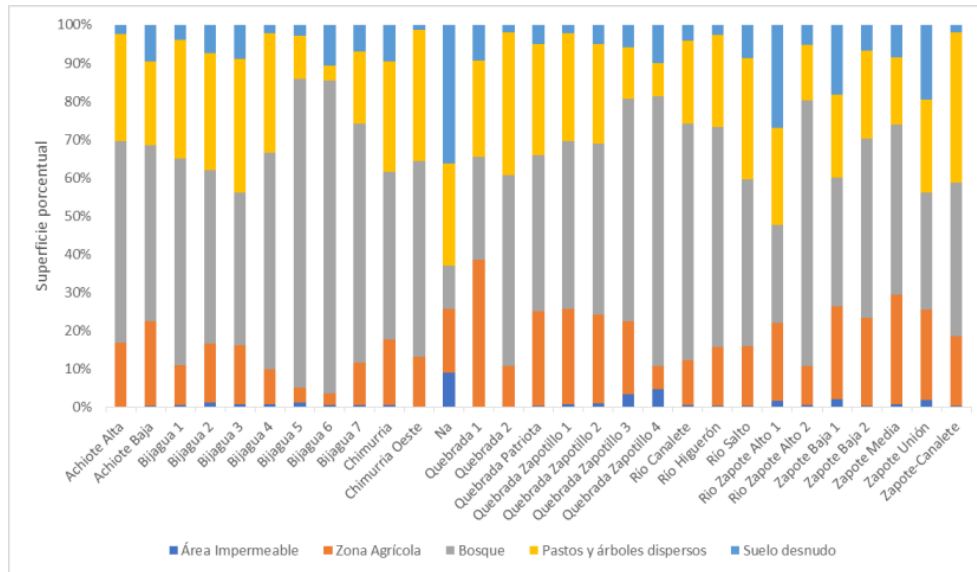


Figura 4-3 Porcentaje de cobertura de subcuencas de la cuenca del Río Zapote.

En la Figura 4-4 se presenta la cobertura del suelo para la Cuenca del Río Zapote.

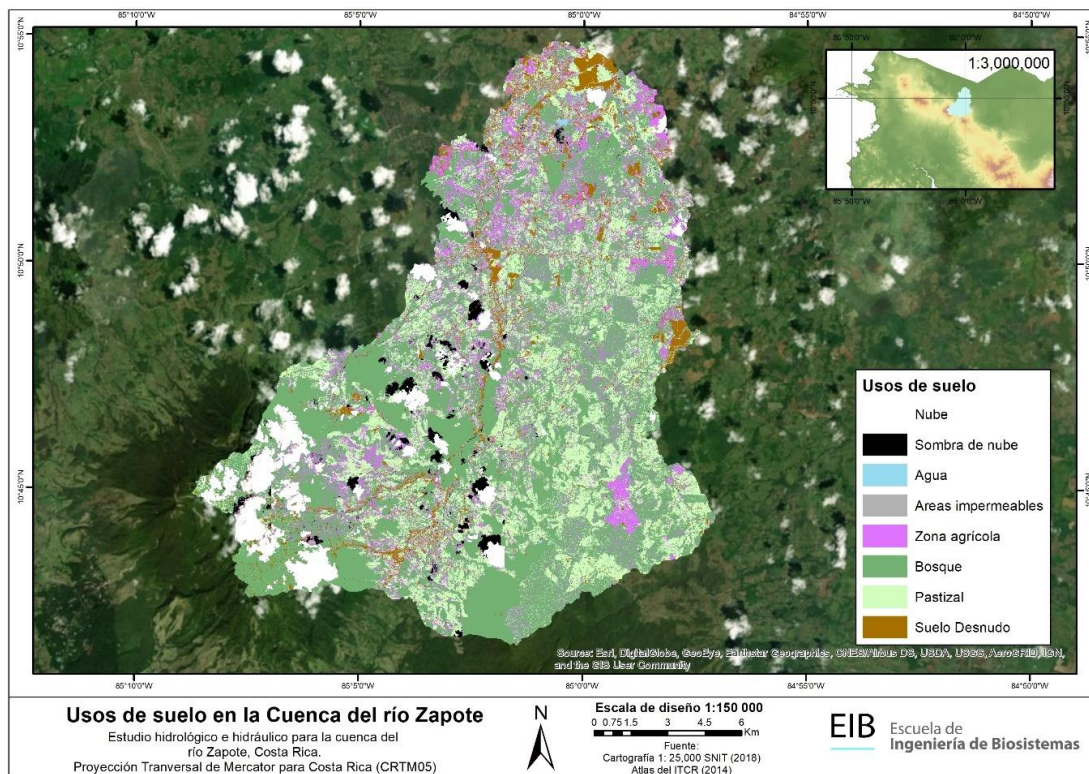


Figura 4-4. Usos de suelo Cuenca del Río Zapote.

4.2 Tipo de Suelos

La clasificación de los suelos se realiza a partir de la morfología, material parental, la génesis y factores formadores predominantes, tal clasificación permite evaluar la capacidad del suelo para con esto prevenir la degradación y rehabilitar el potencial de los suelos degradados debido a actividades antropogénicas y fenómenos naturales.

A partir de la base de datos del Centro de Investigaciones de Agronómicas de la Universidad de Costa Rica, han sido identificados tres órdenes de suelo en el área de estudio, a mencionar Ultisoles, Andisoles y Entisoles.

Los Ultisoles los podemos encontrar en la Zona Norte (Upala, Guatuso, los Chiles, Sarapiquí, San Carlos). Este orden de suelos es uno de los más viejos que podemos encontrar en el país, y por lo general los podemos encontrar en lugares muy húmedos donde existe mucha precipitación, se desarrollan en relieves que van desde ligeramente ondulados hasta fuertemente ondulados. Son suelos profundos, y bien desarrollados con una transición difusa entre los horizontes, cuentan con texturas finas a muy finas como es el caso de las arcillas (INTA-MAG, 2016)². Los Andisoles se encuentran en Alajuela (Upala, San Carlos, Naranjo, Alfaro Ruiz, Valverde Vega y Poas). Tienen altos valores en contenido de materia orgánica, son suelos de las regiones subhúmedas y húmedas, poseen buena acumulación de humus, con texturas medias franco arenosas, franco o franco limosas (INTA-MAG, 2016)³.

Los suelos Entisoles están presentes desde pendientes planas a casi planas, menos del 3%, hasta fuertemente escarpadas, más del 75%. Al tener poco desarrollo no son recomendables para actividades agrícolas intensivas. La labranza inadecuada de estos suelos puede acelerar los procesos de erosión por lo que se recomienda realizar prácticas agro conservacionistas intensivas principalmente cuando se encuentran en zonas de ladera (INTA-MAG, 2016)⁴.

A partir de la base de datos de suelos del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica, se identificaron 11 puntos georeferenciados (Ver Tabla 4-5) de muestreo de suelo en la cuenca del Río Zapote o aledaños a esta y con influencia en ella. Tales puntos se utilizaron para la descripción de características morfológicas del suelo como horizontes, textura, condiciones de drenaje, profundidad efectiva entre otros. Se presentan en la siguiente tabla.

² INTA Costa Rica, Boletín Técnico Suelos de Costa Rica, Orden Ultisol, San José, 2016; <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Av-1902.PDF>

³ INTA Costa Rica, Boletín Técnico Suelos de Costa Rica, Orden Andisol, San José, 2016; <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Av-1828.PDF>

⁴ INTA Costa Rica, Boletín Técnico Suelos de Costa Rica, Orden Entisol, San José, 2016; <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Av-1822.PDF>

Tabla 4-5. Puntos de muestreo de suelo en área de influencia de la cuenca del Río Zapote.

Punto	Coordenadas		Cantón	Clase textural	Horizontes	Profundidad total (m)
	X	Y				
1	-85.09821	10.73041	Upala	Franco	5	1.7
2	-84.99864	10.83016	Upala	Arcilloso	4	1.2
3	-84.96206	10.83204	Upala	Franco Arcilloso	5	1.1
4	-85.02025	10.88391	Upala	Franco Arcilloso	4	1.2
5	-85.06911	10.85306	Upala	Franco	4	1.2
6	-85.06232	10.88472	Upala	Franco	4	1.2
7	-84.98556	10.91789	Upala	Franco Arcilloso	5	1.05
8	-84.96261	10.87815	Upala	Arcilloso	4	0.94
9	-84.94612	10.86553	Upala	Franco Arcilloso Arenoso	4	1
10	-84.9173	10.78268	Guatuso	Arcilloso	4	0.92
11	-85.00474	10.89719	Upala	Franco Arcilloso	4	1.1

Se observa que la textura de suelo se encuentra entre fina, moderadamente fina y media correspondiente a tres puntos de muestreo con textura arcillosa, cuatro puntos de muestreo con textura franco arcillosa, tres con textura arcillosa y uno de los puntos con textura franco arcillo arenosa.

La condición hidrológica del suelo se estableció en relación con la textura del suelo y la profundidad de este, definiendo condición hidrológica B para suelos de textura franca y franca arcillo arenosa, la condición C corresponde a suelos franco-arcillosos mientras que los suelos de textura fina como los arcillosos se les asignaron la condición D.

Ante la importancia de los suelos en el ciclo del agua, la profundidad de los suelos es un parámetro importante para estimar la capacidad de almacenaje de agua del terreno y su retención de humedad.

Adicionalmente, el MAG clasifica las profundidades dentro de las siguientes categorías:

1. **Muy profundo:** más de 120 cm.
2. **Profundo:** 90 cm - 120 cm.
3. **Moderadamente profundo:** 60 cm - 90 cm.
4. **Poco profundo:** 30 cm - 60 cm.
5. **Superficial:** menos de 30 cm.

Como se muestra anteriormente los suelos muestreados presentan una profundidad de muy profundo en un punto de muestreo y los diez restantes con condición de suelo profundo.

La conductividad hidráulica o permeabilidad es un valor constante que indica el flujo de un líquido a través de un medio poroso, saturado con un líquido que fluye a través de un sistema. La conductividad hidráulica del suelo se determina a partir de la textura, donde los porcentajes de arena, limo y arcilla, así como la presencia de materia orgánica definen el valor asociado de conductividad.

Para el cálculo de la conductividad hidráulica se utilizó el software *Soil Water Characteristics* (Washington State University) obteniendo los siguientes valores de conductividad hidráulica para las texturas presentes en los perfiles de muestreo en la cuenca del Río Zapote (Ver Tabla 4-6).

Se presenta una conductividad lenta a moderadamente lenta, consecuente a la textura del suelo, donde suelos con texturas arcillosas presentan una menor conductividad en relación con suelos francos o francos arcillosos, además la presencia de materia orgánica en el suelo también contribuye a una mayor conductividad como se observa en la tabla anterior.

Tabla 4-6. Conductividad Hidráulica de suelos muestreados en la cuenca del Río Zapote.

Punto	Porcentaje				Conductividad Hidráulica (mm/hr)
	Arena	Limo	Arcilla	MO	
1	25.5	47.6	26.9	1.0	4.90
2	17.0	35.0	48.0	3.6	3.05
3	31.0	31.0	38.0	4.9	5.70
4	39.0	27.0	34.0	7.2	10.59
5	35.0	47.0	18.0	6.4	41.05
6	43.0	35.0	22.0	3.8	17.79
7	38.0	30.0	32.0	6.4	11.87
8	22.0	28.0	50.0	2.7	1.49
9	47.0	25.0	28.0	6.4	15.17
10	23.3	13.3	63.5	4.5	14.05
11	36.5	35.0	33.0	1.5	3.75

En la Figura 4-5 se presentan los puntos de muestreo, los polígonos de influencia de Thiessen para cada punto de interés y la condición del suelo en el respectivo polígono.

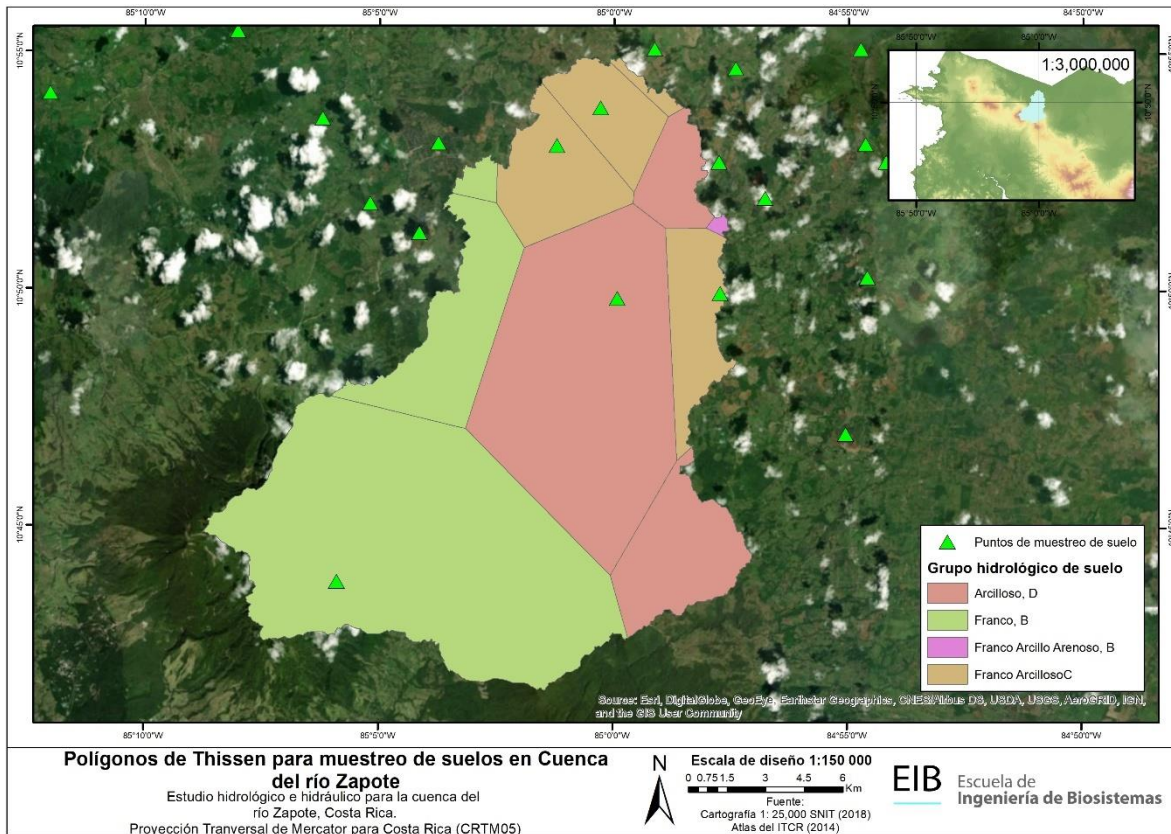


Figura 4-5. Puntos de muestreo de suelo en la cuenca del Río Zapote.

4.3 Numero de curva

El balance hidrológico en el sistema suelo-cobertura integra los procesos de precipitación, infiltración, evapotranspiración y escorrentía. Conociendo el comportamiento de la precipitación, la variación de la evapotranspiración e infiltración y el efecto regulador del sistema suelo-cobertura, se puede determinar la escorrentía, la cual constituye la información básica para el cálculo de la red de drenaje (Villón Bejér , .2006)⁵.

Uno de los métodos para el cálculo de la escorrentía superficial es el de número de curva desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, el cual deriva de una de una serie de curvas asociadas a coeficientes de escorrentía, los valores de número de curva varían entre CN=1 donde se da la infiltración completa y CN=100 que indica que toda la lluvia escurre.

La metodología de número de curva integra varios criterios como la condición hidrológica, la cual establece la capacidad de la superficie de la cuenca para favorecer o

⁵ Villón Bejér, M. (2006). Drenaje. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

dificultar el escurrimiento directo y está relacionada a la cobertura vegetal, donde si el 75% del área total de la cuenca pertenece a cobertura vegetal la condición hidrológica se define como buena, la condición regular presenta una cobertura vegetal de entre 50% a 75% del área total de la cuenca, mientras que una cobertura vegetal inferior al 50% es definida como pobre.

Otro criterio es el grupo hidrológico del suelo, el cual se define como Grupo A para suelos con bajo potencial de escorrentía aun estando mojados y está constituido por suelos arenosos y gravas con drenaje de bueno a excesivo.

El Grupo B se refiere a suelos con un moderado bajo potencial de escorrentía cuando están mojados, se constituye de suelos profundos con texturas de moderadamente finas a moderadamente gruesas.

Los suelos que poseen un moderado alto potencial de escorrentía cuando están completamente mojados, son constituidos por texturas de moderadamente finas a finas y con estratos que impiden el movimiento de agua hacia abajo se clasifican en el Grupo C. Mientras que el Grupo D presenta los suelos con un alto poder de escorrentía y bajas tasas de infiltración cuando están completamente mojadas, lo constituyen suelos arcillosos con alto nivel de esponjamiento, suelos con capas de arcilla y suelos superficiales sobre material casi impermeable.

La condición de humedad antecedente se ve determinada por la precipitación total durante el período de 5 días anteriores a la tormenta, para ella el Sistema de Conservación de Suelos de la USDA (Villón Bejár, 2006), definió 3 casos:

- CN-I (seca): en estación seca se tiene una precipitación acumulada menor a 13 mm y en estación de crecimiento menor a 35 mm.
- CN-II (media): la precipitación acumulada en estación seca se encuentra entre 13-25 mm y, en la estación de crecimiento, se encuentra entre 35-50 mm.
- CN-III (húmeda): se da un nivel de precipitación acumulada mayor a 25 mm y a 50 mm en las estaciones secas y de crecimiento, respectivamente.

De tal forma que, el número de curva para la CN-II se puede obtener mediante los datos tabulados por la USDA, mientras que, para las condiciones I y III se deben utilizar las siguientes ecuaciones:

$$CN_{(I)} = \frac{4.2CN_{(II)}}{10 - 0.058CN_{(II)}} \quad (13)$$

$$CN_{(III)} = \frac{23CN_{(II)}}{10 - 0.13CN_{(II)}} \quad (14)$$

Mediante el respectivo análisis de los cinco días anteriores al impacto del Huracán Otto en la zona de Upala, es decir, del día 19 al 23 de noviembre del 2016, se acumuló un total de precipitación equivalente a 20.3 mm en la zona de Guayabal, por lo que se determinó que el evento se dio bajo una condición antecedente de humedad CN-I. Para el evento de Otto de 24 horas, se obtuvo una lámina de 183 mm, además, como parte de los resultados del análisis hidrológico se observó que el evento se encontró entre un período de retorno entre 50 y 100 años, por lo que es probable que eventos similares deban modelarse con una condición antecedente CN III donde es mucho más crítica la lámina generada.

La cobertura y uso del suelo incluye toda clase de vegetación, los cuerpos de agua y las superficies impermeables presentes. Se calculó el número de curva para cada subcuenca de la Tabla 4-7.

Tabla 4-7. Número de curva para las subcuencas del Río Zapote

Subcuenca	Simbología	CN II	CN III
Achiote Alta	AA	78.96	89.62
Achiote Baja	AB	79.08	89.68
Bijagua_1	B1	60.62	77.98
Bijagua_2	B2	62.99	79.65
Bijagua_3	B3	63.46	79.98
Bijagua_4	B4	59.94	77.48
Bijagua_5	B5	57.80	75.90
Bijagua_6	B6	59.03	76.82
Bijagua_7	B7	60.87	78.16
Chimurria	Ch	77.16	88.60
Chimurria Oeste	ChO	74.91	87.29
NA	NA	81.74	91.15
Quebrada_1	Q1	81.58	91.06
Quebrada_2	Q2	76.00	87.93

Quebrada Patriota	QP	79.59	89.97
Quebrada Zapotillo_1	Qz1	63.55	80.04
Quebrada Zapotillo_2	Qz2	63.85	80.25
Quebrada Zapotillo_3	Qz3	63.24	79.83
Quebrada Zapotillo_4	Qz4	61.40	78.53
Río Canalete	RC	60.39	77.81
Río Higuierón	RH	63.80	80.21
Río Salto	RS	80.60	90.53
Río Zapote Alto_1	RZA	69.33	83.87
Río Zapote Alto_2	RZA2	69.30	83.85
Zapote Baja_1	ZB1	77.84	88.99
Zapote Baja_2	ZB2	75.69	87.75
Zapote-Canalete	ZC	64.52	80.70
Zapote Media	ZM	68.68	83.45
Zapote Unión	ZU	78.06	89.11

El número de curva en las subcuencas se encuentra entre 57.80 para la subcuenca Bijagua 5 en la parte alta de la cuenca del Río Zapote y 81.74 para la subcuenca de Zapote Baja 3 que se encuentra en la parte baja de la cuenca del Río Zapote.

Para el cálculo del número de curva de la Cuenca del Río Zapote, se despreciaron las áreas correspondientes a nubes, sombra de nubes y cuerpos de agua para la contabilización del área total. Con esto se contabilizó el 91% del área total de la cuenca del Río Zapote con 267.51 km, y el número de curva ponderado para la cuenca del Río Zapote es de 71.17.

4.4 Tiempo de concentración

El tiempo de concentración (T_c) se obtuvo mediante el método de velocidad, distinguiendo entre los tipos de régimen de flujo que se pueden presentar, los cuales pueden ser según sus características un flujo laminar ($T_{laminar}$), concentrado (T_{conc}) y canales (T_{canal}) (USDA, 1986). Para su cálculo es necesario obtener el flujo más largo (“Longest flow path”) que transita por cada subcuenca, para su obtención se utilizó el software ArcGis, con la extensión ArcHydro Tools.

$$T_c = T_{laminar} + T_{conc} + T_{canal} \quad (15)$$

La distancia más lejana de cada subcuenca es clasificada en tres tramos de acuerdo con la bibliografía (USDA, 1986), los cuales son, distancia para flujo Laminar en los primeros 100 m. Distancia de flujo concentrado, el cual abarca después de los primeros 100 m hasta la intersección con el cauce principal de cada subcuenca. Por último, está la

distancia del Flujo en Canal, el cual corresponde a lo que queda de la longitud sobre el canal del río hasta su salida. Se consideró el canal del río como trapezoidal y se tomó la medición del espejo de agua promedio (que se pudo obtener aguas arriba, medio y abajo con las ortofotos), y se asignó una pendiente del banco del talud de 0.5. También se varió el tirante de 1 a 4 m entre subcuencas de acuerdo con las dimensiones de cada canal, por último, se utilizó 0.030 como coeficiente de Manning que corresponde a canales de tierra con algunas malezas y pastos.

Para cada tramo se obtuvieron las longitudes de tramos, las elevaciones de cada punto aguas arriba y abajo mediante ArcGIS y el modelo de elevación digital. Los datos obtenidos se muestran a continuación.

Tabla 4-8. Tiempo de concentración en la cuenca del Río Zapote.

Subcuenca	Simbología	T_c (min)	T_{lag}
Achiote Alta	AA	135.994	81.596
Achiote Baja	AB	289.274	173.564
Bijagua_1	B1	103.259	61.955
Bijagua_2	B2	78.711	47.227
Bijagua_3	B3	88.400	53.040
Bijagua_4	B4	77.854	46.712
Bijagua_5	B5	62.900	37.740
Bijagua_6	B6	82.418	49.451
Bijagua_7	B7	49.200	29.520
Chimurria	Ch	165.669	99.402
Chimurria Oeste	ChO	97.280	58.368
NA	NA	241.211	144.727
Quebrada_1	Q1	584.585	350.751
Quebrada_2	Q2	88.254	52.952
Quebrada Patriota	QP	234.504	140.703
Quebrada zapotillo_1	Qz1	63.692	38.215
Quebrada zapotillo_2	Qz2	112.360	67.416
Quebrada Zapatillo_3	Qz3	62.685	37.611
Quebrada Zapatillo_4	Qz4	43.191	25.914
Río Canalete	RC	94.115	56.469
Río Higuerón	RH	116.305	69.783
Río Salto	RS	143.001	85.801
Río Zapote Alto_1	RZA	193.890	116.334
Río Zapote Alto_2	RZA2	59.064	35.438
Zapote Baja_1	ZB1	171.500	102.900
Zapote Baja_2	ZB2	179.554	107.732
Zapote-Canalete	ZC	151.067	90.640

Zapote Media	ZM	158.511	95.107
Zapote Unión	ZU	78.808	47.285

4.5 Datos de Precipitación y tormenta de diseño

Para la zona de Bijagua y Canalete, se obtuvieron datos de precipitación de las estaciones pertenecientes al Instituto Costarricense de Electricidad. Tales datos, provenientes de las estaciones meteorológicas 69576 y 69574 correspondientemente, son períodos de 18 años (1999-2017) y 12 años (2006 – 2018), en donde se redujeron los datos al evento de mayor magnitud contemplando láminas de 5, 15, 30, 60, 120, 180 y 360 minutos. Con la estación de Bijagua son contó con datos diarios de un período de 28 años (1990-2018), por lo cual se tiene, además, láminas de 1440 minutos.

Con los datos de precipitación se obtuvieron las curvas IDF características de la zona para períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años. Por definición, el período de retorno se considera la probabilidad de que un evento extremo suceda al menos una vez en promedio al año; es decir, el intervalo de recurrencia entre eventos que igualan o exceden una magnitud especificada (Chow, 1994).

El objetivo principal del análisis de frecuencia de la información hidrológica radica en la realización de una distribución de probabilidad espacial y temporal que relacione la magnitud de los eventos extremos con su frecuencia de ocurrencia.

La curva de intensidad-distribución-frecuencia (IDF) es uno de los primeros pasos que se realizan en un diseño hidrológico, ya que con la utilización de esta se puede caracterizar los eventos de precipitación para los cuales debe ajustarse el factor de seguridad del diseño. En la misma se incluyen los períodos de retorno considerados, la intensidad de la precipitación y la duración de esta (Chow, 1994)

En la Tabla 4-9, se muestra el resultado obtenido para el análisis de la estación de Guayabal, en donde se puede observar, cuantitativamente, la magnitud de los eventos que pueden ser igualados o excedidos en un período de tiempo determinado. Los resultados se obtuvieron mediante un análisis de frecuencia de Gumbel (Valores Extremos Tipo I) haciendo uso del software Retorno2.0, de igual forma se realizó un análisis de confiabilidad con un 95% de confianza y una prueba de datos dudosos, de donde se obtuvieron resultados óptimos.

Tabla 4-9. Intensidades máximas de precipitación para tormenta de diseño.

Duración (min)	Láminas máximas de precipitación				
	Período de retorno (años)				
	5	10	25	50	100
	Estación Canalete				
5	12.26	13.12	14.21	15.01	15.81
15	30.55	33.28	36.73	39.29	41.83
30	50.34	56.22	63.66	69.17	74.65
60	69.35	78.42	89.88	98.38	106.81
120	87.54	98.73	112.86	123.35	133.76
180	96.45	108.31	123.3	134.41	145.45
360	108.95	123.78	142.53	156.43	170.24
	Estación de Bijagua				
5	12.21	13.5	15.13	16.34	17.54
15	21.55	23.79	26.62	28.72	30.8
30	28.57	31.52	35.25	38.02	40.77
60	45.69	50.19	55.88	60.1	64.3
120	64.33	70.58	78.48	84.34	90.15
180	88.89	101.48	117.38	129.18	140.9
360	111.76	131.79	157.1	175.88	194.51
1440	132.77	158.33	190.63	214.59	238.38

4.5.1 Caracterización del Huracán Otto

El huracán Otto, impactó la zona norte de Costa Rica en noviembre del 2016. Los efectos de este iniciaron el día 16, a pesar de que su ciclo de vida fue del 21 al 26 del mismo mes, y su salida del país se dio el 26 de noviembre como tormenta tropical dada la debilitación que experimentó por un sistema de baja presión. La cantidad de precipitación ocasionó gran impacto en las zonas de Upala, Bagaces y Bijagua, las cuales son zonas de interés para el estudio realizado; tuvo efectos considerables en la flora y fauna y grandes zonas de cultivos. Se registraron precipitaciones de hasta 300 mm en un lapso de 24 horas, lo que generó inundaciones y deslizamientos en las zonas afectadas. El 24 de noviembre, Otto, alcanzó una velocidad de vientos de 175 km/h y una velocidad de desplazamiento de 15 km/h. (Instituto Meteorológico Nacional, 2017)

Según los datos recopilados por las estaciones meteorológicas, se midieron precipitaciones acumuladas en 24 horas de 181.1 mm en Canalete y 236.2 mm en Bijagua. Estos registros evidencian la severidad del evento ya que, para Canalete, esta supera la lluvia para el período de retorno de 100 años, mientras que en Bijagua se aproxima a un

evento de 72 años. Es necesaria la recopilación de información más antigua de lluvia para precisar de mejor manera este dato.

4.5.2 Hidroestimador

El Hidroestimador es un modelo de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA), el cual es un satélite estimador de lluvia. Este tiene una resolución espacial aproximada de 4.9 km para Costa Rica y una resolución temporal horaria. Estos datos se obtienen desde los servidores del Centro de Aplicaciones e Investigaciones Satelitales (NOAA STAR). Para este estudio se obtuvieron los datos para el huracán Otto en las fechas del 21 de noviembre al 26 de noviembre del 2016 con información horaria.

En el caso de la subcuenca de Zapote se seleccionaron 31 puntos del Hidroestimador, los cuales son los más cercanos a la zona de estudio. En la Figura 4-6 se puede observar la precipitación acumulada de los tres puntos más cercanos a los poblados de Bijagua, Canalete y Upala.

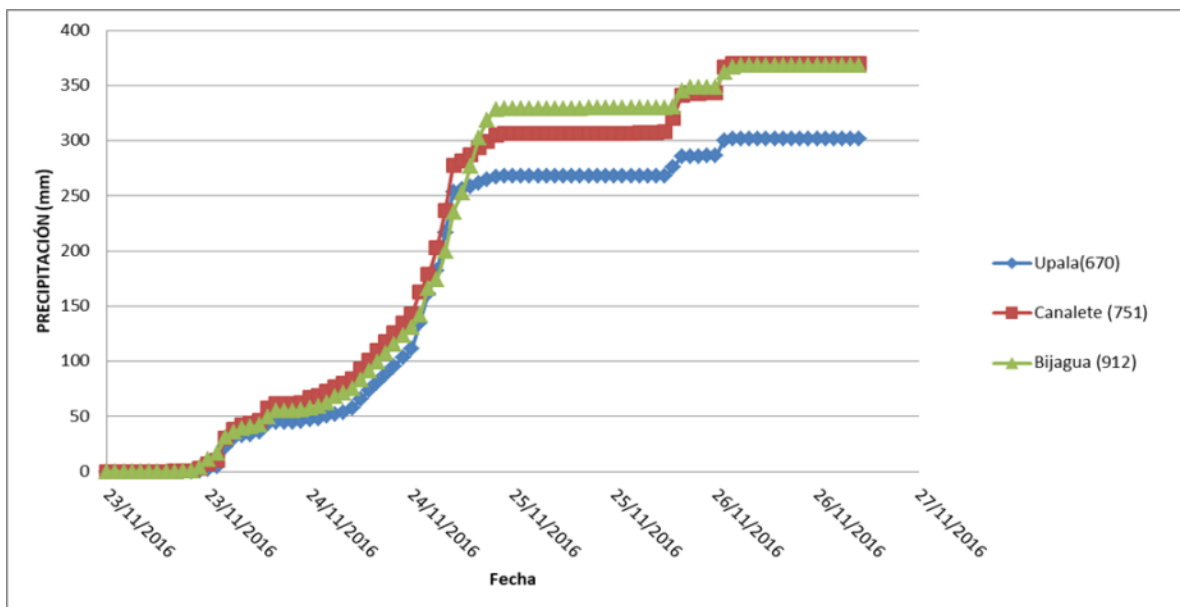


Figura 4-6. Precipitación acumulada del Hidroestimador para los puntos característicos de la zona de estudio.

4.6 Resultados de Simulación Hidrológica

En la Figura 4-7 se muestra el hidrograma en la salida de la cuenca para el huracán Otto. Según el modelo hidrológico, existe una salida de 2042 m³/s. Este pico coincide con la hora más catastrófica del evento, la cual se registró a las 8 de la noche del día 24 de noviembre del 2017. El segundo pico se dio el día 26 en horas de la tarde con un caudal máximo de 800 m³/s.

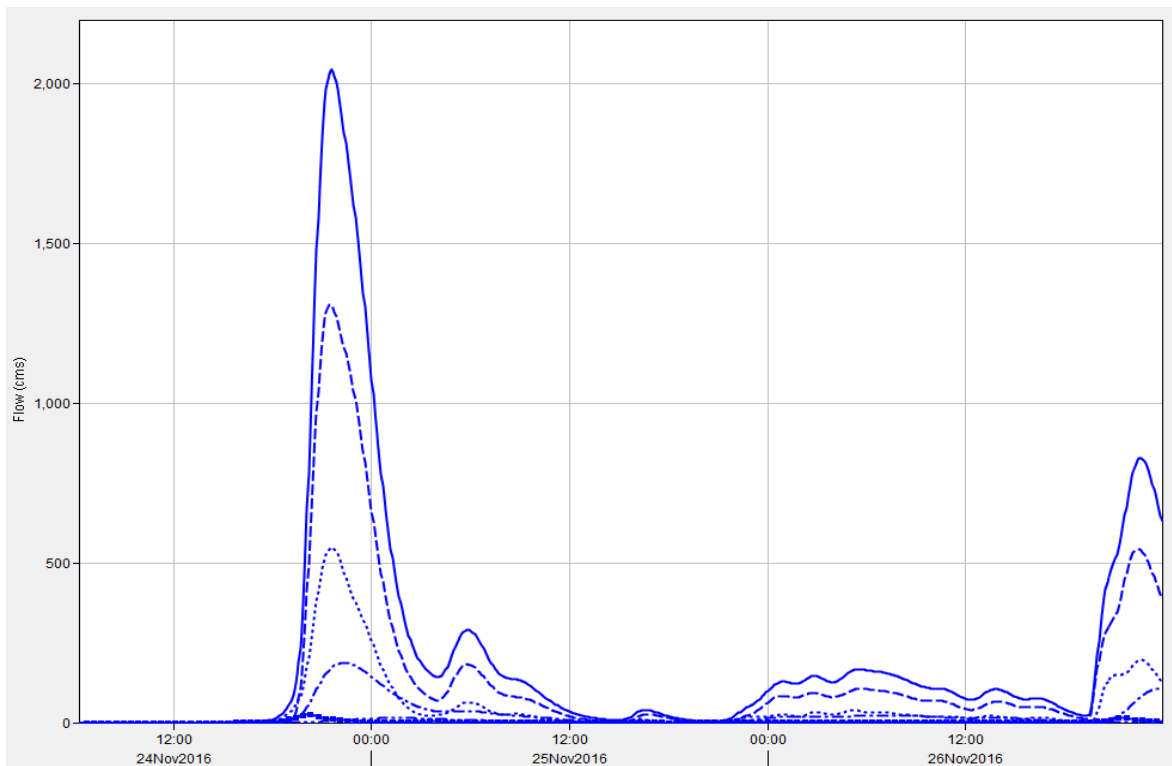


Figura 4-7 Gráfico del hidrograma de salida de la cuenca para el huracán Otto con 5 minutos de intervalo.

En la Tabla 4-10, se muestran los caudales y volúmenes máximos de cada uno de los escenarios. El periodo de retorno de 100 años muestra 2593.5 m³/s, sin embargo, su volumen es de 184.51 mm, comparado con 231.8 mm que tuvo el huracán.

Tabla 4-10 Caudales y volúmenes máximos de los escenarios establecidos

Período de Retorno	Caudal máximo (m ³ /s)	Volumen máximo (mm)
100	2593.5	184.51
50	2260.8	163.70
25	1937.9	143.52
Otto	2042.31	231.8

La diferencia mencionada anteriormente se puede observar en la distribución de ambas lluvias, donde el huracán Otto se distribuye diferente al periodo de retorno, como se observa en la Figura 4-8. Esta diferencia muestra que el volumen se distribuye en 1 pico, mientras que el huracán la distribuye en 3 picos diferentes.

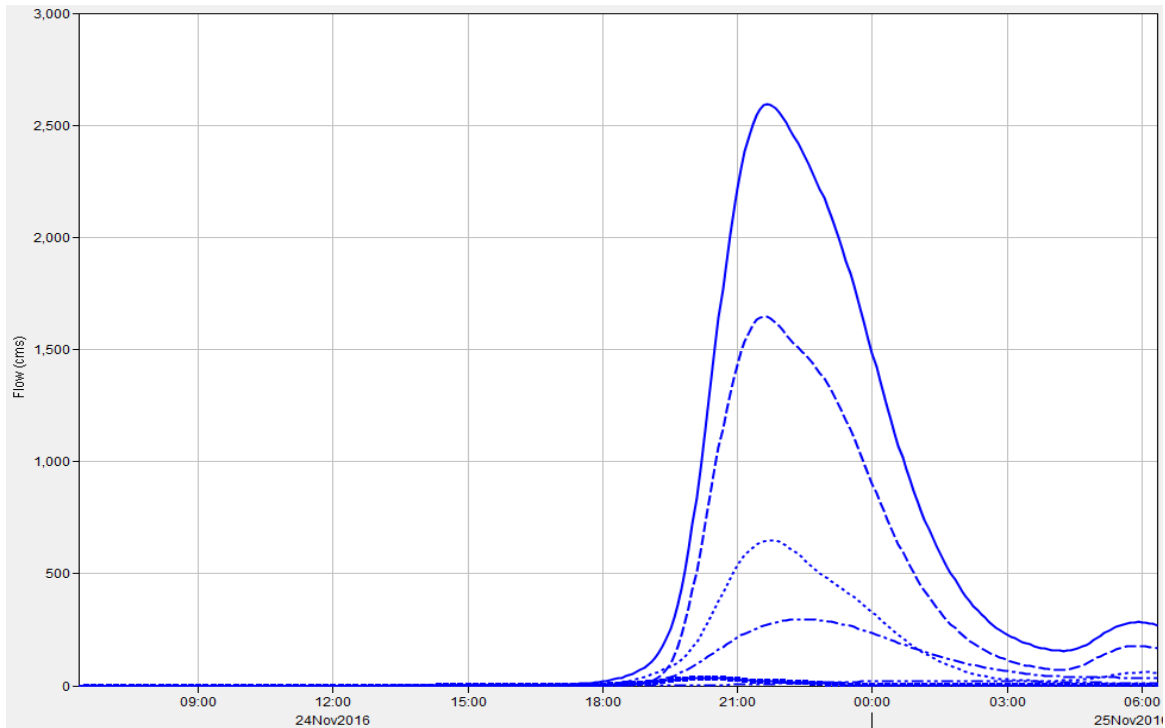


Figura 4-8 Hidrograma del caudal de salida del período de retorno de 100 años.

5 Modelación Hidráulica

5.1 Zona de estudio hidráulico.

Se realizó un estudio del comportamiento hidráulico en la cuenca del Río Zapote, más específicamente en el área de los poblados de Bijagua, Canaleta y Upala. El estudio consistió en visitas de campo, levantamiento de perfiles, una modelación hidráulica en HEC-RAS versión 5.1 y una modelación bidimensional con Flo2D.

La zona de modelación hidráulica se puede ver en la Figura 5-1, donde el modelo se dividió con respecto a las poblaciones más afectadas en la zona. El caso particular de la modelación de Upala, se consideró un área mayor debido a las características topográficas de la zona y por el grado de afectación del Huracán Otto a este lugar.

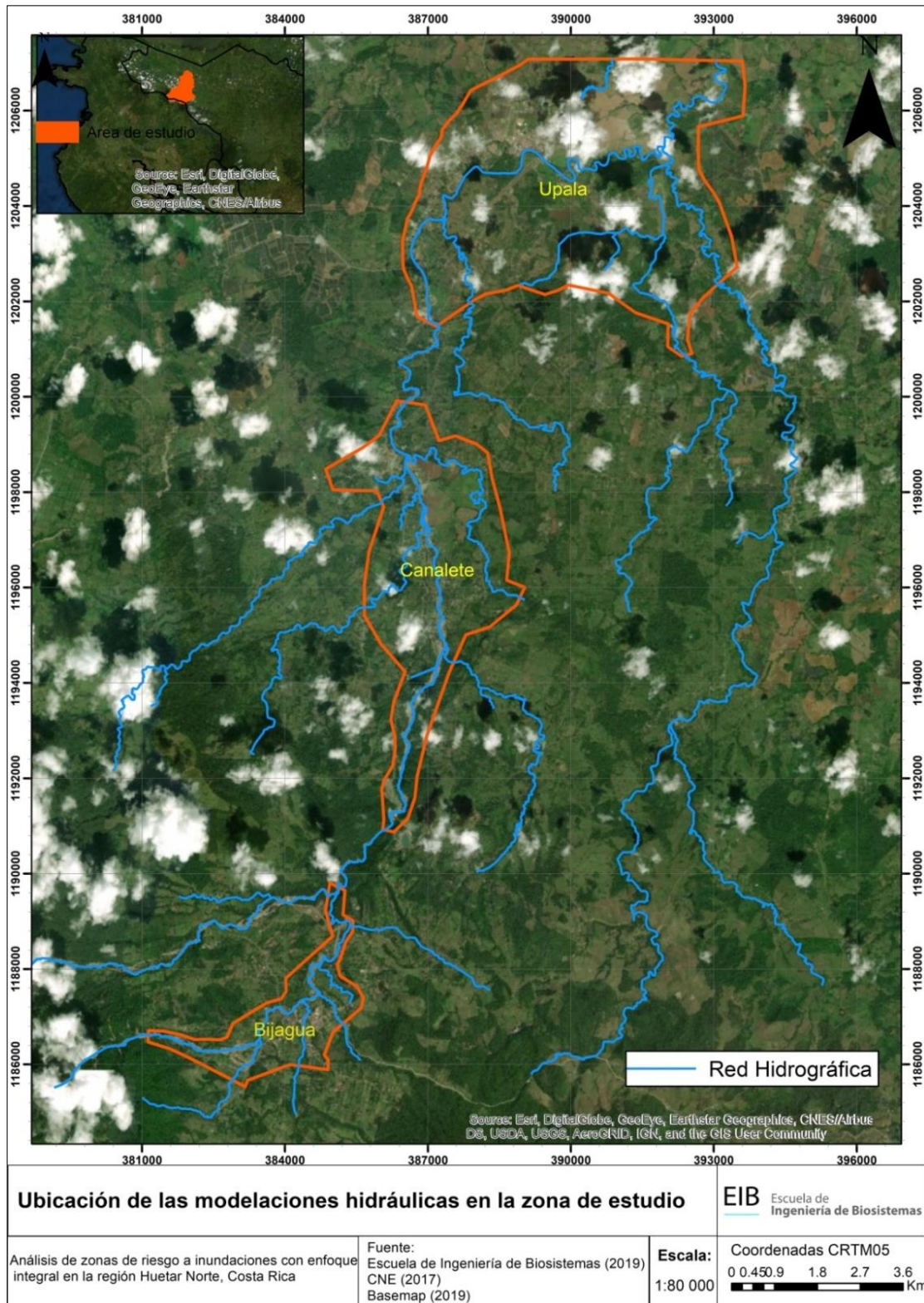


Figura 5-1. Mapa de ubicación de las modelaciones hidráulicas en la cuenca del Río Zapote.

5.2 Visitas de Campo

En total se realizaron tres visitas de campo en la zona de estudio, esto con el objetivo de conocer las características topográficas, climáticas y estructurales del lugar. Además, se consultó a la población sobre el impacto del huracán en las diferentes comunidades. Por último, se levantaron perfiles de río, perfiles de estructuras, muestras de suelo y levantamiento de puntos de inundación in situ. En el apéndice A se encuentran las anotaciones de campo para los puntos de GPS.

Visita 19 al 20 de Abril del 2018

Se realizó una visita de reconocimiento en los poblados de Bijagua, Canalete y Upala, se obtuvieron fotos del lugar y se realizó un reconocimiento del impacto del huracán en la parte alta de Bijagua (ver Figura 5-2). En el caso de Canalete y Upala se hizo un reconocimiento de la topografía, las condiciones actuales de los puentes y el cauce principal del río.



Figura 5-2. Fotos de la zona de Bijagua para la visita del 20 al 22 de Febrero del 2019

Visita del 20 al 22 de Febrero del 2019

Se levantaron perfiles del Río Zapote en los puentes ubicados en Bijagua, Canalete y Upala, esto mediante el equipo Disto S910. Se realizó una evaluación en la zona de Bijagua y Canalete, consultando sobre los lugares a los que llegó la inundación y el grado de afectación. En el caso de Upala se preguntó por la misma condición, pero tomando los valores de altura de inundación en el pueblo. Estos valores se obtuvieron debido a que el impacto de la inundación sucedió en centro de Upala y sus alrededores (ver Figura 5-3).



Figura 5-3 Fotos de la zona de Upala para la visita del 20 al 22 de Febrero del 2019

Visita del 5 al 6 de Marzo del 2019

En la última visita de campo se levantaron los puentes ubicados en la zona de Bijagua y Upala. Se visitó la parte alta del río Zapote para ver los efectos del huracán en un hotel de la zona. Se verificó el estado de los puentes y se determinó que la estructura hidráulica más relevante de la zona, es una alcantarilla a la salida de Bijagua (ver Figura

5-4). En el caso de Upala solo se verificó información de campo y se realizó una evaluación general de la zona.



Figura 5-4 Fotos de la zona de Bijagua para la visita del 5 al 6 de Marzo del 2019

Puntos levantados en campo

Durante las visitas de campo se mapeo la inundación en las diferentes zonas del modelo bidimensional. La información de estos puntos varía dependiendo de la zona, en el caso de Upala se cuenta con datos de altura, los cuales fueron obtenidos por medio de consultas a las personas residentes de la zona y mediante mediciones en campo (ver Figura 5-5).

Las alturas se distribuyen por todo el centro del pueblo confirmando el nivel de impacto del evento extremo. La altura máxima registrada fue de 2.5m en un centro urbano con un alto grado de impacto. Las condiciones planas de la zona facilitaron la acumulación de agua con lodos en el centro del pueblo, dando como resultado los datos registrados.

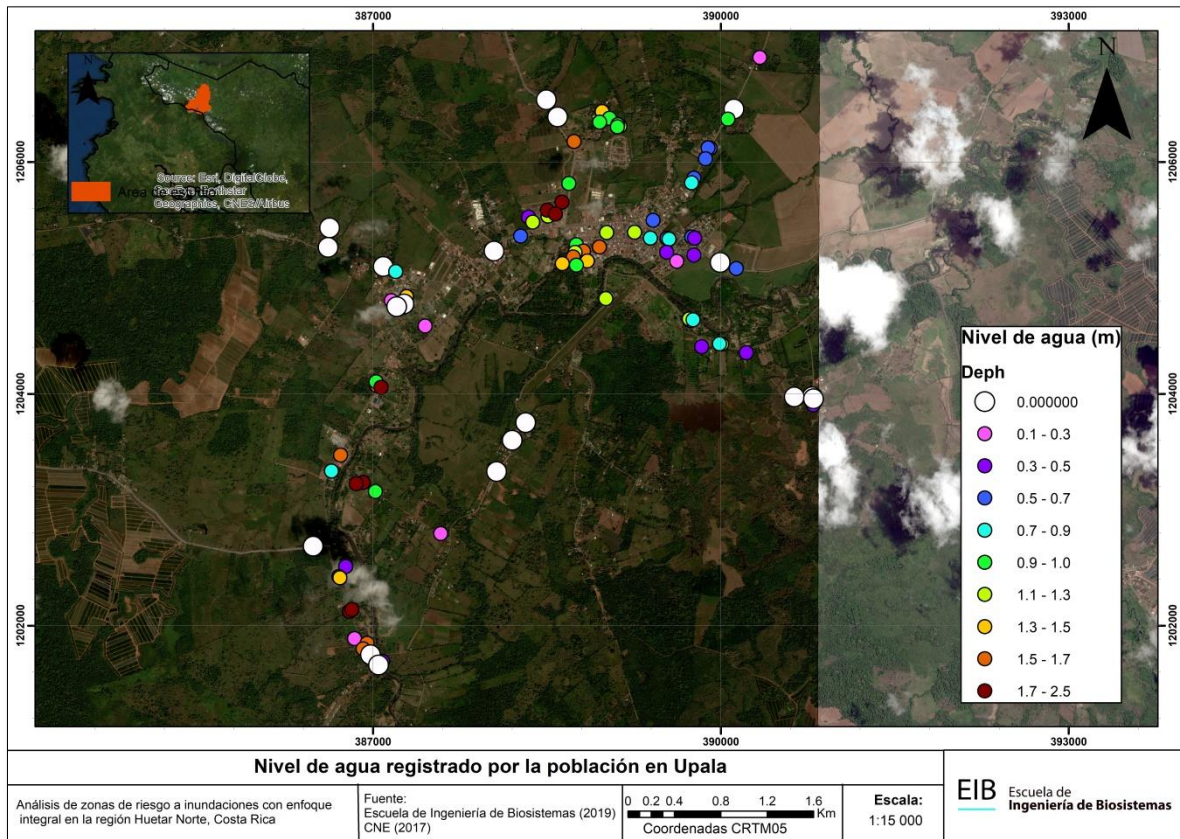


Figura 5-5. Mapa de nivel de agua registrado por la población de Upala para el huracán Otto.

En el caso de la inundación en Bijagua no se dio una afectación directa en el pueblo. Lo cual ocasionó que no se lograra obtener valores de altura en estructuras, pero si se definió una ubicación aproximada de la inundación (ver Figura 5-6).

En Bijagua el impacto más grande se dio en la quebrada Pichardo, la cual se encuentra a la entrada del pueblo camino a Upala. En la salida del pueblo de Bijagua se encuentra una quebrada intermitente que no ocasionó problemas y cuenta con una estructura hidráulica construida después del paso del Huracán. Por último el río principal de la zona presentó una ampliación en sus márgenes al mover gran cantidad de lodos, piedras y árboles, pero esto no tuvo un impacto directo en las construcciones cercanas al río.

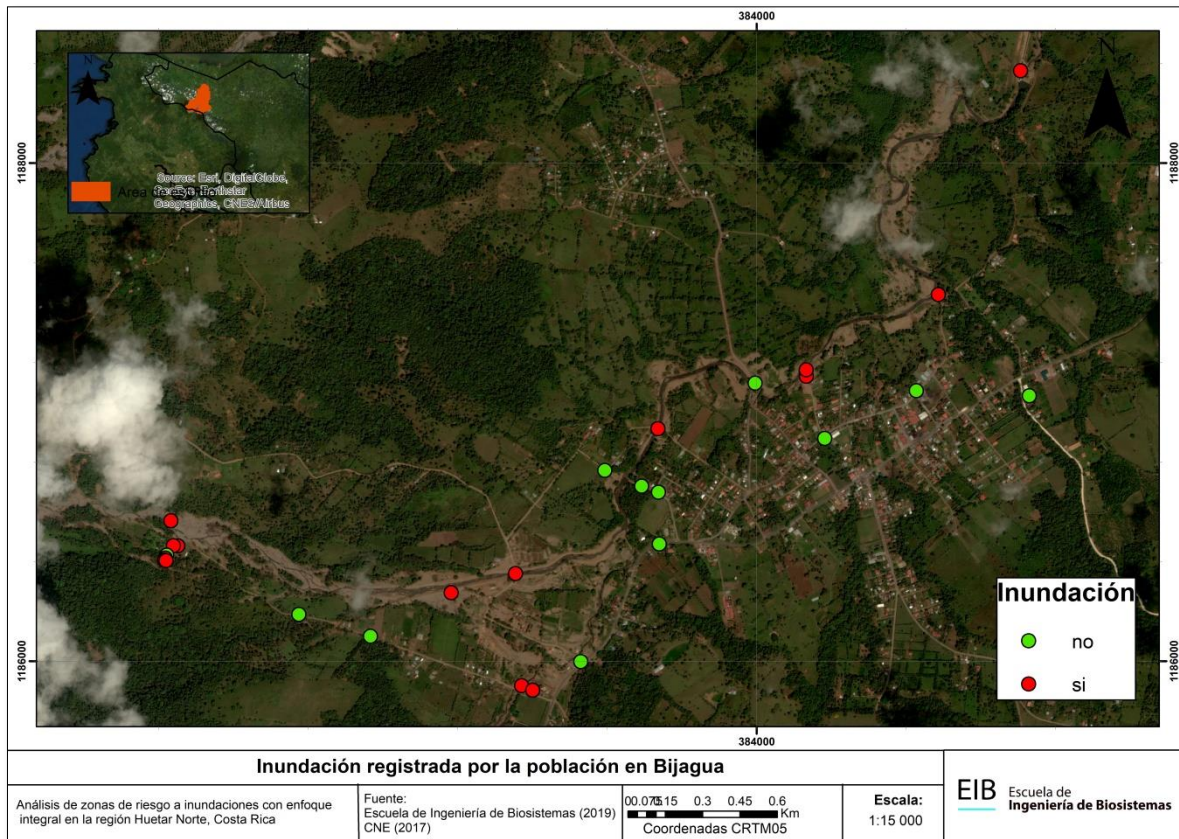


Figura 5-6. Mapa de inundación registrada por la población de Bijagua para el huracán Otto.

En la zona de Canalete a lo largo del río Zapote se observó una ampliación de los márgenes del río debido a la gran cantidad de piedras, lodos y troncos, resultados de la inundación. El centro de Canalete no se vio afectado, pero algunas viviendas cercanas al río tuvieron un grado leve de afectación. En la Figura 5-7 se aprecia como los puntos cercanos al margen del río son los únicos con presencia de inundación.

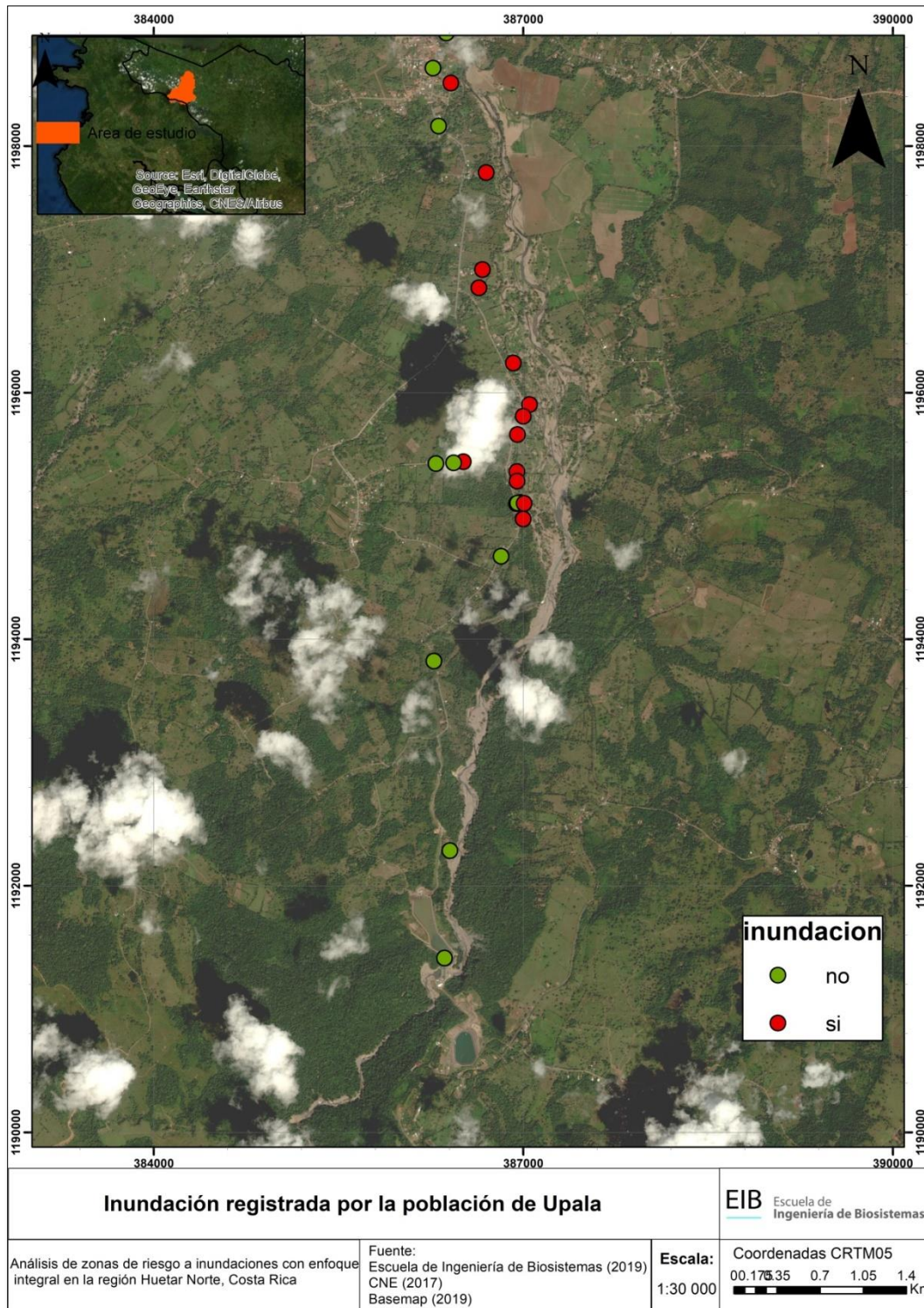


Figura 5-7 Mapa de inundación registrada por la población de Bijagua para el huracán Otto.

5.3 Geometría del río y de las planicies para la modelación

Para la modelación bidimensional en las tres zonas se utilizó una malla de 5m (ver Tabla 5-1). Esta se conforma con información de elevación, límites para número Froude, estructuras de reducción, perfiles topográficos para canales, n de Manning, entradas y salidas de agua. En el caso particular de Upala se cuenta con la mayor cantidad de elementos obteniendo el modelo más complejo.

Tabla 5-1 Caracterización del modelo bidimensional en Flo2D

Zona	Área (km ²)	Malla (m)	Número de elementos
Bijagua	5.73	5	229344
Canalete	16.02	5	640727
Upala	31.27	5	1250623

La construcción del mallado se realizó por medio de la definición del área de modelación, utilizando las imágenes satelitales del WorldView 3 y la información recopilada de las visitas de campo. Los valores de elevación y n de Manning se asignaron por número de elemento utilizando archivos *shapefile* (ver Figura 5-8), además en el Apéndice B se puede observar los modelos de elevación para las otras modelaciones. Por último, se establecieron las entradas de agua por medio de hidrogramas obtenidos de HEC-HMS y se estableció la salida del agua en la parte baja del modelo.

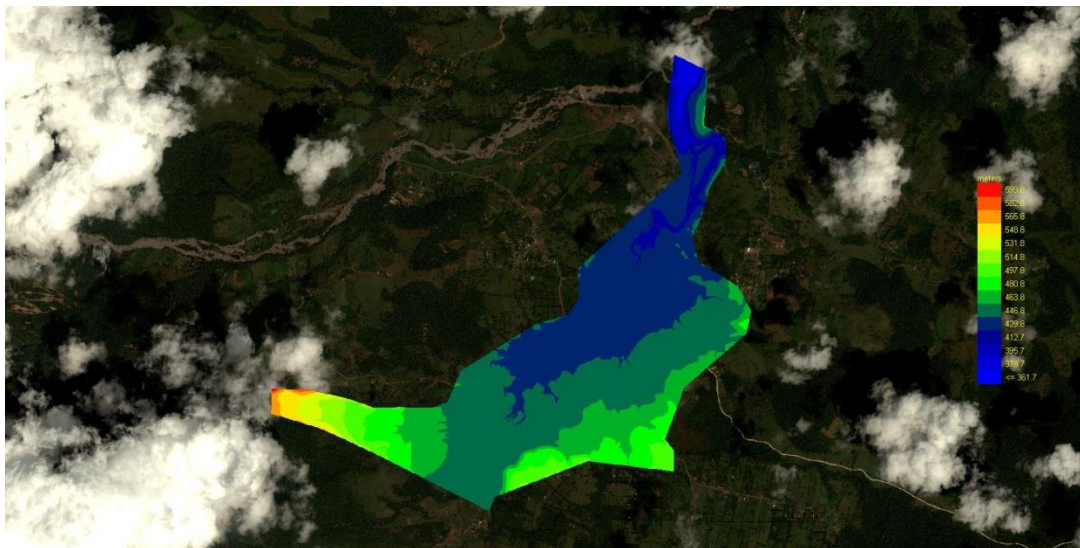


Figura 5-8. Modelo de elevación digital en el área del estudio bidimensional para Bijagua.

La conformación del modelo para cada zona presenta variaciones según las características topográficas, estructurales y climáticas. A modo de ejemplo en la Figura 5-9

se puede ver el modelo para la zona de Bijagua, el cual cuenta con información de estructuras y un canal a la salida del pueblo sobre la carretera principal hacia Canalete.

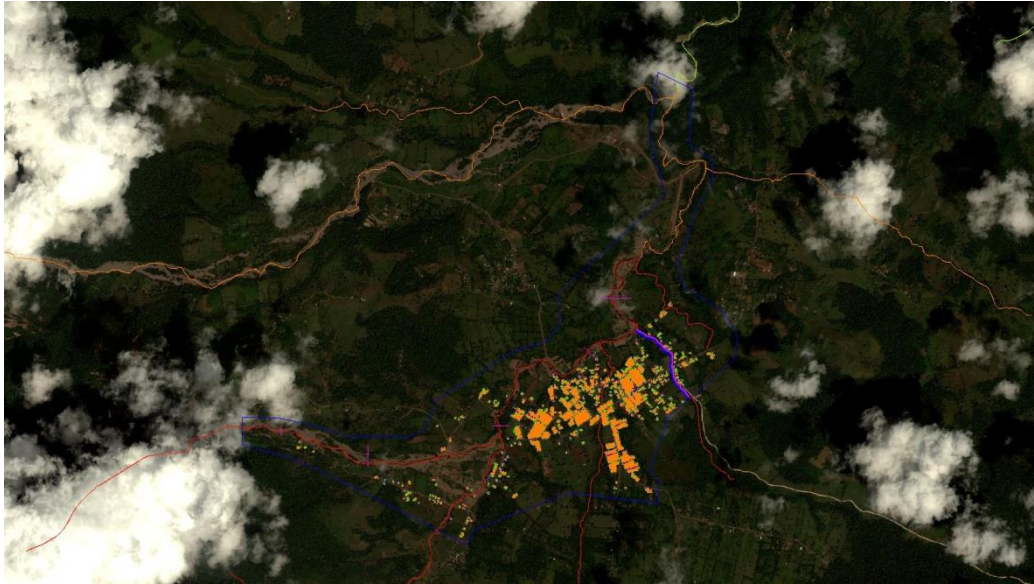


Figura 5-9. Componentes que conforman la modelación bidimensional en el programa Flo2D para Bijagua

Un componente importante en el modelo son las estructuras de reducción, las cuales permiten establecer elementos de bloqueo. Estos elementos ocasionan una disminución del área hidráulica en las zonas urbanas (ver Figura 5-10). Esto permite tener una modelación más precisa en el centro de los poblados, ya que, al tener una reducción del área de inundación, condicionara las condiciones de flujo aumentando velocidades en los casos más críticos.



Figura 5-10. Mallado del modelo bidimensional para la Bijagua.

Una característica singular de estos modelos es el contar con una malla de una resolución de 5m. Esto nos permite modelar el flujo sin necesidad de canales en los ríos más grandes (ver Figura 5-11) como el caso del río principal de Bijagua. La diferencia entre los perfiles tomados con el DISTO S910 y lo obtenido de las curvas de nivel que alimentan el mallado, presenta un comportamiento parecido en general. Es importante recordar que esto es válido por tener una resolución espacial muy fina.

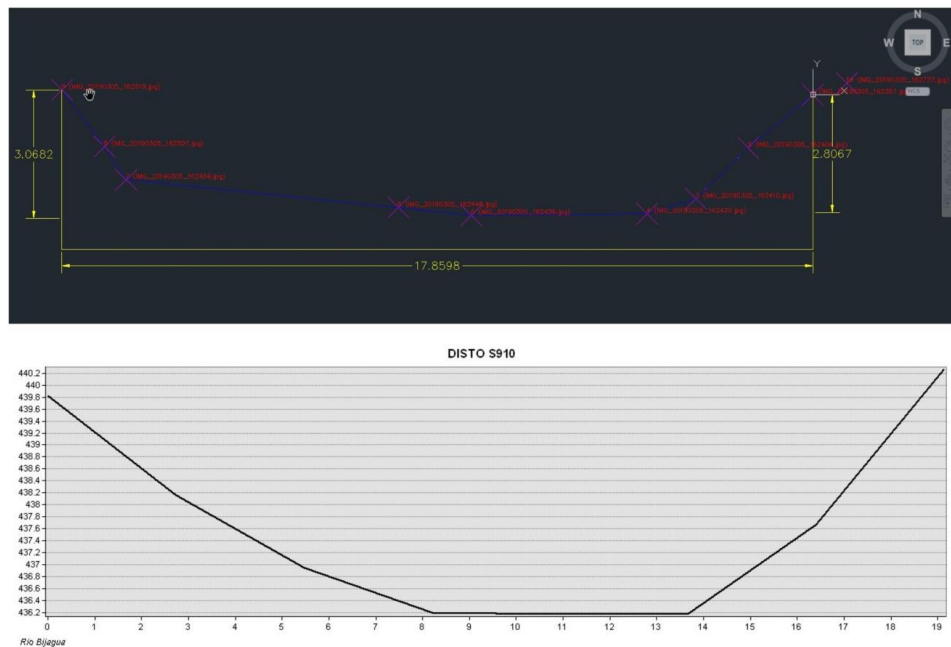


Figura 5-11. Perfil del DISTO 2910 y perfil del río de las curvas de nivel.

5.3.1 Estructuras hidráulicas.

Las estructuras hidráulicas presentes por zona son: 5 puentes para Bijagua, 1 para Canalete y 2 para Upala. Estos puentes se modelaron en HEC-RAS para ver su comportamiento bajo las condiciones del huracán Otto y los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. En el caso que el flujo de agua no sobrepasara la capacidad hidráulica del puente y sus características estructurales no funcionarían como un elemento de restricción de flujo, no se considera la estructura para la modelación bidimensional. Con esto se busca limitar los problemas de estabilidad en el cálculo por el uso de canales de gran extensión.

Considerando lo mencionado anteriormente en Canalete no se consideró el puente en la modelación debido a que este se encuentra a una altura mayor de los 10m. En Upala se consideró el puente en el río principal debido a su cercanía al centro del pueblo y en Bijagua se incluyó el puente de la quebrada intermitente debido a que es una alcantarilla nueva y los otros puentes no representan una condición de peligro. En el Apéndice C se pueden ver los resultados adicionales de todas las modelaciones hidráulicas.

En el caso de la alcantarilla en Bijagua se cuenta con 2 tuberías de diámetros de 2.194m y 2.871m (ver Figura 5-12). Esta es una estructura construida después del paso del huracán. La capacidad hidráulica de la alcantarilla es aproximadamente de 45 m³/s y el perfil de la estructura se tomó con el DISTO S910. Las condiciones aguas abajo son con presencia de vegetación y canal angosto, mientras aguas arriba se tiene una mayor cantidad de suelo desnudo y un canal más ancho.

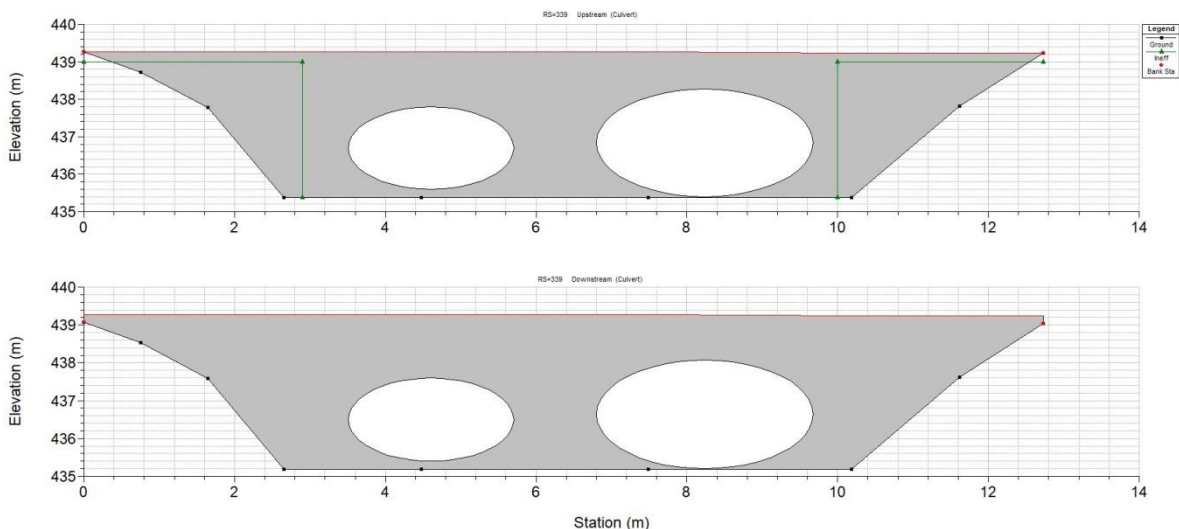


Figura 5-12 Vista aguas arriba y aguas debajo de la alcantarilla ubicada en Bijagua.

En el modelo bidimensional la estructura se monta con los valores de la curva de descarga (ver Figura 5-13). Estos valores se establecen para un elemento de entrada y salida en el mallado considerando el uso de un canal que facilite el paso del flujo.

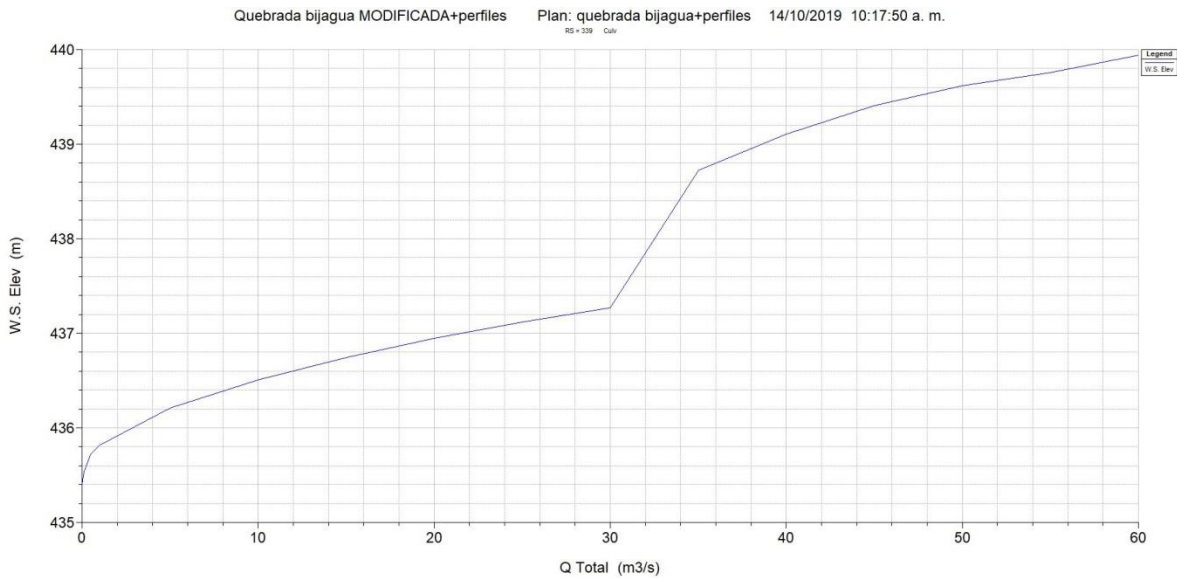


Figura 5-13 Curva de descarga de la alcantarilla en la calle principal de Bijagua.

En el río principal de Bijagua encontramos tres puentes enumerados en orden de aguas arriba a aguas abajo. El primer puente (ver Figura 5-14) se encuentra en una zona alejada del centro del pueblo con una altura aproximada de 5m.

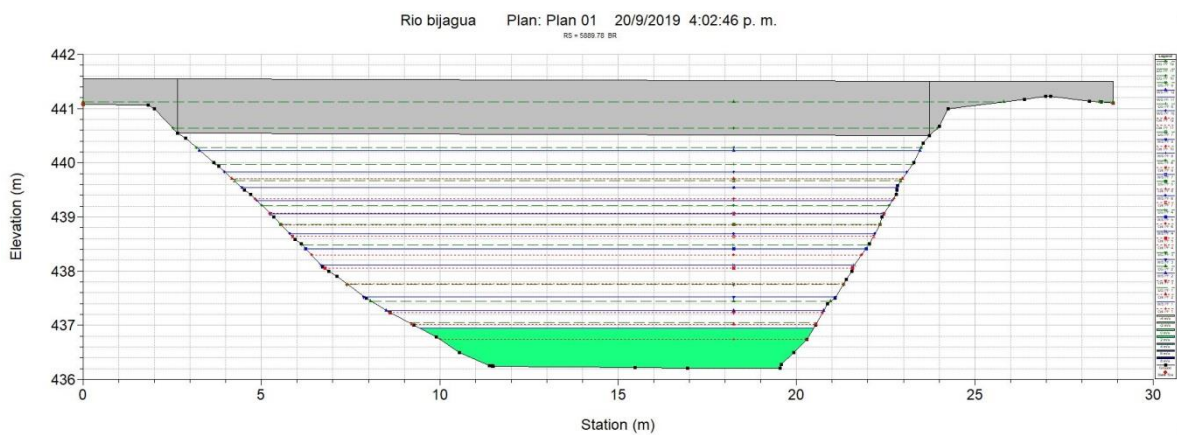


Figura 5-14 Perfil del puente ubicado en Bijagua aguas arriba del pueblo.

En el puente 2 tenemos una estructura en mal estado con un pilar de concreto bastante afectado por el paso del tiempo. El puente tiene 23m de largo y una altura máxima de 3.8m en la parte del pilar central. Una gran cantidad de partes del puente son de madera gastada.

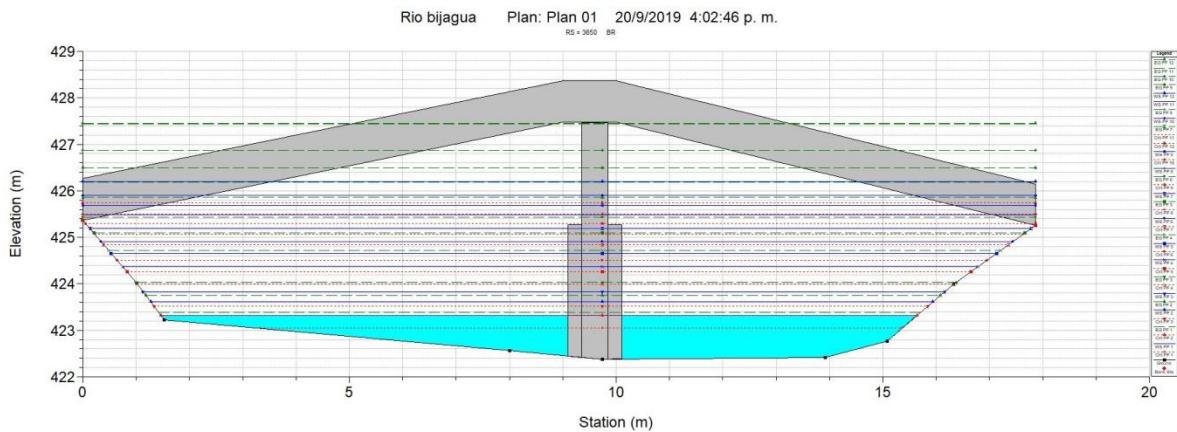


Figura 5-15 Perfil del puente ubicado en Bijagua a un costado alejado del pueblo.

El ultimo puente en el río principal (ver Figura 5-16) tiene un largo de 16.2m y una altura de 6.2m. Este puente presenta condiciones parecidas aguas arriba y aguas abajo, con presencia de vegetación en los márgenes y de una pendiente leve en el cauce.

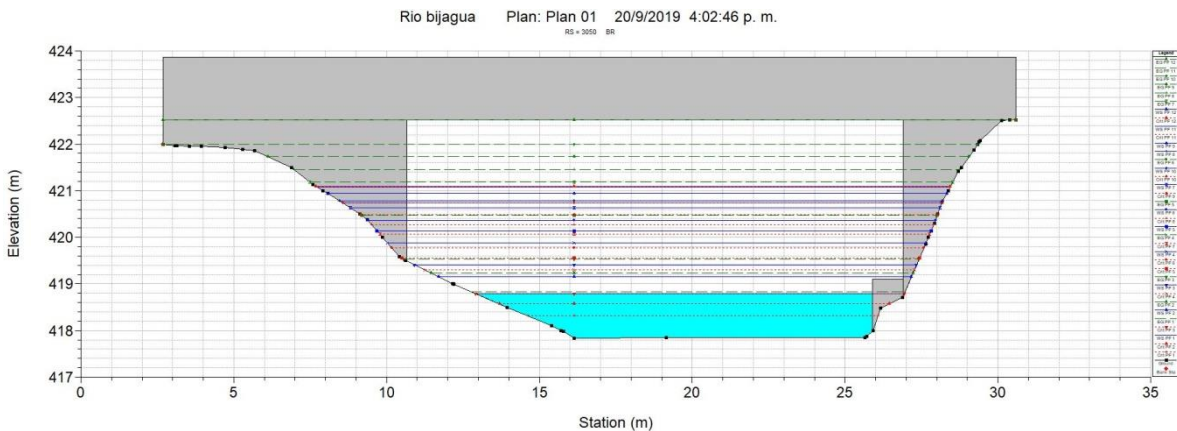


Figura 5-16 Perfil del puente ubicado en Bijagua más cercano del pueblo.

El puente en la zona de Canalete (ver Figura 5-17), se encuentra a un costado del pueblo tiene una longitud de 53.4m y una altura superior de 10m. Este puente presenta un base en el centro de 1,20 m de ancho en la base y 8 m de largo. Una característica notoria es que el puente solo tiene flujo de agua en el lado derecho.

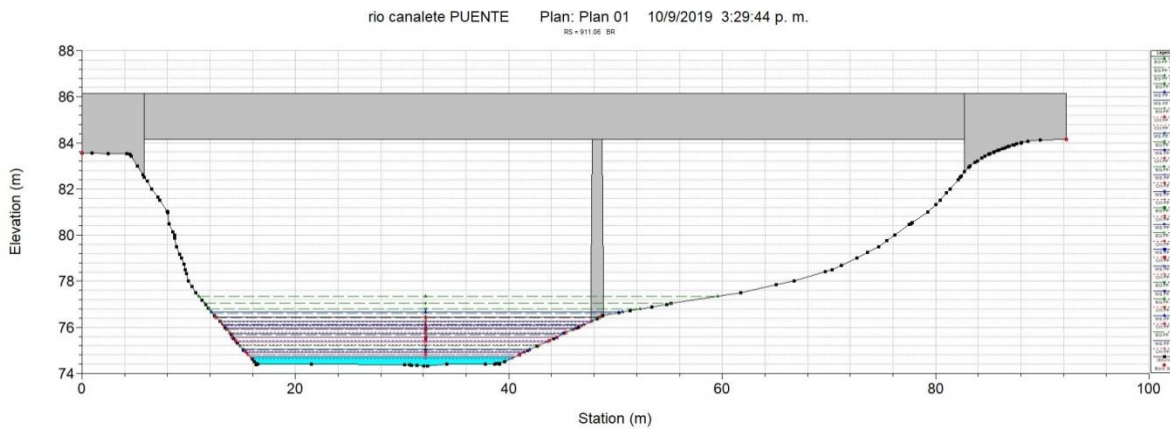


Figura 5-17 Perfil del puente ubicado en Canalete.

En la subcuenca de Upala, se tienen dos puentes principales. El puente de Upala es un puente de tipo armadura de estructura metálica que cruza el río Zapote ubicado a unos 8 metros sobre el nivel habitual del río. Este puente mide alrededor de 55 metros de largos y un contrafuerte visible en el sector izquierdo de este. En la Figura 5-18 se muestra el perfil aguas arriba con las elevaciones de diferentes caudales. Se muestra que el huracán Otto (EGFP 12) no llegó a tocar la estructura, información corroborada por los habitantes de la zona.

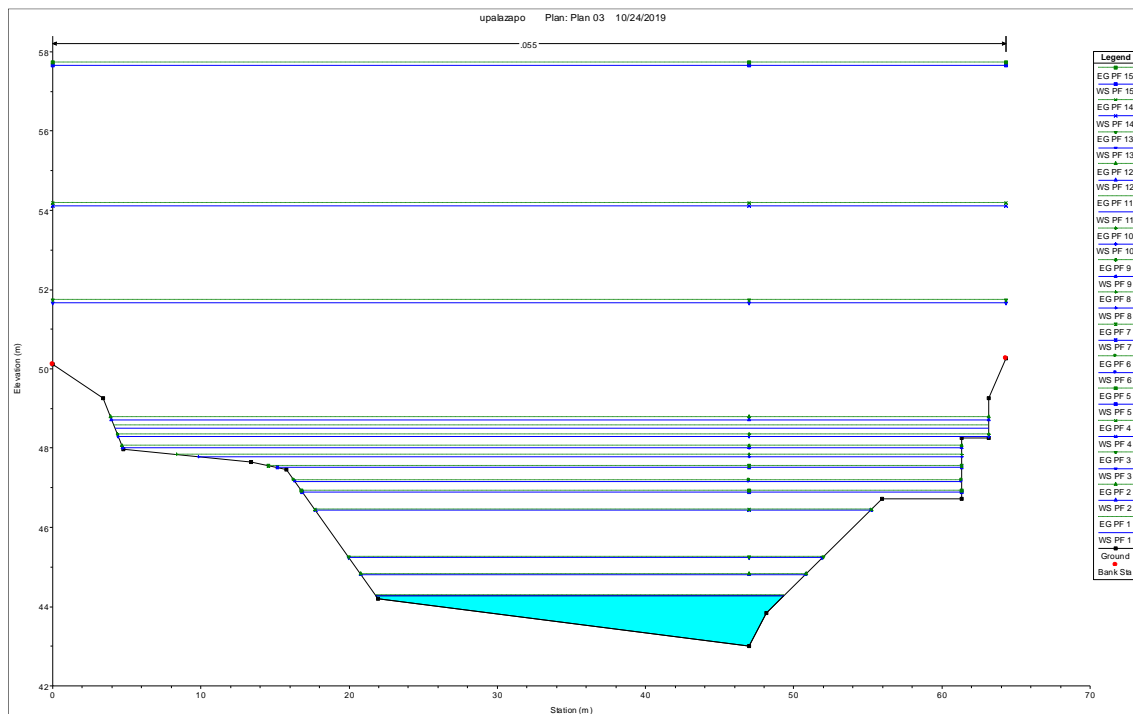


Figura 5-18 Perfil del río donde se ubica el puente del río Zapote en Upala.

En la Figura 5-19 se muestra la estructura del puente que se montó en HEC-RAS, donde se agregó el contrafuerte y una base que sostiene la estructura de ese lado. La figura muestra el perfil aguas arriba y aguas abajo de la estructura. El espesor de la calle es de 1 metro y su ancho de alrededor de 6 m. Las dimensiones de la estructura fueron tomadas mediante un DISTO, el cual toma las dimensiones de estructuras desde un punto de ubicación.

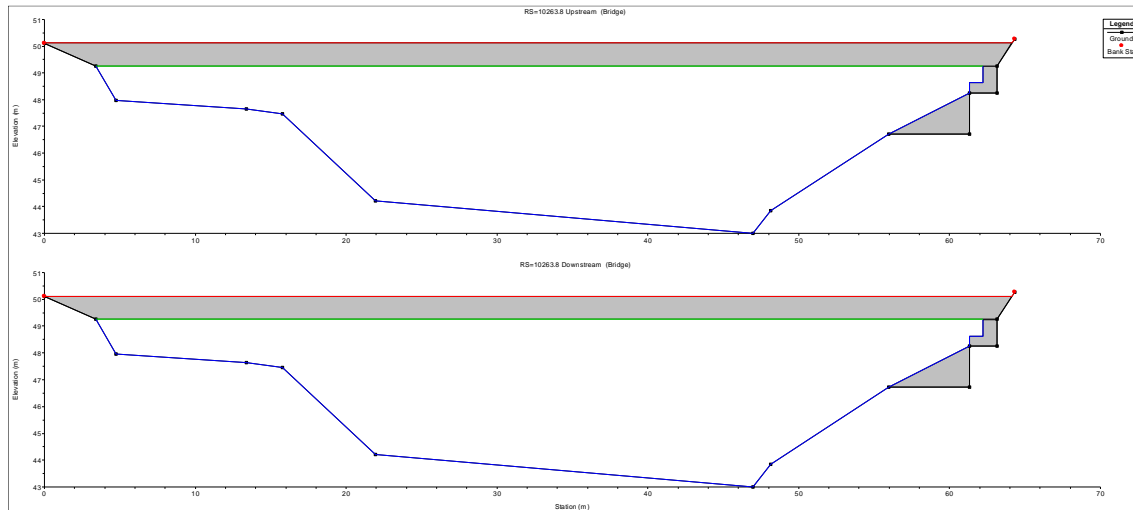


Figura 5-19 Puente de Upala aguas arriba y aguas abajo.

La curva de descarga nos muestra el comportamiento de la sección transversal en donde está ubicado el puente. Se puede observar el incremento que tiene a caudales menores, hasta una altura de 4 metros para caudales menores a $100 \text{ m}^3/\text{s}$ (ver Figura 5-20).

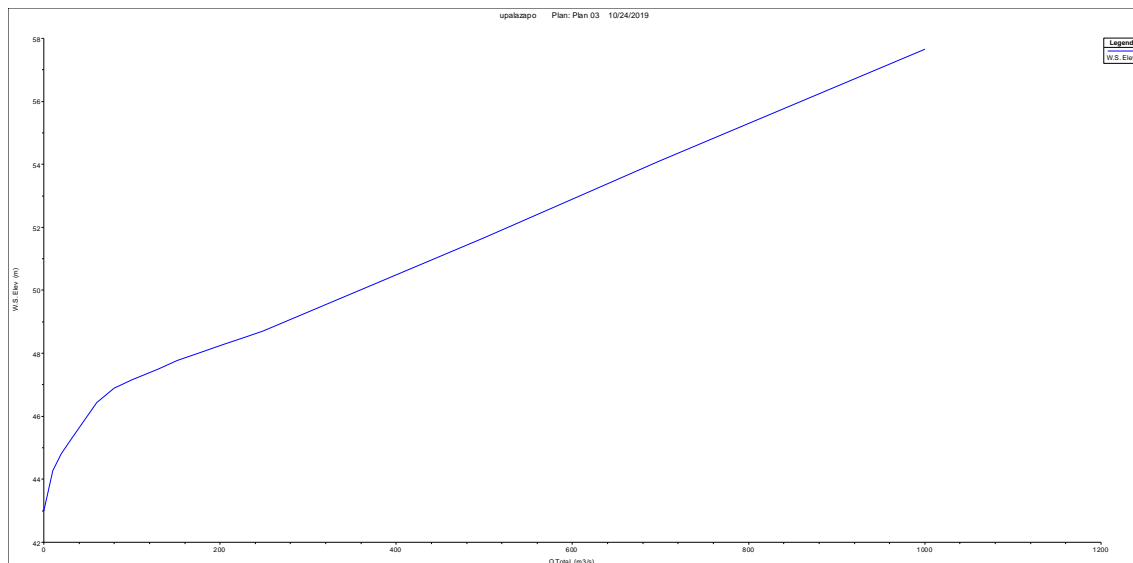


Figura 5-20 Curva de descarga para el puente del Río Zapote en Upala.

El puente ubicado en Chimurria es un puente de tipo viga, enterradas en el suelo en sus dos extremos por el ancho que este tiene. El largo es de 25 metros, un espesor de 1 m y un ancho de calle de 4.5 m. Según se muestra en la Figura 5-21, este se inunda a partir de un caudal de $65 \text{ m}^3/\text{s}$ en el perfil 13.

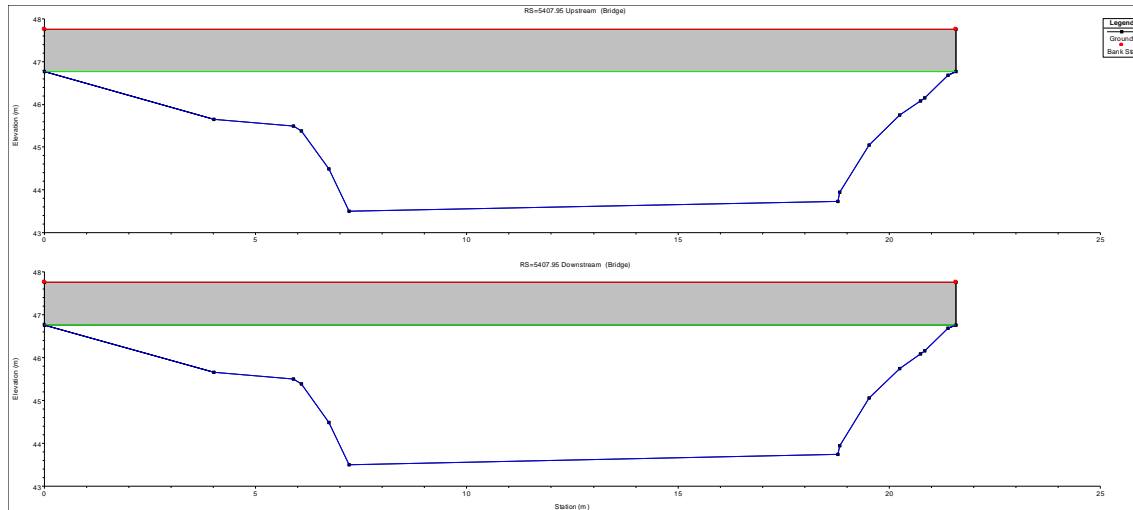


Figura 5-21 Puente del río Chimurria aguas arriba y aguas abajo

5.4 Coeficientes de rugosidad

Para los coeficientes de rugosidad se establecieron una serie de valores (ver Tabla 5-2) para cada una de las coberturas establecidas en el uso de suelos. El mapa de uso de suelos se afino manualmente para cada área de la modelación hidráulica para tener datos más exactos por zona. En el caso de las nubes y la sombra nubes se consideró un n de Manning de 0.15 ya que estos pixeles estaban ubicados cerca de bosques reales en la imagen satelital.

Tabla 5-2. Valores de N de Manning para las diferentes coberturas de suelo.

Cobertura	N Manning
Bosque	0.15
Agua	0.055
Nubes	0.15
Sombra Nubes	0.15
Suelo desnudo	0.022
Urbano	0.018
Pastizal	0.06
Zona agrícola	0.04

En el caso de Bijagua se observa un predominio de los pastizales (ver Figura 5-22), Esto ocasiona que el flujo de agua se mueva con mayor facilidad que en bosque al tener un valor de n de Manning menor. En el caso del centro del pueblo no sufrió los efectos directos del Huracán.

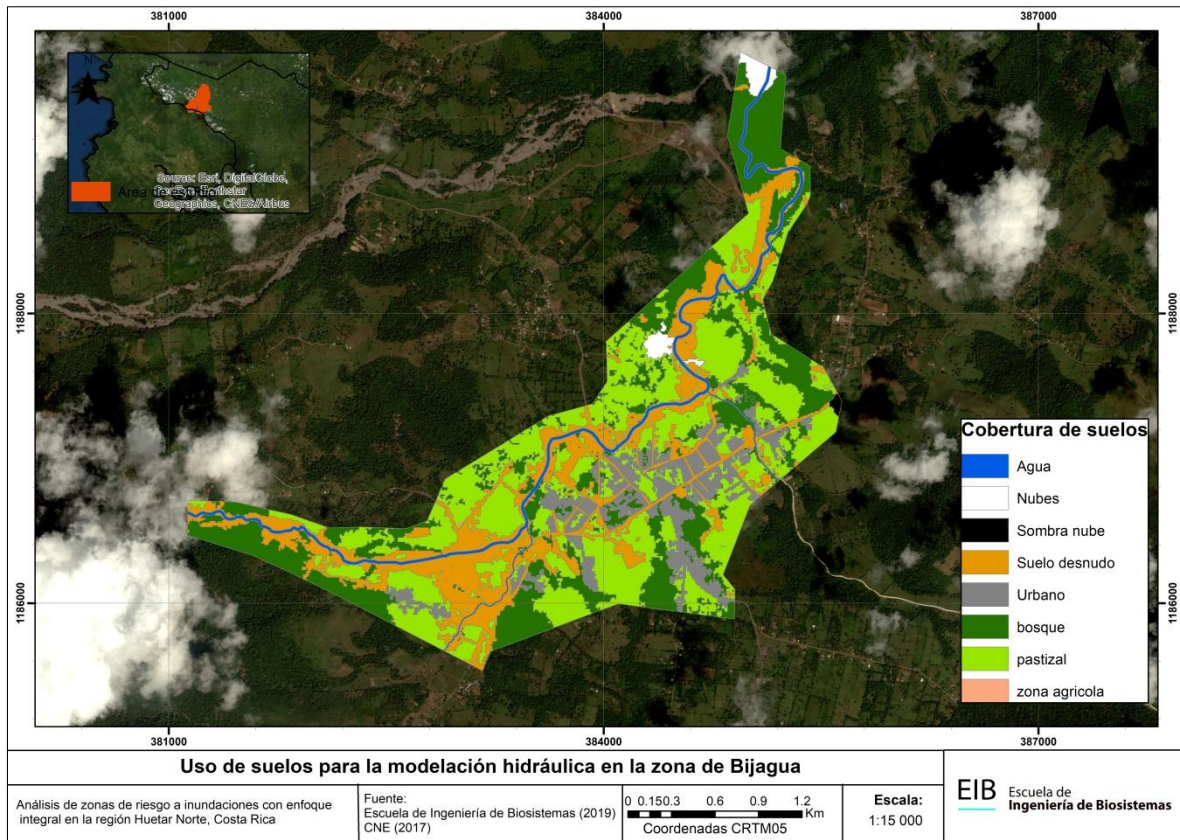


Figura 5-22. Mapa de uso de suelos afinado para la zona de Bijagua.

Para Canalete en la zona alta predominan los bosques y en el resto de la zona de modelación la cobertura más común son los pastizales (ver Figura 5-23). El centro de Canalete se encuentra en la parte baja y a una altura considerablemente alta del cauce del río. Es importante mencionar que ambas imágenes satelitales están prácticamente libres de nubes, lo cual no provoca cálculos enmascarados. Además para ambas zonas se utilizó una misma imagen del WorldView 3 para una misma fecha.

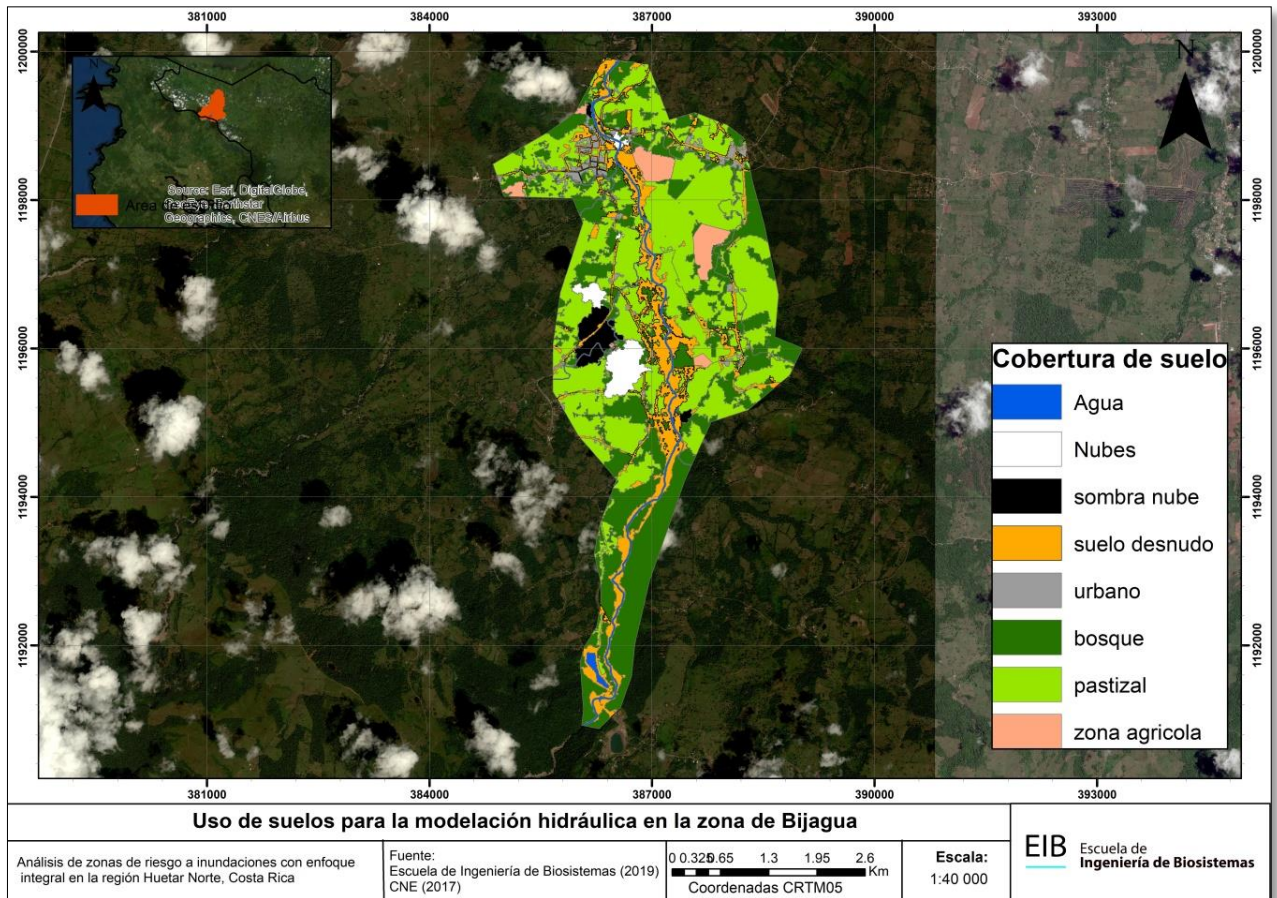


Figura 5-23. Mapa de uso de suelos afinado para la zona de Canaleta.

En Upala en la parte alta predominan los bosques y en la zona baja se tiene presencia de zonas agrícolas y pastizales (ver Figura 5-24). A lo largo del cauce principal se tiene bosques alrededor y un problema es la ubicación del centro del pueblo, ya que está muy cerca del cauce principal.

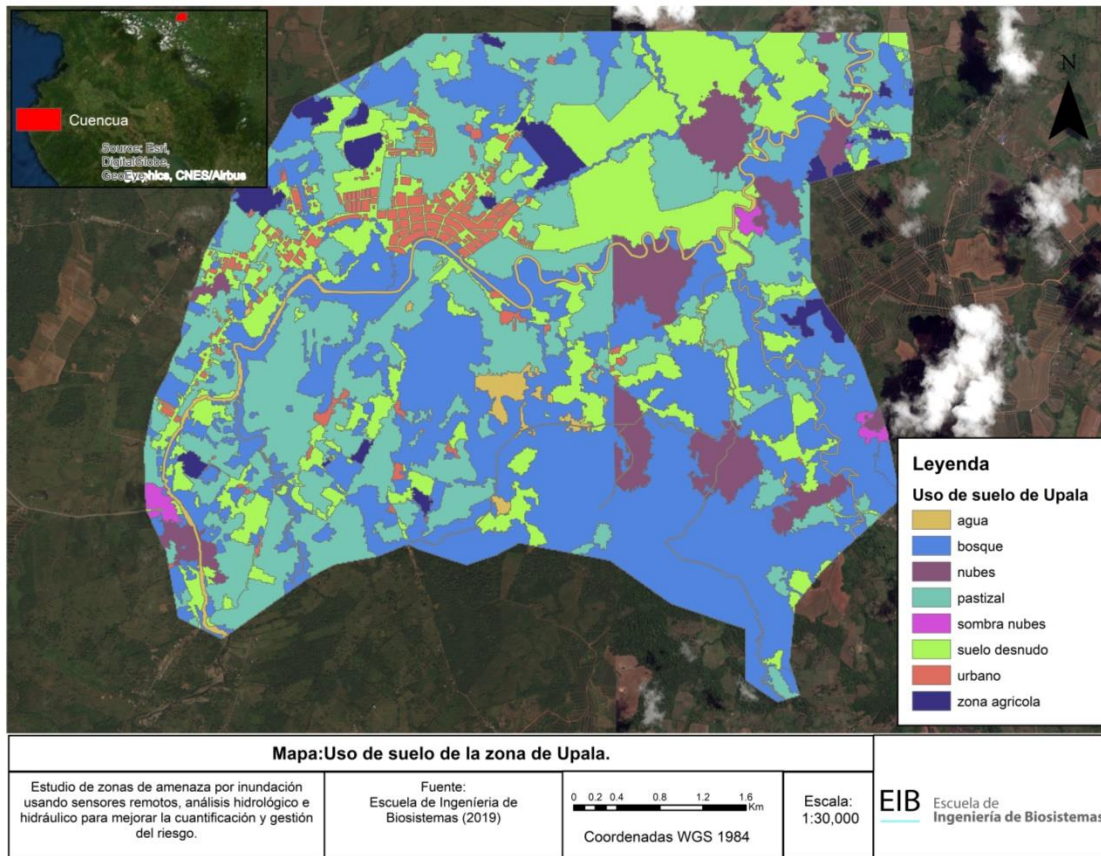


Figura 5-24 Mapa de uso de suelos afinado para la zona de Upala.

5.5 Condiciones de borde y régimen de flujo

Las condiciones de borde establecen las entradas y salidas de agua que va a tener el modelo bidimensional. Estas se definen por número de elemento y varían en base de las subcuencas definidas en la modelación hidrológica. Cada modelo tendrá entradas y salidas diferentes considerando las condiciones de la topografía y la distribución de subcuencas.

La correcta asignación de estas condiciones permite generar estabilidad en los cálculos que realiza el programa y proporciona los resultados más acordes a la realidad. Es importante mencionar que los primeros metros después de una entrada de agua se deben de tomar como una zona de transición, para que el flujo se adecue a las condiciones de la malla.

El modelo trabaja con flujo subcrítico y supercrítico considerando las condiciones particulares para cada elemento de la malla. En el caso de tener números de Froude muy elevados en zonas planas, se puede establecer límites para forzar el tipo de flujo en elementos específicos. Estas modificaciones se verifican por elemento para garantizar estabilidad en el cálculo y no generar resultados enmascarados.

En la Figura 5-25 se observan las condiciones de borde para el modelo de Bijagua. Se cuenta con 6 hidrogramas de entrada, los cuales están distribuidos en base a las subcuencas que afectan directamente al pueblo. La entrada B6 corresponde al río principal de la zona y es el que lleva la mayor cantidad de agua, pero no ocasiono efectos directos en la población. Otra entrada importante es la B5, ya que en esta se estableció un canal para modelar el flujo del agua.

Las salidas del modelo se establecieron en la zona baja del área de estudio, ya que se presenta una condición donde el flujo se ve obligado a ir por una única ruta debido a las características topográficas de la zona. En este caso se estableció que todo el elemento de la parte baja fueran nodos de salida.

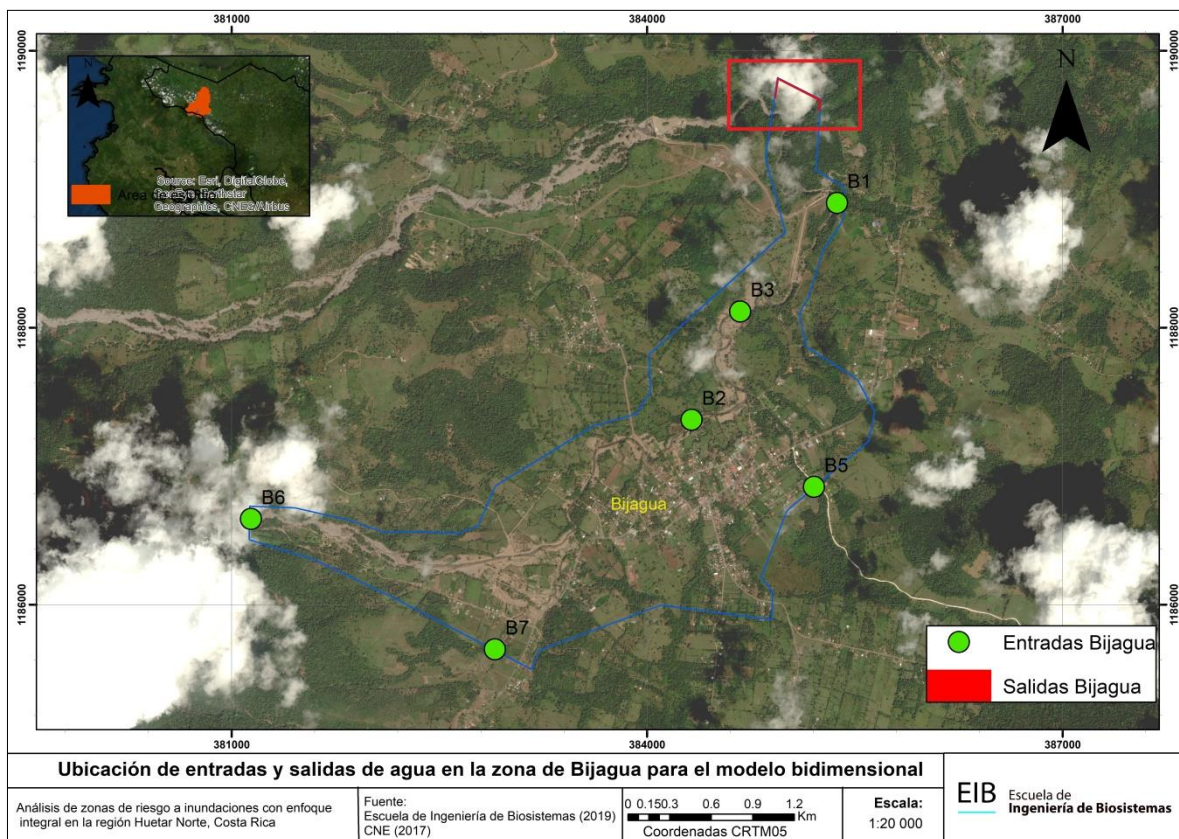


Figura 5-25 Ubicación de las entradas y salidas de agua en la zona de Bijagua

En el caso de Canalete (ver Figura 5-26) se cuenta con cinco hidrogramas de entrada. Estos hidrogramas se alimentan de subcuencas relativamente grandes en comparación de Bijagua, por lo que el flujo de agua es mayor, resultando en un modelo más complejo para el cálculo del programa. Las condiciones planas en el centro del modelo y las fuertes entradas de agua, provocan que el flujo del agua se extienda por amplias regiones en esta parte.

Las salidas del agua se establecieron únicamente en la parte baja, ya que la topografía genera un efecto de embudo donde toda el agua se dirige a una salida. En la parte baja el río estas condiciones encañonan el flujo aumentando las velocidades en esta zona.

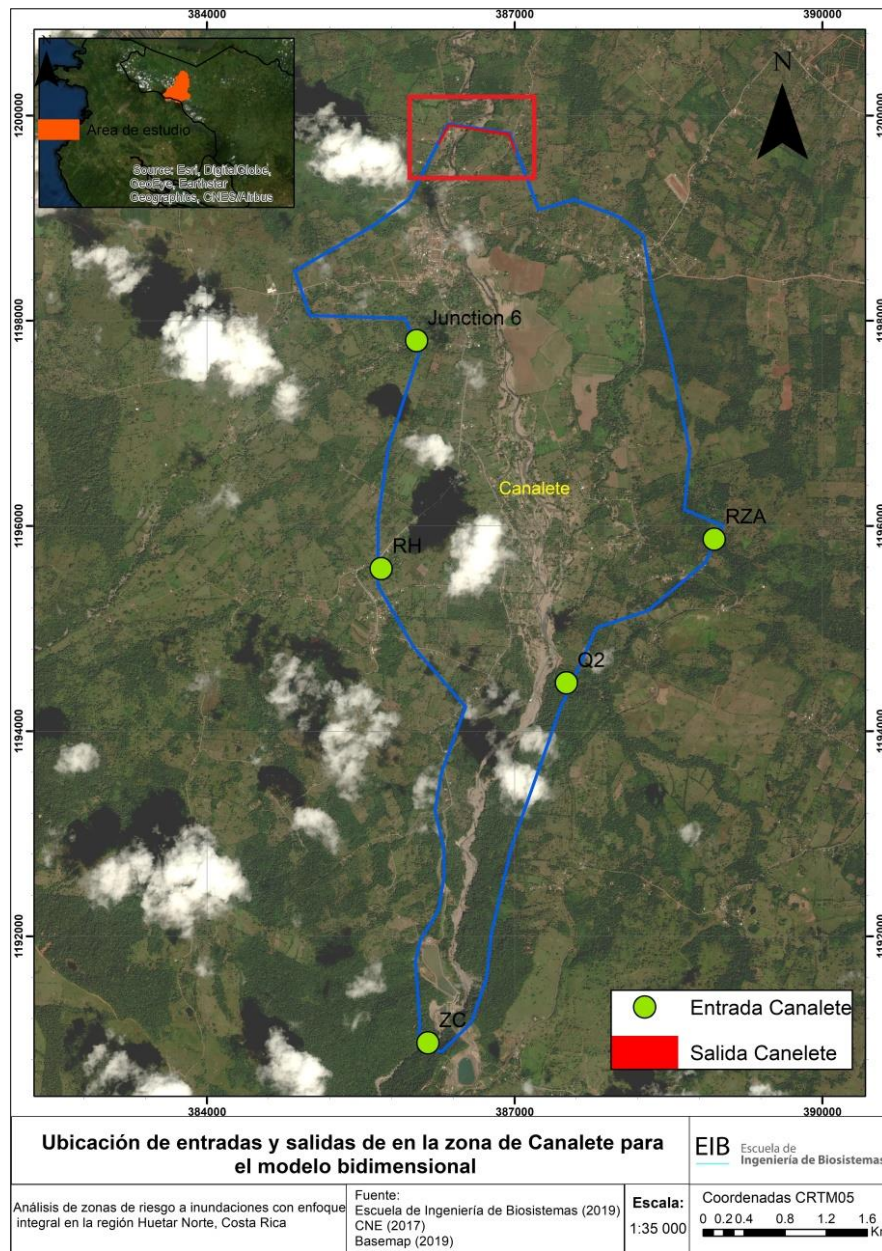


Figura 5-26 Ubicación de las entradas y salidas de agua en la zona de Canalete

En la subcuenca del Upala, se colocó 2 nodos de entrada que alimentan el río Zapote en dirección de Upala, 0 para el río Zapote y 1 para Patriota. Uno de estos se coloca sobre el río, el cual viene alimentado de todas las subcuenca aguas arriba de este y que

para el huracán Otto tuvo un valor pico de alrededor $1500 \text{ m}^3/\text{s}$. El segundo corresponde a la Quebrada Patriota, el cual alimenta al río Zapote aguas abajo, afectando directamente el centro de Upala. Los nodos de salida se colocaron alrededor de casi toda la cuenca ya que esta al ser una planicie, se desconoce la dirección que vaya a tomar el flujo (ver Figura 5-27). El flujo para el huracán en la entrada del río Zapote se dividió en 21 nodos de entrada y la quebrada Patriota en solamente uno. En el caso del periodo de retorno de 25 años el río Zapote está dividido en 19 entradas y Patriota en 2, y en 50 años en 22 y 2 entradas respectivamente.

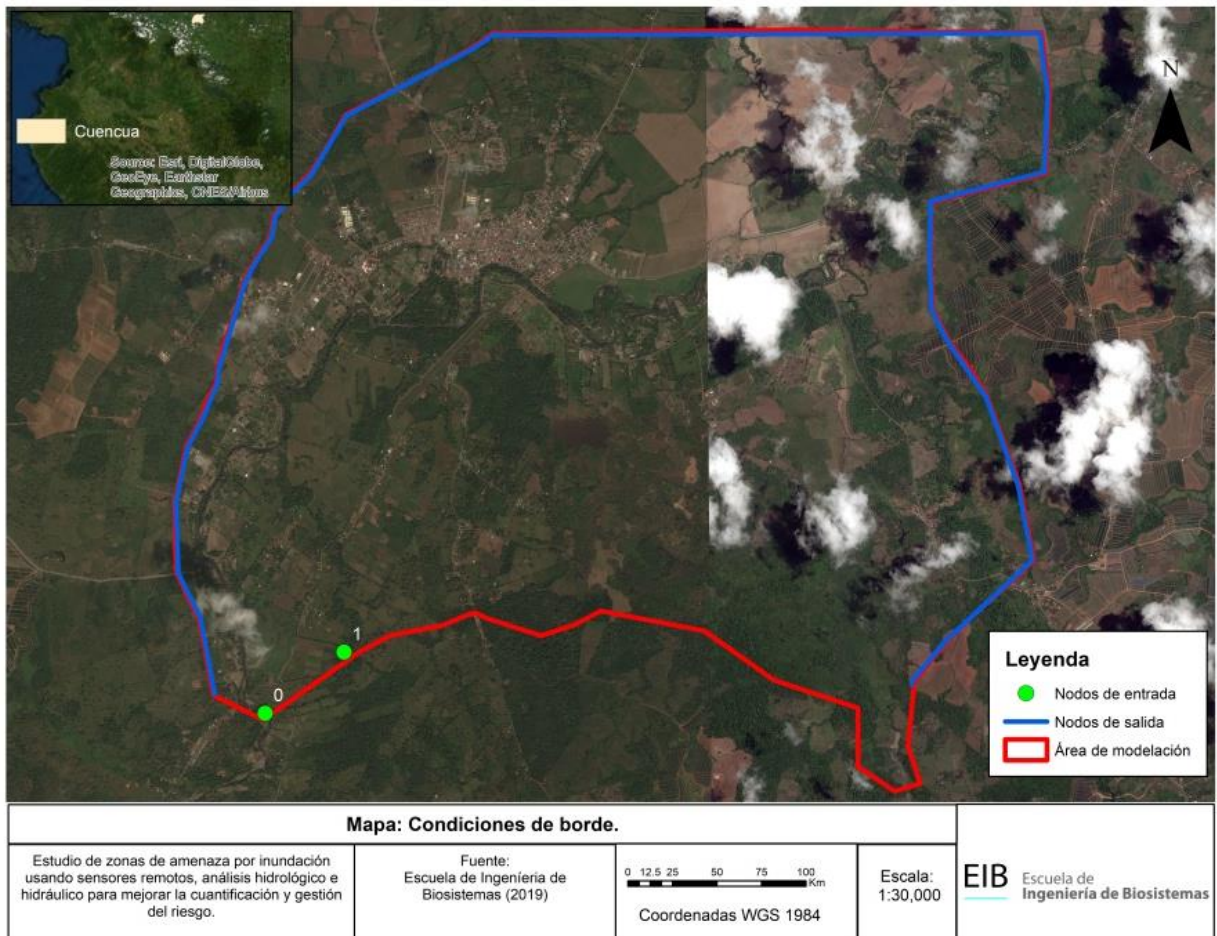


Figura 5-27 Condiciones de borde de la subcuenca de Upala.

5.6 Escenarios hidráulicos

Las modelaciones bidimensionales que se realizaron por zona de estudio, consideraron una serie de escenarios con diversas condiciones. Estas condiciones buscan conocer un comportamiento más amplio de la inundación. Los escenarios evaluados fueron con un número de curva de tipo II y tipo III, considerando agua limpia y flujo de lodos (variando el CV). Además, se realizaron modelaciones para agua limpia con los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años. En el documento se presentan una serie de resultados seleccionados de forma representativa, Los resultados completos se pueden ver en los Apéndice I, J y K

5.6.1 Análisis hidráulico para condiciones de Otto y agua limpia

5.6.1.1 Resultados para Bijagua y un CN tipo II

Los resultados de la modelación con la lluvia del huracán Otto y un número de curva tipo II se pueden ver en la Figura 5-28. En esta modelación se tiene alturas mayores a 6m en la parte baja de la zona de estudio. Esto ocurre por las condiciones topográficas ya que el cauce se encañona. En el centro del pueblo no se tiene problemas de inundación, pero en los márgenes del río principal se cuenta con velocidades elevadas y alturas superiores a los dos metros.

En la parte alta se cuenta con velocidades de hasta 10 m/s debido a las fuertes pendientes, además se presenta un aumento en el ancho del cauce en algunas zonas debido a los efectos del huracán Otto. El canal modelado no presenta problemas de desbordamiento y la alcantarilla no supera su capacidad hidráulica. En el caso de esta modelación se consideraron 65 horas de tiempo de simulación para ver el comportamiento del flujo después del paso del pico del huracán en la zona de estudio.

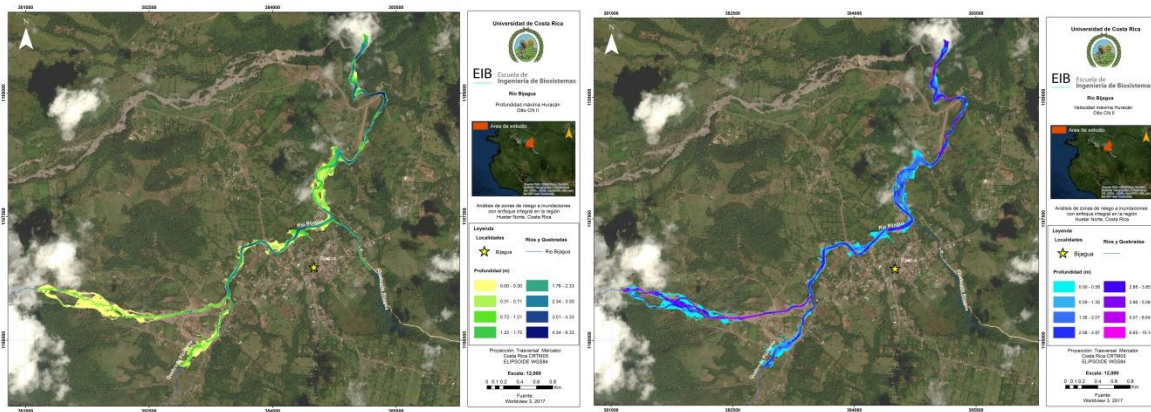


Figura 5-28. Profundidad de agua a la derecha y velocidad de agua a la izquierda para Bijagua con agua limpia y CN II

En el canal se verificó el comportamiento del flujo de agua (ver Figura 5-29) por medio de los niveles de agua, la altura del banco izquierdo, la altura del banco derecho y la altura del lecho del río. Con esto se analiza cualquier condición inusual para la zona como pueden ser saltos hidráulicos o algún otro comportamiento anormal en el cauce. Es importante mencionar que el apéndice E cuenta con los perfiles de todas las modelaciones, así como sus respectivos hidrogramas en canal y llanura de inundación.

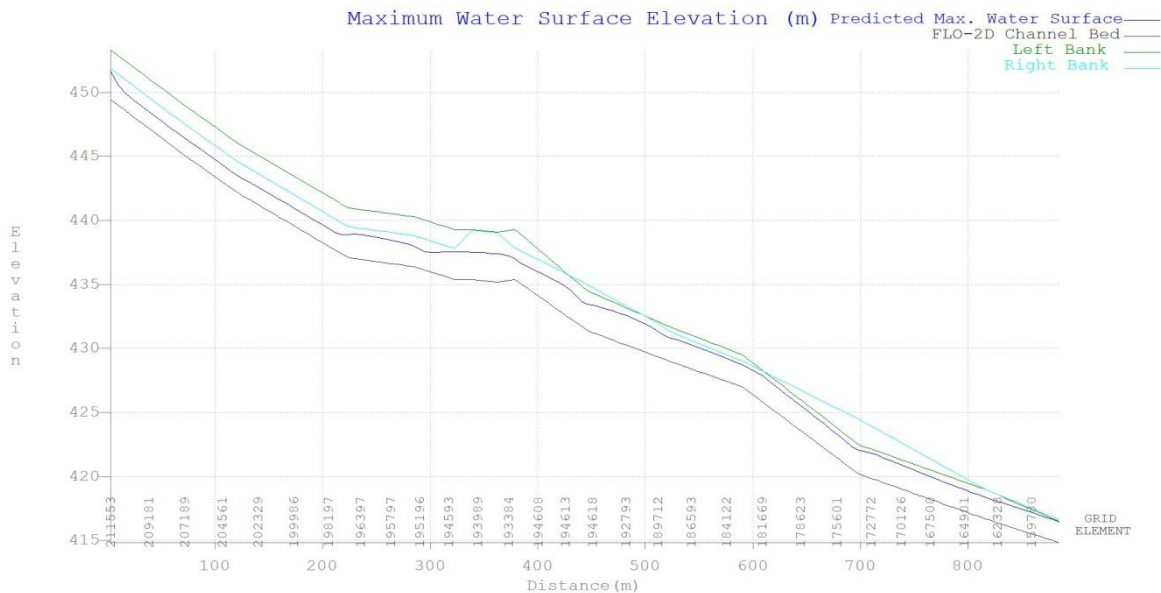


Figura 5-29 Perfil del canal para la modelación de agua limpia y CN II

Además, en el canal se verificó la estabilidad del cálculo, por medio de hidrogramas ubicados en cada sección. En la Figura 5-30 se observa el comportamiento del flujo del agua en la sección 201171. Estos valores se mantienen estables a lo largo del canal y su comportamiento es similar al del hidrogramas de entrada al inicio del canal, por lo que el cálculo se mantuvo estable a lo largo de todo el canal.

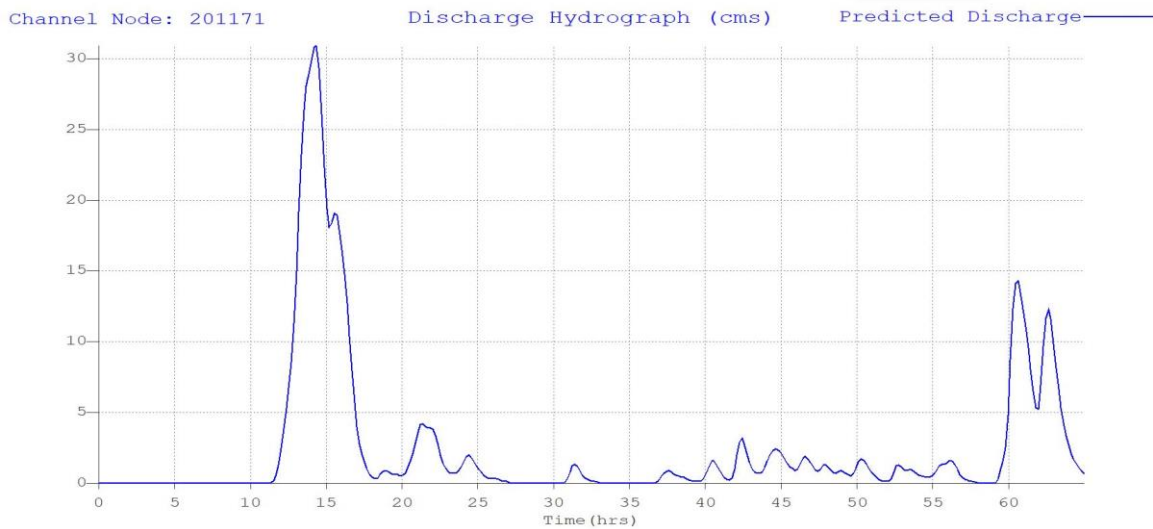


Figura 5-30 Hidrograma de una sección del canal para la modelación de agua limpia y CN II

En la llanura de inundación se verifico la estabilidad para los elementos con números de Froude más altos. En la Figura 5-31 se observa el comportamiento de uno de estos elementos. La verificación de estos elementos nos permite garantizar estabilidad en el cálculo para la llanura de inundación y garantizando estabilidad en el modelo. Es importante mencionar que el comportamiento del hidrogramas en canal y llanura de inundación son parecidos, pero el pico máximo es diferente debido a que estos son alimentados por hidrogramas de subcuencas distintas.

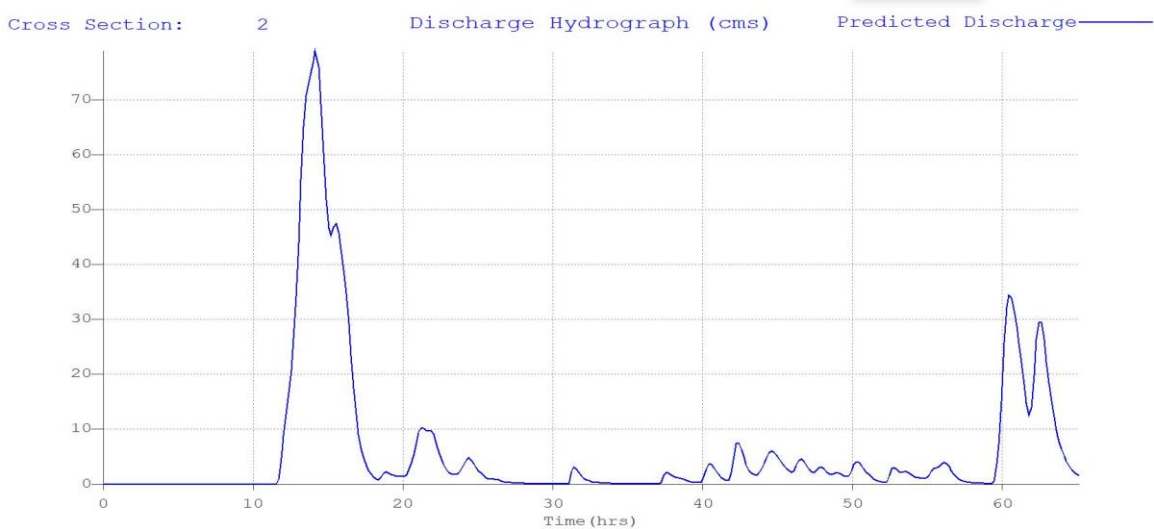


Figura 5-31 Hidrograma para una sección de la llanura de inundación para la modelación de agua limpia y CN II

5.6.1.2 Resultados para Bijagua y un CN tipo III

El considerar una condición de humedad en el suelo durante el evento extremo de Otto, ocasiona un aumento considerable en los niveles de agua y en las velocidades. En las zonas más críticas se tienen aumentos de más de un metro de altura en comparación a los resultados considerando un CN tipo II (Ver Figura 5-32).

Los resultados muestran un aumento en el área de afectación por la inundación debido al aumento del agua por entrada de los hidrogramas. En el caso de las velocidades máximas se puede llegar a tener hasta 11m/s aproximadamente en la parte alta y en zona baja de la modelación, debido a la topografía de la zona. En el caso del canal se presentan problemas de desbordamiento en la zona donde se ubica la alcantarilla, ya que se está superando la capacidad hidráulica de la misma. En este modelo también se consideraron 65 horas de tiempo de simulación y se aumentó los márgenes de los primeros 6 perfiles a la entrada del canal, para evitar problemas de estabilidad en el cálculo.

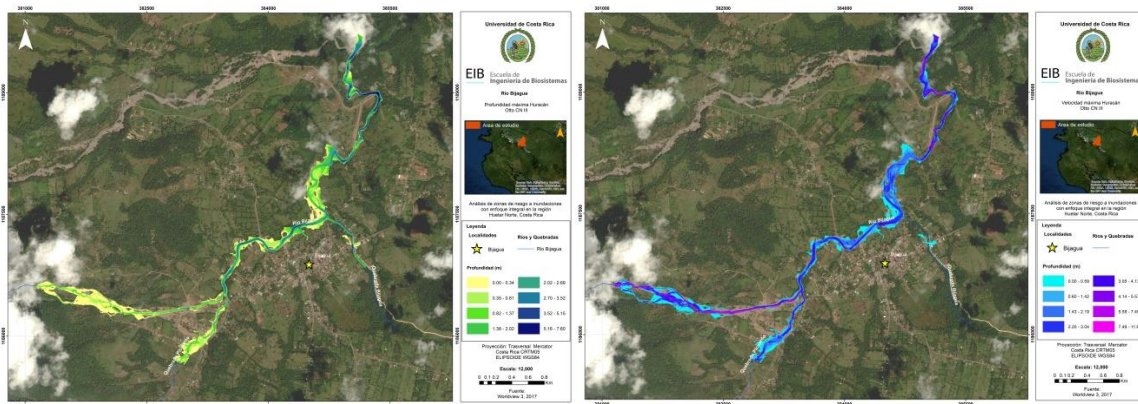


Figura 5-32 Profundidad de agua a la derecha y velocidad de agua a la izquierda para Bijagua con agua limpia y CN III

5.6.1.3 Resultados para Canalete y un CN tipo II

En el caso particular de la modelación de canalete se tiene una mayor área de modelación y no se cuenta con ningún canal. En la Figura 5-33 se puede observar cómo se distribuye la inundación con la particularidad que en la zona alta y baja el flujo del agua esta encañonado. Una vez la topografía se vuelve plana los márgenes de la inundación aumentan en zonas agrícolas.

En este modelo se llegan a tener alturas superiores a los 7m de altura y velocidades de más de 13 m/s, esto se debe a la cantidad de agua que llega a la zona. Las condiciones de la zona provocan que subcuencas de gran tamaño como Río Zapote Alto 2, Quebrada 2 y

Río Higerón desembocan en la zona de modelación. En la parte baja también se consideró la unión de dos subcuencas cercanas como lo son Río Canalete y Zapote-Canalete, esto provoca un flujo de agua considerablemente alto a la entrada del pueblo de Canalete.

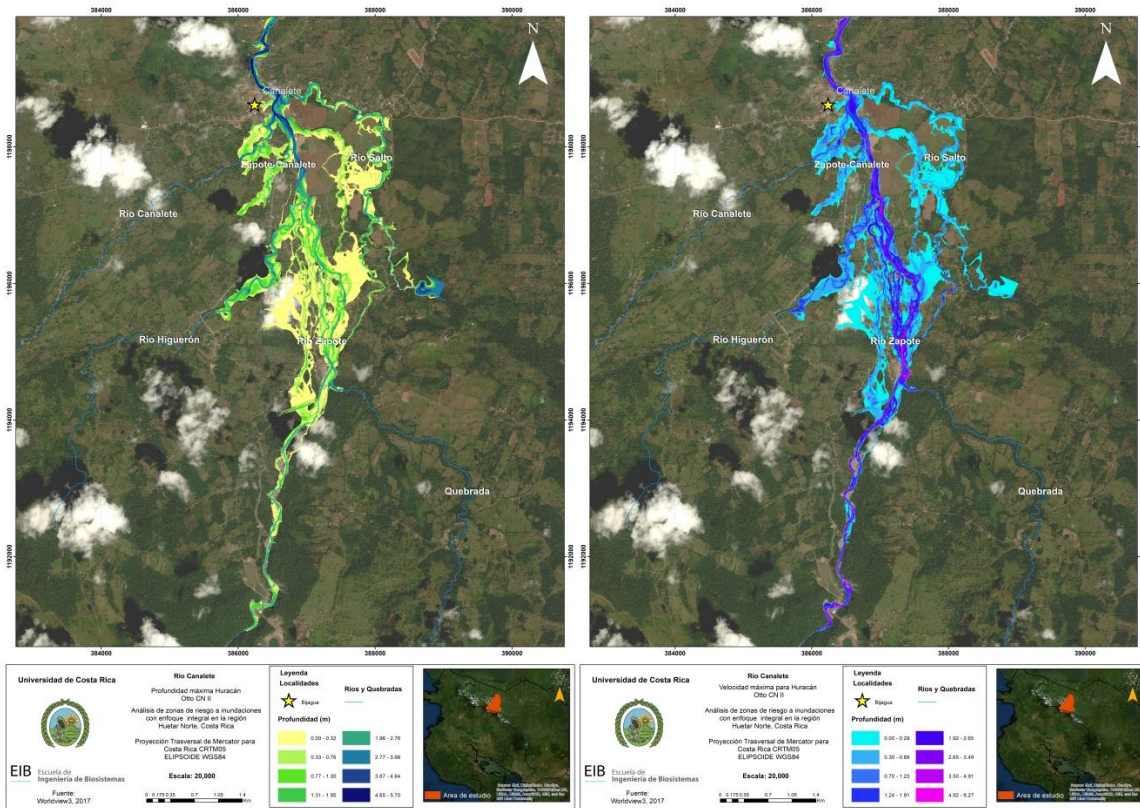


Figura 5-33 Profundidad de agua a la derecha y velocidad de agua a la izquierda para Canalete con agua limpia y CN II

5.6.1.4 Resultados para Canalete y un CN tipo III

La modelación de Canalete considerando una condición de humedad antes del huracán Otto, presenta un aumento de velocidad y de nivel de agua en comparación del modelo con CN tipo II (ver Figura 5-34). La altura máxima llega a los 8m y se cuenta con velocidades superiores a los 14 m/s. El área de afectación aumenta en mayor medida en las zonas agrícolas de la parte central del modelo. En este caso el pueblo, en las zonas cercanas al margen del río se ven afectados, debido a los aumentos de las alturas y velocidades.

En el caso de esta modelación se consideraron 65 horas de tiempo de simulación para ver el comportamiento del flujo después del paso del pico del huracán en la zona de estudio y en el apéndice E se cuenta con el hidrograma en la llanura de inundación para

ambas condiciones. Es importante recordar que esta modelación no cuenta con canal, por lo que no hay un hidrograma asociado a este.

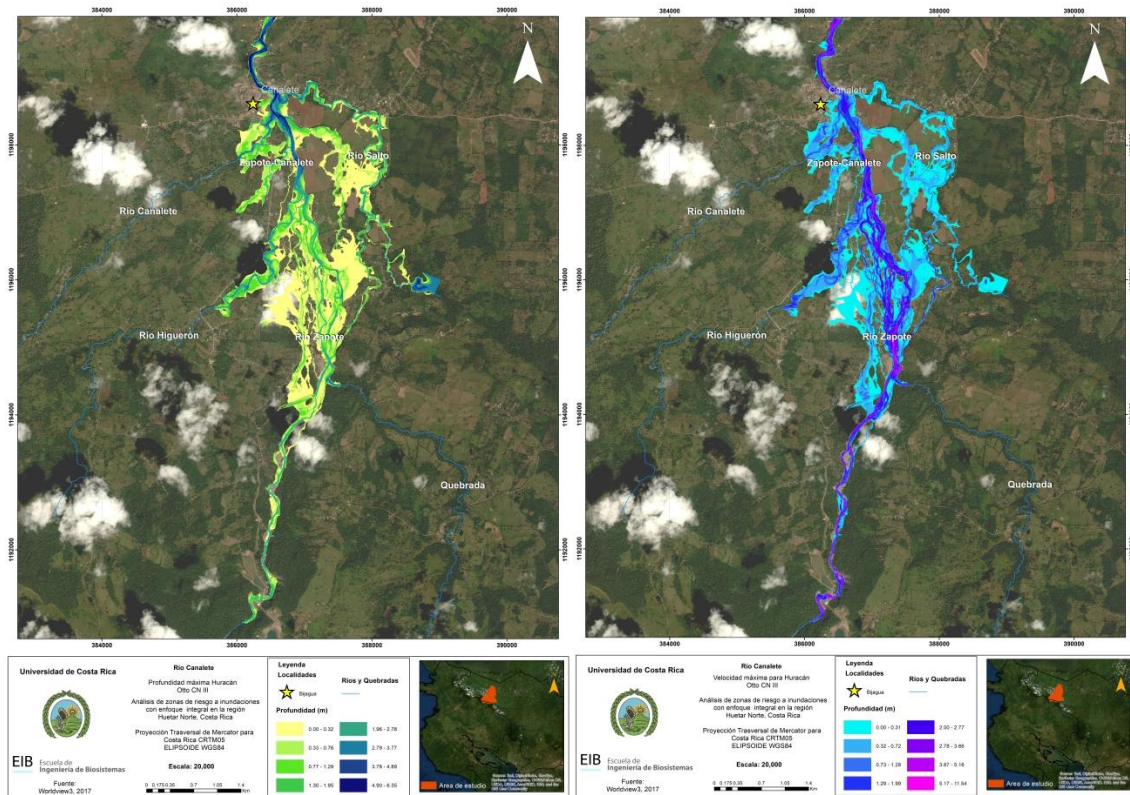


Figura 5-34 Profundidad de agua a la derecha y velocidad de agua a la izquierda para Canaleta con agua limpia y CN III

5.6.1.5 Resultados para Upala y un CN tipo II

En el caso de Upala las profundidades se pueden observar en la Figura 5-35, donde puede tener hasta 6 metros en algunos lugares. Se tiene un promedio de alturas de 0.65 m con una desviación estándar de 0.79 m y en el centro de Upala se registran valores de hasta 1.39 m, profundidades posibles según lo relatado por los habitantes. En este caso se consideró 30 horas de simulación para ver el comportamiento del evento después del pico máximo.

Según la Figura 5-35, velocidades de 1.66 m/s se pueden dar en el centro de Upala, lo que puede poner en peligro las estructuras, además de carros y personas. Los lugares aledaños al río son de peligro igualmente ya que concentra velocidades altas de hasta 2 m/s. La velocidad máxima es de 3.90 m/s y una velocidad promedio de 0.26 m/s con una desviación estándar de 0.36 m/s.

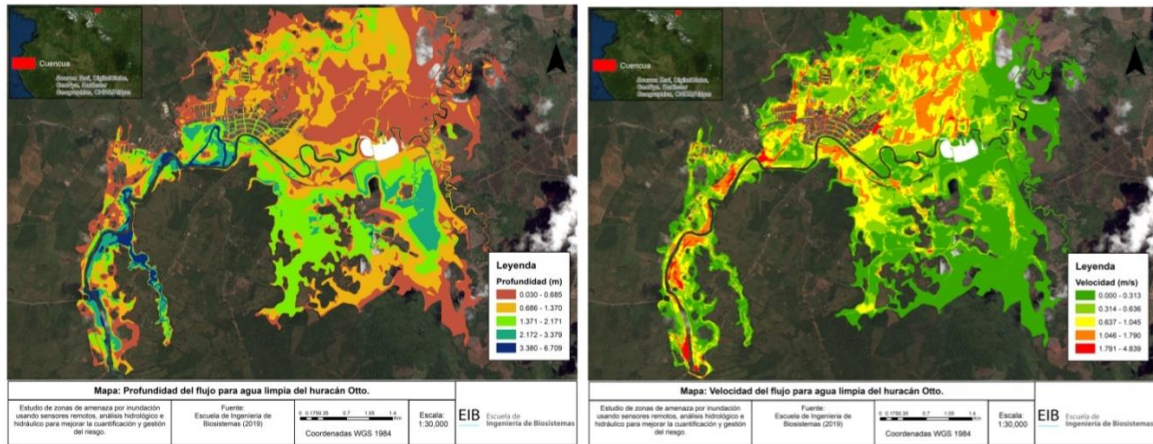


Figura 5-35 Profundidad de agua a la derecha y velocidad de agua a la izquierda para Upala con agua limpia y CN II

En la Figura 5-36 se muestra la estabilidad que lleva el flujo en un pico de $1100 \text{ m}^3/\text{s}$. No existen picos de inestabilidad a lo largo del flujo.

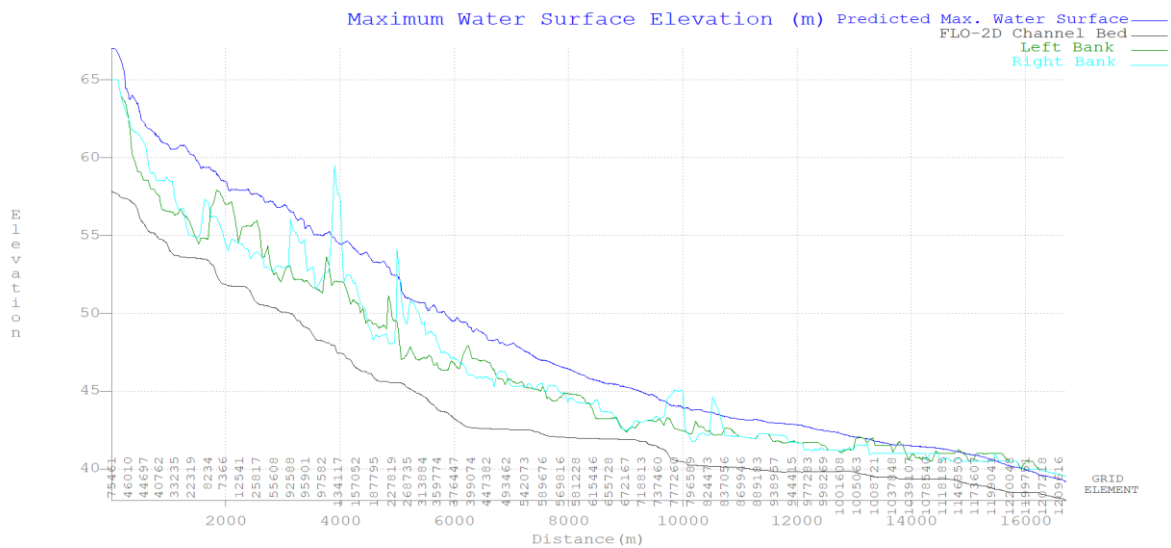


Figura 5-36 Perfil del canal para la modelación de agua limpia y CN II

5.6.2 Análisis hidráulico para condiciones de Otto y flujo de lodos

El evento del huracán considerando la concentración de volumen de sedimentos (CV), representa un cambio fuerte en las condiciones del modelo. El contar con esta

condición provoca que el flujo de lodos aumente los volúmenes de agua y la cantidad de materia en los cauces evaluados, por lo que se tiene condiciones más críticas.

5.6.2.1 Resultados para Bijagua con CN tipo II y CV: 0.55

En Bijagua la presencia de lodos y una condición de número de curva tipo II ocasiona un aumento considerable de los niveles de agua ya que se pasa de alturas promedio de 1m a 1.7m en el modelo. La ubicación de las alturas máximas se mantiene igual, pero se llega a tener alturas superiores a los 9m. El área de afectación también se ve aumentada, pero sin efectos directos al pueblo. En este caso los daños al cauce principal son considerablemente grandes por lo que cualquier modificación en este puede afectar directamente al pueblo (ver Figura 5-37).

La velocidad es otra variable con un aumento considerable ya que se tienen valores máximos hasta los 14m/s. Estos valores son muy peligrosos ya que el centro del pueblo se ubica al costado del cauce del río. En promedio la modelación da valores de superiores de los 2m/s los cuales se encuentran en su mayoría en los márgenes del río. En este caso la alcantarilla sigue su funcionamiento normal y no se presenta desbordamiento bajo estas condiciones particulares.

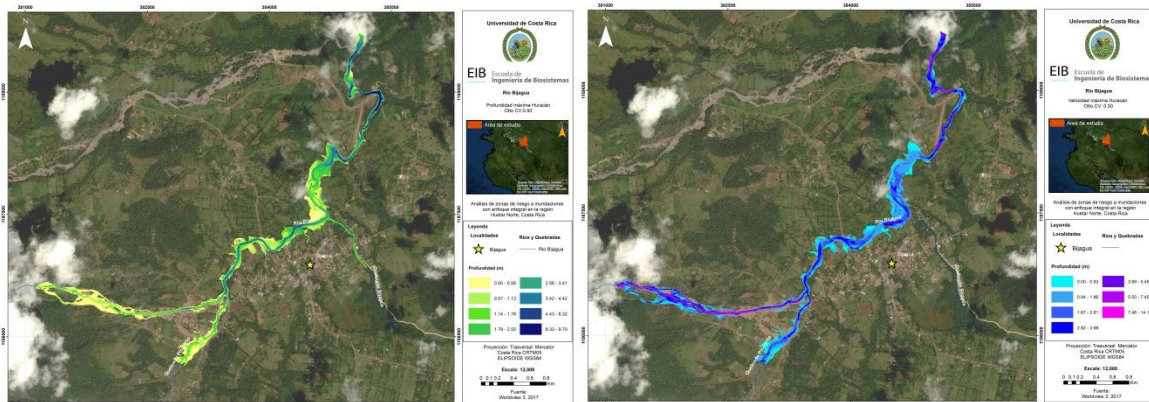


Figura 5-37 Profundidad de agua a la derecha y velocidad de agua a la izquierda para Bijagua con agua limpia CN II y CV: 0.45

5.6.2.2 Resultados para Canalete con CN tipo II y CV: 0.45

En el caso de Canalete al considerar la condición de lodos. El modelo cuenta con alturas máximas cercanas a los 10m y velocidades máximas de 13m/s, lo cual pone a este modelo como el más crítico para esta zona de modelación (ver Figura 5-38). La ubicación

de estas alturas y velocidades es la misma en la parte media y baja, pero se ve un aumento considerablemente grande del área de afectación. En este caso el pueblo si se ve directamente afectado y las zonas cercanas a los márgenes del río presentan elevaciones y velocidades elevadas.

Es importante considerar que esta condición crítica no ocurrió durante el huracán Otto, debido a que la mayor cantidad de sedimentos se quedó en la zona alta. En el modelo se considera un flujo de lodos constante a lo largo del cauce del río, por lo que este modelo se debe de considerar como un caso particular.

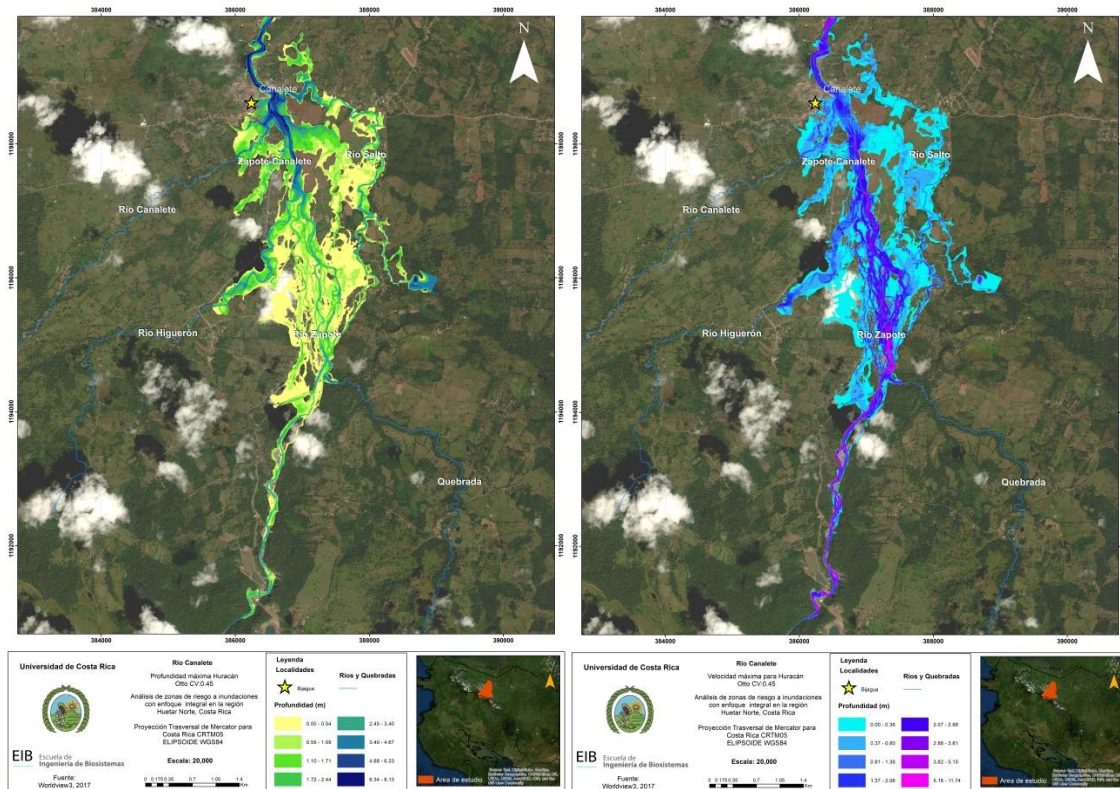


Figura 5-38 Profundidad de agua a la derecha y velocidad de agua a la izquierda para Canalete con agua limpia CN II y CV: 0.45

5.6.3 Análisis hidráulico de las condiciones existentes para 100 años de periodo de retorno

5.6.3.1 Resultados Bijagua con CN tipo II y un periodo de retorno de 100 años

El estudio de los periodos de retorno permite conocer cómo se comportará la inundación provocada por el huracán Otto en un futuro con una probabilidad asociada. La modelación para el periodo de retorno de 100 años para la zona de Bijagua (ver Figura 5-39) presento una leve ampliación en los márgenes iniciales del canal, ya que debido al aumento del pico en el hidrograma de entrada se necesita una mayor capacidad hidráulica para que el programa no presente problemas de estabilización en el cálculo. Otra modificación en el canal fue el aumento de la n de Manning en 3 secciones cercanas a la alcantarilla.

Los resultados de este modelo presentan alturas máximas de 6.5m con velocidades superiores a los 10m/s. Las ubicaciones de los márgenes de inundación a lo largo del modelo son muy similares a la condición de agua limpia con CN tipo II. En comparación con este otro modelo es importante mencionar que se tiene una concordancia de resultados, ya que el evento de Otto es menor de 100 años de periodo de retorno, por lo que se espera que sus valores de altura y velocidad sean menores. En este caso se consideró un tiempo de horas de simulación de 24 horas, ya que solo se está modelando el evento principal del huracán Otto.

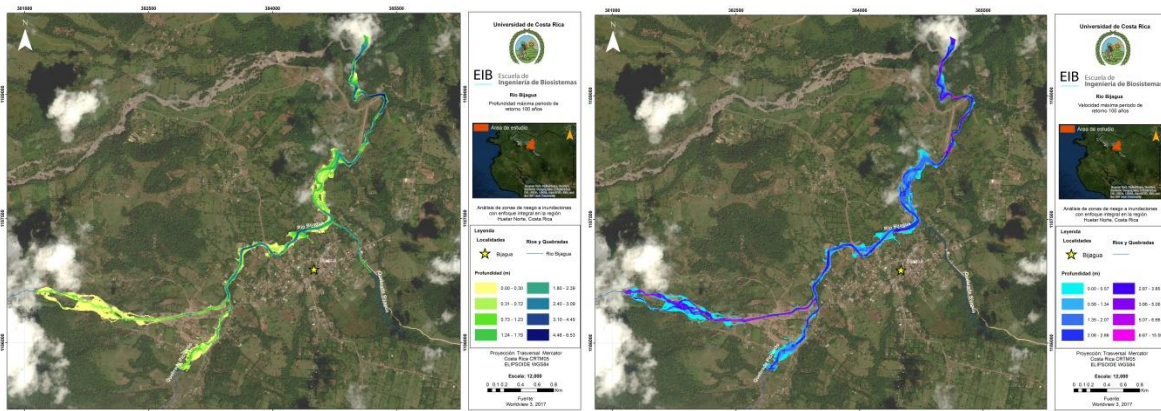


Figura 5-39 Profundidad de agua a la derecha y velocidad de agua a la izquierda para Bijagua periodo de retorno de 100 años y CN II

5.6.3.2 Resultados Canaleta con CN tipo II y un periodo de retorno de 100 años

En el caso de Canaleta la malla no sufrió ningún cambio para el correcto funcionamiento de la misma. La estabilidad en el cálculo se mantuvo durante todo el proceso y no se contó con problemas de conservación de agua. En la Figura 5-40 se

observan los resultados obtenidos donde se tiene alturas máximas cercanas a los 7.5m en la parte baja por la topografía y con promedios de altura cercanos a los 1.5m. La parte alta no presenta problemas con las alturas, esto se debe al aumento del cauce en esta zona, por lo que la capacidad hidráulica del río es mayor.

En el caso de la velocidad se tienen valores máximos similares a las otras modelaciones de esta zona. Los valores más elevados son cercanos a los 14.5m y se ubican en la parte baja y a la entrada del agua de la subcuenca de Quebrada 2. La mancha de inundación afecta al pueblo en la parte más cercana al cauce principal, por lo que se debe de poner particular atención en estas zonas. En este caso se consideró un tiempo de horas de simulación de 24horas, ya que solo se está modelando el evento principal del huracán Otto.

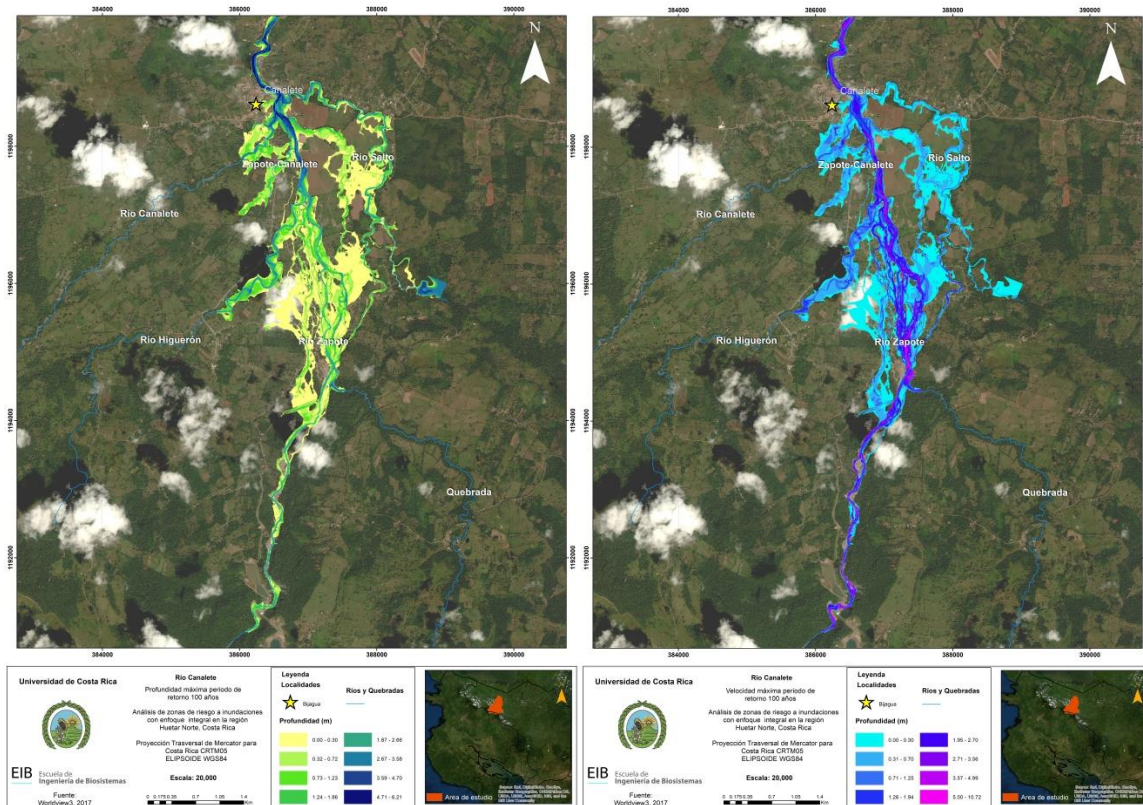


Figura 5-40 Profundidad de agua a la derecha y velocidad de agua a la izquierda para Canalete periodo de retorno de 100 años y CN II

5.6.4 Análisis hidráulico de las condiciones existentes para 50 años de periodo de retorno

5.6.4.1 Resultados Bijagua con CN tipo II y un periodo de retorno de 50 años

A la modelación de Bijagua con el periodo de retorno de 50 años no se le modificó las características de la malla. Los resultados de la modelación presentan alturas máximas menores a los 6m. En este caso las alturas máximas se encuentran más distribuidas a lo largo del cauce principal. En el caso de la alcantarilla no se cuenta con problemas de desbordamiento.

Las velocidades máximas son inferiores a los 9.6m/s y se encuentran en la parte alta y baja del área de modelación (ver Figura 5-41). Los resultados generales muestran valores menores en comparación del evento con agua limpia y CN tipo II, estos son resultados esperados ya que el evento del huracán Otto se encuentra entre el periodo de retorno de 50 y 100 años. Por último en este caso se consideró un tiempo de horas de simulación de 24 horas, ya que solo se está modelando el evento principal del huracán Otto.

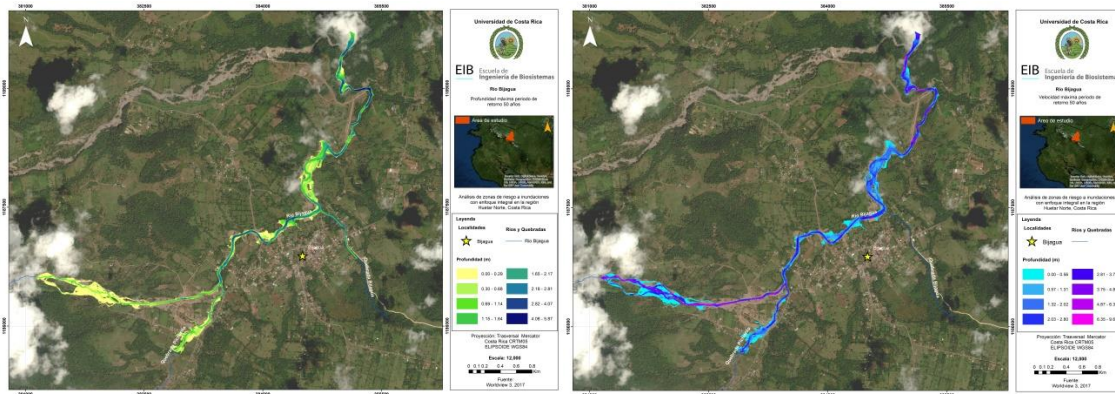


Figura 5-41 Profundidad de agua a la derecha y velocidad de agua a la izquierda para Bijagua periodo de retorno de 50 años y CN II

5.6.4.2 Resultados Canaleta con CN tipo II y un periodo de retorno de 50 años

A la modelación de Canaleta con el periodo de retorno de 50 años no se le modificó las características de la malla (ver Figura 5-42). Los resultados para este modelo muestran una afectación menor de la inundación, en comparación con el evento de Otto. Las alturas máximas en este caso alcanzan los 7m y solo se encuentran aguas abajo del modelo. La mancha de inundación afecta a las zonas agrícolas cercanas al cauce del río y el pueblo no sufre una afectación directa.

En el caso de las velocidades se cuenta con una disminución en comparación a otros modelos, se tienen velocidades máximas ligeramente superiores a los 13m/s. Estas velocidades predominan en la zona baja del modelo y a la salida del hidrograma de entrada de Quebrada 2. Por último en este caso se consideró un tiempo de horas de simulación de 24 horas, ya que solo se está modelando el evento principal del huracán Otto.

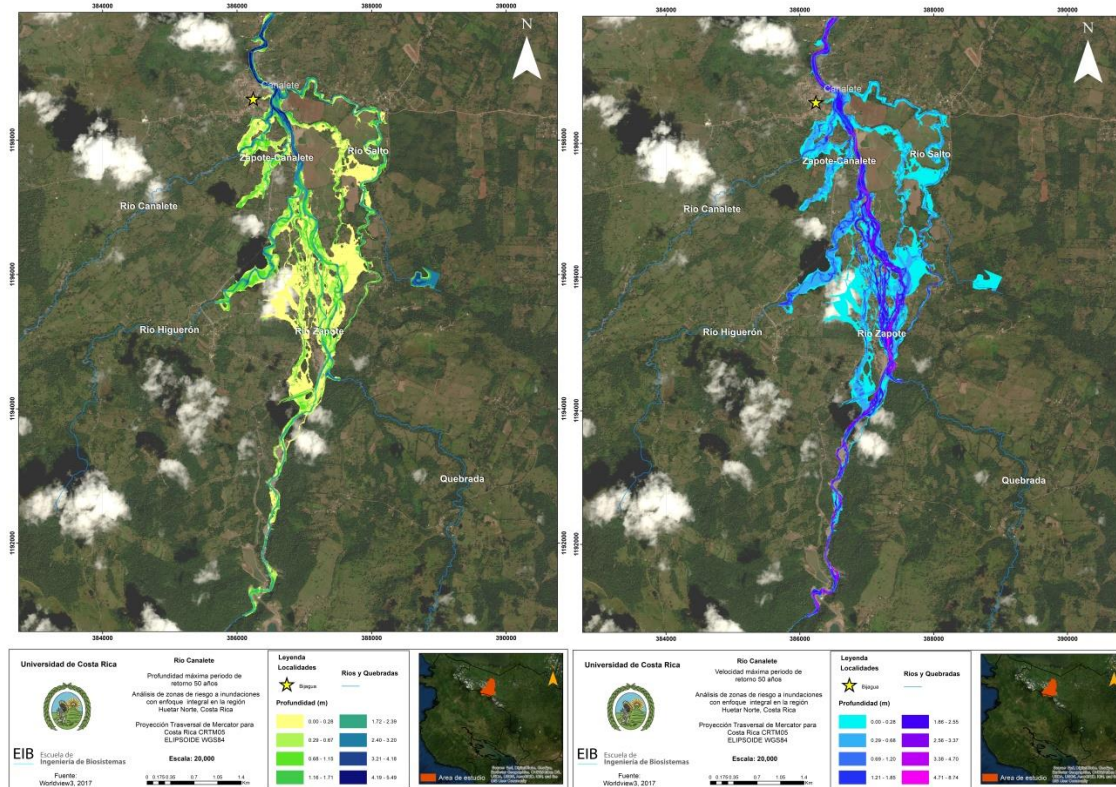


Figura 5-42 Profundidad de agua a la derecha y velocidad de agua a la izquierda para Canalete periodo de retorno de 50 años y CN II

5.6.4.3 Resultados Upala con CN tipo II y un periodo de retorno de 50 años

El mapa de alturas para el periodo de retorno de 50 años se muestra en la Figura 5-43. Alturas de hasta 1.06 metros se muestran en el centro de Upala lo cual el desastre que este puede ocasionar es considerable porque puede afectar artefactos dentro de casas. El aeropuerto no se ve afectado, caso parecido con el huracán Otto. El promedio es de 1.1 metros, y la desviación estándar es de 0.8 m.

En la Figura 5-43 se muestra el mapa de velocidades para un período de retorno de 50 años. Se presentan velocidades entre de hasta 3.01 m/s en el centro de Upala entre las calles, lo cual hace que el flujo en estos lugares sea de mucho peligro. Estas velocidades combinadas con las alturas mencionadas anteriormente, vuelve el flujo altamente peligroso. La velocidad promedio es de 0.49 m/s con una desviación estándar de 0.48 m/s y una

velocidad máxima de 3.9 m/s en algunas zonas de la planicie de inundación, estos valores no se diferencian mucho del huracán. Donde se presentan velocidades mayores a 3.01 m/s, hay riesgo de erosión en el suelo y pérdida de infraestructura. Por último, en este caso se consideró un tiempo de horas de simulación de 20 horas, ya que solo se está modelando el evento principal del huracán Otto.

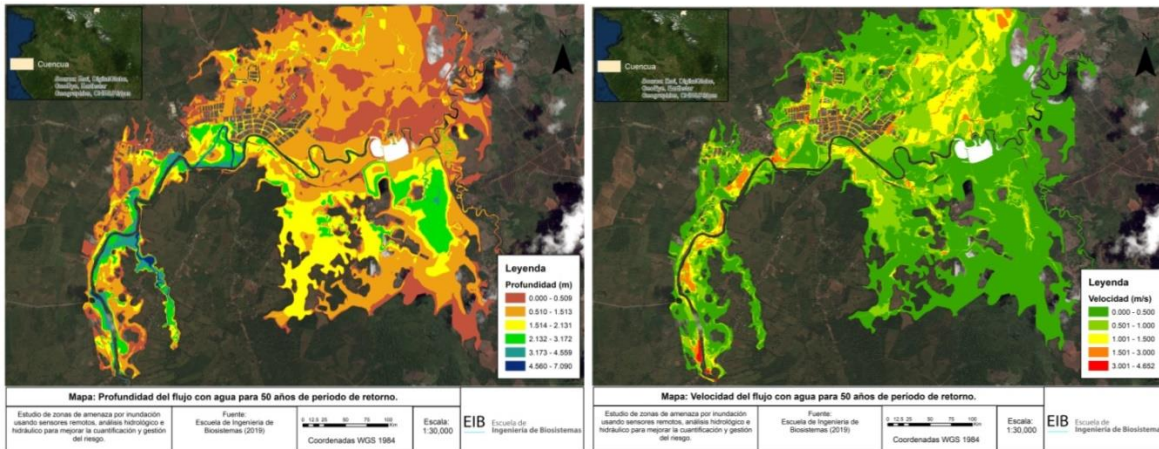


Figura 5-43 Profundidad de agua a la derecha y velocidad de agua a la izquierda para Upala periodo de retorno de 50 años y CN II

5.6.5 Análisis hidráulico de las condiciones existentes para 25 años de periodo de retorno

5.6.5.1 Resultados Bijagua con CN tipo II y un periodo de retorno de 25 años

La última modelación realizada para la zona de Bijagua fue considerando el periodo de retorno de 25 años. Esta modelación es la que presenta los valores de elevación y velocidad más bajos en comparación a las otras modelaciones (ver Figura 5-44). Los resultados siguen dando valores elevados de hasta 5.3m de altura en el cauce principal y un promedio de altura en el modelo de 1m.

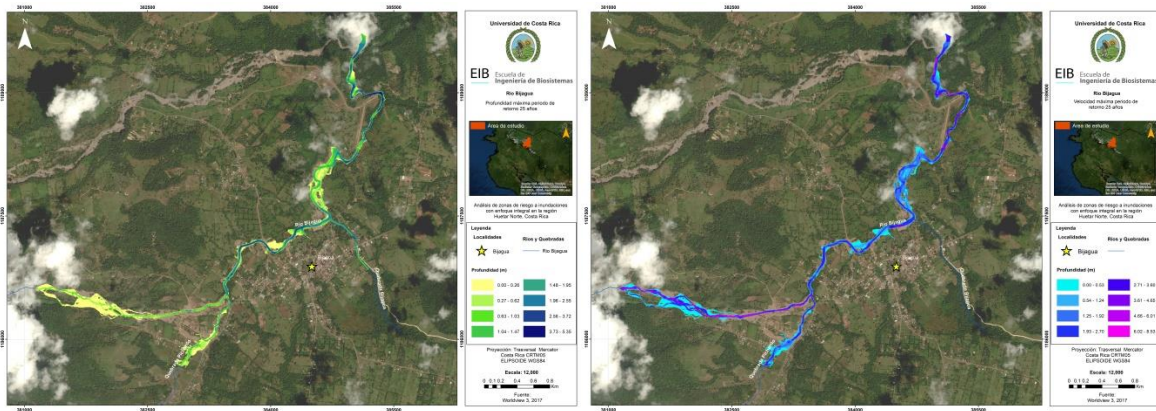


Figura 5-44 Profundidad de agua a la derecha y velocidad de agua a la izquierda para Bijagua periodo de retorno de 25 años y CN II

En el caso de las velocidades se cuenta con valores inferiores a los 8.5m/s. Estos valores elevados se encuentran en la zona baja y predominantemente en la zona alta. La alcantarilla no presenta problemas de desbordamiento y su funcionamiento es completamente normal. En el caso del centro del pueblo no se ve afectado directamente. Por ultimo en este caso se consideró un tiempo de horas de simulación de 24 horas, ya que solo se está modelando el evento principal del huracán Otto.

5.6.5.2 Resultados Canaleta con CN tipo II y un periodo de retorno de 25 años

En Canaleta con un tiempo de retorno de 25 años se observan los valores más bajos en comparación a las otras modelaciones en la misma zona (ver Figura 5-45). La altura máxima es de 6.6m, estos valores elevados predominan en la zona baja. En promedio para todo el modelo se cuenta con una altura de 1.4m y el área de afectación es inferior a los otros modelos.

La velocidad máxima es ligeramente superior a los 12m/s, los valores máximos se encuentran distribuidos a lo largo del cauce principal. En esta modelación no se observa un efecto directo de la inundación en el poblado central de Canaleta. Por último en este caso se consideró un tiempo de horas de simulación de 24 horas, ya que solo se está modelando el evento principal del huracán Otto.

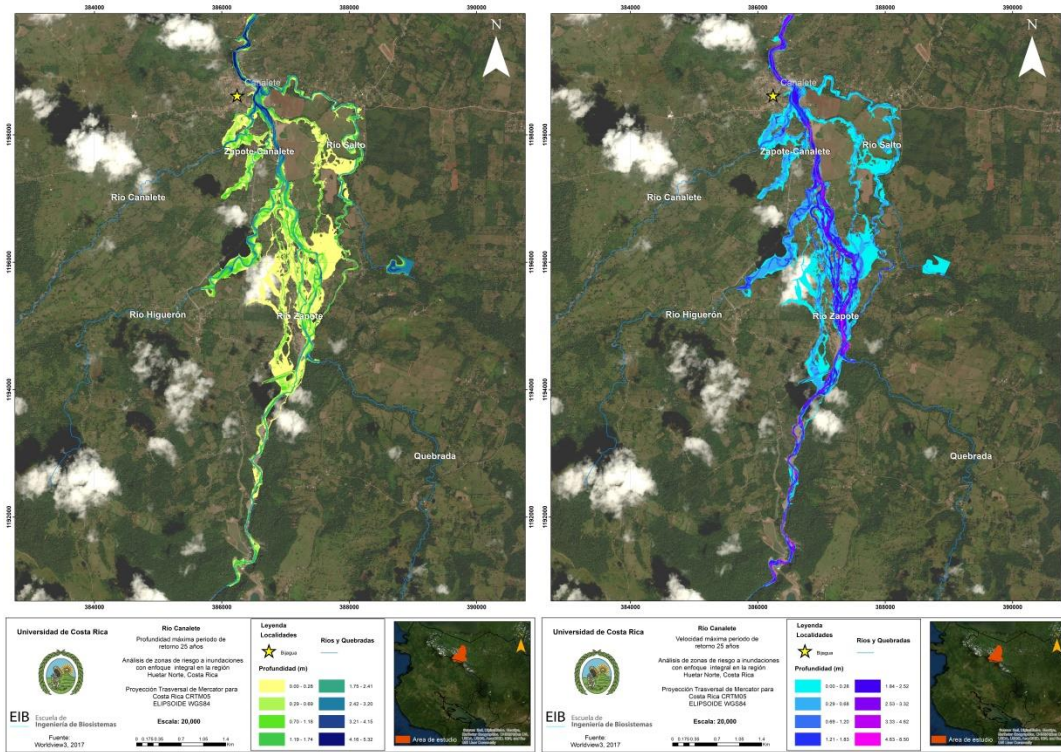


Figura 5-45 Profundidad de agua a la derecha y velocidad de agua a la izquierda para Canalete periodo de retorno de 25 años y CN II

En el caso del periodo de retorno de 100 años, se hizo un estudio de los perfiles de nivel de agua para la inundación ver Figura 5-46. Estas secciones se seleccionaron debido a su ubicación para ver el comportamiento de la cota de agua en diversos puntos del modelo. En el Apéndice G se puede ver el mapa de secciones para Canalete y Upala.

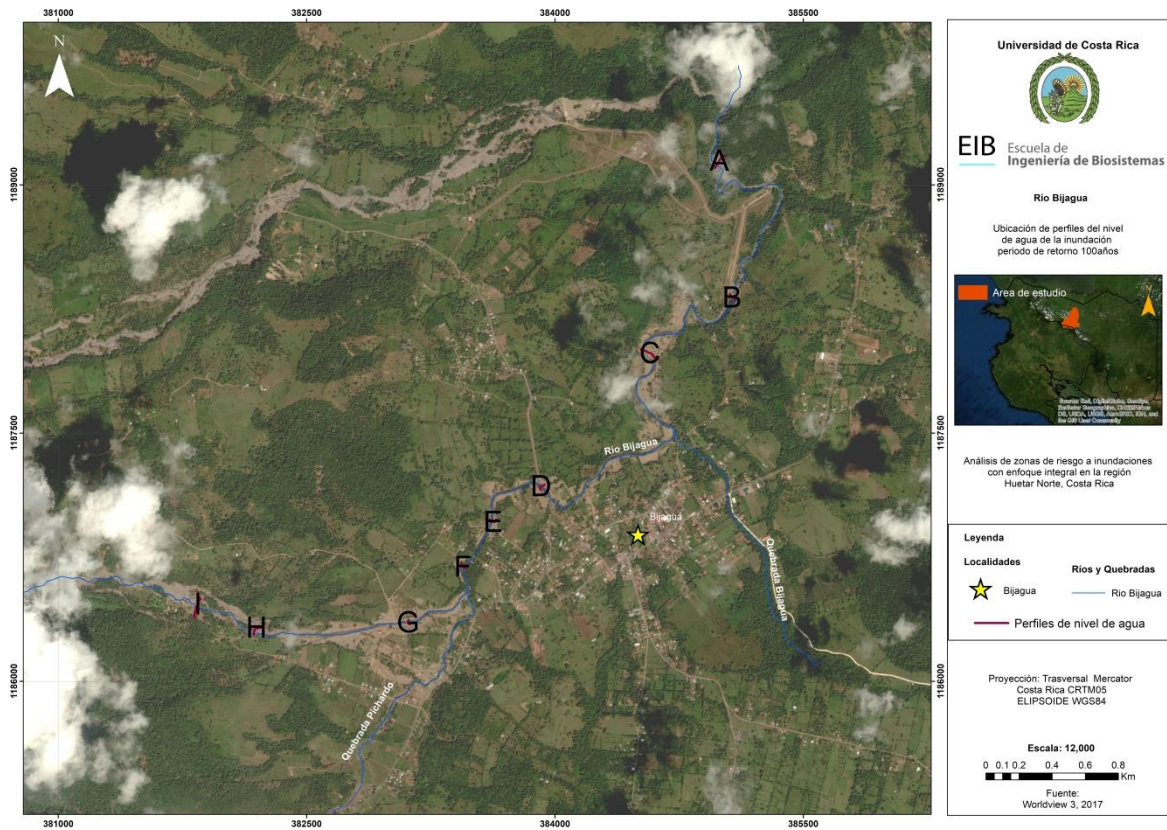


Figura 5-46. Ubicación de perfiles de nivel de agua de la inundación para un periodo de retorno de 100 años para la zona de Bijagua.

Los resultados de las secciones de cotas de agua se pueden ver en la Tabla 5-3 en donde se nota que las velocidades más altas se encuentran en la zona alta del modelo, esto debido a las altas pendientes presentes en la zona. La cota de elevación se obtuvo tomando en cuenta la altura del agua y la topografía. Este valor se acota hasta la altura topográfica de la salida del modelo hidráulico.

Es importante mencionar que el ancho de la cota pertenece a la altura constante de la cota del agua, por lo que no necesariamente corresponde al ancho de la inundación en la zona señalada.

Tabla 5-3 Caracterización de los perfiles de nivel de agua de inundación para un periodo de retorno de 100 años para la zona de Bijagua.

Localización		Llanura de inundación	
Sección	Cota de elevación (m)	Ancho (m)	Velocidad promedio (m/s)
A	22.28	100.90	1.65
B	47.48	40.30	3.42
C	51.68	131.96	1.70
D	60.08	48.63	1.92
E	61.88	55.12	2.29
F	63.98	44.51	2.31
G	74.48	30.05	3.65
H	106.88	94.93	2.12
I	134.48	164.67	2.36

5.6.6 Resumen de Análisis Hidráulicos.

A modo de resumen se procesaron los resultados generados por los modelos, para tener un conocimiento más amplio sobre el comportamiento de la inundación en cada zona. A modo representativo se muestran los resultados del modelo de Bijagua, el resto de los resultados se pueden ver en el Apéndice H.

En la Tabla 5-4 se puede observar el área de afectación para cada modelo evaluado. El modelo con mayor afectación es el que presenta flujo de lodos, esto nos demuestra el impacto directo de considerar este tipo de modelos para evaluar el impacto de un evento extremo.

Tabla 5-4 Área de afectación por escenario estudiado para la zona de Bijagua.

Escenario	Área de inundación(km2)
Periodo de Retorno 5 años	0.42
Periodo de Retorno 10 años	0.46
Periodo de Retorno 25 años	0.52
Periodo de Retorno 50 años	0.56
OTTO CN II	0.58
Periodo de Retorno 100 años	0.60
OTTO CN III	0.69
OTTO CN II CV	0.76

En el caso del índice de amenaza ver Tabla 5-5, la distribución de afectación por modelo representa un comportamiento parecido a la tabla anterior. El índice de amenaza alto es el predominante, debido a que este se encuentra a lo largo del cauce principal en este caso particular.

Tabla 5-5 Área de afectación por índice de amenaza para la zona de Bijagua

Escenario	Área de amenaza (km ²)		
	Baja	Media	Alta
Periodo de Retorno 5 años	0.06	0.08	0.16
Periodo de Retorno 10 años	0.06	0.09	0.18
Periodo de Retorno 25 años	0.07	0.11	0.22
Periodo de Retorno 50 años	0.07	0.11	0.25
OTTO CN II	0.07	0.12	0.26
Periodo de Retorno 100 años	0.07	0.13	0.27
OTTO CN III	0.07	0.14	0.31
OTTO CN II CV	0.09	0.17	0.45

La profundidad promedio para la inundación ver Tabla 5-6, presenta un comportamiento similar a las áreas de afectación. La profundidad más alta se encuentra en el flujo de lodos, esto confirma la importancia de considerar este escenario para conocer todos los posibles efectos de un evento particular. El considerar lodos (barro, piedras y troncos), aumenta los niveles de agua. Esto se debe a que la presencia de estos elementos en el cauce reduce la capacidad hidráulica del río.

Tabla 5-6 Estadísticas de los modelos para profundidad de inundación en la zona de Bijagua.

Escenario	Profundidad promedio (m)	Desviación Estándar
Periodo de Retorno 5 años	0.703	0.686
Periodo de Retorno 10 años	0.786	0.770
Periodo de Retorno 25 años	0.889	0.886
Periodo de Retorno 50 años	0.950	0.954
OTTO CN II	0.985	0.995
Periodo de Retorno 100 años	0.998	1.016
OTTO CN III	1.073	1.136
OTTO CN II CV	1.593	1.448

La velocidad para la inundación por modelo ver Tabla 5-7, presenta valores muy elevados para todos los escenarios evaluados. Estos valores son elevados para las poblaciones, pero en este caso estos números se encuentran en el cauce del río. El escenario de inundación de lodos es el más crítico, repitiendo el mismo comportamiento que en los otros parámetros estudiados.

Tabla 5-7 Estadísticas de los modelos para velocidad de inundación en la zona de Bijagua.

Escenario	Velocidad promedio (m/s)	Desviación Estándar
Periodo de Retorno 5 años	1.469	1.324
Periodo de Retorno 10 años	1.590	1.415
Periodo de Retorno 25 años	1.739	1.532
Periodo de Retorno 50 años	1.819	1.595
OTTO CN II	1.873	1.654
Periodo de Retorno 100 años	1.874	1.658
OTTO CN III	1.936	1.773
OTTO CN II CV	2.204	1.734

6 Conclusiones

- Se determinaron las características geomorfológicas, suelos y cobertura vegetal de las cuencas del río Zapote y Chimurria que drenan al cantón de Upala.
- Se configuró el modelo hidrológico de la cuenca completa del río Zapote, la cual consta de 28 subcuencas, donde se obtendrán los valores de avenidas máximas.
- A este informe se le adjunta un archivo en formato *shapefile* de la empresa ESRI, donde se identifican las planicies de inundación de los diferentes ríos con el objetivo de que este archivo sea utilizado para realizar la solicitud al IGN de topografía más detallada en estas zonas.
- Se levantaron las estructuras hidráulicas para cada zona de modelación.
- Una malla de 5m de resolución permite tener una modelación bidimensional en ríos principales de gran tamaño.
- El uso de los caudales en las uniones como hidrogramas de entrada para el modelo bidimensional se debe de aplicar para casos particulares en varias celdas del modelo. Al tener flujos de agua muy elevados en un elemento de entrada de la malla ocasiona problemas de estabilidad en el cálculo.
- La modelación en la zona de Bijagua con agua limpia y un número de curva tipo II se comporta similar al evento registrado por los vecinos del pueblo.
- El considerar una condición de humedad por medio del número de curva tipo III permitió evaluar una condición donde se da un aumento en los niveles de agua y velocidad.
- El considerar una condición de flujo de lodos permitió establecer los efectos de la condición más crítica. En estos casos se presentaron las alturas y velocidades máximas en todos los modelos.
- El modelo de Canaleta con agua limpia y un número de curva tipo II dio parecido a lo registrado por los pobladores. En el caso de este modelo los niveles de agua no llegaron a todos los lugares registrados, pero se obtuvieron resultados bastante cercanos.
- La alcantarilla en Bijagua presenta un comportamiento adecuado para las condiciones de las zonas. En la mayoría de las modelaciones no se presentó problemas de desbordamiento.
- El uso de canales en los modelos bidimensionales son la opción más viable en los casos de contar con riachuelos o quebradas de ancho menor a la resolución de la malla.

7 Referencias

- Comité Sectorial Regional Agropecuario. (2011). Plan Regional de Desarrollo Región Huetar Norte.
- INTA-MAG. (2016). Boletín Técnico Suelos de Costa Rica, Orden Andisol. San José.
- INTA-MAG. (2016). Boletín Técnico Suelos de Costa Rica, Orden Entisol.
- INTA-MAG. (2016). Boletín Técnico Suelos de Costa Rica, Orden Ultisol. San José.
- Pérez, J. (1979). Fundamentos del ciclo hidrológico. Universidad Central de Venezuela, Departamento de Meteorología e Hidrología, Caracas-Venezuela. 1-38
- Rojas, N. (s.f.). Estudio de Cuencas Hidrográficas de Costa Rica, Cuenca del Zapote. San José: IMN.
- Villalobos, R., Jiménez, E., Hernández, K., Córdoba, J., & Solano, P. (2013). Descripción del clima en el cantón de Upala. San José: IMN.
- Villón Bejár, M. (.2006). Drenaje. Cartago:: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- González, M. (Abril de 2001). *OpenCourseWare de la Universidad Politécnica de Madrid*. Recuperado el 22 de Setiembre de 2018, de <http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/hidrologia-de-superficies-y-conservacion-de-suelos/ocw-marta-pdf/Tema2.pdf>
- MAG. (2014). *Principales suelos de Costa Rica*. Obtenido de Asociación Costarricense de Ciencias del Suelo: http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_ciencia/suelos-cr.html
- Pérez J. 1979. *Fundamentos del ciclo hidrológico*. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Departamento de Meteorología e Hidrología. Caracas-Venezuela. 1-38.
- Strahler, A. (1957). Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. *Trans American Geophysical Union*, 38(6), 913-920.
- United States Department of Agriculture. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds: Technical Release 55* (Segunda ed.). Estados Unidos.
- Villón Bejár, M. (2006). *Drenaje*. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

8 Equipo de trabajo

A continuación, se mencionan las personas que, de alguna forma, ya sea como estudiantes o por medio de contratación por medio del proyecto participaron en la generación del mismo.

Equipo colaborador:

Nombre	Título	Posición
Alejandra Rojas González, Ph.D.	Licenciada en Ingeniería Agrícola Maestría en Ingeniería Civil. Doctorado en Ingeniería Civil (Recursos Hídricos y Ambiental)	Coordinadora
Reiner Sibaja Matarrita	Licenciado en Ingeniería Agrícola.	Colaborador
Sebastián Fallas Salazar	Estudiante de Licenciatura Ingeniería Agrícola y de Biosistemas	Asistente
Hellen Brenes Vargas	Estudiante de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas	Asistente
Michel Castagnet Herrera	Estudiante de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas	Asistente

9 Apéndices

<i>Apéndice A: Anotaciones de campo del GPS.....</i>	<i>9.1</i>
<i>Apéndice B: Información adicional de la malla.</i>	<i>9.20</i>
<i>Apéndice C: Descripción visual de los puentes de la zona.</i>	<i>9.22</i>
<i>Apéndice D: Modelaciones hidráulicas adicionales.....</i>	<i>9.26</i>
<i>Apéndice E: Verificación de resultados de Flo2D para cada modelación bidimensional.</i>	<i>9.31</i>
<i>Apéndice F: Matrices de confusión para cada imagen.....</i>	<i>9.42</i>
<i>Apéndice G. Secciones de cotas de inundación</i>	<i>9.47</i>
<i>Apéndice H. Resumen de Análisis Hidráulicos.....</i>	<i>9.63</i>
<i>Apéndice I. Mapas de profundidad, velocidad y peligrosidad de Upala para distintos escenarios.....</i>	<i>9.67</i>
<i>Apéndice J. Mapas de profundidad, velocidad y peligrosidad de Bijagua para distintos escenarios.....</i>	<i>9.89</i>
<i>Apéndice K. Mapas de profundidad, velocidad y peligrosidad de Canalete para distintos escenarios</i>	<i>9.114</i>