

Informe 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 de Aguas Claras

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



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

Elaborado por: Dra. Alejandra Rojas González, Escuela de Ingeniería de Biosistemas, Universidad de Costa Rica

San José, 03 de Marzo, 2020

TABLA DE CONTENIDO

1	Resumen Ejecutivo.....	1-1
2	Introducción	2-1
2.1	Propósito del estudio.....	2-1
2.2	Alcance del trabajo	2-1
3	Descripción del área de estudio.....	3-1
3.1	Antecedentes en la cuenca y datos históricos	3-1
3.2	Clasificación de las cuencas.	3-2
3.3	Localización.....	3-5
3.4	Características Climáticas.....	3-6
3.4.1	Precipitación	3-6
3.4.2	Temperatura.....	3-6
3.4.3	Velocidad del viento	3-8
3.4.4	Radiación solar	3-9
3.4.5	Evapotranspiración	3-9
3.5	Características morfométricas de las subcuencas y red de drenaje.....	3-11
3.5.1	Delimitación del área de estudio	3-11
3.5.2	Red Hidrográfica	3-11
3.5.3	Parámetros de forma de las subcuencas	3-14
3.5.4	Parámetros de relieve de las subcuencas	3-18
4	Análisis hidrológico	4-1
4.1	Cobertura del terreno	4-3
4.2	Tipos de Suelos.....	4-9
4.3	Número de curva.....	4-10
4.4	Tiempo de concentración.....	4-13
4.5	Datos de Precipitación y tormenta de diseño	4-14
4.5.1	Caracterización del Huracán Otto.....	4-16
4.6	Simulación Hidrológica	4-17
4.6.1	Hidroestimador	4-17
4.6.2	Resultados del análisis hidrológico	4-18
5	Modelación Hidráulica.....	5-1



5.1	Zona de estudio hidráulico.....	5-1
5.2	Visita de campo	5-2
5.3	Geometría del río y de las planicies para la modelización.....	5-5
5.3.1	Estructuras Hidráulicas.....	5-8
5.4	Coeficientes de rugosidad.....	5-16
5.5	Condiciones de borde y régimen de flujo	5-17
5.6	Escenarios hidráulicos	5-21
5.6.1	Análisis hidráulico para condiciones de Otto con CN II.....	5-21
5.6.2	Análisis hidráulico para condiciones de Otto con CN III.....	5-23
5.6.3	Análisis hidráulico para condiciones de Otto con CN II y C.V de 0.45.....	5-24
5.6.4	Análisis hidráulico de las condiciones existentes para 5 años de periodo de retorno	5-26
5.6.5	Análisis hidráulico de las condiciones existentes para 10 años de periodo de retorno	5-27
5.6.6	Análisis hidráulico de las condiciones existentes para 25 años de periodo de retorno	5-28
5.6.7	Análisis hidráulico de las condiciones existentes para 50 años de periodo de retorno	5-29
5.6.8	Análisis hidráulico de las condiciones existentes para 100 años de periodo de retorno	5-30
5.6.9	Resumen de Análisis Hidráulicos Desarrollados para Aguas Claras	5-34
6	Conclusiones y recomendaciones.....	6-37
7	Referencias	7-1
8	Equipo de trabajo	8-1
9	Apéndices	9-1

Lista de Figuras

Figura 3-1. Índice de vulnerabilidad integrado.....	3-3
Figura 3-2. Índice para eventos extremos lluviosos.....	3-3
Figura 3-3. Clasificación por información general disponible por cuenca	3-4
Figura 3-4 Localización de cuenca Aguas Claras	3-5
Figura 3-5. Precipitación mensual promedio para la cuenca Aguas Claras	3-6
Figura 3-6. Temperatura media promedio de la cuenca Aguas Claras	3-7
Figura 3-7. Temperatura máxima promedio mensual de la cuenca Aguas Claras	3-7
Figura 3-8. Temperatura mínima promedio mensual para la cuenca Aguas Claras.....	3-8
Figura 3-9. Velocidad promedio mensual del viento para la cuenca Aguas Claras	3-8
Figura 3-10. Radiación promedio para la cuenca Aguas Claras	3-9
Figura 3-11. Evapotranspiración mensual para la cuenca Aguas Claras	3-10
Figura 3-12. Pendiente porcentual de la cuenca de Aguas Claras	3-18
Figura 3-13. Curva hipsométrica general, tomado de Strahler (1857).....	3-20
Figura 3-14. Curva hipsométrica para subcuencas en fase de juventud.....	3-21
Figura 3-15. Curva hipsométrica para subcuencas en fase de juventud.....	3-21
Figura 3-16. Curva hipsométrica para subcuencas en fase de juventud y madurez	3-22
Figura 3-17. Curva hipsométrica para subcuencas en fase de madurez y vejez	3-22
Figura 3-18. Curva hipsométrica para subcuencas en fase de vejez	3-23
Figura 4-1. Esquema gráfico de la distribución del modelo Hidrológico en HEC HMS.....	4-2
Figura 4-2. Mapa de Imágenes Satelitales WorldView 3.....	4-4
Figura 4-3. Cobertura del suelo para cuenca de Aguas Claras.....	4-7
Figura 4-4. Porcentaje de cobertura de suelo para la cuenca Aguas Claras	4-8
Figura 4-5. Curvas intensidad-duración-frecuencia de Guayabal	4-16
Figura 4-6. Precipitación acumulada del Hidroestimador para puntos característicos de la zona de estudio.4-18	
Figura 4-7 . Hidrograma de Salida del Río Frijoles.....	4-19
Figura 4-8. Hidrograma de Salida del Río Raudales.....	4-19
Figura 4-9 . Hidrograma de salida del rio Frijoles con período de retorno de 100 años	4-21
Figura 4-10 . Hidrograma de salida de rio Raudales para un tiempo de retorno de 100 años	4-21
Figura 5-1. Zona de modelación hidráulica.....	5-1
Figura 5-2. Labores de campo de primera gira	5-2
Figura 5-3. Labores de campo de segunda gira.....	5-3
Figura 5-4. Puntos de ubicación de la inundación en zona de Aguas Claras.....	5-4
Figura 5-5. Mallado utilizado para en modelación hidráulica	5-5
Figura 5-6. Elevaciones de modelo bidimensional	5-6
Figura 5-7. Perfil del río a partir de topografía de curvas de nivel.....	5-7
Figura 5-8. Perfil del río a partir de topografía obtenida mediante el DISTO 2910.....	5-7
Figura 5-9. Infraestructuras hidráulicas incluidas en modelación bidimensional	5-8
Figura 5-10. Perfil aguas arriba y aguas abajo del puente de Quebrada Brava.....	5-9
Figura 5-11. Niveles de agua en puente de Quebrada Brava	5-9
Figura 5-12. Curva de descarga de puente de Quebrada Brava	5-10
Figura 5-13. Perfil aguas arriba y aguas abajo de puente de Quebrada Huacas	5-10
Figura 5-14. Niveles de agua en el puente de Quebrada Huacas	5-11
Figura 5-15. Curva de descarga de puente de Quebrada Huacas.....	5-11
Figura 5-16. Perfil aguas arriba y aguas abajo de puente ubicado en la entrada norte del poblado de San Isidro de Aguas Claras.....	5-12

Figura 5-17. Niveles de agua en el puente ubicado en la entrada norte del pueblo de San Isidro de Aguas Claras	5-12
Figura 5-18. Curva de descarga de puente ubicado en la entrada norte del pueblo de San Isidro de Aguas Claras	5-13
Figura 5-19. Perfil aguas arriba y aguas debajo de alcantarilla en centro del poblado de San Isidro	5-13
Figura 5-20. Niveles de agua en la alcantarilla en el centro del pueblo de San Isidro	5-14
Figura 5-21. Curva de descarga de alcantarilla	5-14
Figura 5-22. Perfil de dique ubicado en última sección el Río Frijoles	5-15
Figura 5-23. Niveles de agua en el dique localizado en la última sección del Río Frijoles	5-15
Figura 5-24. Curva de descarga del dique presente en Río Frijoles	5-15
Figura 5-25. Cobertura del suelo de zona hidráulica	5-16
Figura 5-26. Ubicación de las entradas y salidas de agua de los modelos hidráulicos	5-18
Figura 5-27. Distribución de lluvia para escenarios CN II (a), CN III (b), CN II 5 años (c), CN II 10 años (d), CN II 25 años (e), CN II 50 años (f) y CN II 100 años (g).	5-20
Figura 5-28. Comprobación de estabilidad en elemento 205223 de modelación del evento OTTO	5-21
Figura 5-29. Profundidad máxima (izquierda) y velocidad máxima (derecha) de la inundación CN II para Aguas Claras	5-22
Figura 5-30. Mapa de índice de amenaza para la inundación CN II para Aguas Claras	5-23
Figura 5-31. Profundidad máxima (izquierda) y velocidad máxima (derecha) de la inundación CN III para Aguas Claras	5-24
Figura 5-31. Profundidad máxima (izquierda) y velocidad máxima (derecha) de la inundación CN II y CV de 0.45 para Aguas Claras.....	5-25
Figura 5-33 . Profundidad máxima (izquierda) y velocidad máxima (derecha) de la inundación CN II para período de retorno de 5 años.....	5-26
Figura 5-34. Profundidad máxima (izquierda) y velocidad máxima (derecha) de la inundación CN II para período de retorno de 10 años.....	5-27
Figura 5-35. Profundidad máxima (izquierda) y velocidad máxima (derecha) de la inundación CN II para período de retorno de 25 años.....	5-28
Figura 5-36. Profundidad máxima (izquierda) y velocidad máxima (derecha) de la inundación CN II para período de retorno de 50 años.....	5-30
Figura 5-37. Profundidad máxima (izquierda) y velocidad máxima (derecha) de la inundación CN II para período de retorno de 100 años.....	5-31
Figura 5-38. Localización de perfiles de cotas de nivel de agua de los principales cauces de la zona.	5-32

Lista de Tablas

Tabla 1. Información consultada que contempla el distrito de Aguas Claras.	3-1
Tabla 2. Clasificación de las cuencas de acuerdo con la pendiente promedio de laderas.	3-12
Tabla 3. Pendiente media del río por subcuenca	3-12
Tabla 4. Densidad de drenaje por subcuenca	3-14
Tabla 5. Valores de interpretación del factor de forma	3-15
Tabla 6. Factor de forma por subcuenca	3-15
Tabla 7. Índice de compacidad por subcuenca	3-17
Tabla 8. Características topográficas de las subcuencas	3-19
Tabla 9. Índice de pendiente por subcuenca	3-24
Tabla 10. Distribución de Junctions del modelo Hidrológico para Aguas Claras	4-3
Tabla 11. Distribución de Reach's del modelo Hidrológico para Aguas Claras	4-3
Tabla 12. Valores de precisión global y kappa de la clasificación supervisada	4-6
Tabla 13. Porcentaje de cobertura de suelo por subcuenca	4-8
Tabla 14. Porcentaje de cobertura de suelo por subcuenca	4-9
Tabla 15. Tipo de suelo en la cuenca Aguas Claras.	4-10
Tabla 16. Números de curva por subcuenca	4-12
Tabla 17. Tiempo de concentración por subcuenca	4-14
Tabla 18. Láminas máximas de precipitación para tormenta de diseño.	4-15
Tabla 19. Caudales y volúmenes máximos de los escenarios establecidos para Salida del Río Frijoles.....	4-20
Tabla 20. Caudales y volúmenes máximos de los escenarios establecidos para Salida del Río Raudales ...	4-20
Tabla 21. Coeficientes de rugosidad	5-17
Tabla 22. Información de la inundación para secciones del Río Frijoles.....	5-33
Tabla 23. Información de la inundación para secciones de Quebrada Culebra.....	5-33
Tabla 24. Información de la inundación para secciones de Quebrada Brava	5-33
Tabla 25. Información de la inundación para secciones de Quebrada Huacas-El Cerro	5-34
Tabla 26. Área de cobertura de la inundación.....	5-35
Tabla 27. Área de afectación según índice de amenaza.....	5-35
Tabla 28. Resumen de las profundidades de la inundación	5-36
Tabla 29. Resumen de las velocidades de la inundación	5-36

Lista de Apéndices

Apéndice A: Anotaciones de campo de GPS	9-2
Apéndice B: Descripción visual de estructuras hidráulicas.....	9-22
Apéndice C: Tipo de relieve en la cuenca Aguas Claras	9-25
Apéndice D: Factor de Forma por subcuenca	9-27
Apéndice E: Modelaciones hidráulicas unidimensionales adicionales.....	9-29
Apéndice F: Verificación de resultados de Flo-2D.....	9-33
Apéndice G: Secciones de cotas de inundación.....	9-38
Apéndice H: Matrices de confusión.....	9-49
Apéndice I: Mapas de Profundidad Máxima de Inundación	9-54
Apéndice J: Mapas de Velocidad Máxima de Inundación.....	9-63
Apéndice K: Mapas de Amenaza de Inundación	9-72

1 Resumen Ejecutivo

Este proyecto se realiza 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.

El trabajo realizado presenta la elaboración de los mapas de inundación de los ríos presentes en la cuenca de Aguas Claras, zona Norte de Costa Rica. Se calcularon las características de las cuencas hidrográficas de los ríos, se elaboraron los mapas con respecto al relieve, suelos, uso de suelo e hidrografía, caracterización de los parámetros hidrológicos de las subcuencas y se elaboró un análisis hidrológico. Adicionalmente, se realizó una modelación hidráulica bidimensional para generar los mapas de inundación del evento del Huracán Otto y para los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años con flujo Newtoniano (agua limpia).

2 Introducción

2.1 Propósito del estudio

El propósito de este estudio fue evaluar las condiciones hidrológicas e hidráulicas del lugar para desarrollar mapas de inundación para diferentes períodos de retorno de los ríos ubicados en el distrito de Aguas Claras, Costa Rica, como apoyo a la actualización de los mapas 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 ante posibles escenarios a presentarse en una zona de alta vulnerabilidad que ha sido afectada 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 revisión bibliográfica de diversas fuentes de información que abarcó estudios previos de la zona. Con dicha investigación, se encontró que, para la zona de Aguas Claras, hay una ausencia de información. La información disponible corresponde a aquella que contempla en su totalidad a la cuenca hidrográfica de Zapote como tal y lo relacionado con el cantón de Upala.

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

Tabla 1. Información consultada que contempla el distrito de Aguas Claras.

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 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 las cuencas.

Para obtener el inventario de amenazas por cuenca, se trabajó con el Informe final: Adaptación del recurso hídrico al cambio climático en Costa Rica del 2012, elaborado por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). Este documento cuenta con información del índice de vulnerabilidad integrado, riesgo climático ante eventos extremos lluviosos y secos por cantón.

La vulnerabilidad es definida a partir de 14 indicadores sociales y económicos, agrupados en tres componentes: Infraestructura, servicios y condición humana. Esta información se encuentra a nivel de cantón por lo que se trabajó para llevar los datos a nivel de cuenca hidrográfica. Para ello se digitalizaron y con el uso de la capa de cantones del Atlas de Costa Rica 2014, se elaboró un nuevo índice para las cuencas a partir de los datos originales mediante un promedio ponderado, donde se considera el peso de las áreas de los cantones asociados a las cuencas hidrográficas.

En el caso del índice de vulnerabilidad integrado (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 (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 del proyecto en esta área beneficiará a estas comunidades localizadas en zonas propensas a problemas de inundación, evitando la pérdida de vidas humanas.

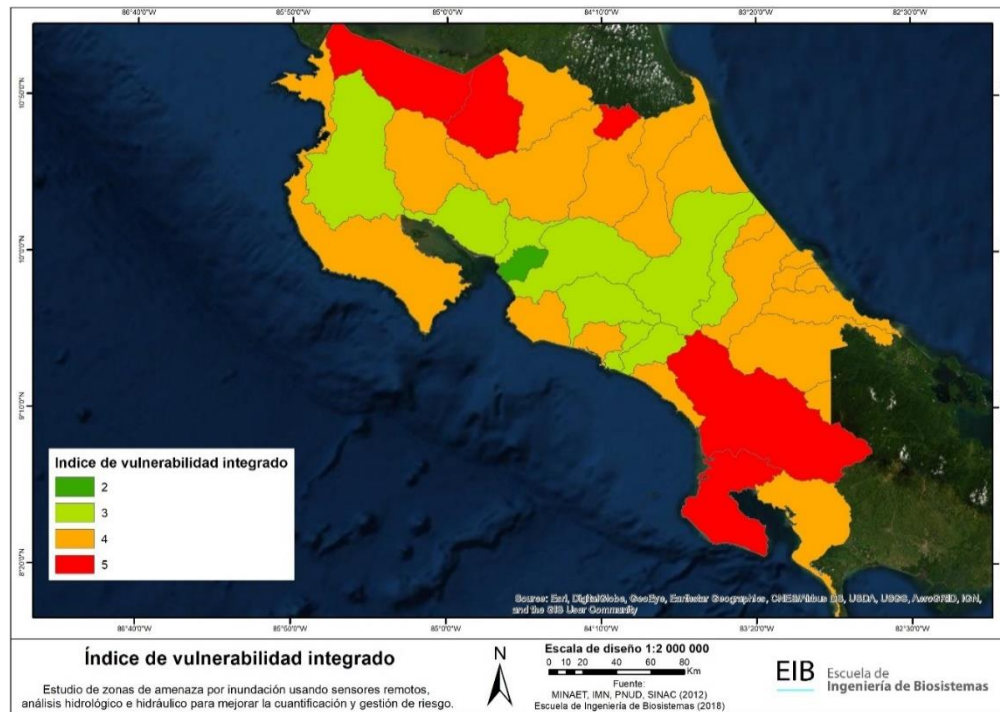


Figura 3-1. Índice de vulnerabilidad integrado

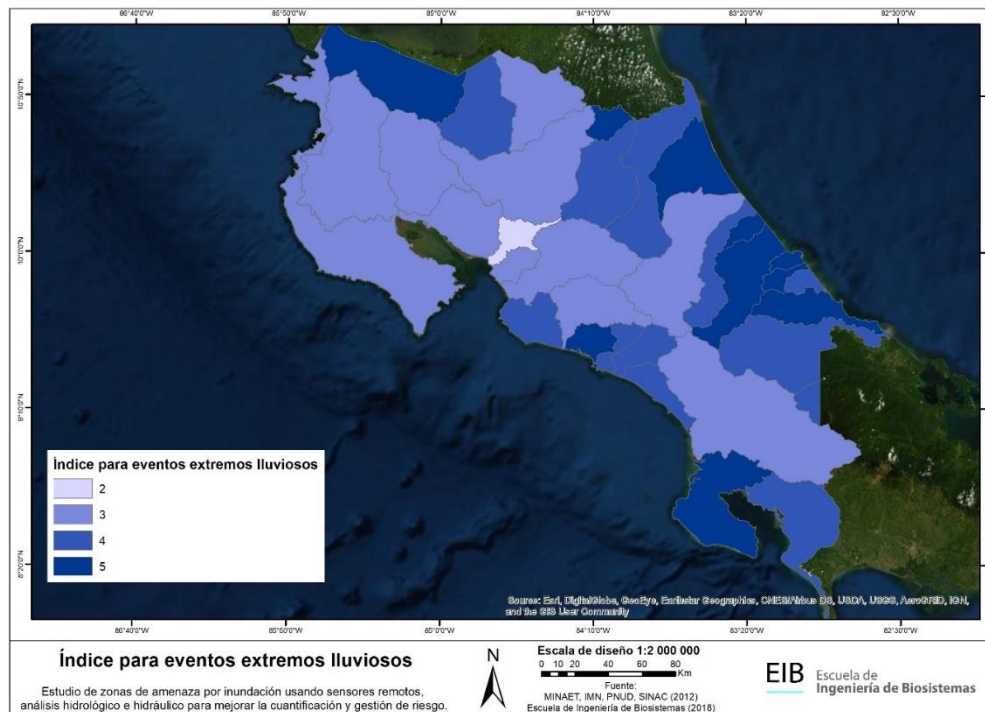


Figura 3-2. Índice para eventos extremos lluviosos

La cantidad de información disponible por cuenca se clasificó de acuerdo con los datos encontrados. Considerando como un 100% las cuencas que cuentan con toda la información recopilada (Figura 3-3). 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, los cuales apenas permiten tener un conocimiento general de la cuenca hidrográfica.

Para el desarrollo del estudio es importante mencionar que se debería de contar con información más detallada, ya que la encontrada 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.

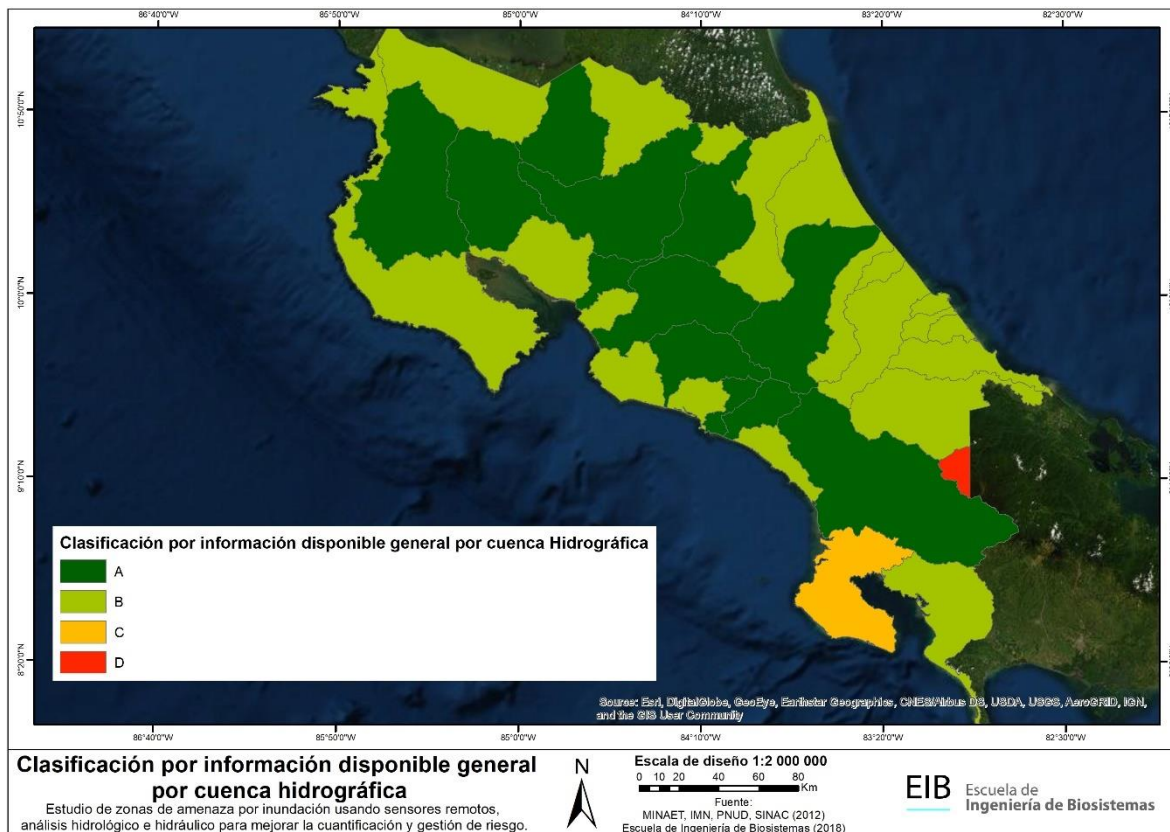


Figura 3-3. Clasificación por información general disponible por cuenca

3.3 Localización

La cuenca Aguas Claras corresponde a un área de 49.75 km² que pertenece a la Vertiente del Pacífico Norte y está localizada en la zona Huetar Norte del país, específicamente en la provincia de Alajuela, cantón de Upala, distrito Aguas Claras. Esta región cuenta con un poblado de gran importancia, San Isidro. La cuenca presenta 14 estructuras hidráulicas, la mayoría ubicados en la parte norte de la cuenca. Además, contiene en su relieve una elevación máxima de 2,030.84 msnm y mínima de 304.62 msnm, tal información se puede apreciar en la siguiente figura.

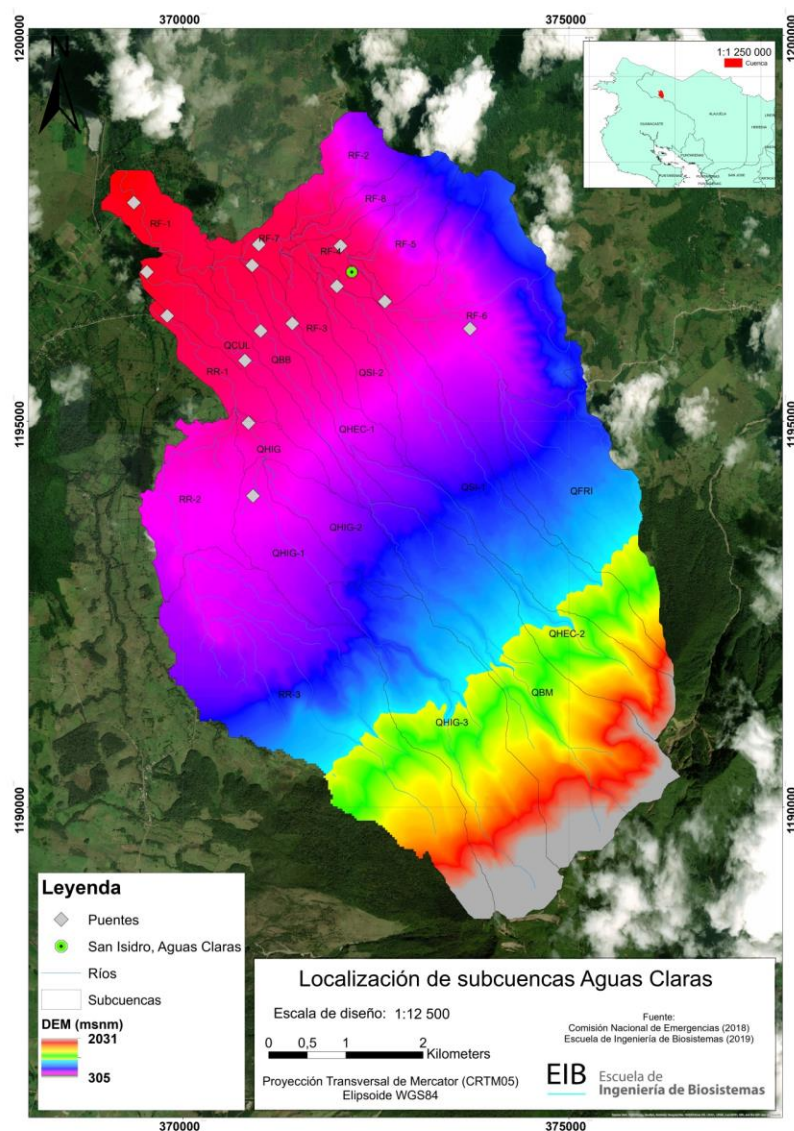


Figura 3-4 Localización de cuenca Aguas Claras

3.4 Características Climáticas

La información utilizada para las características climáticas de la cuenca Aguas Claras se obtuvieron de los rásters del WorldClimate Global Data 1970-2000.

La zona de estudio cuenta con la estación Guayabal, Código 69582, ubicada a una elevación de 506 msnm y específicamente en coordenadas CRTM05, Norte 1, 193,046.944 m y Este 369,746.244 m.

3.4.1 Precipitación

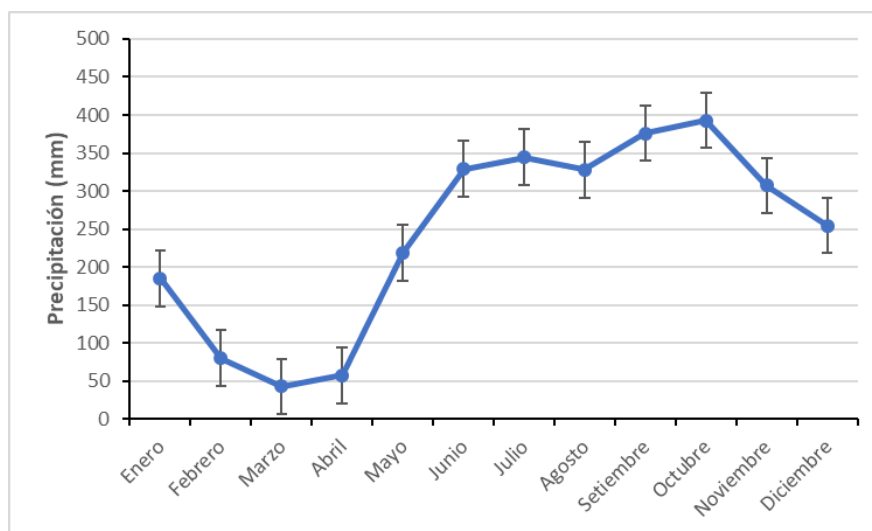


Figura 3-5. Precipitación mensual promedio para la cuenca Aguas Claras

Las precipitaciones promedio de la cuenca Aguas Claras (Figura 3-5) oscilan entre los 50-400 mm. Los meses con mayor cantidad de lluvia son setiembre y octubre con valores de 375.9 y 392.6 mm, respectivamente. El período más seco se vincula con los meses de febrero a abril, donde el mes de menor precipitación es marzo con 42.8 mm.

3.4.2 Temperatura

Los datos de temperatura registrados por WorldClim presentan un comportamiento similar entre cada figura, como se puede evidenciar en las Figura 3-6, Figura 3-7 y Figura 3-8. Para temperaturas máximas promedio y media promedio, existe un incremento desde enero hasta abril y se da una disminución hasta que se alcanza el mes de julio, luego incrementa en

agosto y vuelve a disminuir en diciembre. No obstante, para las temperaturas mínimas promedio, a partir de abril se da una disminución hasta diciembre, siendo este último el mes que presenta menor temperatura para la zona, como se evidencia en la figura respectiva.

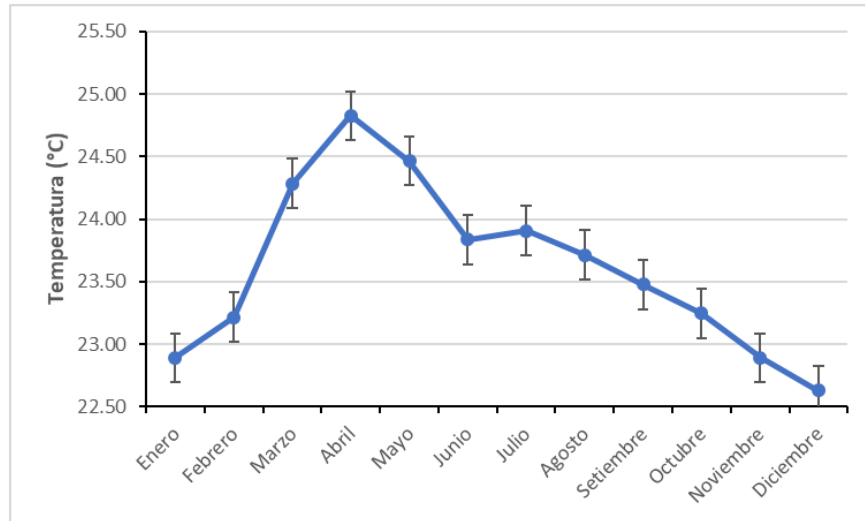


Figura 3-6. Temperatura media promedio de la cuenca Aguas Claras

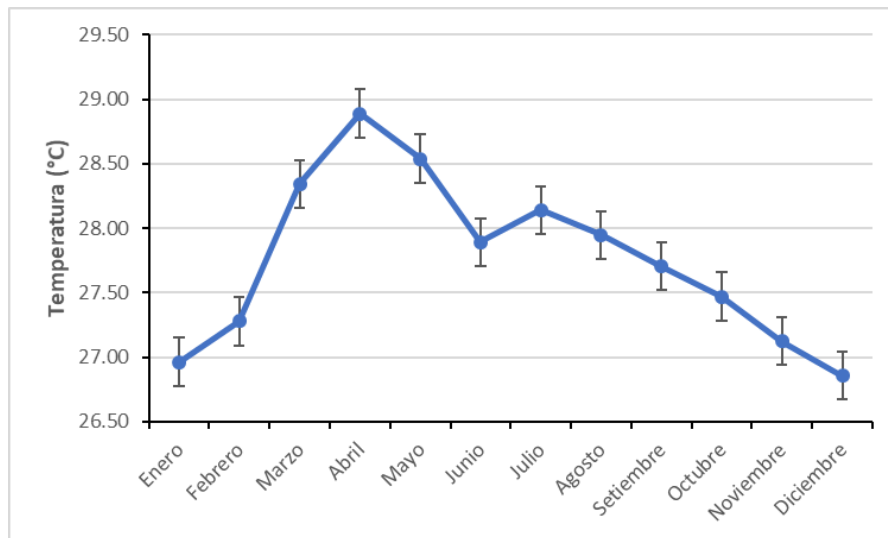


Figura 3-7. Temperatura máxima promedio mensual de la cuenca Aguas Claras

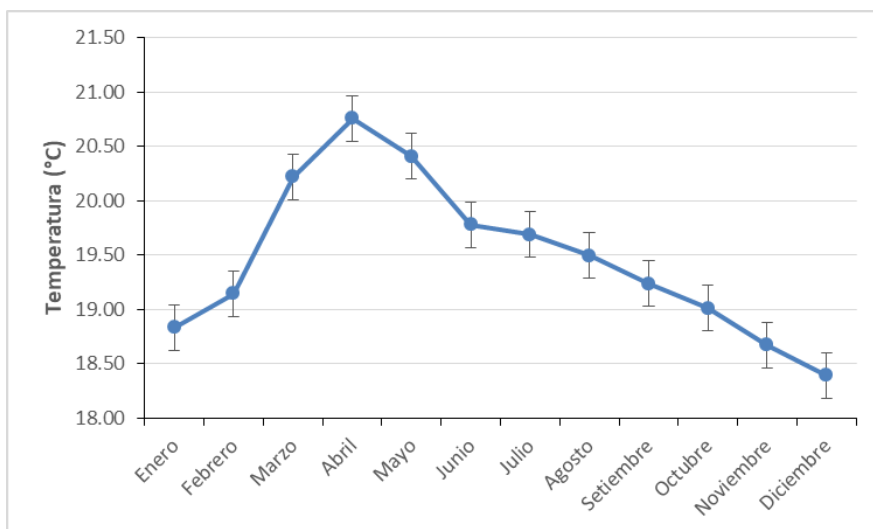


Figura 3-8. Temperatura mínima promedio mensual para la cuenca Aguas Claras

3.4.3 Velocidad del viento

La velocidad promedio mensual de los vientos decrece de febrero a junio; luego se presenta un aumento en julio y, seguidamente, vuelve a disminuir hasta setiembre, donde este último registra los vientos con menor velocidad (1.75 m/s), y luego vuelve a incrementarse hasta el mes de diciembre.

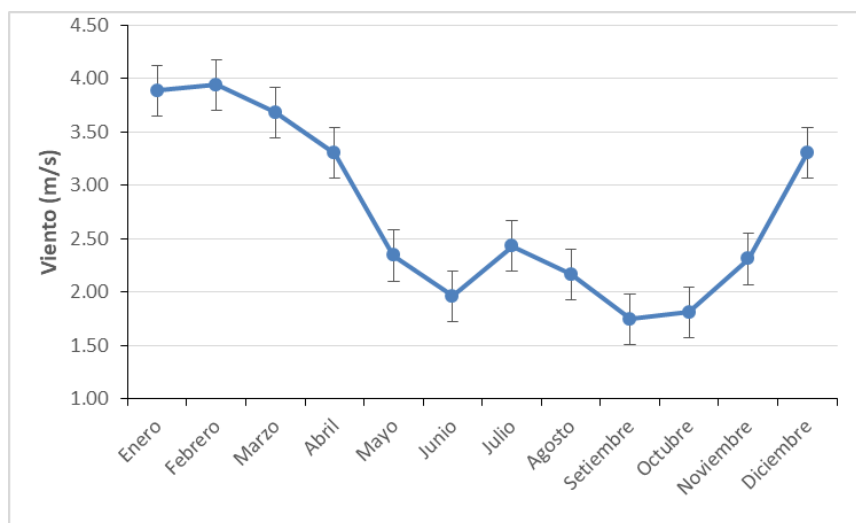


Figura 3-9. Velocidad promedio mensual del viento para la cuenca Aguas Claras

3.4.4 Radiación solar

La radiación solar para la cuenca se comporta de forma similar a las temperaturas promedios mensuales anteriormente presentados, donde el mes de mayor radiación solar es el de abril con 23,087.37 kJ m⁻² día⁻¹.

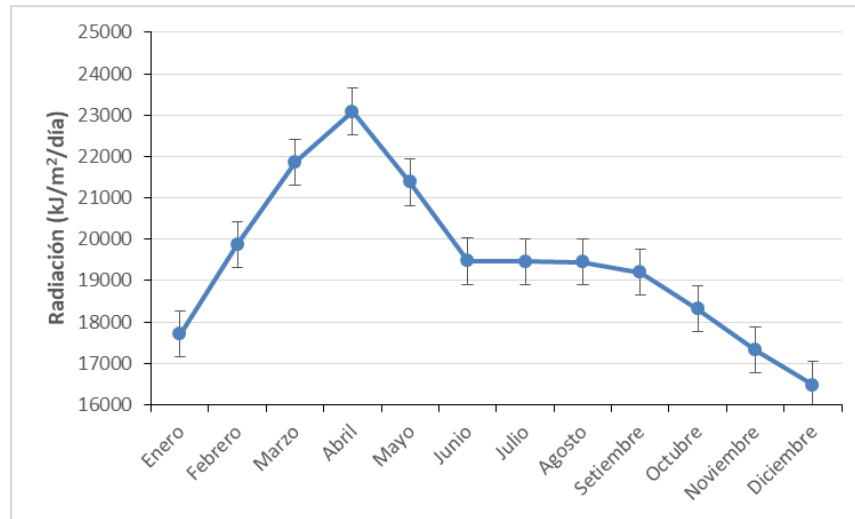


Figura 3-10. Radiación promedio para la cuenca Aguas Claras

3.4.5 Evapotranspiración

La evapotranspiración es la pérdida de la humedad del suelo debido a la evaporación y la transpiración de la vegetación.

$$ET_{potencial/mes} = 58,93 \times t_b \times \frac{(N^{\circ} \text{ días del mes})}{365} \quad (1)$$

Dónde:

t_b = biotemperatura

Según la Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales de Perú (ONERN), la biotemperatura es la temperatura del aire, aproximadamente entre 0°C y 30°C, que determina el ritmo e intensidad de los procesos fisiológicos en las plantas. Del mismo modo, establece la tasa de evaporación directa del agua contenida en el suelo y en la vegetación.

Para el cálculo de la biotemperatura se toma en consideración la metodología utilizada en el estudio realizado por la Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales (1976), con lo anterior, se toma en cuenta tres consideraciones para temperaturas medias de cada mes.

1. Si la temperatura media del mes se encuentra entre 6°C y 24°C, la Biotemperatura media es igual a la temperatura media.
2. Si la temperatura media es mayor a los 24°C, la biotemperatura se calcula de la siguiente manera.

$$t_b = t_{mm} - \left| \frac{3 \times Lat^{\circ} \times (t_{mm} - 24)^2}{100} \right| \quad (2)$$

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

$$t_b = \frac{t_{máxm}^2}{2 \times (t_{máxm} - t_{minm})} \quad (3)$$

En la Figura 3-11 se muestra la evapotranspiración potencial mensual para el área de estudio, donde la temperatura de la cuenca Aguas Claras se obtuvo con la ecuación (1) para una latitud general de la zona de estudio de 10.816, la cual corresponde al poblado de San Isidro.

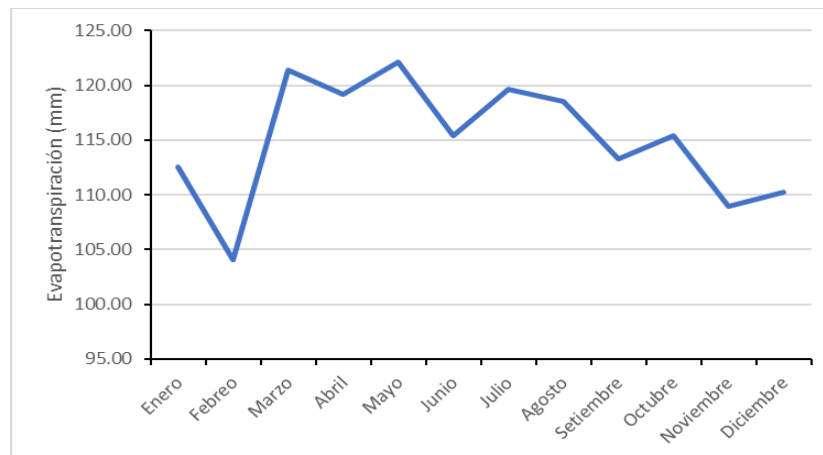


Figura 3-11. Evapotranspiración mensual para la cuenca Aguas Claras

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 utilizaron dos modelos de elevación digital (DEM por sus siglas en inglés). Uno de ellos, se obtuvo a partir de las curvas de nivel a 0.5 m para una resolución espacial de 1 m, correspondientes a la zona circundante del poblado de San Isidro, de manera tal que contemplara los Ríos Frijoles y Raudales. Y el segundo, corresponde a una sección del mosaico elaborado a partir de DEM's individuales, los cuales también se encuentran a una resolución espacial de 1m. Este segundo DEM se utilizó para afinar las zonas altas de la zona de estudio obtenidas a partir del primer DEM.

Posteriormente, se delimitó la cuenca y las subcuencas mediante la herramienta ArcHydro Tools del software ArcGIS. Las cuencas delimitadas corresponden a los Ríos Frijoles y Raudales, los cuales se subdividen en un total de 23 subcuencas (Figura 3-4). Además, se le asignó una codificación a cada subcuenca según su origen con el fin de simplificar la lectura de los mapas.

3.5.2 Red Hidrográfica

La cuenca del río Aguas Claras posee un área de 48.90 km² y está conformada por dos cuencas hidrográficas principales, el río Raudales con una longitud máxima de 9.97 km, por otro lado, el río Frijoles con 11.04 km aproximadamente. Ambos drenan de Sureste a Noroeste.

Las 23 subcuencas a lo largo de la cuenca hidrográfica de Aguas Claras presentan un cauce principal, drenaje y forma característica que brindan información importante para la caracterización de las subcuencas.

La **longitud del cauce principal** (L) es la longitud total en kilómetros de la corriente principal de la cuenca, la cual 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):

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

Tabla 2. Clasificación de las cuencas de acuerdo con la pendiente promedio de laderas.

Pendiente Media (%)	Tipo de Relieve
>3	Llano
3 – 10	Suave
10 – 20	Moderado
20 – 30	Fuerte
30 – 50	Muy fuerte
<50	Escarpada

Fuente: Gonzales, s.f.¹

Los valores obtenidos de la respectiva pendiente media de cada río en conjunto con sus cotas de elevación se detalla a continuación.

Tabla 3. Pendiente media del río por subcuenca

Subcuenca	Altura máxima (m)	Altura mínima (m)	Longitud de cauce principal (km)	I_r (%)	Tipo de relieve
Q. Brava Baja	543.52	337.68	4.42	4.65	Suave
Q. Brava Media	1716.24	543.63	6.14	19.1 1	Moderado
Q. Culebra	383.92	323.02	2.64	2.31	Llano
Q. Frijoles	797.00	492.88	2.73	11.1 5	Moderado
Q. Higuerón	421.29	387.34	1.49	2.27	Llano
Q. Higuerón 1	536.08	421.23	2.19	5.25	Suave
Q. Higuerón 2	486.96	421.31	1.29	5.10	Suave
Q. Higuerón 3	1777.47	535.66	5.66	21.9 6	Fuerte
Q. San Isidro 1	906.13	355.81	6.70	8.21	Suave

1 <http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/hidrologia-de-superficies-y-conservacion-de-suelos/ocw-marta-pdf/Tema2.pdf>

Q. San Isidro 2	383.43	361.24	0.81	2.73	Llano
Q. Huacas-El Cerro 1	478.44	342.40	8.58	1.59	Llano
Q. Huacas-El Cerro 2	1272.40	478.46	8.58	9.26	Suave
Río Frijoles 1	337.66	304.87	2.82	1.16	Llano
Río Frijoles 2	494.55	353.13	1.93	7.33	Suave
Río Frijoles 3	361.42	351.08	0.76	1.35	Llano
Río Frijoles 4	363.71	351.08	1.24	1.02	Llano
Río Frijoles 5	528.61	363.69	1.51	10.9 3	Moderado
Río Frijoles 6	621.94	363.71	4.61	5.60	Suave
Río Frijoles 7	353.14	342.40	0.92	1.17	Llano
Río Frijoles 8	457.83	353.13	1.61	6.49	Suave
Río Raudales 1	387.3	332.8	2.10	2.59	Llano
Río Raudales 2	459.7	387.4	3.31	2.19	Llano
Río Raudales 3	1349.6	458.9	6.22	14.3 1	Moderado

De manera análoga, el mapa generado con el tipo de relieve según la pendiente promedio se puede apreciar en el Apéndice C.

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:

$$D_d = \frac{\Sigma L_s}{A} \left(\frac{km}{km^2} \right) \quad (5)$$

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.

De acuerdo con los datos obtenidos (Tabla 4), las subcuencas mejor drenadas son las de Quebrada Brava Baja, Quebrada Huacas-El Cerro 2 y Quebrada Huacas-El Cerro 1 con valores de 3.61 km/km², 3.70 km/km² y 8.857 km/km², respectivamente.

Tabla 4. Densidad de drenaje por subcuenca

Subcuenca	Área (km ²)	Longitud total de cauces (km)	Densidad de drenaje (km/km ²)
Q. Brava Baja	1.363	4.927	3.616
Q. Brava Media	5.616	12.964	2.309
Q. Culebra	1.435	2.637	1.837
Q. Frijoles	3.237	8.100	2.502
Q. Higuerón	0.521	0.905	1.736
Q. Higuerón 1	1.657	2.650	1.599
Q. Higuerón 2	1.229	1.547	1.259
Q. Higuerón 3	4.752	7.145	1.504
Q. San Isidro 1	3.782	9.400	2.485
Q. San Isidro 2	0.717	0.813	1.134
Q. Huacas-El Cerro 1	0.969	8.582	8.857
Q. Huacas-El Cerro 2	2.320	8.575	3.696
Río Frijoles 1	1.089	2.820	2.588
Río Frijoles 2	1.102	1.930	1.752
Río Frijoles 3	0.661	0.765	1.157
Río Frijoles 4	0.607	1.235	2.035
Río Frijoles 5	1.153	1.604	1.391
Río Frijoles 6	5.261	9.544	1.814
Río Frijoles 7	0.448	1.117	2.494
Río Frijoles 8	0.605	1.613	2.667
Río Raudales 1	0.747	2.101	2.812
Río Raudales 2	2.007	3.809	1.898
Río Raudales 3	7.621	17.832	2.340

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:

$$F = \frac{P}{A} \left(\frac{km}{km^2} \right) \quad (6)$$

Se puede inferir en el largo y ancho de cada una de las subcuencas mediante el factor de forma al utilizar las relaciones de la Tabla 5 .

Tabla 5. Valores de interpretación del factor 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
>1.20	Rodeando el desagüe

Fuente: Pérez, 1979²

Los valores resultantes del factor de forma para cada subcuenca se presentan en la Tabla 6, y de manera gráfica en el Apéndice D. Se observó que 18 subcuencas son categorizables como muy largas, 3 son alargadas, 1 es ligeramente alargada y 1 no es ni alargada ni ensanchada.

Tabla 6. Factor de forma por subcuenca

Subcuenca	F	Forma de subcuenca
Q. Brava Baja	0.10	Muy alargada
Q. Brava Media	0.31	Ligeramente alargada
Q. Culebra	0.11	Muy alargada
Q. Frijoles	0.23	Alargada
Q. Higuerón	0.09	Muy alargada
Q. Higuerón 1	0.15	Muy alargada
Q. Higuerón 2	0.15	Muy alargada
Q. Higuerón 3	0.30	Alargada
Q. San Isidro 1	0.18	Muy alargada
Q. San Isidro 2	0.09	Muy alargada
Q. Huacas-El Cerro 1	0.09	Muy alargada
Q. Huacas-El Cerro 2	0.10	Muy alargada
Río Frijoles 1	0.14	Muy alargada
Río Frijoles 2	0.19	Muy alargada
Río Frijoles 3	0.10	Muy alargada
Río Frijoles 4	0.08	Muy alargada

² Pérez J. 1979. Fundamentos del ciclo hidrológico. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Departamento de Meteorología e Hidrología. Caracas-Venezuela. 1-38.



Río Frijoles 5	0.16	Muy alargada
Río Frijoles 6	0.25	Alargada
Río Frijoles 7	0.08	Muy alargada
Río Frijoles 8	0.09	Muy alargada
Río Raudales 1	0.12	Muy alargada
Río Raudales 2	0.19	Muy alargada
Río Raudales 3	0.39	Ni alargada ni ensanchada

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 circular de la misma (P_c), equivalente a la superficie de esta:

$$I_c = \frac{P}{P_c} = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad (7)$$

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

- a) $1 < I_c < 1.25$; la forma de la cuenca es ovalada.
- b) $1.25 < I_c < 1.50$; la forma de la cuenca es oblonga.
- c) $1.50 < I_c < 1.75$; la forma de la cuenca es alargada.
- d) $I_c > 1.75$; 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.

De acuerdo con el índice de compacidad todas las subcuencas poseen una forma de rectangular alargada, tal y como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Índice de compacidad por subcuenca

Subcuenca	Perímetro circular (km)	Perímetro (km)	Ic	Forma de cuenca
Q. Brava Baja	4.14	12.99	3.14	Rectangular alargada
Q. Brava Media	8.40	17.92	2.13	Rectangular alargada
Q. Culebra	4.25	13.25	3.11	Rectangular alargada
Q. Frijoles	6.38	13.99	2.19	Rectangular alargada
Q. Higuerón	2.56	5.64	2.20	Rectangular alargada
Q. Higuerón 1	4.56	11.05	2.42	Rectangular alargada
Q. Higuerón 2	3.93	8.07	2.05	Rectangular alargada
Q. Higuerón 3	7.73	15.86	2.05	Rectangular alargada
Q. San Isidro 1	6.89	20.99	3.04	Rectangular alargada
Q. San Isidro 2	3.00	8.11	2.70	Rectangular alargada
Q. Huacas-El Cerro 1	3.49	10.09	2.89	Rectangular alargada
Q. Huacas-El Cerro 2	5.40	16.13	2.99	Rectangular alargada
Río Frijoles 1	3.70	7.96	2.15	Rectangular alargada
Río Frijoles 2	3.72	11.42	2.19	Rectangular alargada
Río Frijoles 3	2.88	6.62	2.30	Rectangular alargada
Río Frijoles 4	2.76	8.06	2.92	Rectangular alargada
Río Frijoles 5	3.81	7.25	1.90	Rectangular alargada
Río Frijoles 6	8.13	21.39	2.63	Rectangular alargada
Río Frijoles 7	2.37	5.32	2.24	Rectangular alargada
Río Frijoles 8	2.76	6.97	2.53	Rectangular alargada
Río Raudales 1	3.06	6.49	2.12	Rectangular alargada
Río Raudales 2	5.02	10.70	2.13	Rectangular alargada
Río Raudales 3	9.79	19.52	2.00	Rectangular alargada

3.5.4 Parámetros de relieve de las subcuencas

A continuación se presenta un mapa con las pendientes porcentuales presentes en la cuenca de Aguas Claras. Se observa que las zonas altas de la cuenca presentan pendientes con valores arriba de 40%, mientras que la zona baja pendientes entre 0 y 20%. Debido al relieve de la zona de estudio, las subcuencas poseen los siguientes rasgos físicos (Tabla 8).

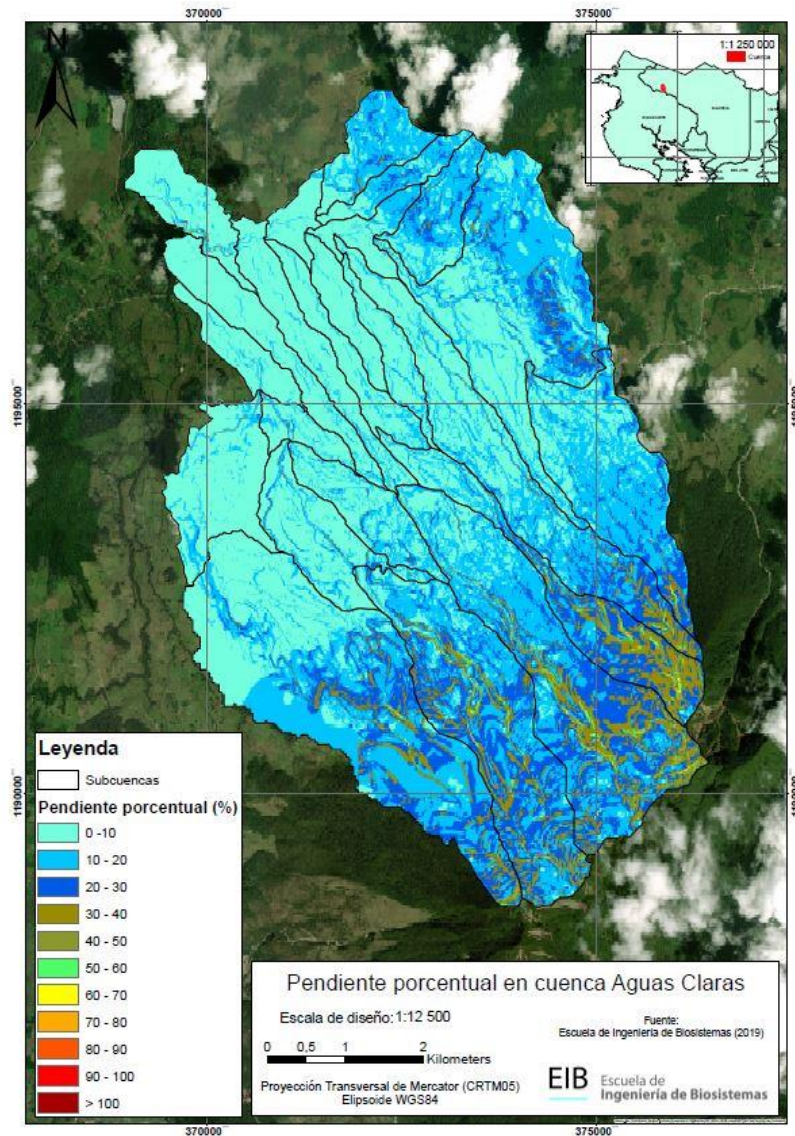


Figura 3-12. Pendiente porcentual de la cuenca de Aguas Claras

Tabla 8. Características topográficas de las subcuencas

Subcuenca	Código	Área (km ²)	Elevaciones (msnm)		Pendiente (%)	
			Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar
Q. Brava Baja	QBB	1.36	404.56	59.02	7.76	8.39
Q. Brava Media	QBM	5.62	1166.88	390.51	47.86	40.62
Q. Culebra	QCUL	1.45	386.88	53.70	6.60	5.82
Q. Frijoles	QFRI	3.24	755.65	177.87	26.28	19.07
Q. Higuerón	QHIG	0.52	435.82	24.95	11.73	11.18
Q. Higuerón 1	QHIG-1	1.66	506.26	50.24	12.76	13.08
Q. Higuerón 2	QHIG-2	1.23	538.93	65.80	15.22	11.03
Q. Higuerón 3	QHIG-3	4.75	1137.86	395.92	48.79	38.66
Q. San Isidro 1	QSI-1	3.78	689.89	264.05	26.00	26.22
Q. San Isidro 2	QSI-2	0.72	433.87	42.41	10.51	7.18
Q. Huacas-El Cerro 1	QHEC-1	0.9689	425.19	53.76	9.05	6.77
Q. Huacas-El Cerro 2	QHEC-2	2.32	1015.84	352.37	54.68	42.24
Río Frijoles 1	RF-1	1.09	329.08	14.21	8.33	15.65
Río Frijoles 2	RF-2	1.10	454.62	62.39	23.16	14.92
Río Frijoles 3	RF-3	0.66	387.22	24.49	5.66	3.96
Río Frijoles 4	RF-4	0.61	385.54	36.22	11.15	11.29
Río Frijoles 5	RF-5	1.15	478.99	71.89	24.41	14.97
Río Frijoles 6	RF-6	5.26	538.13	79.40	21.84	16.97
Río Frijoles 7	RF-7	0.45	354.89	6.63	4.38	5.72
Río Frijoles 8	RF-8	0.60	471.85	86.82	20.76	13.33
Río Raudales 1	RR-1	0.75	375.03	19.61	6.45	6.50
Río Raudales 2	RR-2	2.01	450.03	19.44	7.69	8.21
Río Raudales 3	RR-3	7.62	809.90	348.66	29.03	29.55

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 esta. Al ser 23 subcuencas, se agruparon en 5 figuras para una mayor apreciación de los datos. Para el análisis del comportamiento de la curva hipsométrica en los ríos del área de estudio se utilizó la Figura 3-13.

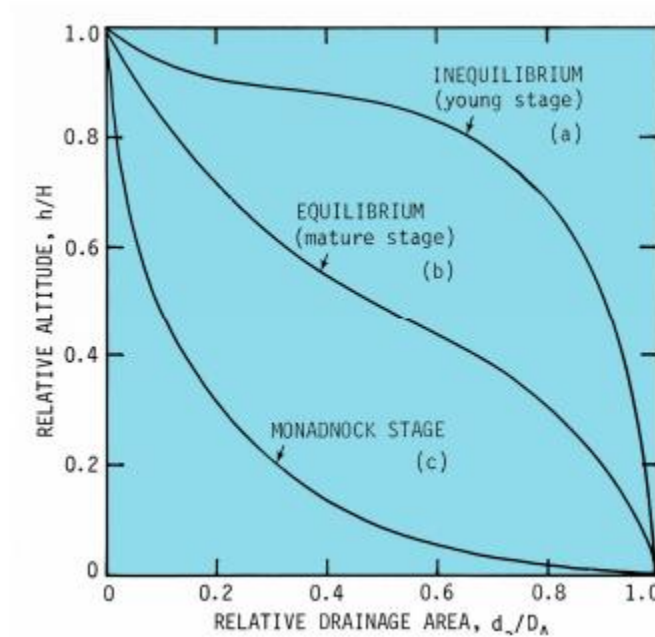


Figura 3-13. Curva hipsométrica general, tomado de Strahler (1857)

A continuación, se muestran las curvas hipsométricas de las subcuencas de la cuenca de Aguas Claras.

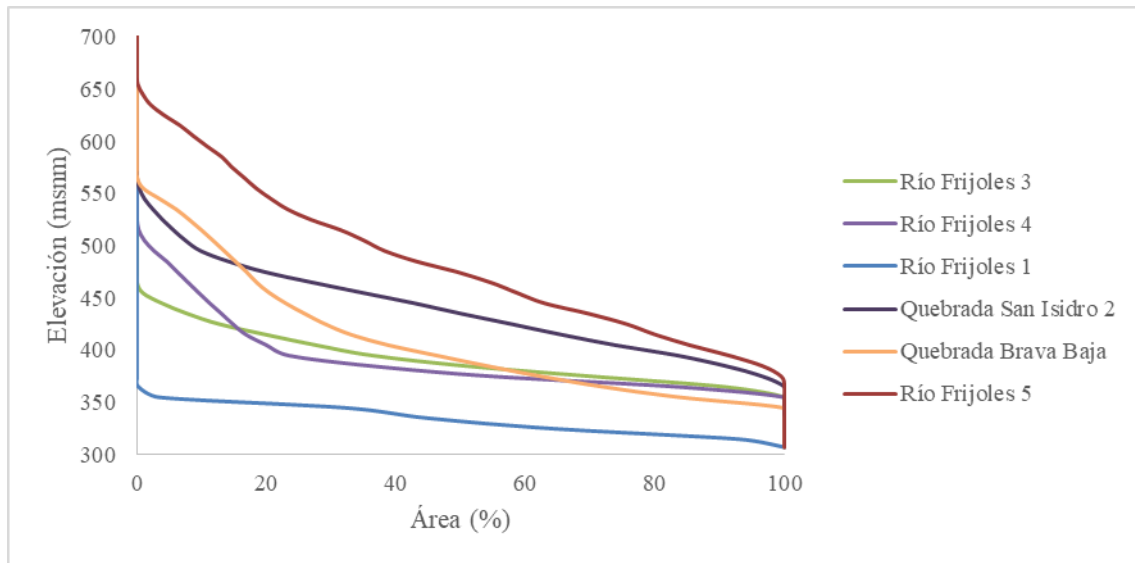


Figura 3-14. Curva hipsométrica para subcuencas en fase de juventud

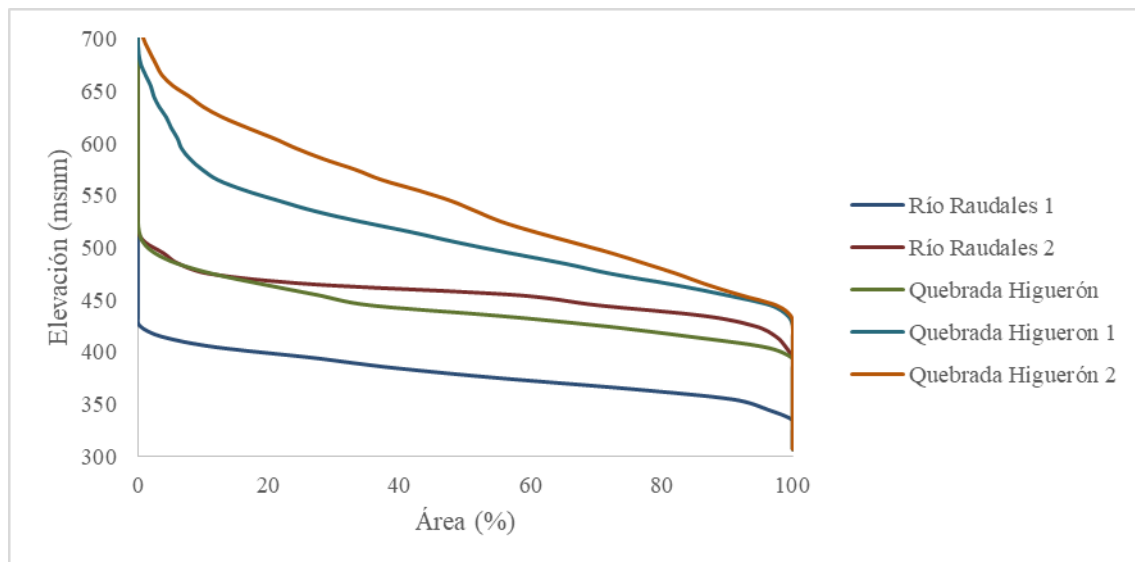


Figura 3-15. Curva hipsométrica para subcuencas en fase de juventud

Debido al comportamiento de las subcuencas de las dos figuras anteriores, estas se caracterizan por ser de un potencial erosivo.

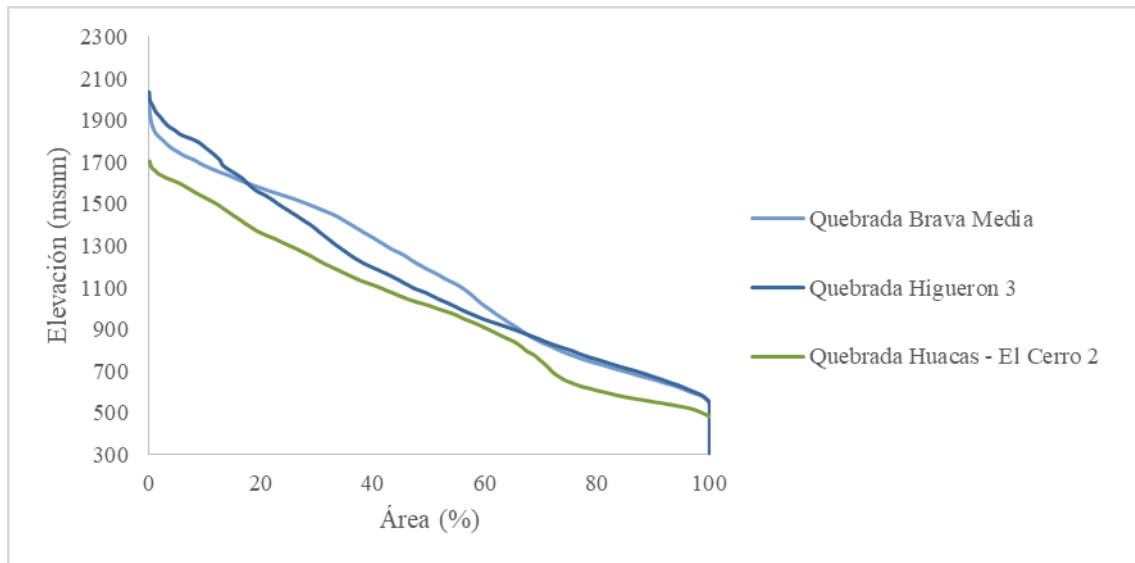


Figura 3-16. Curva hipsométrica para subcuencas en fase de juventud y madurez

La subcuenca Quebrada Huacas- El Cerro 2 podría ser considerada como transitoria hacia fase de madurez por lo que se encuentra en equilibrio. Por otro lado, Quebrada Brava Media y Quebrada Higuerón 3 están en fase de juventud por lo cual presentan un potencial erosivo.

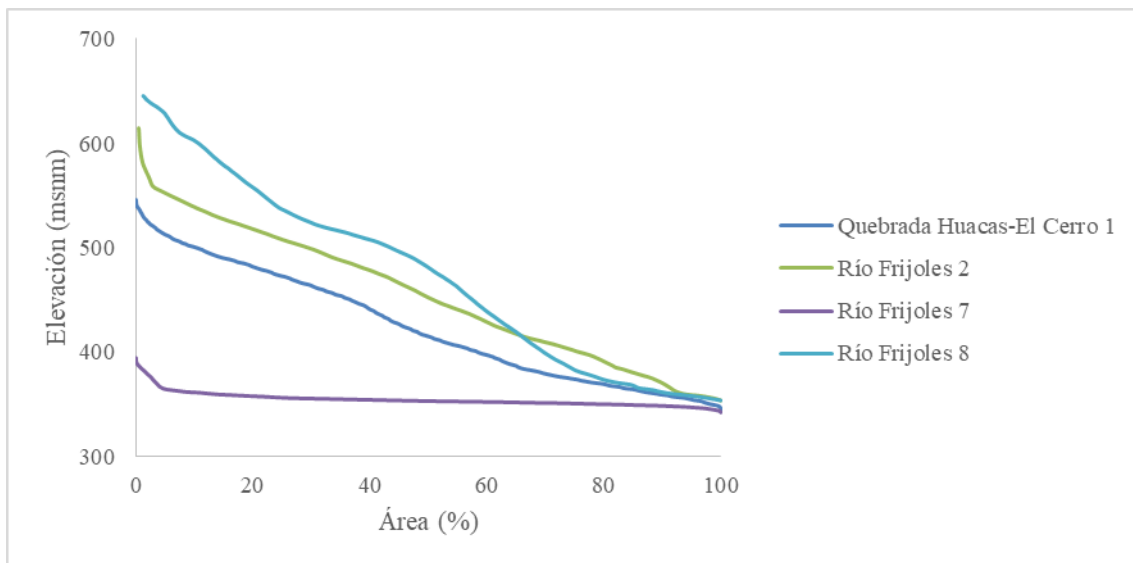


Figura 3-17. Curva hipsométrica para subcuencas en fase de madurez y vejez

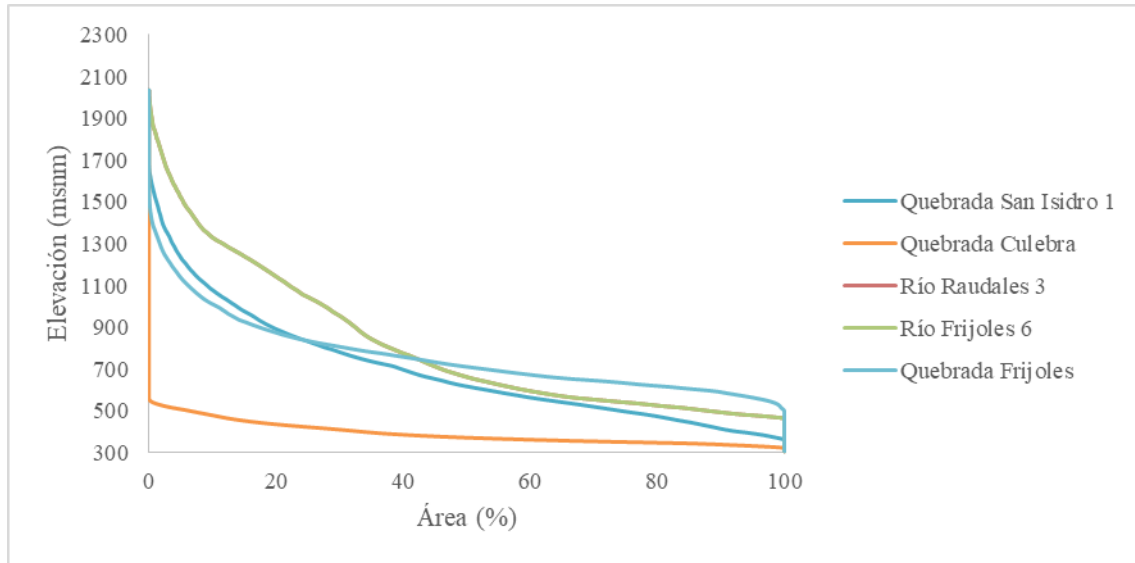


Figura 3-18. Curva hipsométrica para subcuencas en fase de vejez

Estas últimas 5 subcuencas de la figura anterior están en fase de vejez por lo que se caracterizan por ser subcuencas sedimentarias.

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

$$I_p = \sum_{i=2}^n \sqrt{\beta_i (a_i - a_{i-1})} * \frac{1}{\sqrt{L}} \quad (8)$$

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.

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

donde:

A_i = área i entre cotas de curvas de nivel

A_T = área total de la cuenca

Los resultados del análisis realizado para el índice de pendiente se presentan a continuación.

Tabla 9. Índice de pendiente por subcuenca

Subcuenca	Índice de pendiente
Q. Brava Baja	0.177
Q. Brava Media	0.401
Q. Culebra	0.179
Q. Frijoles	0.339
Q. Higuerón	0.212
Q. Higuerón 1	0.207
Q. Higuerón 2	0.271
Q. Higuerón 3	0.440
Q. San Isidro 1	0.318
Q. San Isidro 2	0.217
Q. Huacas-El Cerro 1	0.201
Q. Huacas-El Cerro 2	0.389
Río Frijoles 1	0.125
Río Frijoles 2	0.271
Río Frijoles 3	0.178
Río Frijoles 4	0.176
Río Frijoles 5	0.291
Río Frijoles 6	0.183
Río Frijoles 7	0.145
Río Frijoles 8	0.310
Río Raudales 1	0.176
Río Raudales 2	0.142
Río Raudales 3	0.360

4 Análisis hidrológico

Mediante la información de cada una de las subcuencas (área, número de curva, tiempo de concentración y largo de los ríos) se generó el modelo hidrológico en el software HEC-HMS v4.3 (Figura 4-1) para llevar a cabo la modelación del Huracán Otto así como de diversas tormentas de años anteriores y períodos de retorno.

El modelo está compuesto de los elementos: basins, junctions y reach. Los basins se ubicaron en el centroide de cada subcuenca para un total de 23 basins, se utilizaron 16 junctions y 9 reach. Por lo tanto, la configuración del modelo hidrológico está estructurada de la siguiente manera:

Se definieron los junctions los cuales corresponden a las uniones desde los basins y en algunos casos entre ellos mismos, como por ejemplo el junction 8 (ver Tabla 10). De igual manera se conectaron a los junctions ciertos reach (ver Tabla 11), los cuales sirven como medio de enrutamiento del flujo de agua a través de la subcuenca. Todo esto desembocando en los dos puntos de salida presentes en la zona de estudio.

En aquellos casos donde era necesario trasladar el flujo a través de la subcuenca, se utilizó el método de enrutamiento Muskingum-Cunge, el cual contempla datos propios de los tramos de los ríos presentes en dichas áreas tales como: longitud del cauce, pendiente longitudinal, n de Manning, ancho del espejo agua y pendiente lateral.

El tiempo de modelación para el evento Otto corresponde del día 24 de Noviembre de 2016 de las 6:15 am hasta las 23:55 del 26 de Noviembre del mismo año. Para la modelación de dicho evento se consideraron dos condiciones antecedentes de humedad, así como los escenarios de un período de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años.

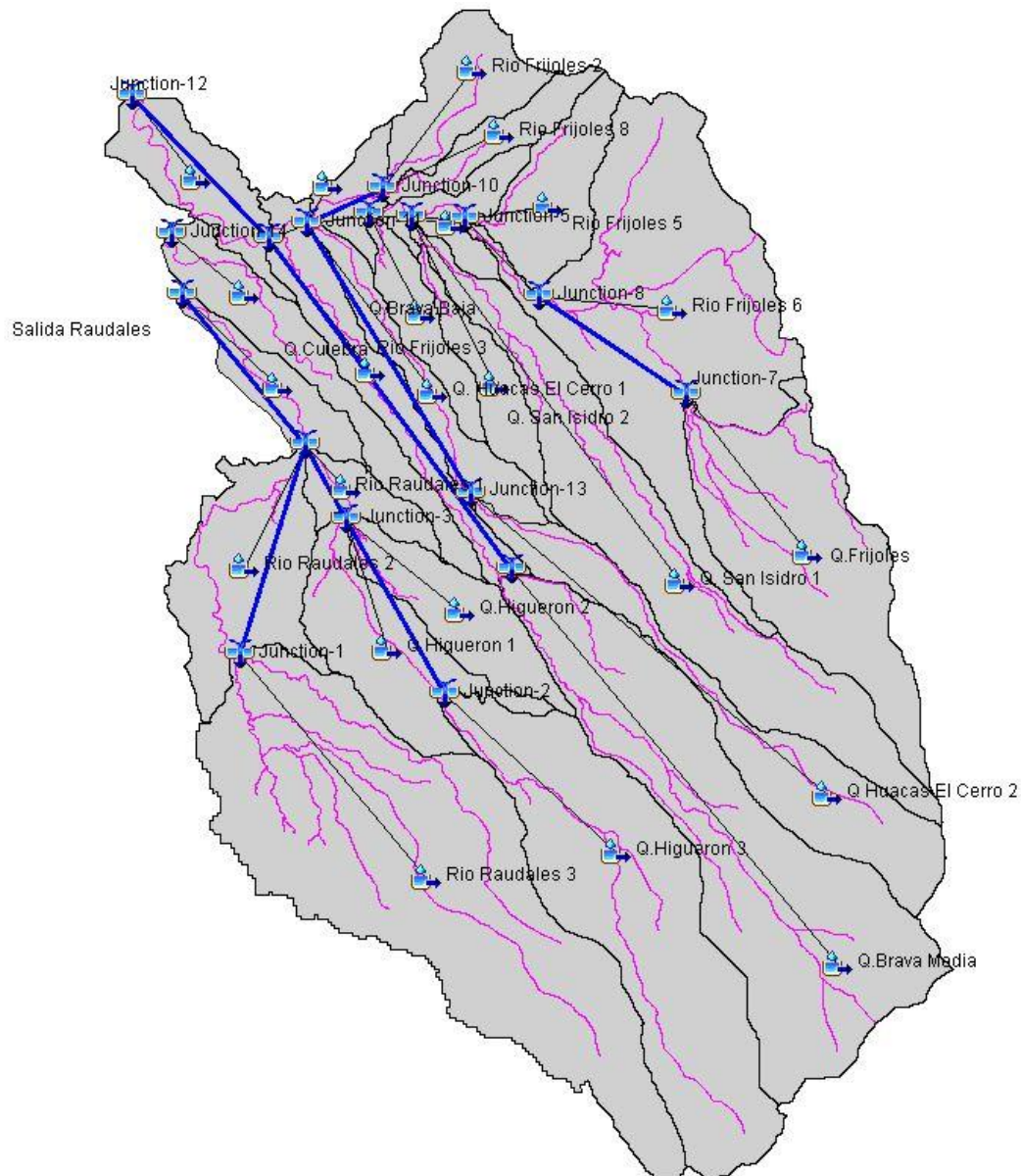


Figura 4-1. Esquema gráfico de la distribución del modelo Hidrológico en HEC HMS

A continuación, se presenta la distribución de los diversos elementos que conforman el modelo hidrológico para la zona de estudio.

Tabla 10. Distribución de Junctions del modelo Hidrológico para Aguas Claras

Junction	Alimentación (Aguas Arriba)	Descarga (Aguas Abajo)
1	Rio Raudales 3	Reach 1
2	Q. higuieron 3	Reach 2
3	Q. Higuieron 1 y 2, Reach 2	Reach 3
4	Rio Raudales 2, Q. Higuieron, Reach 1 y Reach 3	Reach 4
5 EMH	Q. Brava Media	Reach 5
6	Q. Brava Baja, Reach 5 y Junction 11	Reach 7
7	Q. Frijoles	Reach 8
8	Rio Frijoles 6 y Reach 8	Junction 5
9	Q. San Isidro 1, Q. San Isidro 2, Rio Frijoles 4 y Junction 5	Junction 15
10	Rio Frijoles 2 y Rio Frijoles 8	Reach 6
11	Q. Huacas el Cerro 1, Rio Frijoles 7, Junction 15, Reach 9 y Reach 6.	Junction 6
12	Rio Frijoles 1 y Reach 7	Salida
13	Q. Huacas el Cerro 2	Reach 9
14	Q. Culebra	Salida
15	Rio Frijoles 3 y Junction 9	Junction 11
Salida Raudales	Rio Raudales 1 y Reach 4	Salida

Tabla 11. Distribución de Reach's del modelo Hidrológico para Aguas Claras

Reach	Subcuencas	Unión Aguas Arriba	Unión Aguas Abajo
1	Río Raudales 2	Junction 1	Junction 4
2	Q. Higuieron 1	Junction 2	Junction 3
3	Q. Higuieron	Junction 3	Junction 4
4	Rio Raudales 1	Junction 4	Salida Raudales
5	Q. Brava Baja	Junction 5 EMH	Junction 6
6	Rio Frijoles 7	Junction 10	Junction 11
7	Rio Frijoles 1	Junction 6	Junction 12
8	Rio Frijoles 6	Junction 7	Junction 8
9	Q. Huacas el Cerro 1	Junction 13	Junction 11

4.1 Cobertura del terreno

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 combinan

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.

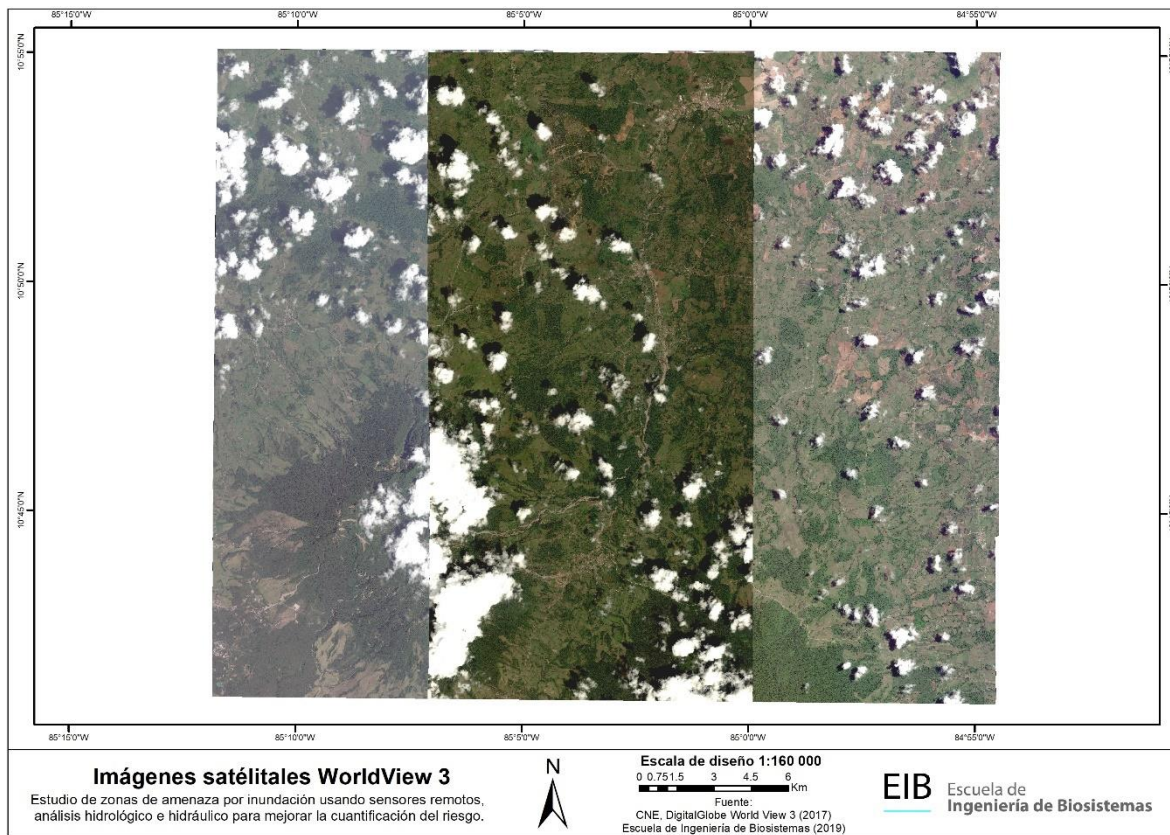


Figura 4-2. Mapa de Imágenes Satelitales WorldView 3

Las clases seleccionadas para la clasificación de la cobertura del suelo fueron: nubes, sombra de nubes, agua, zona urbana o 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 ráster de clasificación y la herramienta *Extract Values to Points* se extrajo el valor de la celda del ráster 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 G). Con ello se calculó la precisión global mediante la ecuación (10), el cual utiliza los valores de la diagonal de la matriz de confusión.

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

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 traslapes 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 sí 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 rásters 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 pixeles 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.

De las matrices de confusión se obtuvo para las cuatro imágenes clasificadas los siguientes porcentajes de precisión global y los valores Kappa.

Tabla 12 . 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

A continuación, se presenta el mapa de la cobertura del suelo presente en la cuenca de Aguas Claras.

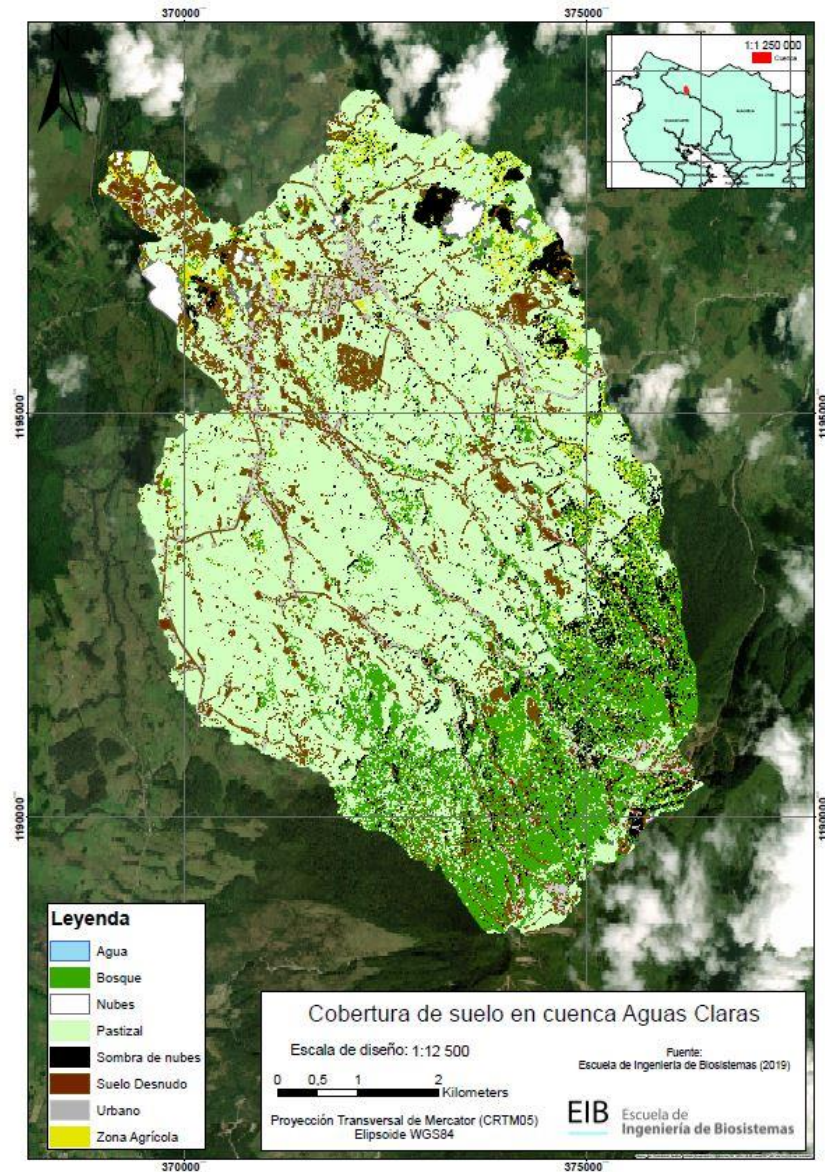


Figura 4-3. Cobertura del suelo para cuenca de Aguas Claras

Con base en el mapa de la cobertura del suelo (Figura 4-3), se obtuvo la Figura 4-4 para la zona de estudio con los siguientes porcentajes de la cobertura del suelo total.

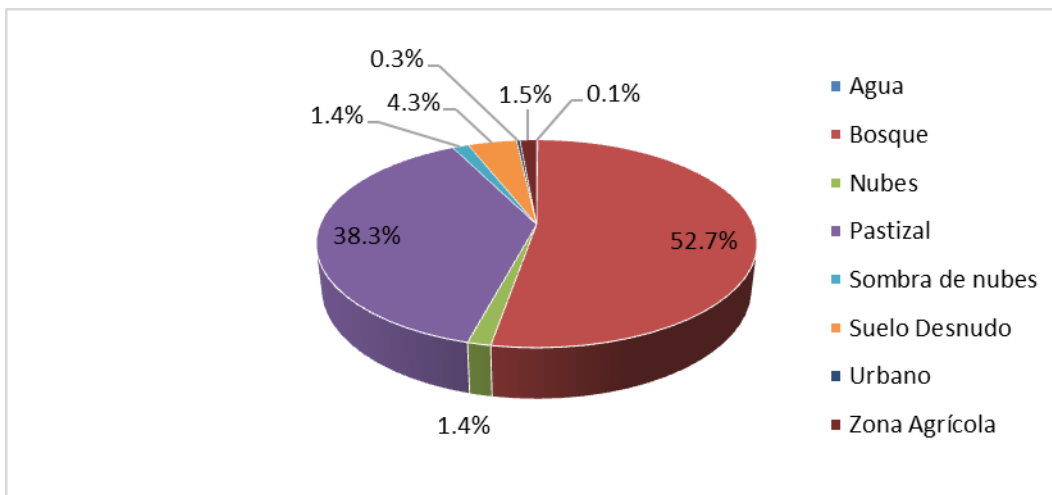


Figura 4-4. Porcentaje de cobertura de suelo para la cuenca Aguas Claras

Asimismo, se obtuvo la respectiva caracterización del porcentaje de uso de suelo en cada una de las subcuencas, información que es posible detallar en las Tabla 13

Tabla 14. En las mismas, es posible observar con detalle la variabilidad de cobertura dentro de las subcuencas, en algunos de los casos, es posible observar un alto porcentaje de suelos desnudos, lo que puede considerarse como un factor a destacar dentro de la caracterización de las subcuencas.

Tabla 13. Porcentaje de cobertura de suelo por subcuenca

Uso de suelo	Porcentaje de uso de suelo por río (%)										
	RF-1	RF-2	RF-3	RF-4	RF-5	RF-6	RF-7	RF-8	RR-1	RR-2	RR-3
Agua	0.61	0.00	0.004	0.24	0.00	0.04	0.00	0.00	0.17	0.01	0.01
Bosque	34.48	57.54	29.73	35.44	38.31	47.65	38.36	51.58	31.46	34.31	34.31
Nubes	4.08	0.38	0.44	3.96	0.78	4.05	4.28	1.51	10.60	0.01	0.01
Pasto	30.64	36.98	50.05	45.53	44.50	38.61	49.05	41.20	42.21	61.23	61.23
Sombra nubes	0.44	0.37	0.14	0.84	13.07	3.74	0.41	1.62	1.54	0.04	0.04
Suelo desnudo	20.67	2.20	17.56	10.34	0.95	3.51	2.14	2.59	9.16	2.65	2.65
Urbano	0.31	0.19	0.96	2.98	0.05	0.27	0.03	0.03	1.16	0.29	0.29
Zona Agrícola	8.62	2.26	1.11	0.67	2.32	2.12	5.68	1.46	3.70	1.42	1.42
Total	99.85	99.92	100.00	100.00	99.99	99.97	99.95	99.98	100.00	99.96	99.96
Área Medida (km ²)	1.09	1.10	0.66	0.61	1.15	5.26	0.45	0.60	0.75	2.01	7.62

Tabla 14. Porcentaje de cobertura de suelo por subcuenca

Uso de suelo	Porcentaje de uso de suelo por quebrada (%)											
	QBB	QBM	QCUL	QFRI	QHIG	QHIG-1	QHIG-2	QHIG-3	QSI-1	QSI-2	QHEC-1	QHEC-2
Agua	0.24	0.30	0.28	0.03	0.07	0.01	0	0.23	0.03	0.05	0.08	0.06
Bosque	44.45	69.69	33.65	58.12	35.12	38.34	31.67	66.96	47.84	26.59	49.85	80.42
Nubes	6.17	0.27	12.05	0.06	0.04	1.23	0.04	0.13	0.12	0.22	2.64	0.43
Pasto	29.80	23.90	39.44	39.10	57.46	0.04	67.29	26.99	43.72	60.42	0.93	0.04
Sombra nubes	1.56	1.67	3.83	0.68	0.05	54.31	0.11	0.80	0.78	0.25	41.29	16.93
Suelo desnudo	13.15	3.71	7.11	0.96	4.76	0.12	0.27	4.42	5.59	6.64	0.15	1.20
Urbano	0.46	0.19	0.77	0.12	0.76	5.40	0.00	0.20	0.35	0.45	4.52	0.85
Zona Agrícola	4.17	0.25	2.86	0.83	1.73	0.56	0.63	0.26	1.59	5.37	0.55	0.05
Total	99.99	99.98	99.98	99.91	100.00	100.00	100.00	99.99	100.00	100.00	100.00	99.98
Área Medida (km ²)	1.36	5.62	1.44	3.24	0.52	1.66	1.23	4.75	3.78	0.72	0.97	2.32

4.2 Tipos de Suelos

La caracterización del tipo de suelo presente en la zona (Tabla 15) es de suma relevancia ya que de ello depende el comportamiento del flujo de agua en este. Dentro de esta temática un parámetro que cobra relevancia y que es de gran importancia corresponde a la infiltración, la cual está directamente relacionada con la estructura y textura del suelo, las cuales a su vez influyen en la porosidad del suelo. Normalmente, las texturas de mayor diámetro permiten una mayor tasa de infiltración, por lo que tiene una amplia influencia el porcentaje de arcillas contenidas, así como la materia orgánica en él; además, estructuralmente, los agregados que se pueden formar en los suelos fomentan o impiden la infiltración.

A continuación se muestra el tipo de suelo presente en la zona de Aguas Claras.

Tabla 15. Tipo de suelo en la cuenca Aguas Claras.

Orden	Suborden	Área (km ²)	Área porcentual
Andisoles	Udands	48.34	98.9%
Inceptisoles	Udepts	0.56	1.1%
Área Total		48.90	100%

Como se pudo observar anteriormente, el suelo predominante en la cuenca Aguas Claras pertenece al orden de los Andisoles, los cuales son originados de materiales volcánicos, presentan un rejuvenecimiento y enriquecimiento nutricional de manera frecuente, además poseen altos valores de materia orgánica.

Son suelos bien estructurados por la alta presencia de compuestos organominerales formados por alófanos hidratados ligados a materia orgánica, esto caracteriza un buen drenaje a pesar de presentar una buena retención de humedad por su alta porosidad vinculada a baja densidad aparente, propia de suelos livianos con texturas entre franco arenosas a franco limosas (MAG, 2014).

4.3 Número 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 Bejár, 2006; Villón Bejár, 2006).

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 (USSCS por siglas en inglés), el cual deriva de una de una serie de curvas asociadas a coeficientes de escorrentía, los valores de número de curva varían entre $N=1$, donde se da la infiltración completa, y $N=100$ 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 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 óptima, 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; para la cuenca Aguas Claras se utilizó este grupo.

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 superficiales 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 CN-I.

Los números de curva para la condición tipo II y III por cada subcuenca se presentan en la Tabla 16, donde se obtuvo un valor promedio de 60 para las subcuencas de Aguas Claras en el tipo II.

Tabla 16. Números de curva por subcuenca

Subcuenca	CN II	CN III
Quebrada Brava Baja	62.08	79.02
Quebrada Brava Media	57.63	75.78
Quebrada Culebra	61.28	78.45
Quebrada Frijoles	57.87	75.96
Quebrada Higuerón	60.44	77.85
Quebrada Higuerón 1	60.23	77.69
Quebrada Higuerón 2	59.27	77.00
Quebrada Higuerón 3	57.98	76.04
Quebrada Huacas - El Cerro 1	59.59	77.23
Quebrada Huacas - El Cerro 2	56.38	74.83
Quebrada San Isidro 1	59.68	77.30
Quebrada San Isidro 2	61.91	78.90
Río Frijoles 1	65.14	81.12
Río Frijoles 2	58.46	76.40
Río Frijoles 3	63.42	79.95
Río Frijoles 4	62.15	79.06



Subcuenca	CN II	CN III
Río Frijoles 5	59.07	76.85
Río Frijoles 6	59.2	76.94
Río Frijoles 7	60.83	78.13
Río Frijoles 8	58.65	76.54
Río Raudales 1	62.09	79.02
Río Raudales 2	59.84	77.41
Río Raudales 3	58.1	76.13

4.4 Tiempo de concentración

Se obtuvo mediante el método Technical Release 55: “Urban Hydrology for Small Watersheds” de la USDA (1986). El cual utiliza 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.

Luego se prosiguió a la clasificación del flujo más largo en tres tramos de acuerdo a la bibliografía, los cuales son, Flujo Laminar en los primeros 100 m (utilizando una intensidad de 90 mm/h), luego está el Flujo Concentrado, el cual abarca después de los primeros 100 m hasta la intersección entre el cauce principal de cada subcuenca con el flujo teórico y por último está el Flujo en Canal, el cual corresponde a lo que queda del flujo teórico y como su nombre lo indica se analiza el flujo en un canal, el cual se consideró como trapezoidal en función del espejo de agua promedio (que se pudo obtener aguas arriba, medio y abajo con las ortofotos), además de un 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 pasto.

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 17. Tiempo de concentración por subcuenca

Subcuenca	Código	Área (km ²)	T _c (min)	Tlag (min)
Quebrada Brava Baja	QBB	1.36	66.29	39.78
Quebrada Brava Media	QBM	5.62	34.23	20.54
Quebrada Culebra	QCUL	1.44	60.32	36.19
Quebrada Frijoles	QFRI	3.24	36.70	22.02
Quebrada Higuerón	QHIG	0.52	47.47	28.48
Quebrada Higuerón 1	QHIG-1	1.66	64.74	38.84
Quebrada Higuerón 2	QHIG-2	1.23	60.39	36.23
Quebrada Higuerón 3	QHIG-3	4.75	26.46	15.88
Quebrada Huacas - El Cerro 1	QHEC-1	3.78	36.93	22.16
Quebrada Huacas - El Cerro 2	QHEC-2	0.72	39.98	23.99
Quebrada San Isidro 1	QSI-1	0.97	39.48	23.69
Quebrada San Isidro 2	QSI-2	2.32	57.45	34.47
Río Frijoles 1	RF-1	1.09	68.91	41.35
Río Frijoles 2	RF-2	1.10	53.53	32.12
Río Frijoles 3	RF-3	0.66	90.22	54.13
Río Frijoles 4	RF-4	0.61	38.88	23.33
Río Frijoles 5	RF-5	1.15	64.87	38.92
Río Frijoles 6	RF-6	5.26	76.24	45.75
Río Frijoles 7	RF-7	0.45	38.37	23.02
Río Frijoles 8	RF-8	1.05	36.01	21.61
Río Raudales 1	RR-1	0.75	64.90	38.94
Río Raudales 2	RR-2	2.01	84.33	50.60
Río Raudales 3	RR-3	7.62	40.33	24.20

4.5 Datos de Precipitación y tormenta de diseño

Para la zona de Aguas Claras, con mayor especificación, la zona de Guayabal, se obtuvieron datos de precipitación pertenecientes al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). Tales datos, provenientes de la estación meteorológica 69582, corresponden a un período de 9 años (1999 – 2018), en donde se redujeron los datos al evento de mayor magnitud contemplando intensidades de 5, 15, 30, 60, 120, 180 y 360 minutos. Con los datos de precipitación se obtuvieron las curvas IDF características de la zona para períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años.

Por definición, el período de retorno se considera la probabilidad de que un evento extremo suceda al menos una vez en promedio; 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 18, 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 18. Láminas máximas de precipitación para tormenta de diseño.

Duración (min)	Láminas máximas					
	Período de retorno (años)					
	2	5	10	25	50	100
5	10.53	11.67	12.53	13.67	14.53	15.39
15	23.05	27.69	30.76	34.64	37.51	40.37
30	37.21	46.45	52.57	60.30	66.03	71.73
60	54.54	69.30	79.07	91.41	100.57	109.66
120	67.80	90.06	104.80	123.44	137.26	150.96
180	74.13	100.14	117.36	139.11	155.25	171.27
360	82.68	112.26	131.82	156.60	174.96	193.20
720	89.13	120.61	141.44	167.80	187.34	206.75
1440	102.02	137.32	160.69	190.21	212.11	233.86

Mediante el análisis gráfico de los datos meteorológicos, se obtuvo el gráfico correspondiente a las curvas IDF de la zona de Guayabal, el cual se muestra en la Figura 4-5. Con la curva respectiva para la zona de estudio es posible caracterizar cada evento y

determinar dentro de que rango de retorno se encuentra, asimismo se puede determinar la probabilidad de que se dé un evento de precipitación considerable.

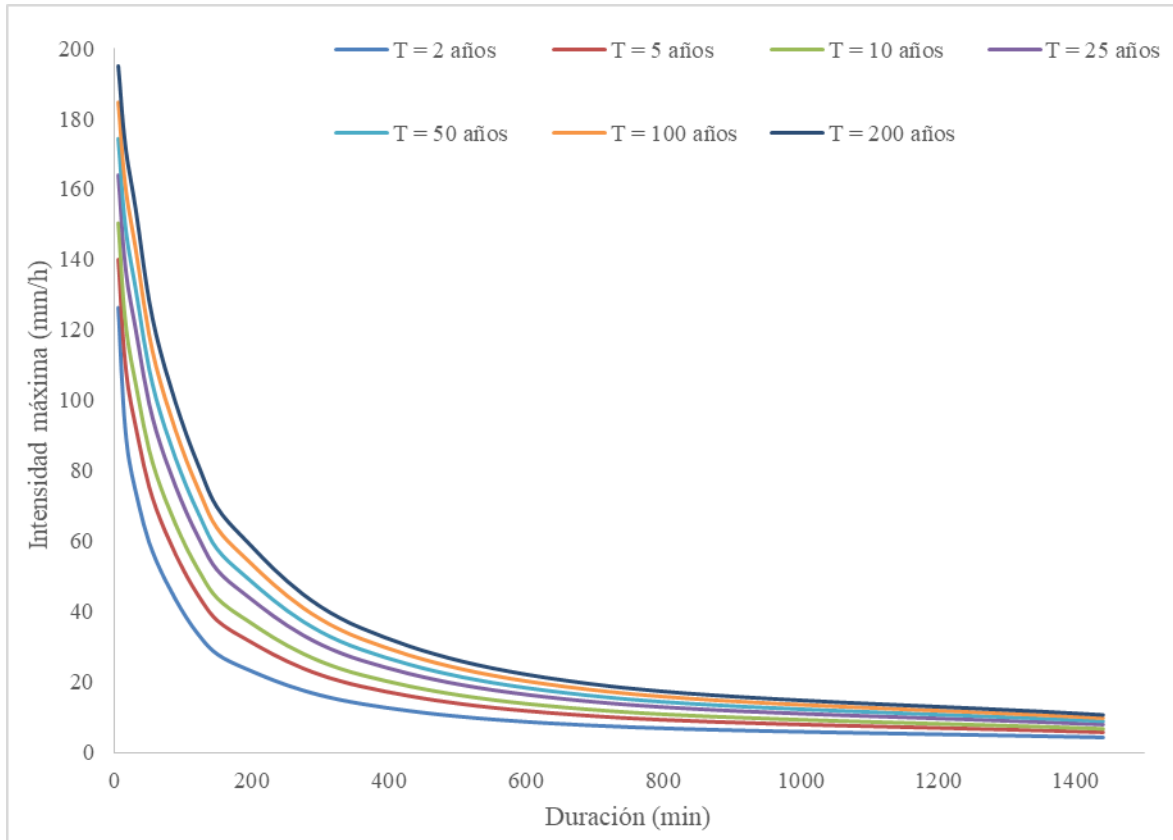


Figura 4-5. Curvas intensidad-duración-frecuencia de Guayabal

4.5.1 Caracterización del Huracán Otto

El huracán Otto, impactó la zona norte de Costa Rica en el año 2016, específicamente en el mes de noviembre, donde los efectos de este iniciaron el 16 de noviembre, 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).

Además, según los datos recopilados por la estación meteorológica 69582 ubicada en Guayabal, perteneciente al ICE, se midieron precipitaciones de 183 mm de lámina máxima desde el 24 de noviembre a las 07:10 y finalizando el 25 de noviembre a la misma hora. Asimismo, los picos más altos de precipitación se dieron el 24 de noviembre a partir de las 17:40, obteniendo un valor máximo de 7.4 mm de lluvia entre las 19:25 y 19:30 del mismo día.

4.6 Simulación Hidrológica

4.6.1 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 4.9Km 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 las subcuencas de Aguas Claras se seleccionaron 15 puntos del hidroestimador, los cuales son los más cercanos a la zona de estudio. En la Figura 4-6Figura 4-6. Precipitación acumulada del Hidroestimador para puntos característicos de la zona de estudio. se observa la precipitación acumulada de dos puntos cercanos al poblado de San Isidro.

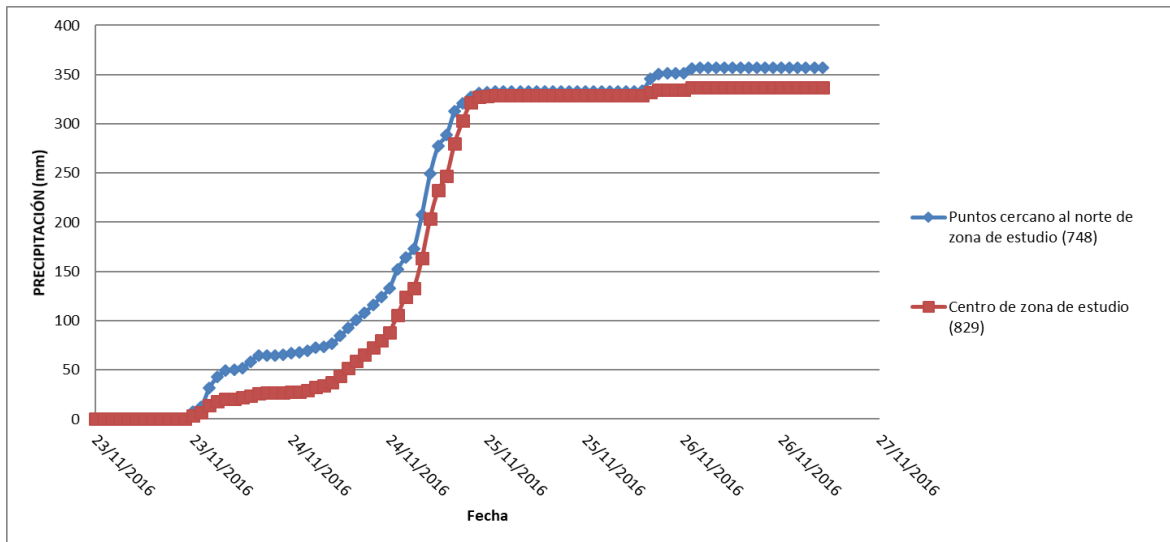


Figura 4-6. Precipitación acumulada del Hidroestimador para puntos característicos de la zona de estudio.

4.6.2 Resultados del análisis hidrológico

A continuación, se presentan los resultados de los modelos hidrológicos para las dos salidas de importancia para la cuenca de Aguas Claras: Río Frijoles y Río Raudales (Figura 4-7 y Figura 4-8) las cuales corresponden Huracán Otto. En ambos casos, el mayor pico estuvo cercano a las 8 pm del 24 de noviembre del 2017. El segundo pico con más flujo se presentó el 26 de dicho mes en horas de la noche.

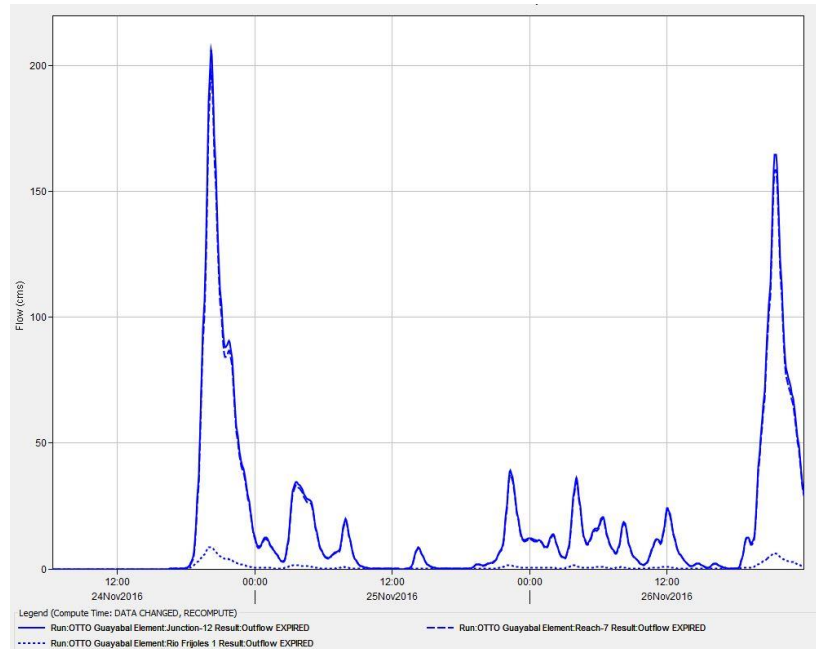


Figura 4-7 . Hidrograma de Salida del Río Frijoles

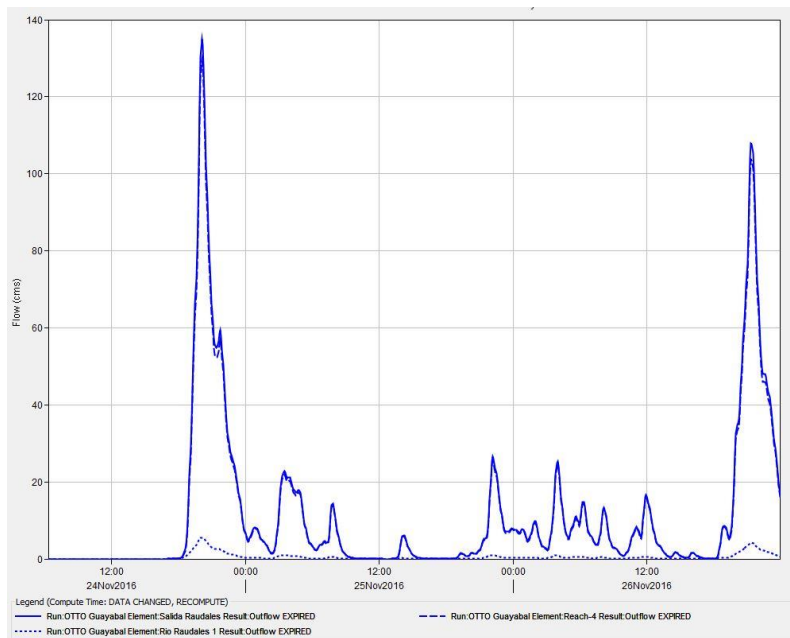


Figura 4-8. Hidrograma de Salida del Río Raudales

En las Tabla 19 y Tabla 20 , se muestran los caudales y volúmenes máximos de cada uno de los escenarios para ambas salidas de la cuenca. Para ambos casos, el periodo de retorno de 100 años tiene mayores caudales, sin embargo, sus volúmenes son menores en comparación con lo que generó el huracán.

Es importante hacer mención que de acuerdo con la modelación hidrológica, el evento de Otto se asemeja más a un evento con período de retorno de 25 años, considerando que Otto tuvo una lámina máxima de 183 mm, y para este período de retorno se tienen 190 mm (Tabla 18). Sin embargo, el evento de Otto al ser un huracán categoría uno generó un poder destructivo mucho mayor.

Tabla 19. Caudales y volúmenes máximos de los escenarios establecidos para Salida del Río Frijoles

Período de retorno	Caudal Máximo (m ³ /s)	Volumen máximo (mm)
100	458.3	105.63
50	388.8	88.98
25	320.5	72.89
10	230.8	52.53
5	95.6	28.18
Otto	206.3	145.78

Tabla 20. Caudales y volúmenes máximos de los escenarios establecidos para Salida del Río Raudales

Período de retorno	Caudal Máximo (m ³ /s)	Volumen máximo (mm)
100	299.9	104.38
50	254.4	87.82
25	209.4	71.83
10	150.5	51.62
5	62.4	27.51
Otto	134.9	144.75

A continuación se presentan los hidrogramas para un tiempo de retorno de 100 años a 24 horas. Donde se aprecia que para dicho período de retorno, se presenta un mayor caudal al provisto por el evento Otto, tal y como se mostró en las Tabla 19 y Tabla 20; además, la distribución del evento es distinta al del período de retorno donde en este último, su volumen se concentra en un pico.

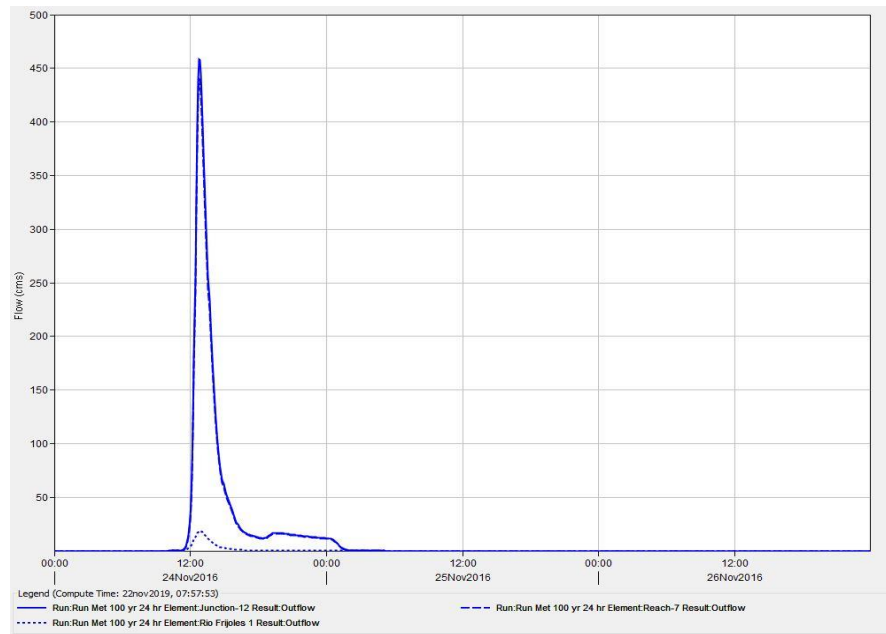


Figura 4-9 . Hidrograma de salida del rio Frijoles con período de retorno de 100 años

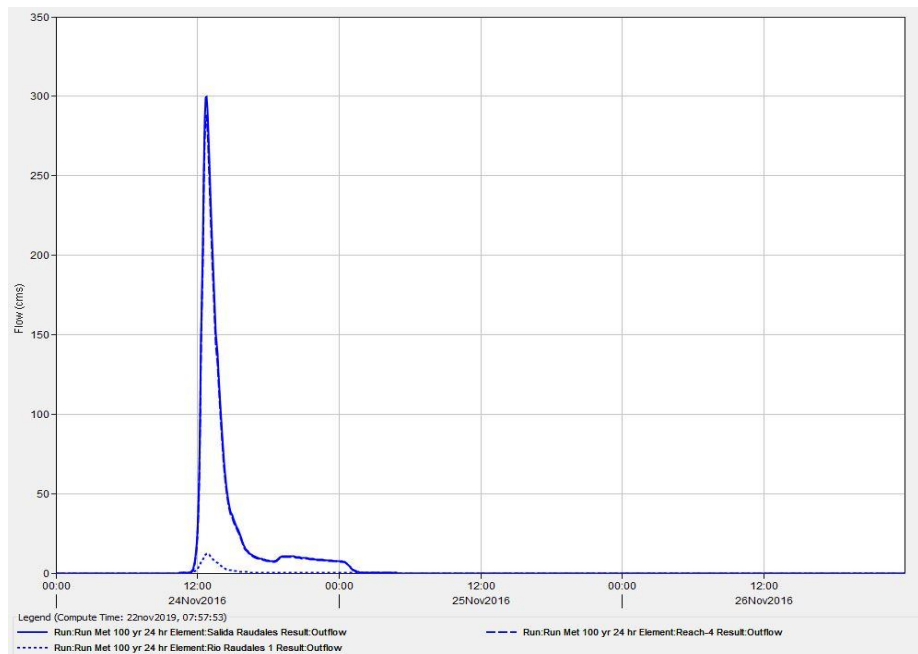


Figura 4-10 . Hidrograma de salida de rio Raudales para un tiempo de retorno de 100 años

5 Modelación Hidráulica

5.1 Zona de estudio hidráulico

Se realizó un estudio del comportamiento hidráulico en la zona de Aguas Claras, más específicamente en el área que se muestra la Figura 5-1, donde se resalta la simulación del comportamiento de diferentes infraestructuras hidráulicas ante diferentes casos de riesgo observados en la zona en los últimos años. Para dicha labor se utilizó el software de modelación bidimensional Flo2D.

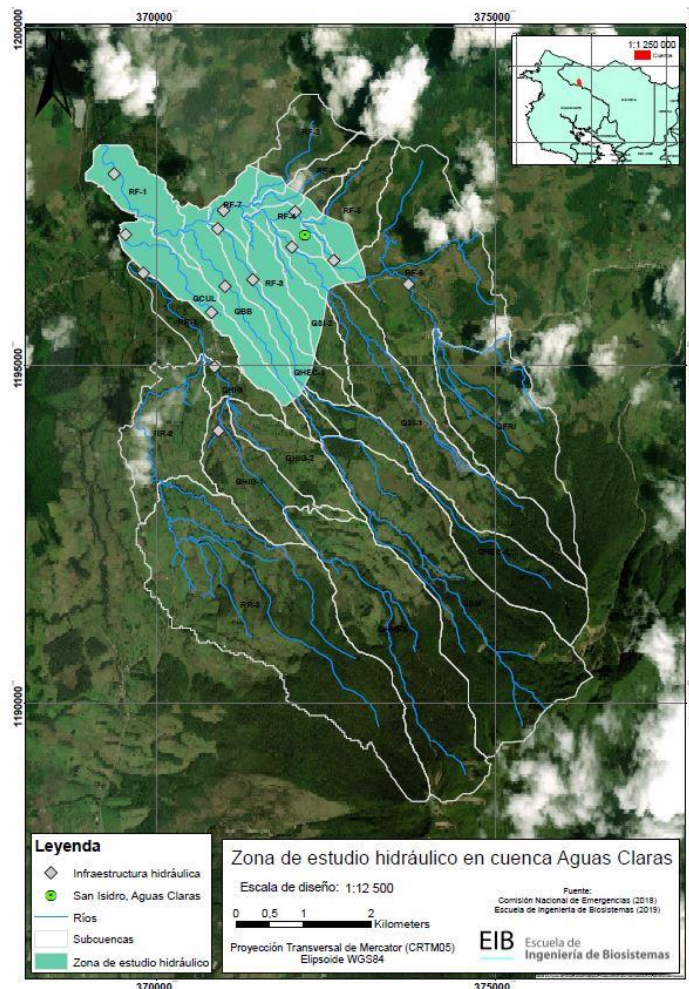


Figura 5-1. Zona de modelación hidráulica

5.2 Visita de campo

Se realizaron tres visitas de campo a las regiones de Upala, Canalete, Bijagua y Aguas Claras durante el período 2018 y 2019, de las cuales dos abarcaron la zona de estudio de interés en este documento. A continuación se desglosan ambas fechas, así como su respectiva descripción de labores.

19 al 20 de Abril de 2018

Se hizo un reconocimiento preliminar de la zona, donde se identificaron estructuras hidráulicas de relevancia en la cuenca de Aguas Claras y se tomaron fotos de estas como referencia para posteriores análisis (Figura 5-2).



Figura 5-2. Labores de campo de primera gira

5 al 6 de Agosto de 2019

Se realizó un reconocimiento más profundo de la zona donde se hizo un levantamiento de puntos de GPS (Apéndice A) de aquellos lugares donde se tuvo una afectación debido a la inundación así como de aquellas áreas donde no llegó esta (Figura 5-4). Durante la gira, se levantaron perfiles de aquellas secciones de los ríos aguas abajo y aguas arriba de los puentes de interés, esto mediante el uso de un distanciómetro marca Leica DISTO modelo S910.

En relación con las estructuras visitadas y de acuerdo con las conversaciones que se tuvieron con personas de la zona, durante el evento de Otto, fueron pocos los lugares que se vieron afectados por el mismo.



Figura 5-3. Labores de campo de segunda gira

Tal y como se muestra en la Figura 5-4, la mayoría de la afectación se presentó al suroeste del centro de San Isidro, donde el nivel del agua estuvo en un rango de 15 a 75 cm.

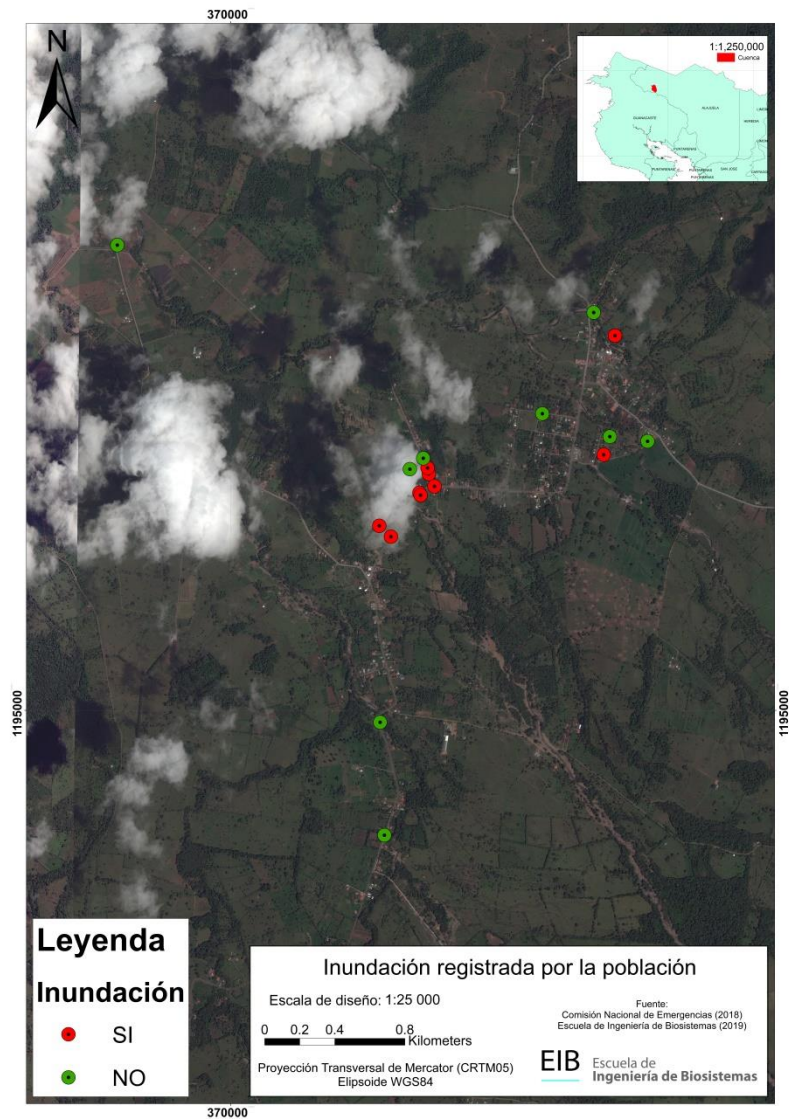


Figura 5-4. Puntos de ubicación de la inundación en zona de Aguas Claras

De acuerdo a las personas con las que se conversó, se conoció que en sí los puentes no se vieron afectados, de manera tal que los flujos de agua durante el evento de Otto, no fueron lo suficientemente altos como para rebasar dichas estructuras. En el Apéndice B se muestran fotos de las estructuras hidráulicas.

5.3 Geometría del río y de las planicies para la modelización

Para la modelación hidráulica de la zona de estudio se utilizó un mallado con una resolución de 5 m para una cobertura de 7.342 km² con un total de 293693 elementos (Figura 5-5). Una ventaja de trabajar con un mallado tan fino es que permitió modelar el flujo de agua sin tener que usar canales en los ríos. Para la selección del área hidráulica se consideró aquellas zonas que se vieron afectadas durante el Huracán Otto, para ello se consideró lo obtenido de la gira realizada del 5 al 6 de agosto del 2019.

Una vez realizado el mallado se procedió a incluir los datos de elevación del terreno (modelo de elevación digital resampleado a 5 m), coeficientes de rugosidad, entradas con sus respectivos hidrogramas, distribución de lluvia para cada uno de los eventos modelados y las estructuras hidráulicas.

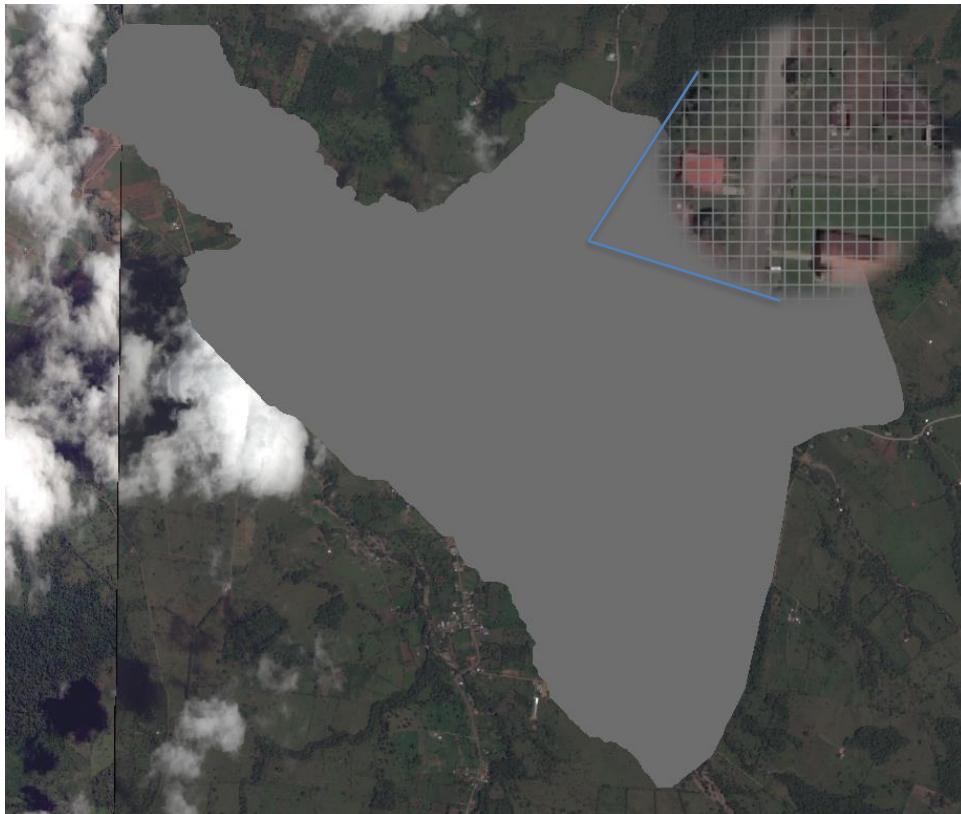


Figura 5-5. Mallado utilizado para en modelación hidráulica

En la siguiente figura se presentan las elevaciones utilizadas para la topografía del modelo bidimensional de Aguas Claras.

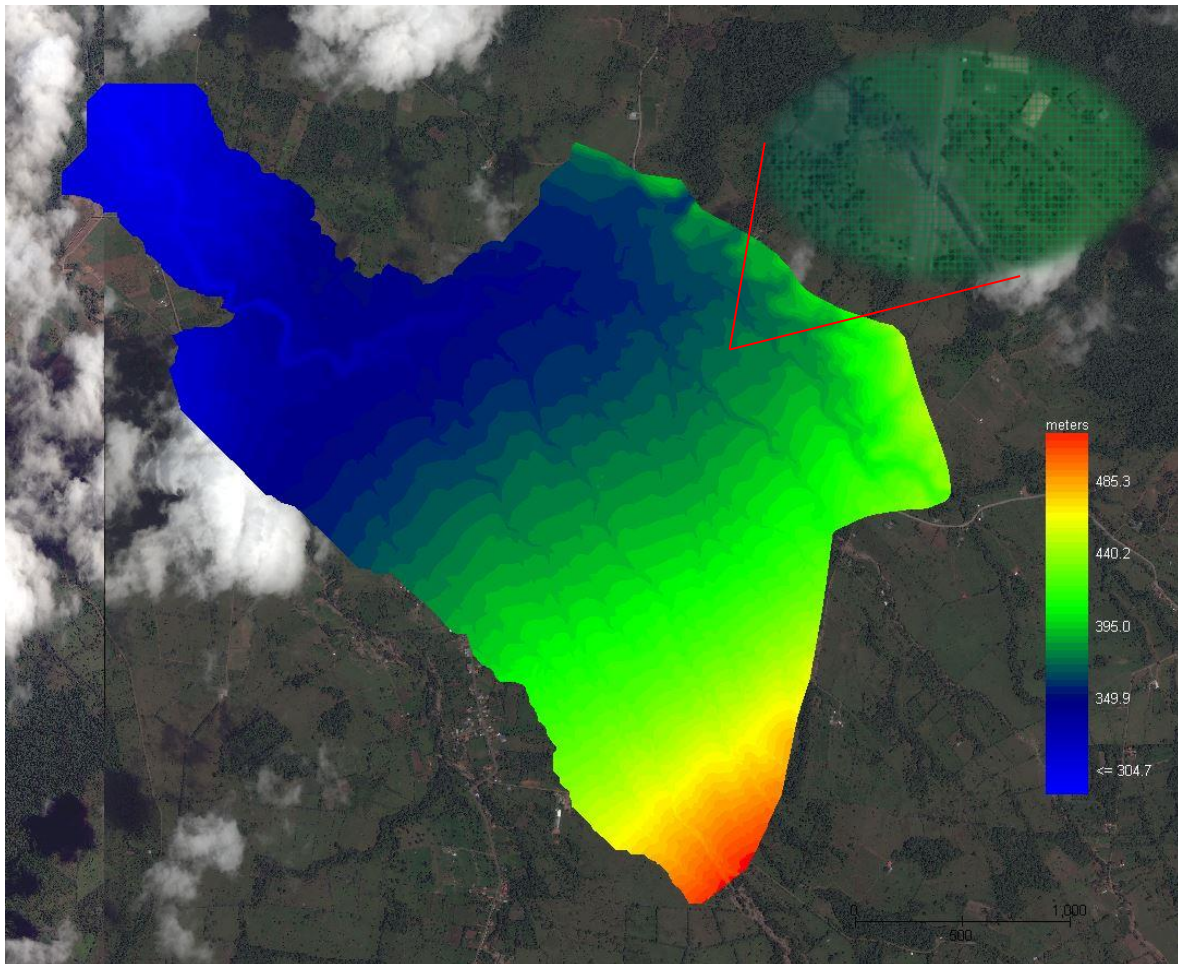


Figura 5-6. Elevaciones de modelo bidimensional

Para el modelo se optó por incluir cinco estructuras hidráulicas: tres puentes, una alcantarilla y un dique ubicado a la salida del Río Frijoles. Estos puentes corresponden a la Quebrada Brava, Quebrada Huacas y uno que se ubica a la entrada Norte del pueblo de San Isidro.

Respecto al levantamiento de las secciones transversales llevado a cabo en campo, se compararon con la topografía la cual proviene de curvas de nivel cada 0.5 m (Figura 5-7 y Figura 5-8), y se logró comprobar que las mismas se asemejan, por lo que eran adecuadas

para ser utilizadas en el modelo unidimensional de HEC-RAS para llevar a cabo la generación de las curvas de descarga de las estructuras hidráulicas a incluirse.

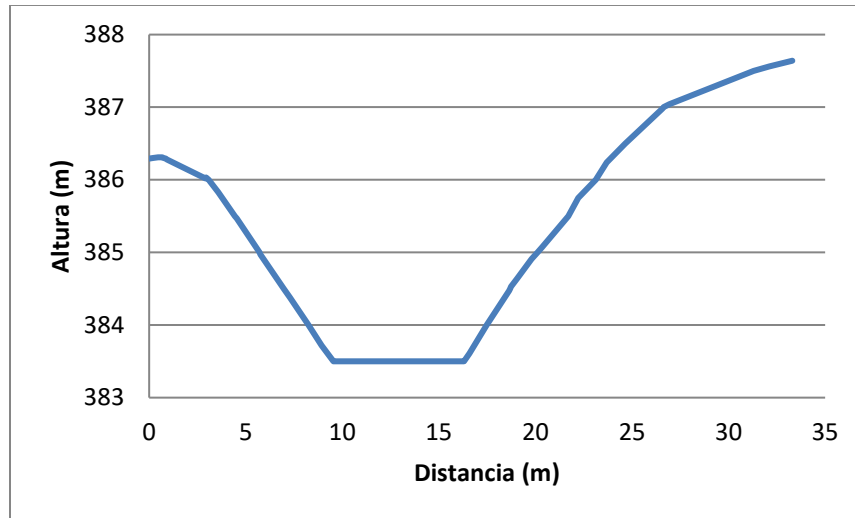


Figura 5-7. Perfil del río a partir de topografía de curvas de nivel

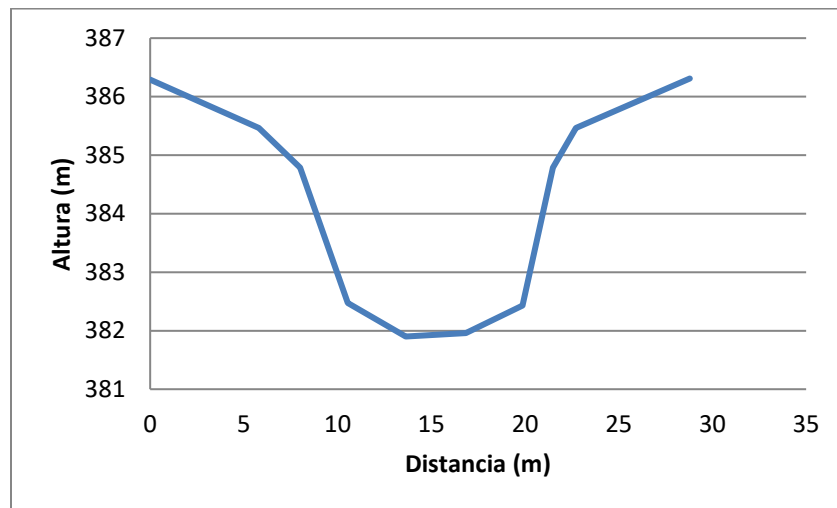


Figura 5-8. Perfil del río a partir de topografía obtenida mediante el DISTO 2910

5.3.1 Estructuras Hidráulicas

A continuación se presentan los perfiles de las estructuras hidráulicas incluidas en el modelo hidráulico en conjunto con sus respectivas curvas de descarga. En el apéndice B se presenta una descripción visual de estas. Aquellas estructuras que se contemplaron en el modelo unidimensional pero no fueron incluidas en la modelación bidimensional se encuentran en el apéndice E.

En la Figura 5-9 se muestra la ubicación de las estructuras contempladas para el modelo hidráulico desarrollado.

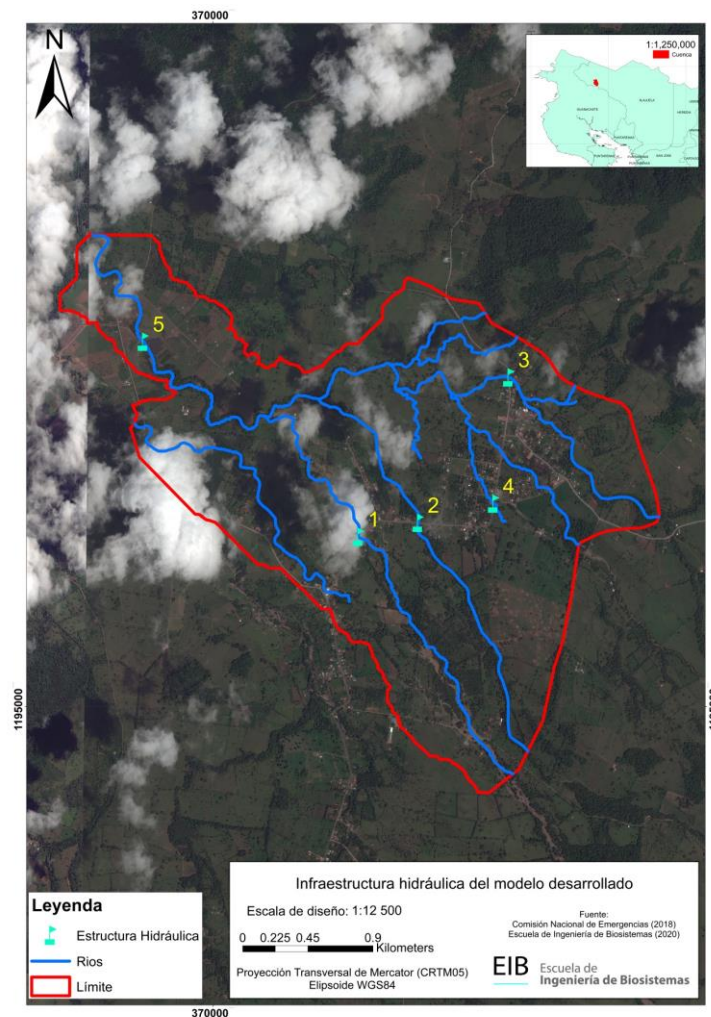


Figura 5-9. Infraestructuras hidráulicas incluidas en modelación bidimensional

Para la estructura hidráulica correspondiente a Quebrada Brava (Figura 5-10) (Figura 5-9 punto 1), el mismo tiene una longitud de 15,820 m, con un ancho y una altura de abertura de 11,126 m y 3,05 m respectivamente. El nivel del agua llegaría a sobrepasar dicho puente con caudales de 220 m³/s (Figura 5-11 y Figura 5-12).

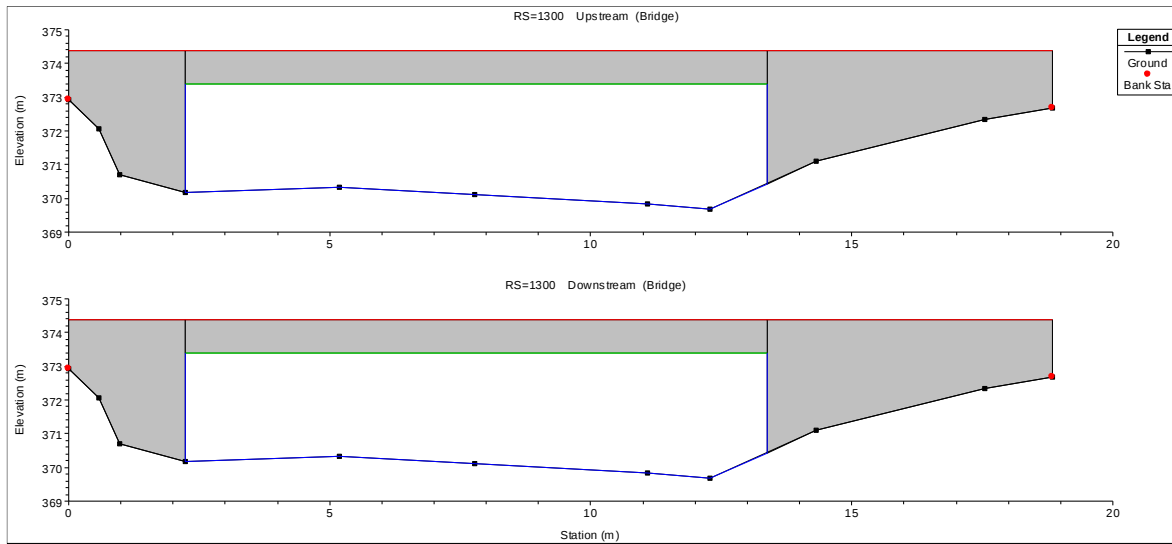


Figura 5-10. Perfil aguas arriba y aguas abajo del puente de Quebrada Brava

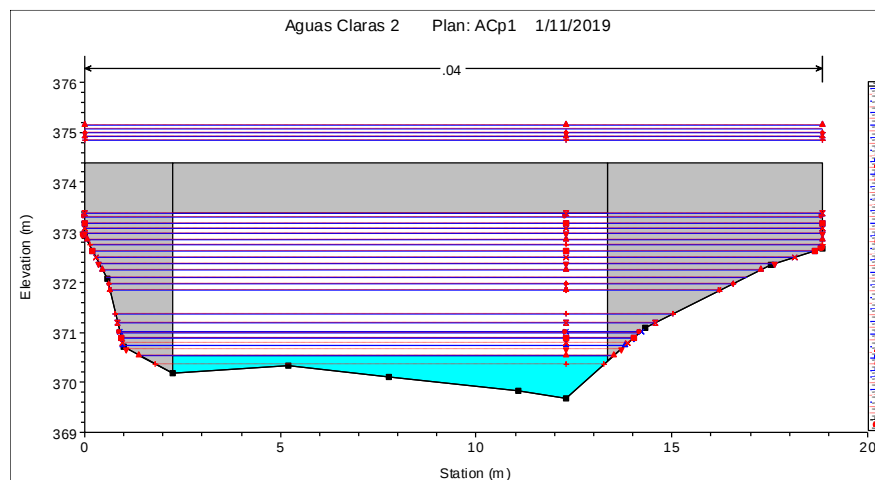


Figura 5-11. Niveles de agua en puente de Quebrada Brava

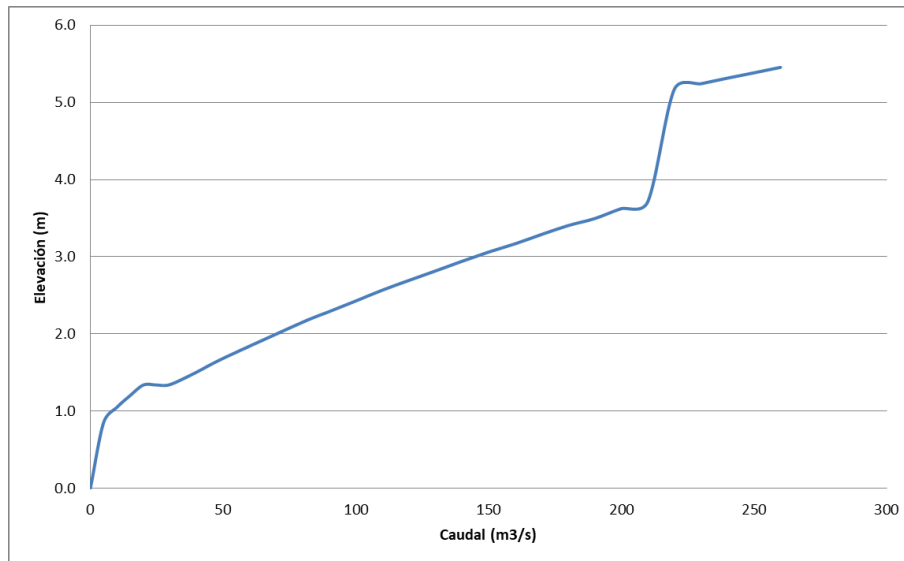


Figura 5-12. Curva de descarga de puente de Quebrada Brava

El puente de la Quebrada Huacas (Figura 5-9 punto 2), tiene una longitud de 25 m con un ancho y altura de apertura de 8,5m y 3,77 m respectivamente. Este puente se vería rebasado por el nivel del agua con un caudal aproximado de 180 m³/s, tal y como se observa en la Figura 5-14 y Figura 5-15.

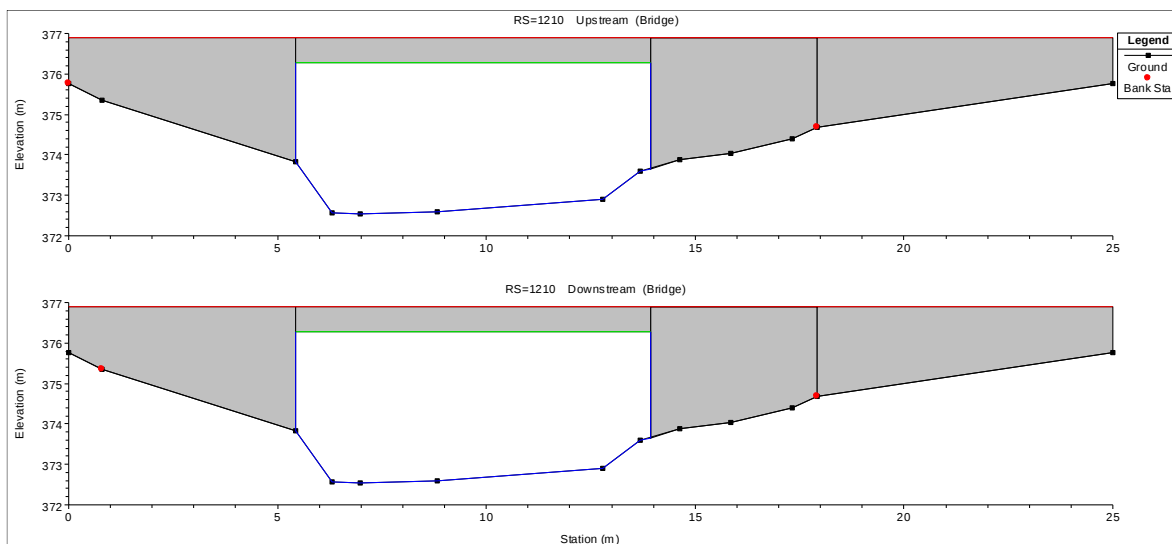


Figura 5-13. Perfil aguas arriba y aguas abajo de puente de Quebrada Huacas

En la siguiente figura se muestra los perfiles del puente ubicado al norte del poblado de San Isidro (Figura 5-9 punto 3). Este puente tiene una longitud de 13,225 m, un ancho y una altura de apertura de 12,366 m y 2,716 m respectivamente. Flujos aproximados a $140 \text{ m}^3/\text{s}$ generarían que el agua rebase esta estructura (Figura 5-17 y Figura 5-18).

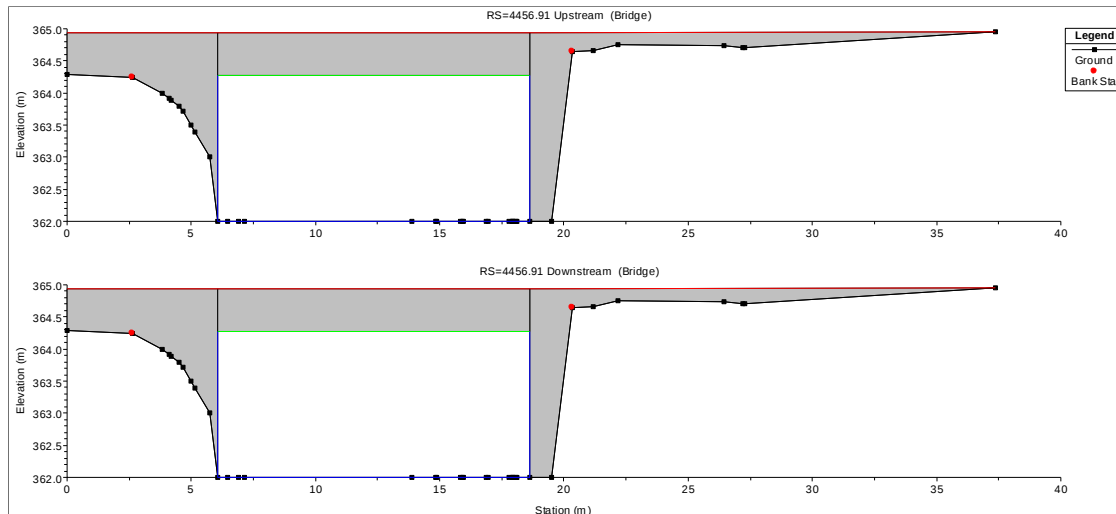


Figura 5-16. Perfil aguas arriba y aguas abajo de puente ubicado en la entrada norte del poblado de San Isidro de Aguas Claras

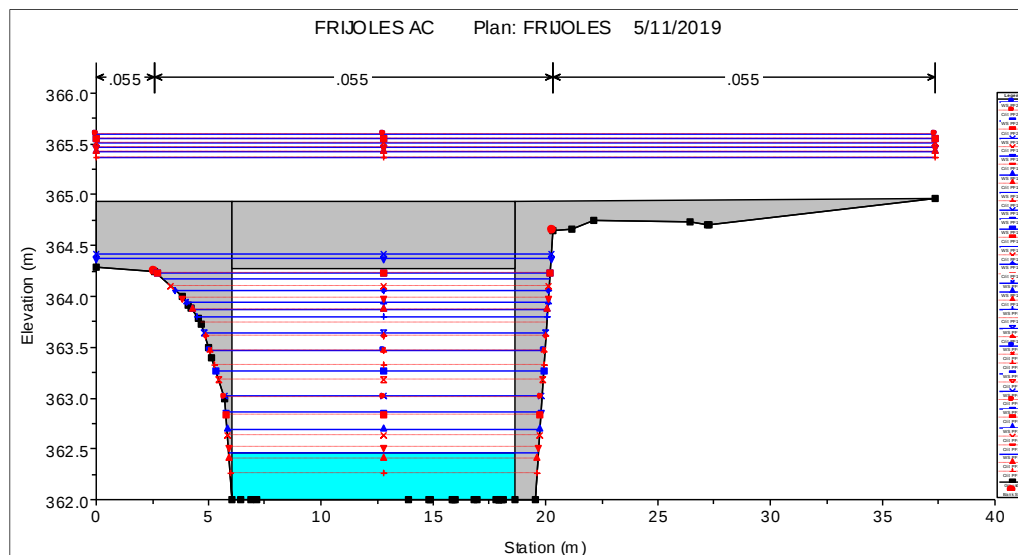


Figura 5-17. Niveles de agua en el puente ubicado en la entrada norte del pueblo de San Isidro de Aguas Claras

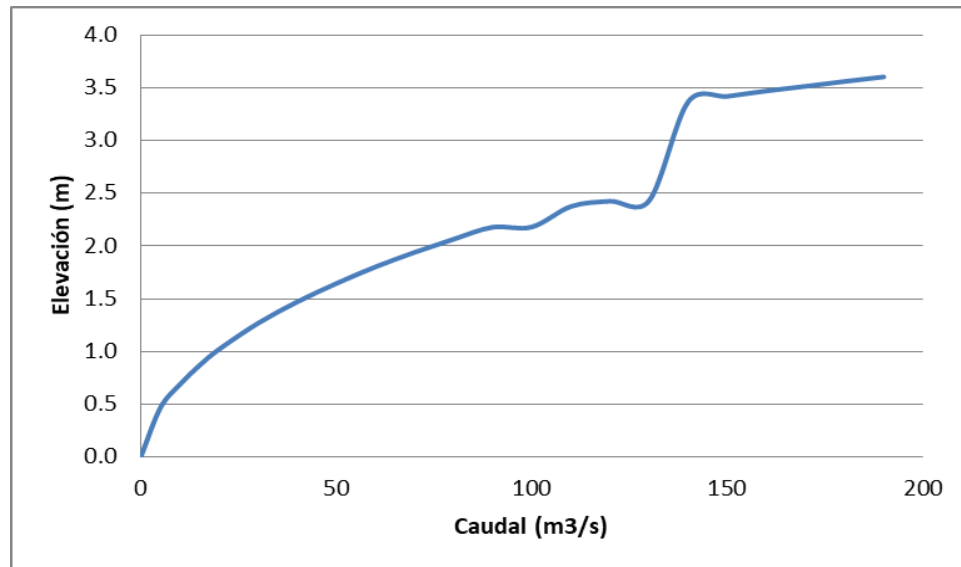


Figura 5-18. Curva de descarga de puente ubicado en la entrada norte del pueblo de San Isidro de Aguas Claras

Al sur del pueblo de San Isidro se ubica una alcantarilla (Figura 5-9 punto 4) la cual está compuesta de dos entradas con diámetros de 80 cm y 70 cm. Dicha estructura tiene un ancho de 5.87 m y una capacidad hidráulica de $2,9 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 5-20 y Figura 5-21).

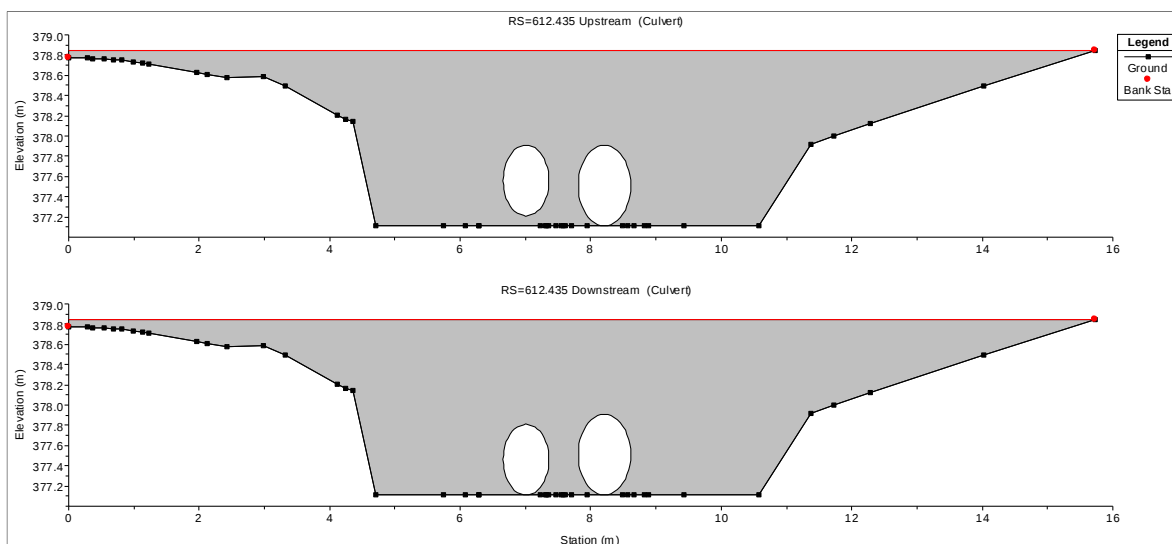


Figura 5-19. Perfil aguas arriba y aguas debajo de alcantarilla en centro del poblado de San Isidro

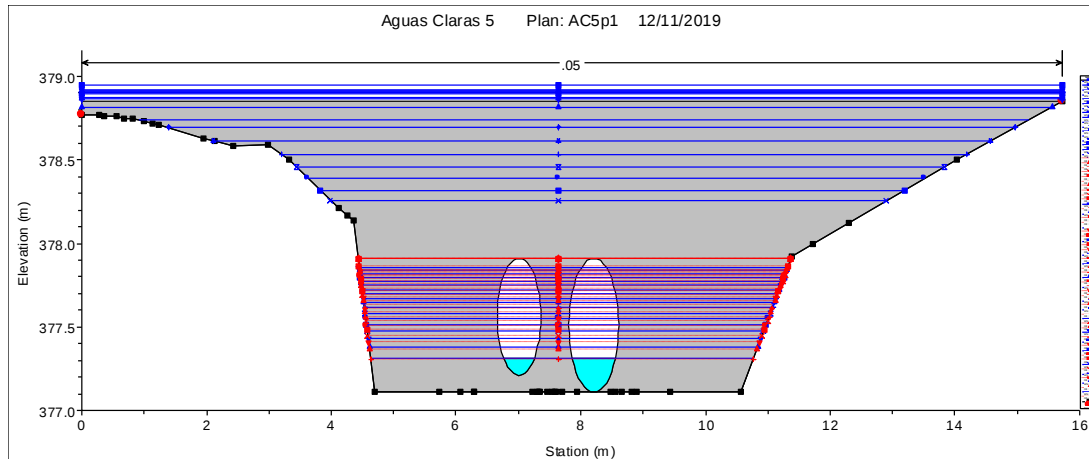


Figura 5-20. Niveles de agua en la alcantarilla en el centro del pueblo de San Isidro

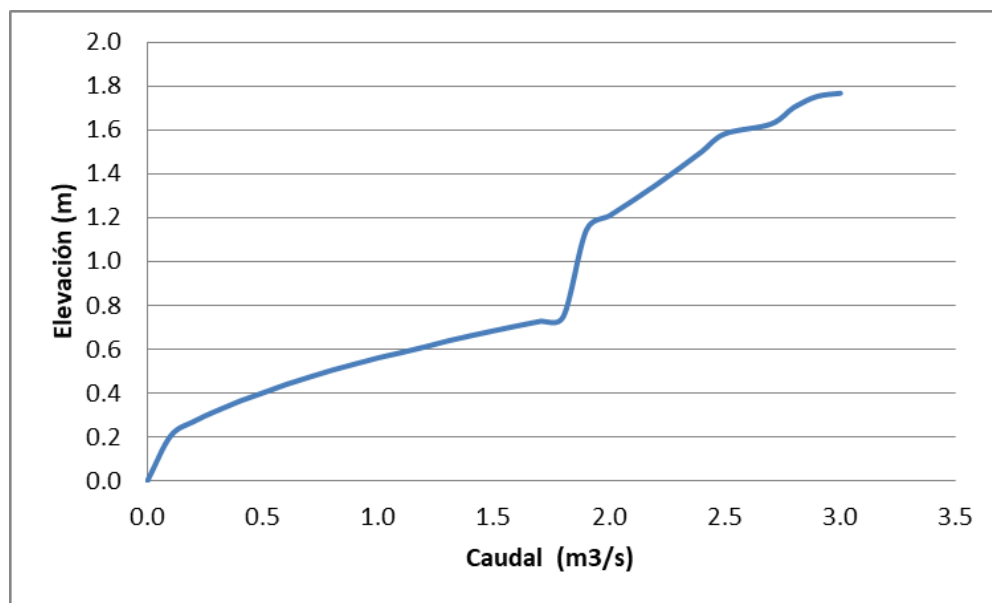


Figura 5-21. Curva de descarga de alcantarilla

Por último, en relación con la última estructura hidráulica utilizada en la modelación bidimensional, esta corresponde a un dique ubicado a 1,2 km aproximadamente de la salida del modelo (Figura 5-9 punto 5). Este tiene una longitud de 26.69 m y una altura de la pared lateral derecha e izquierda de 5.5 m y 5 m respectivamente. Tiene una capacidad hidráulica de $5 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 5-23 y Figura 5-24).

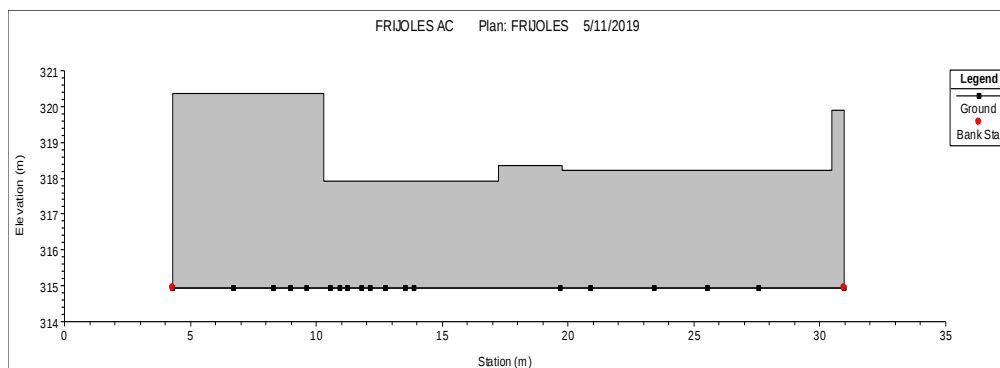


Figura 5-22. Perfil de dique ubicado en última sección el Río Frijoles

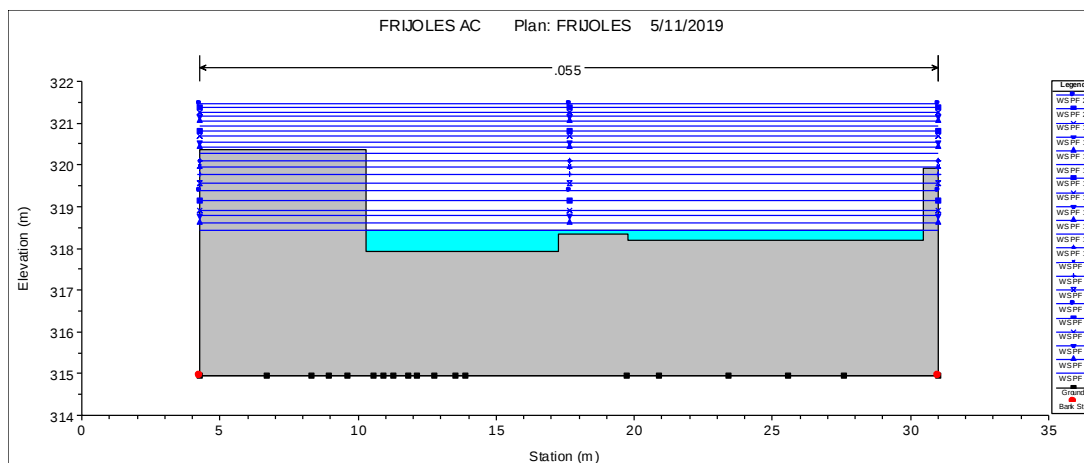


Figura 5-23. Niveles de agua en el dique localizado en la última sección del Río Frijoles

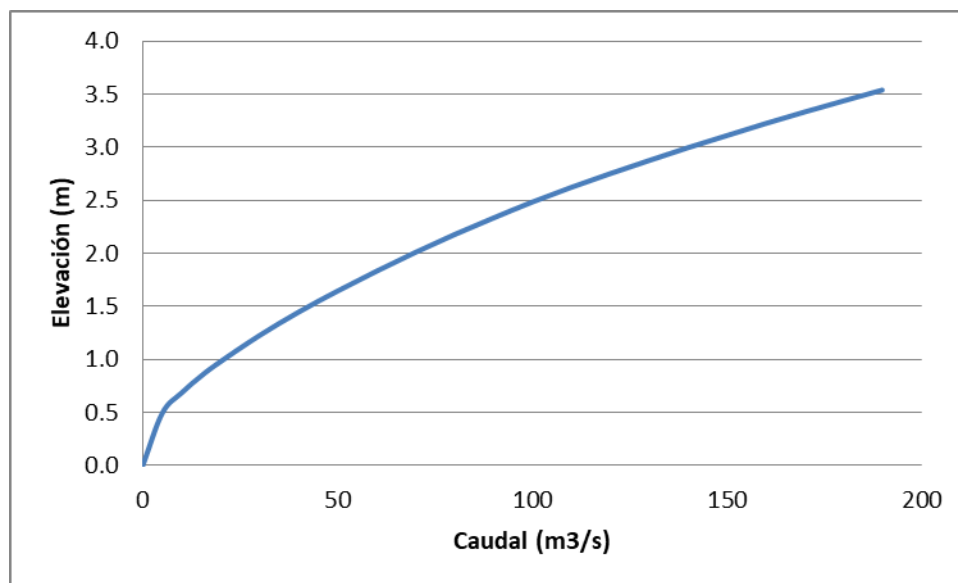


Figura 5-24. Curva de descarga del dique presente en Río Frijoles

5.4 Coeficientes de rugosidad

Para la los coeficientes de rugosidad empleados para la zona de modelación hidráulica se empleó el mapa de cobertura del suelo, el cual a su vez fue afinado de manera manual para tener información más exacta de la zona de estudio, y así lograr un adecuado movimiento del fluido en la superficie. Tal y como se observa en la Figura 5-25, en la zona de estudio predomina lo que son áreas de boscosas y pastizales.

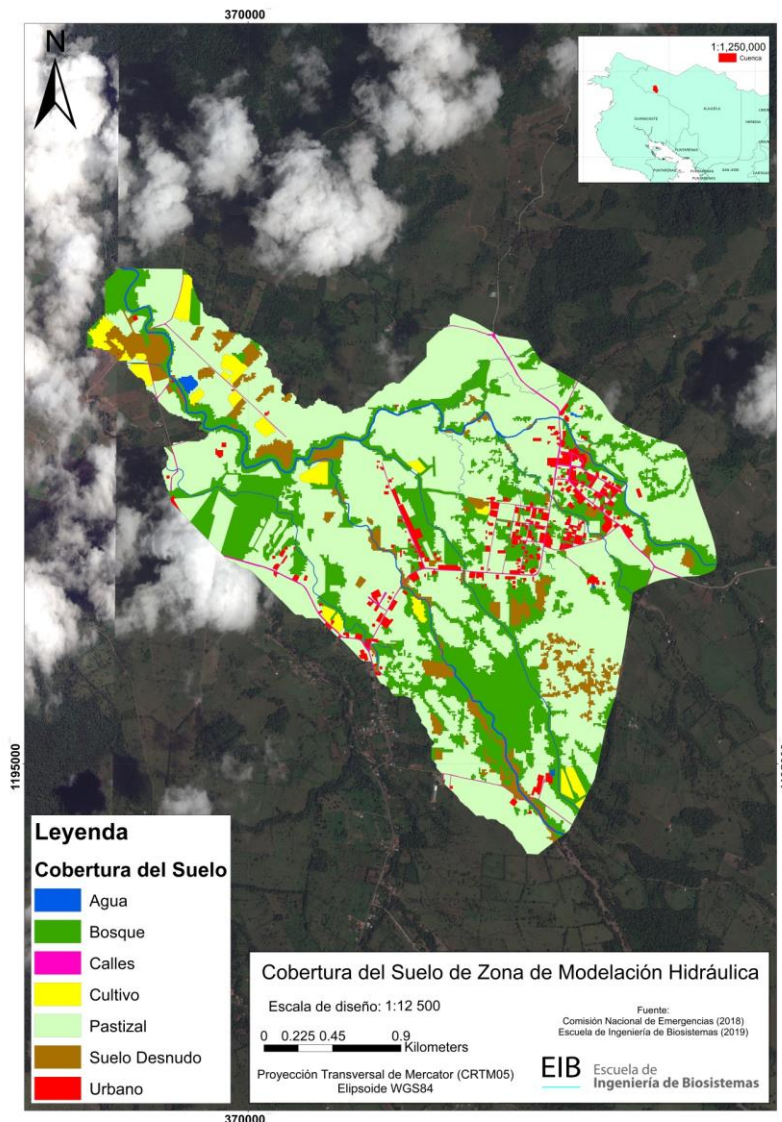


Figura 5-25. Cobertura del suelo de zona hidráulica

A continuación, se presentan los valores utilizados como coeficientes de rugosidad asociados a la cobertura del suelo presente en la zona de estudio (Figura 5-25).

Tabla 21 . Coeficientes de rugosidad

Cobertura del suelo	n de Manning
Río	0.055
Calles	0.020
Urbano	0.200
Cultivo	0.090
Bosque	0.150
Pastizal	0.060
Suelo Desnudo	0.025

5.5 Condiciones de borde y régimen de flujo

Los modelos hidráulicos están compuestos por entradas de flujo al sistema y salidas del sistema. El modelo tiene nueve entradas de caudal (Figura 5-26), las cuales se ubicaron en aquellas zonas correspondientes a las subcuencas que no eran cubiertas en su mayoría por el límite computacional correspondiente a la zona de estudio. En el caso donde los caudales para el caso donde el flujo de entrada era muy grande se procedió a dividir los hidrogramas, generándose de esta manera dos entradas al sistema.

Aquellas áreas que eran cubiertas en su mayoría por el límite computacional, se consideró una distribución de lluvia uniforme a partir de la precipitación de exceso generada mediante el modelo hidrológico.

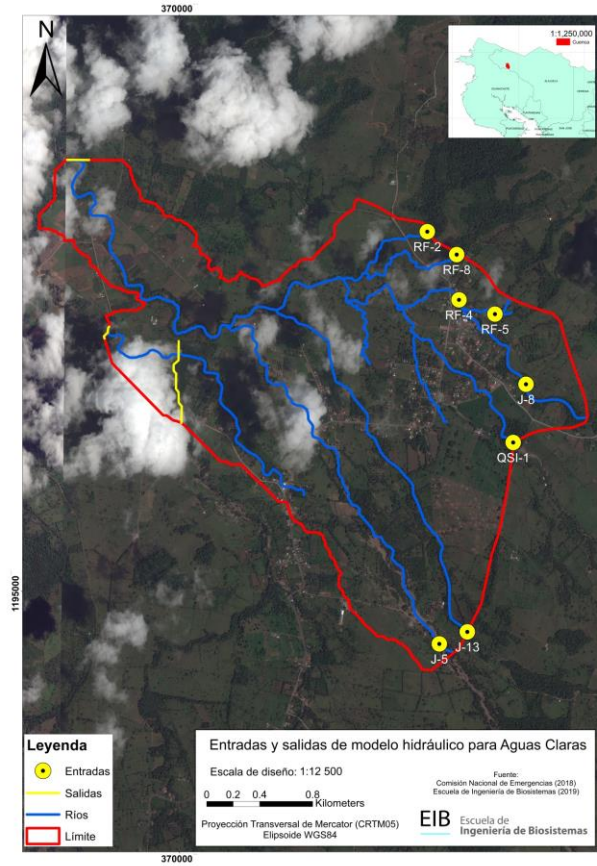


Figura 5-26. Ubicación de las entradas y salidas de agua de los modelos hidráulicos

Las salidas del sistema se ubicaron en aquellas zonas con baja altitud y donde no se tiene más disponibilidad de topografía. Estos puntos de salida son de gran relevancia ya que son los que permiten el curso natural del flujo de agua cuando este llega a los límites computacionales, evitando de esta manera que se dé un almacenamiento inadecuado de agua dentro del sistema. Respecto a los tipos de régimen que puede trabajar el software, este contempla flujos subcríticos y super-críticos, permitiendo una adecuada simulación del flujo y por ende un comportamiento similar al de la realidad.

Ahora bien, con relación a la lluvia introducida a los modelos bidimensionales, a continuación, se presentan las distribuciones usadas para los escenarios CN II, CNIII, CN II con período de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años (

Figura 5-27). En aquellos casos donde se presenta una distribución con un tiempo menor a 24 horas, es porque en ese intervalo se llegó al 100% de la distribución de la lámina de lluvia para el escenario.

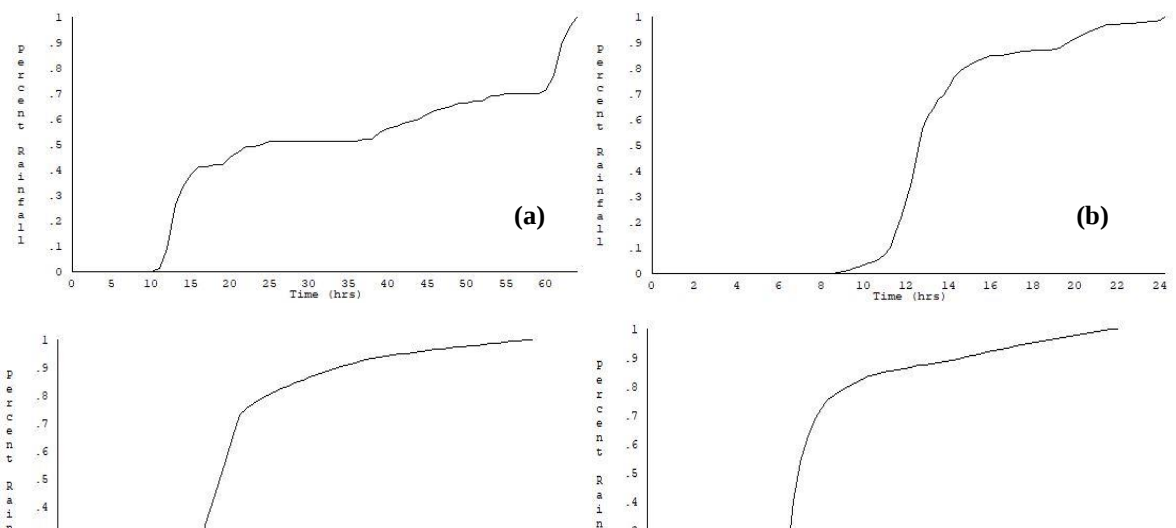


Figura 5-27. Distribución de lluvia para escenarios CN II (a), CN III (b), CN II 5 años (c), CN II 10 años (d), CN II 25 años (e), CN II 50 años (f) y CN II 100 años (g).

En las presentes modelaciones aunque se presentan números de Froude arriba de un valor de 2, se mantiene la estabilidad del sistema. Lo anterior se corroboró mediante la revisión del hidrograma de entrada de aquel elemento con el mayor número de Froude, (lo anterior debido a que estos elementos se ubican en la misma sección del río, de manera que se tuviera el mismo comportamiento al evento que se modeló, en la Figura 5-28 se presenta una muestra de dicha información. En el Apéndice F se presentan los otros hidrogramas utilizados para comprobar la estabilidad de los modelos.

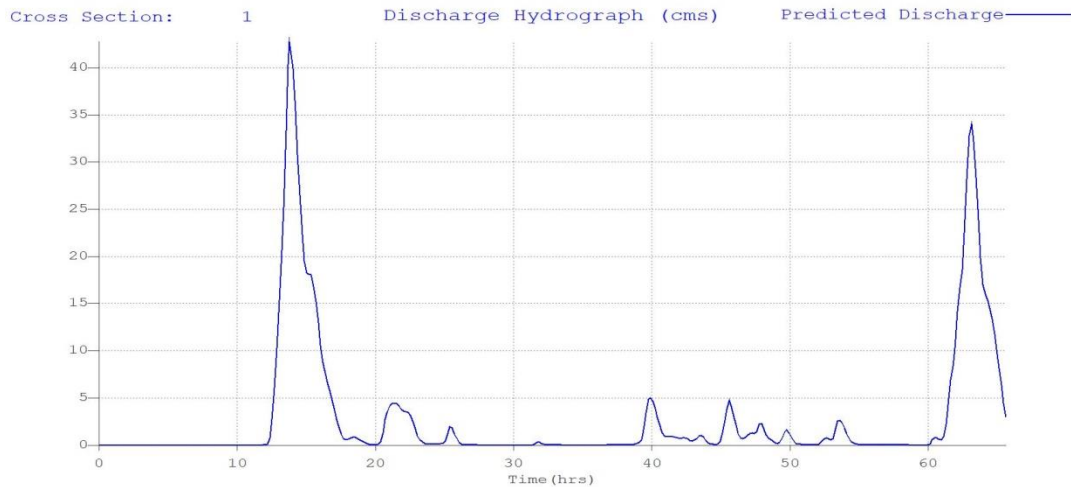


Figura 5-28. Comprobación de estabilidad en elemento 205223 de modelación del evento OTTO

5.6 Escenarios hidráulicos

5.6.1 Análisis hidráulico para condiciones de Otto con CN II

Para las modelaciones hidráulicas se contempló el uso de lluvia distribuida de manera que se pudiera modelar adecuadamente las quebradas presentes en la zona. Para este primer escenario se contempló un tiempo de modelación de 65.58 horas, el cual abarca todo el evento de Otto. En la Figura 5-29 se aprecia que la modelación tiene un comportamiento muy similar a lo sucedido en la realidad donde el evento no afectó el centro de la ciudad; sin embargo, en una zona se denota un desbordamiento, esto debido a que justamente en dicha sección del río el nivel del agua supera la elevación del banco izquierdo. Por lo cual, es importante prestar atención de dicha zona para eventos similares a este, de manera que la población no se vea afectada.

Las mayores velocidades se presentan en la zona noroeste del río Frijoles antes de la ubicación del dique, donde se pueden llegar a tener velocidades entre 3 y 7 m/s. También se observa que al inicio aguas arriba del río que corresponde a la Quebrada Brava de igual manera presenta velocidades altas, lo cual concuerda con las imágenes satelitales, ya que en

dicha zona se aprecia como las zonas cercanas al banco izquierdo de dicho río se denota suelo desnudo, resultado de un alto flujo de agua en ese tramo.

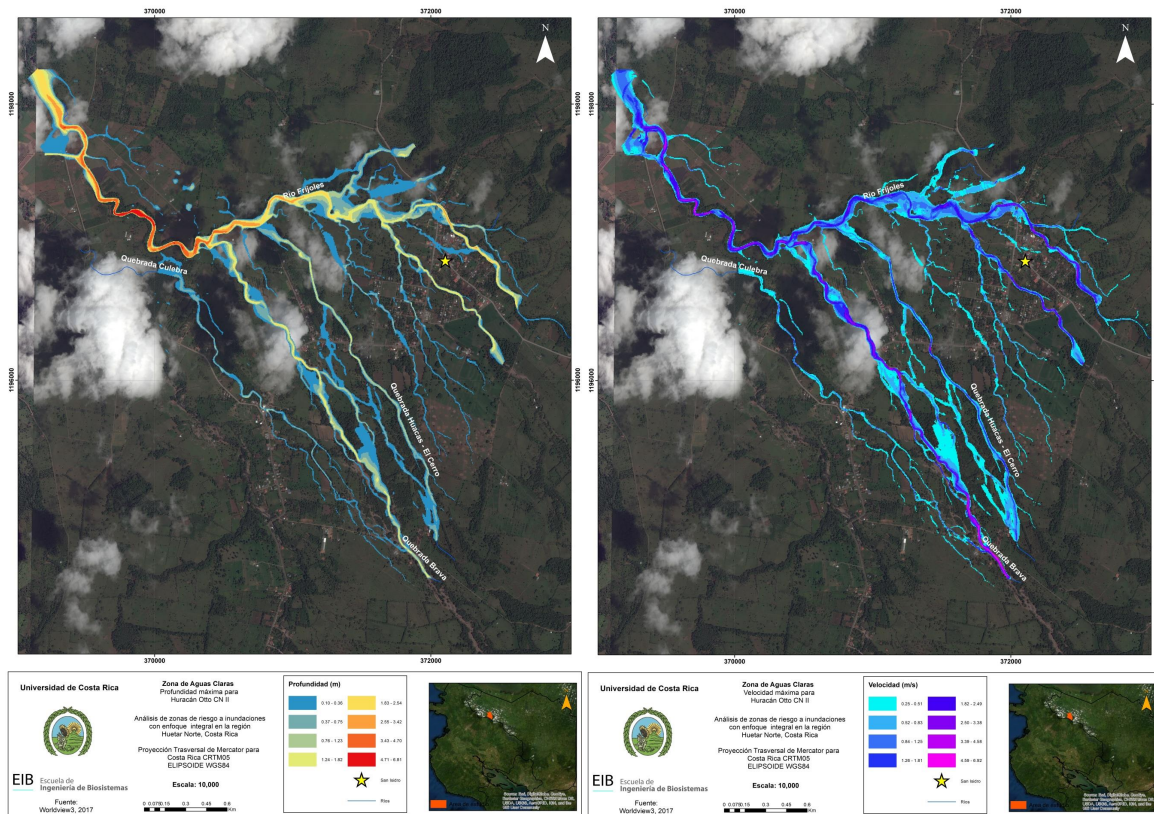


Figura 5-29. Profundidad máxima (izquierda) y velocidad máxima (derecha) de la inundación CN II para Aguas Claras

En la Figura 5-30 se presenta el mapa de índice de amenaza para el escenario anteriormente mencionado. En este se puede apreciar que las zonas que presentan mayor amenaza corresponden a los cauces principales de los ríos de la zona. Ya que se considera la combinación de profundidades y velocidades máximas presentes en el modelo. Además, se aprecia que la zona donde se ubica el poblado de San Isidro no presenta una zona de amenaza, al no darse un desbordamiento de los cauces que pasan en dicha zona.

Los mapas de los índices de amenaza de los otros escenarios que serán presentados a continuación se pueden apreciar en el Anexo K.

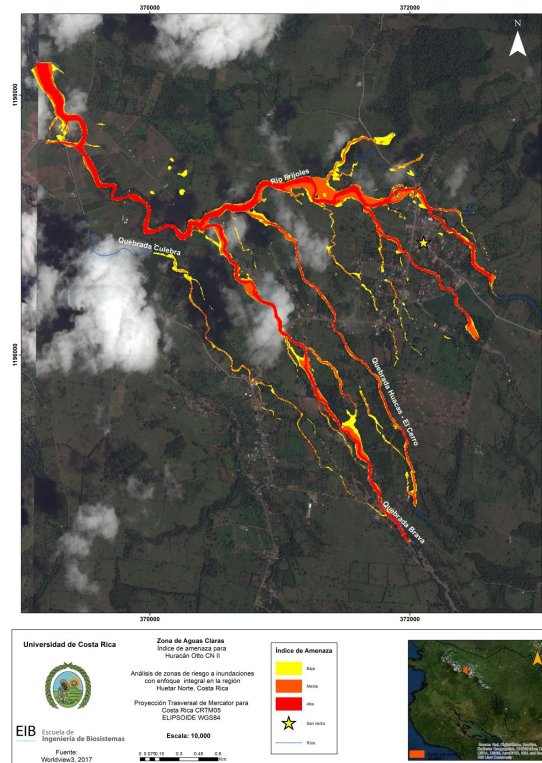


Figura 5-30. Mapa de índice de amenaza para la inundación CN II para Aguas Claras

5.6.2 Análisis hidráulico para condiciones de Otto con CN III

En la Figura 5-31 se presentan los resultados de la modelación para el escenario con una condición previa de humedad CN III. Para este modelo, se contempló un tiempo de modelación de 24 hr, las cuales corresponden al intervalo de tiempo donde se presentó el mayor pico de lámina de agua del huracán.

Se puede apreciar en dichos resultados como una condición previa de humedad del suelo al evento tiene un efecto considerable sobre los niveles de elevación del agua. Gracias a ello la mancha de inundación se amplía, dicha variación se aprecia en la zona que se ubica entre Quebrada Brava y Quebrada Huacas. A diferencia del escenario CN II, se obtienen alturas de 8 m y de velocidades de hasta 8 m/s en las zonas altas y en la zona baja de la cuenca, especialmente en las secciones correspondientes al Río Frijoles. Dichas elevaciones al igual que el escenario CN II, se concentran en la sección antes de la estructura hidráulica de

retención. Es importante mencionar que antes de que comience dicha sección es donde se da la unión de los flujos de la Quebrada Brava y el Río Frijoles.

En este escenario se observa que al norte del pueblo de San Isidro, donde se ubican dos quebradas pequeñas se incrementa la mancha de inundación; sin embargo, dicha zona no representa un peligro para las personas, lo anterior debido a que dicha área actualmente presenta vegetación característica de zonas inundables, siendo esta un espacio natural de almacenamiento de agua.

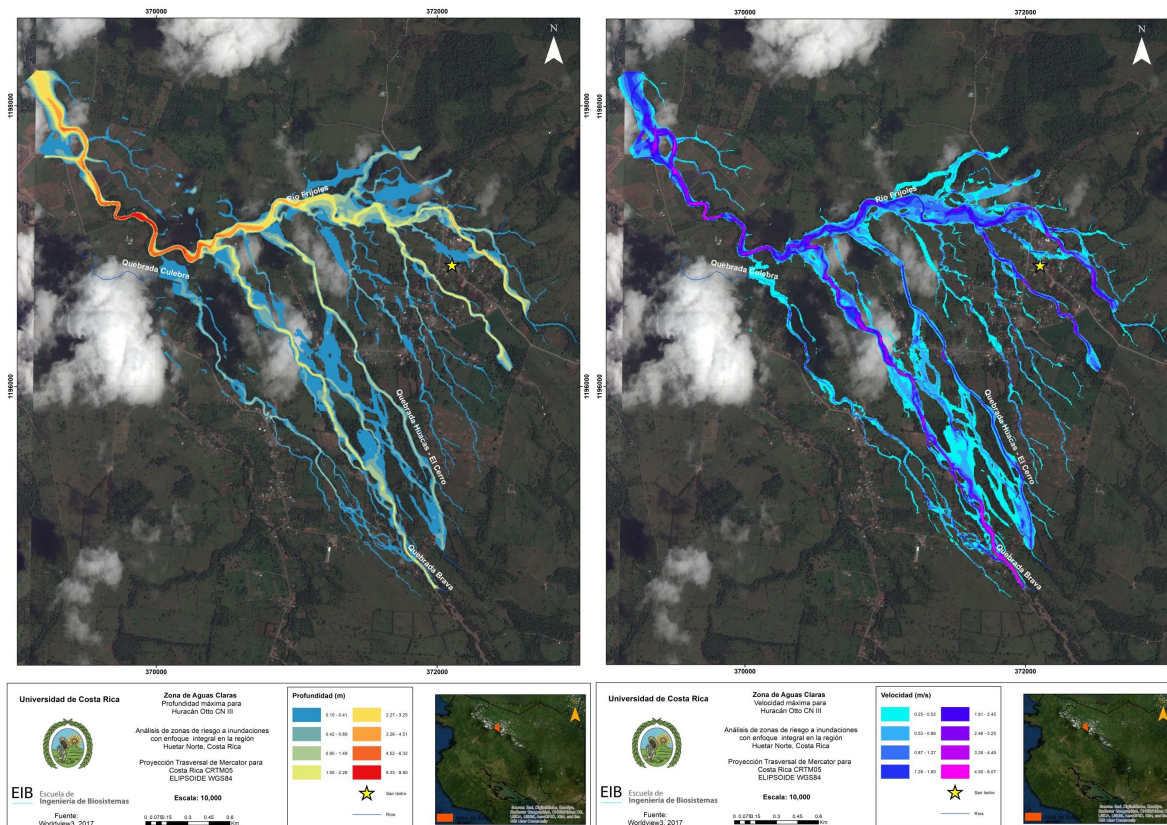


Figura 5-31. Profundidad máxima (izquierda) y velocidad máxima (derecha) de la inundación CN III para Aguas Claras

5.6.3 Análisis hidráulico para condiciones de Otto con CN II y C.V de 0.45

Para el escenario que contempla el flujo de lodos tal y como se observa en la Figura 5-32, se aprecia que la profundidad de los niveles de la inundación aumenta en comparación al agua limpia, generando de esta manera una mayor mancha de inundación y permitiendo así lograr obtener niveles de agua donde la población indica que llegó la inundación.

Es importante mencionar que si bien es cierto, según testigos de la zona el colegio ubicado 1.5 Km al suroeste del cementerio de San Isidro de Aguas Claras se vio afectado, aun contemplando el flujo de lodos a dicha zona no llega la inundación, demostrando así que para que el flujo se direccionara en esa dirección tuvo que haber sido mediante un agente externo, como la alcantarilla que se encuentra cercana a dicha institución.

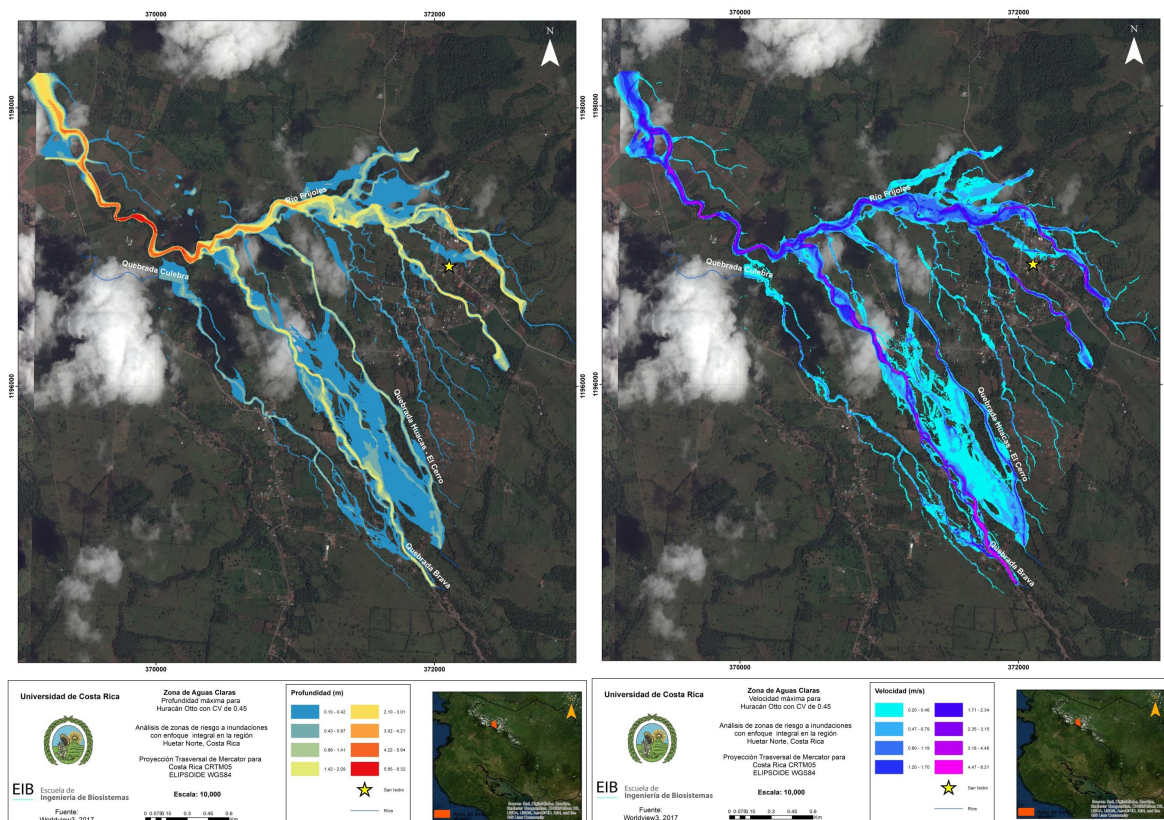


Figura 5-32. Profundidad máxima (izquierda) y velocidad máxima (derecha) de la inundación CN II y CV de 0.45 para Aguas Claras

5.6.4 Análisis hidráulico de las condiciones existentes para 5 años de periodo de retorno

En la Figura 5-33 se presentan los resultados de la modelación del evento Otto para un período de retorno de 5 años para la zona de Aguas Claras. En este escenario las elevaciones llegan hasta un máximo de 4.91 m, las cuales se localizan luego de la unión entre el río Frijoles y la Quebrada Brava. Lo que corresponde a las velocidades máximas presentes, estas llegan a valores límites de 5.2 m/s y se ubican especialmente en la sección del río al que pertenece la Quebrada Brava.

En general no se observa afectación hacia la población presente en la zona de estudio, de manera que para los caudales de este período de retorno, los ríos tienen suficiente capacidad de almacenamiento.

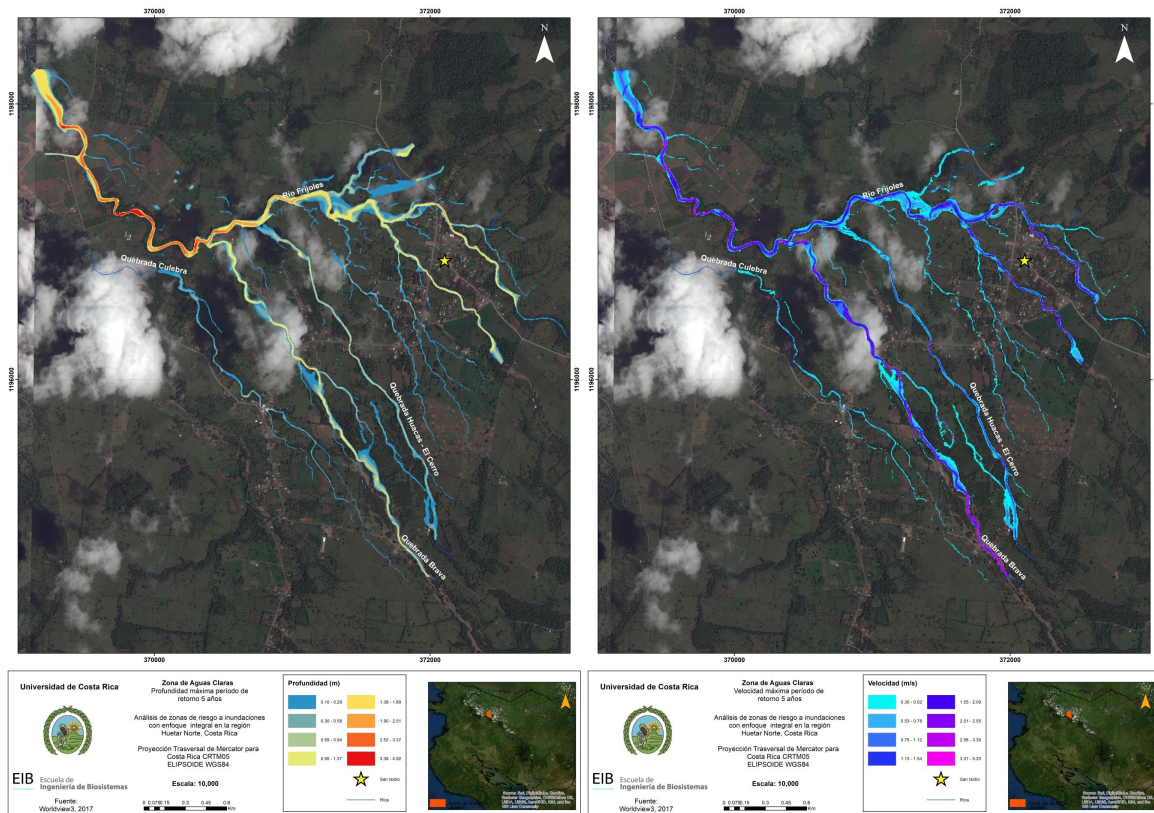


Figura 5-33 . Profundidad máxima (izquierda) y velocidad máxima (derecha) de la inundación CN II para período de retorno de 5 años

5.6.5 Análisis hidráulico de las condiciones existentes para 10 años de periodo de retorno

En la Figura 5-34 se presentan la modelación correspondiente al período de retorno de 10 años. En este se observa un incremento de la mancha de inundación al norte de la zona del poblado de San Isidro, donde hay presencia de vegetación propia de una zona de amortiguamiento, y que no representa un peligro para la población del poblado de San Isidro de Aguas Claras. Además, el área presente entre los cauces de las quebradas Brava y Huacas también presentan una expansión del área de inundación. Las profundidades en esta zona llegan hasta una altura de 7.23 m y las mayores velocidades se presentan en el tramo del río de la Quebrada Brava donde pueden llegar hasta 7.09 m/s.

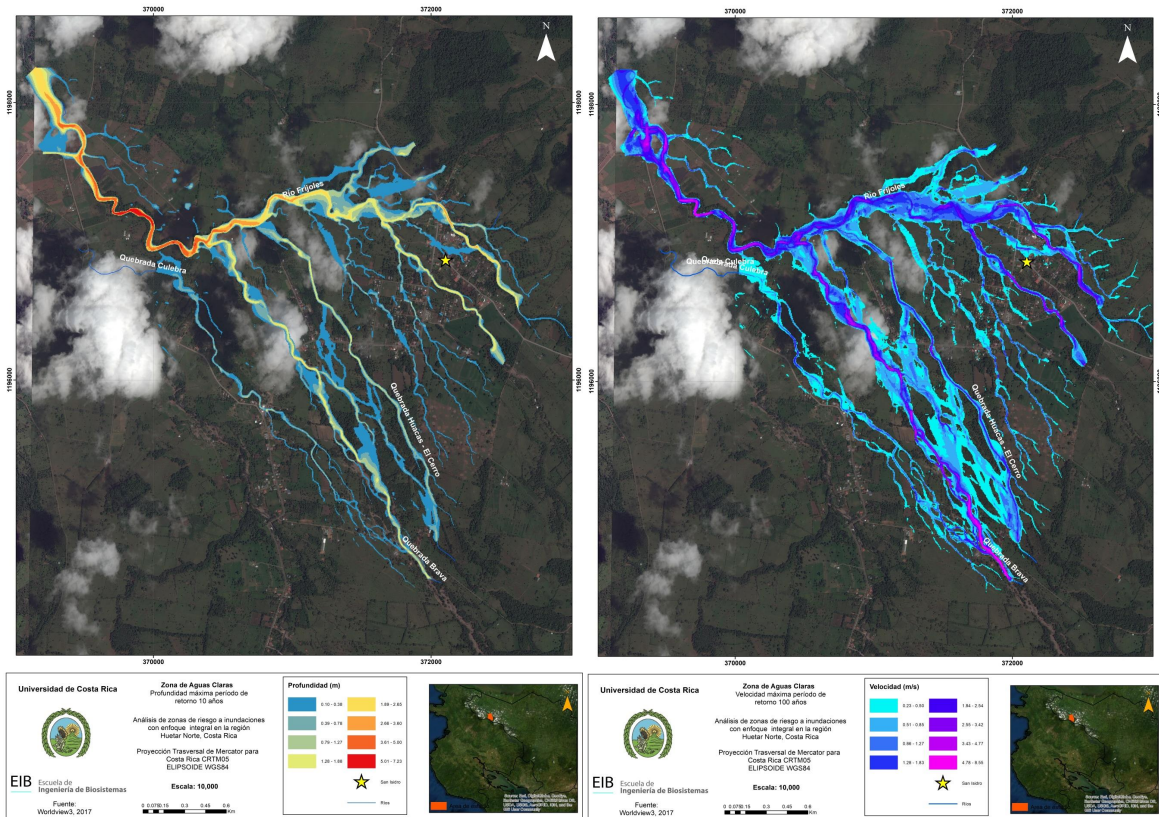


Figura 5-34. Profundidad máxima (izquierda) y velocidad máxima (derecha) de la inundación CN II para período de retorno de 10 años.

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

A continuación, se presentan los resultados de la modelación hidráulica para un período de retorno de 25 años para la zona de interés de Aguas Claras (Figura 5-35). Los resultados obtenidos igualmente demuestran que las zonas donde se presentan las alturas más altas corresponden a la sección luego de la unión del Río Frijoles y Quebrada Brava, con elevaciones de hasta 8.3 m y velocidades máximas de 7.8 m/s.

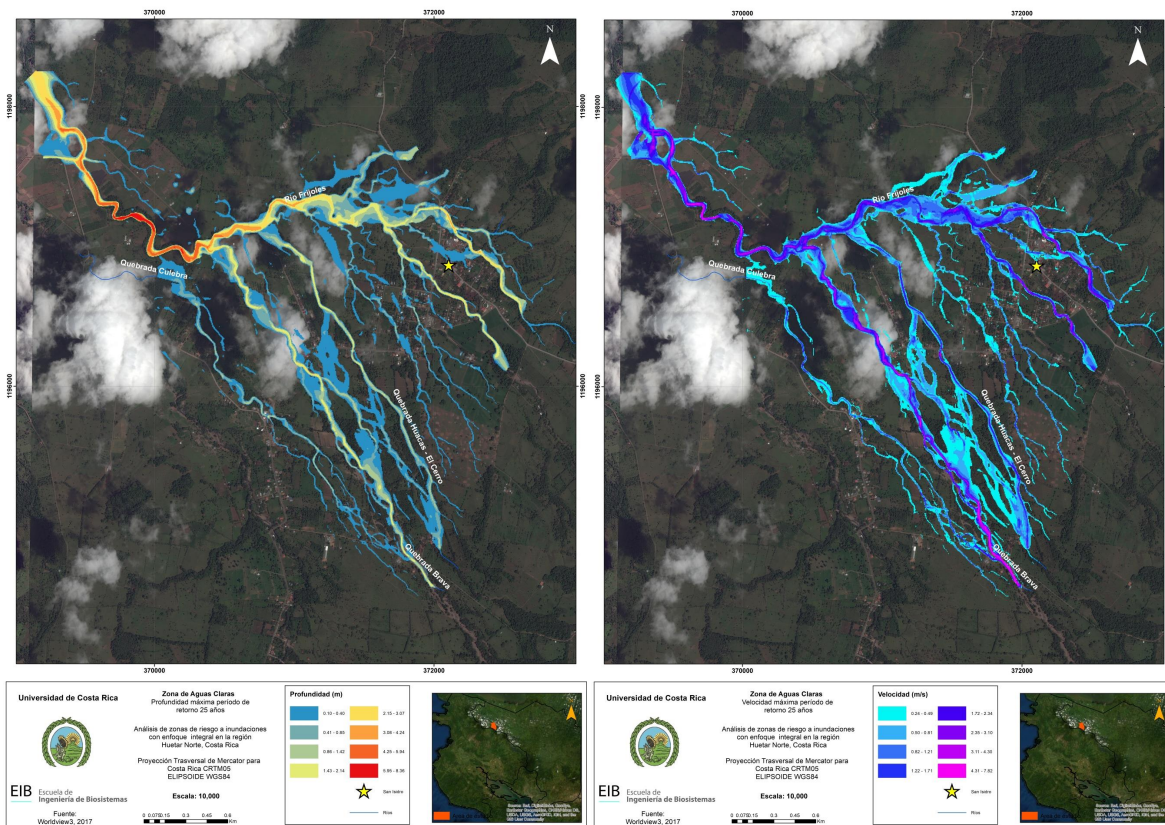


Figura 5-35. Profundidad máxima (izquierda) y velocidad máxima (derecha) de la inundación CN II para período de retorno de 25 años

Es relevante mencionar que en comparación con el escenario CN II que contempla el evento de Otto, este tiene valores más altos tanto para altura del nivel del agua como para velocidades. Lo anterior se explica debido a que para este período de retorno la lámina total

de lluvia es mayor a la del CN II, ya que la primera contempla una lámina de lluvia máxima de 190,21 mm, mientras que el escenario original es de 182,9 mm.

Es por ello que se contempla que el evento de Otto, para la zona de Aguas Claras se comportó como un evento con período de retorno de 25 años, a diferencia de uno de 100 años donde el máximo de lluvia es de 233,86 mm.

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

Tal y como se muestra en la Figura 5-36, se observa un incremento del área de inundación en diversas áreas dentro de las cuales se encuentra al igual que para el período de retorno de 25 años aquella localizada al norte del poblado de San Isidro y entre los cauces de las Quebradas Brava y Huacas. En dichas zonas se presentan alturas de hasta 0.63 m y velocidades máximas de 0.70 m/s.

En general, para este escenario se pueden llegar a tener profundidades y velocidades máximas de 9.15 m y 8.24 m/s. El cauce de la Quebrada Brava al presentar de los mayores caudales de agua limpia, en ciertas secciones se desborda generando un flujo que es transportado por aquellas quebradas que se ubican lateralmente, un ejemplo de esto es la quebrada Culebra, a la cual desemboca agua transportada desde pequeñas quebradas aguas arriba y que son alimentadas aproximadamente unos 300 m aguas abajo de la entrada del modelo bidimensional correspondiente a la Quebrada Brava.

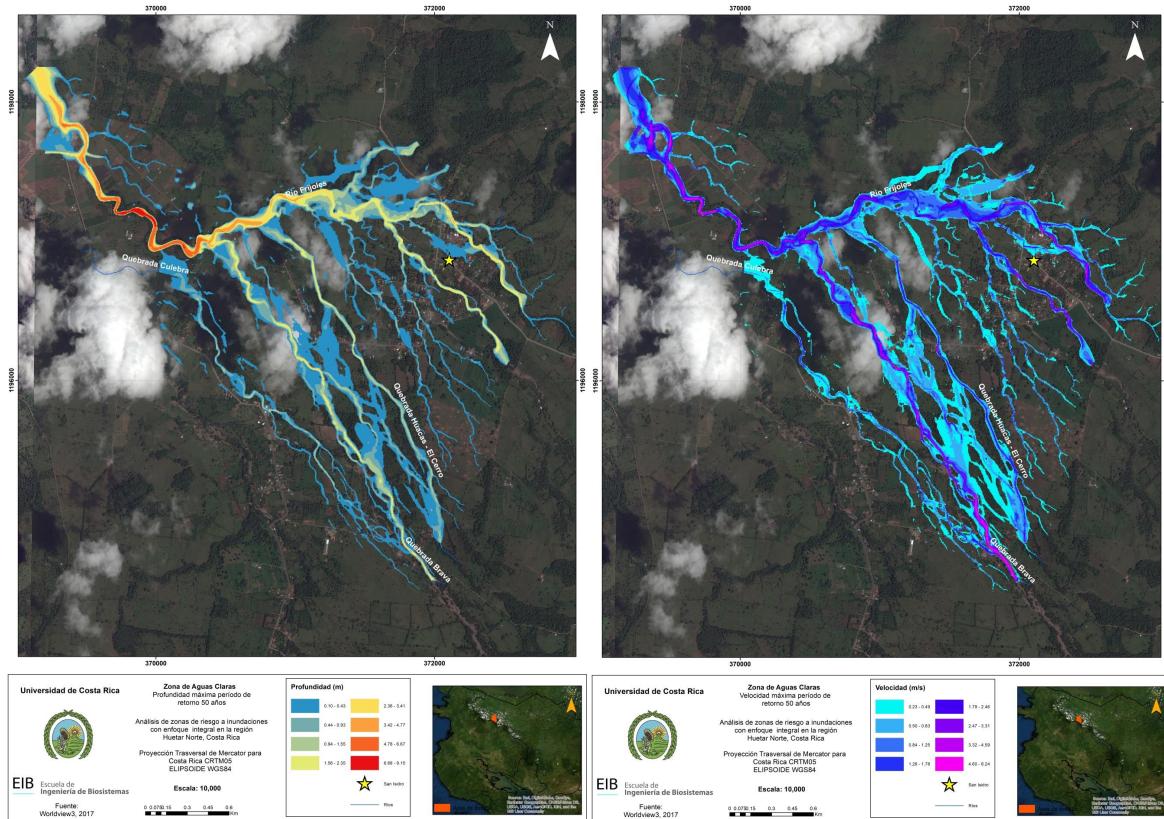


Figura 5-36. Profundidad máxima (izquierda) y velocidad máxima (derecha) de la inundación CN II para período de retorno de 50 años

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

En el último escenario propuesto, tal y como se muestra en la Figura 5-37, se observa un incremento general en la mancha de inundación de la zona. Se aprecia que ciertas zonas que se encuentran dentro del poblado de San Isidro se presentan elevaciones superiores a 10 cm y velocidades de 0.3 m/s. Dentro de las zonas que se verían amenazadas corresponde a la que se ubica cercana a la estructura 3 (Figura 5-9) donde varias casas se localizan dentro de una zona de amenaza baja y media.

En este escenario en específico se pueden llegar a tener profundidades y velocidades máximas de hasta 9.89 m y 8.55 m/s. Los valores más altos de profundidades se llegan a presentar luego de la unión de la Quebrada Brava con el cauce del Río Frijoles (al igual que

en escenarios anteriormente presentados). Es importante mencionar que luego de esta unión comienza una sección con una longitud de aproximadamente 1.2 km la cual tiene la capacidad hidráulica suficiente para soportar alturas de hasta 10 m de elevación del agua, por lo que en esta sección se localizan niveles de agua entre 5.33 m y 9.89 m.

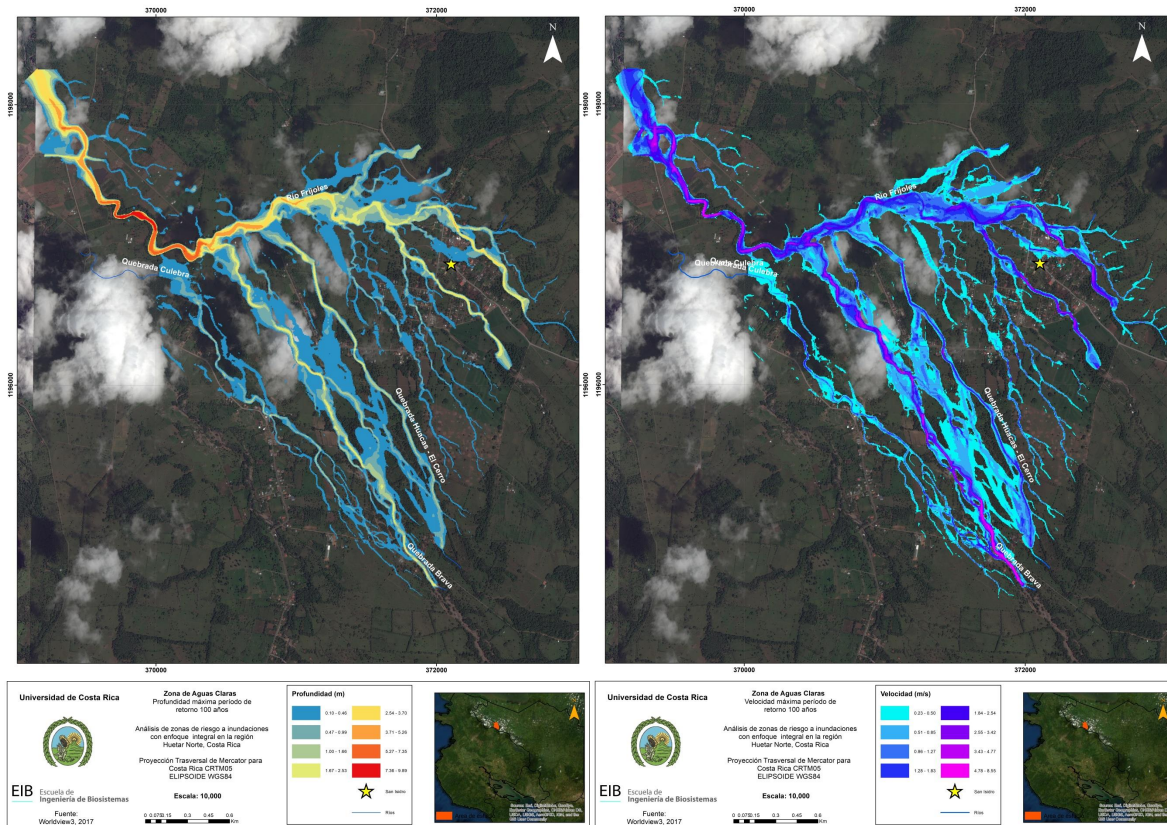
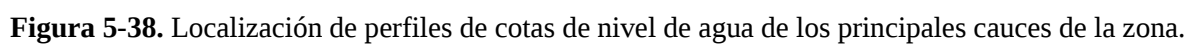


Figura 5-37. Profundidad máxima (izquierda) y velocidad máxima (derecha) de la inundación CN II para período de retorno de 100 años

A continuación se presentan la información correspondiente a los perfiles ubicados en diversas secciones de los cauces principales de los ríos de interés de la zona de Aguas Claras. En la Figura 5-38 se muestra la ubicación de estos perfiles; sin embargo, si se desea observar de manera gráfica los perfiles, ver el Anexo G.



Las Tablas Tabla 22 Tabla 23 Tabla 24 Tabla 25 presentan la información correspondiente a las secciones de los diversos ríos presentes en la zona de Aguas Claras. En la Tabla 22 aprecia que las mayores velocidades del río principal de la zona (Río Frijoles) se presentan en la zona baja (A1 y B1) y la sección J1, que se ubica cerca de una de las entradas de agua del modelo bidimensional.

Tabla 22. Información de la inundación para secciones del Río Frijoles

Localización		Llanura de Inundación	
Sección	Cota de elevación (m)	Ancho (m)	Velocidad promedio (m/s)
A1	14.40	104.84	2.03
B1	27.00	48.68	2.35
C1	34.80	111.10	1.66
D1	39.00	130.52	1.26
E1	42.90	150.44	1.16
F1	48.30	253.24	1.33
G1	56.40	140.03	1.44
H1	60.00	114.59	0.99
I1	69.60	131.69	0.95
J1	75.30	59.64	2.38

Tabla 23. Información de la inundación para secciones de Quebrada Culebra

Localización		Llanura de Inundación	
Sección	Cota de elevación (m)	Ancho (m)	Velocidad promedio (m/s)
A2	4.14	166.18	0.33
B2	8.04	101.29	0.60
C2	21.54	73.07	0.84
D2	40.44	51.45	0.57

Tabla 24. Información de la inundación para secciones de Quebrada Brava

Localización		Llanura Inundación	
Sección	Cota de elevación (m)	Ancho (m)	Velocidad promedio (m/s)
A3	3.13	223.91	0.78
B3	7.03	96.35	1.94
C3	20.53	228.33	1.76
D3	24.13	165.56	1.11
E3	29.83	468.72	0.80
F3	46.03	72.53	2.44
G3	85.63	139.96	1.56

Tabla 25. Información de la inundación para secciones de Quebrada Huacas-El Cerro

Localización		Llanura de Inundación	
Sección	Cota de elevación (m)	Ancho (m)	Velocidad promedio (m/s)
A4	3.61	138.63	0.66
B4	9.01	43.47	1.73
C4	20.71	58.81	1.06
D4	26.41	57.02	0.97
E4	36.01	80.62	0.98
F4	53.41	50.10	1.26
G4	69.61	263.61	0.59
H4	103.21	163.11	0.86

5.6.9 Resumen de Análisis Hidráulicos Desarrollados para Aguas Claras

Las Tabla 26, Tabla 27, Tabla 28 y

Escenario	Profundidad Promedio (m)	Desviación Estándar
Período de retorno 5 años	0.08	0.3
OTTO CN II	0.13	0.45
Período de retorno 10 años	0.15	0.48
Período de retorno 25 años	0.19	0.57
OTTO CN III	0.20	0.61
OTTO CN II CV de 0.45	0.20	0.59
Período de retorno 50 años	0.22	0.63
Período de retorno 100 años	0.25	0.69

Tabla 29 muestran un resumen de la información correspondiente al área de la mancha de inundación, las profundidades y velocidades de todas las modelaciones indicadas en el presente documento.

En la Tabla 26 se aprecia que efectivamente los modelos bidimensionales se comportan de una manera lógica respecto a los períodos de retorno, donde la menor área de inundación corresponde al período de retorno de 5 años y el mayor para 100 años. En caso del evento Otto, para la zona de Aguas Claras no llega a comportarse como un evento de 100 años. Es

importante indicar que el mismo de acuerdo a su lámina máxima de agua según la estación meteorológica de Guayabal es menor al de 100 años.

A su vez, se aprecia como para dicho evento al considerar una condición de humedad antecedente y flujo de lodos, el área de inundación aumenta considerablemente (alrededor de un 42.87% para el escenario de CN III y 55.36% para CN II con un C.V de 0.45).

Tabla 26. Área de cobertura de la inundación

Escenario	Área de inundación (Km ²)
Período de retorno 5 años	0.72
OTTO CN II	1.12
Período de retorno 10 años	1.23
Período de retorno 25 años	1.53
OTTO CN III	1.60
OTTO CV de 0.45	1.74
Período de retorno 50 años	1.74
Período de retorno 100 años	1.96

Tal y como se muestra en las siguiente tabla, efectivamente las zonas con una amenaza alta incrementa para los distintos períodos de retorno y los tres escenarios para el evento OTTO, donde estas áreas se localizan más que todo en el cauce del río. El escenario que presentan las mayores áreas de amenaza media y alta corresponde a 100 años. Lo mismo sucede con las profundidades y velocidades promedio de las inundaciones (Tabla 28 y Tabla 29).

Tabla 27. Área de afectación según índice de amenaza

Escenario	Área de amenaza (km ²)		
	Baja	Media	Alta
Período de retorno 5 años	0.14	0.16	0.17
OTTO CN II	0.18	0.25	0.28
Período de retorno 10 años	0.20	0.28	0.31
Período de retorno 25 años	0.23	0.35	0.39



OTTO CN III	0.24	0.36	0.42
OTTO CV de 0.45	0.39	0.36	0.40
Período de retorno 50 años	0.25	0.39	0.46
Período de retorno 100 años	0.27	0.43	0.52

Tabla 28. Resumen de las profundidades de la inundación

Escenario	Profundidad Promedio (m)	Desviación Estándar
Período de retorno 5 años	0.08	0.3
OTTO CN II	0.13	0.45
Período de retorno 10 años	0.15	0.48
Período de retorno 25 años	0.19	0.57
OTTO CN III	0.20	0.61
OTTO CN II CV de 0.45	0.20	0.59
Período de retorno 50 años	0.22	0.63
Período de retorno 100 años	0.25	0.69

Tabla 29. Resumen de las velocidades de la inundación

Escenario	Velocidad Promedio (m/s)	Desviación Estándar
Período de retorno 5 años	0.13	0.31
OTTO CN II	0.19	0.43
Período de retorno 10 años	0.21	0.45
Período de retorno 25 años	0.26	0.52
OTTO CN III	0.27	0.54
OTTO CN II CV de 0.45	0.24	0.51
Período de retorno 50 años	0.29	0.56
Período de retorno 100 años	0.33	0.60

6 Conclusiones y recomendaciones

- Se logró realizar una caracterización que contempla aspectos geomorfológicos, de suelos y cobertura vegetal de la cuenca de Aguas Claras.
- De acuerdo con la lámina de agua registrada del evento del Huracán Otto para el caso de la región de Aguas Claras, este se comporta como un evento con un período de retorno de 25 años.
- El uso de una malla con una resolución de 5 m y distribución de lluvia permitió modelar esta cuenca sin tener la necesidad de usar canales.
- Los resultados obtenidos indican que efectivamente el poblado de San Isidro mayoritariamente no se ve afectado por las inundaciones contempladas a partir del evento extremo de Otto; sin embargo, se debe poner especial atención en aquella sección cercana a la entrada norte del pueblo ya que es en esta parte donde el flujo llega a desbordarse por el bando izquierdo del río.
- Considerar una condición previa de humedad CN III permitió evaluar el efecto de esta culminando en un aumento en los niveles de agua y velocidad.
- La implementación de los flujos de lodo permite generar una mancha de inundación más acorde con lo sucedido en la realidad del evento del huracán Otto.
- Las mayores alturas del nivel del agua para los presentados se localizan justamente luego la confluencia entre la Quebrada Brava y el cauce principal del Río Frijoles; sin embargo, el río tiene la capacidad de almacenamiento suficiente para soportar dichas alturas.

7 Referencias

- Aparicio, J. (1992). *Fundamentos de Hidrología* (Primera ed.). México D.F, México: Limusa.
- Chow, V. T. (1994). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.
- 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>
- Instituto Meteorológico Nacional. (2017). *Huracán Otto: informe técnico*. San José: Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones.
- 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.	Licenciado en Ingeniería Agrícola Maestría en Ingeniería Civil. Doctorado en Ingeniería Civil (Recursos Hídricos y Ambiental)	Coordinadora
Alberto Coto Fonseca	Licenciado en Ingeniería Agrícola.	Colaborador
Yadir Rodríguez	Estudiante	Asistente
Michel Castagnet Herrera	Estudiante	Asistente

9 Apéndices

<i>Apéndice A: Anotaciones de campo de GPS</i>	<i>9-2</i>
<i>Apéndice B: Descripción visual de estructuras hidráulicas.....</i>	<i>9-22</i>
<i>Apéndice C: Tipo de relieve en la cuenca Aguas Claras</i>	<i>9-25</i>
<i>Apéndice D: Factor de Forma por subcuenca</i>	<i>9-27</i>
<i>Apéndice E: Modelaciones hidráulicas unidimensionales adicionales.....</i>	<i>9-29</i>
<i>Apéndice F: Verificación de resultados de Flo-2D.....</i>	<i>9-33</i>
<i>Apéndice G: Secciones de cotas de inundación.....</i>	<i>9-38</i>
<i>Apéndice H: Matrices de confusión.....</i>	<i>9-49</i>
<i>Apéndice I: Mapas de Profundidad Máxima de Inundación</i>	<i>9-54</i>
<i>Apéndice J: Mapas de Velocidad Máxima de Inundación.....</i>	<i>9-63</i>
<i>Apéndice K: Mapas de Amenaza de Inundación</i>	<i>9-72</i>

Apéndice A: Anotaciones de campo de GPS



Información de gira realizada a Cuenca Zapote

20 – 22 de febrero de 2019

20/02-/019

Punto de muestreo 1 en Río Zapote

Distancia entre punto de muestreo y distanciómetro: 6,678 m

Distancia entre punto y orilla del río: 7,1 m

Perfiles tomados en Río Zapote

(9 pts) 2019-02-20 / 16-13-37

(10 pts) 2019-02-20 / 16-27-30

(11 pts) 2019-02-20 / 16-34-50

(11pts) 2019-02-20 / 17-01-17

(Último perfil del día) 2019-02-20 / 17-10

21/2/2019

Puente Chimurria Aguas Abajo (10°52'26.7" N, 84°58'40"O)

Banco Izquierdo Aguas Abajo 2,30 m.

(28 pts) 2019-2-21/ 7-25-12 Perfil puente Aguas Abajo + Perfil de calle

(21 pts) 2019-2-21 / 7-49-15 Perfil 2 puente *

(7 pts) 2019-2-21 / 7-15-40 Perfil 1 Aguas Arriba

(3 pts) 2019-2-21 / 7-13-58 Ancho del río

(2 pts) 2019-2-21 / 7-12-49 Ancho del río

Puente Chimurria Aguas Arriba [10°52'25.8"N; 84°58'39.6"O]

Profundidad de banco Izquierdo Aguas Arriba: 2,9 m; 2,10 m.

2019-2-21 / 8-17-15 Perfil Aguas Arriba

2019-2-21 / 8-17-15 [Pto 12] Distancia de disto al puente.

Altura de banco derecho: 3,771 m

Ancho de río: 16 m

21/2/2019

(GPS 3) Señor comenta que agua no llegó. Se llena en la zona baja.

(GPS 4) Si llegó, 1,10 m según relato del testigo.

(GPS 5) Subió alrededor de 30 cm.

(GPS 6) 4 personas, 40 años

(GPS 9) 75cm

(GPS10) Agua normal 59cm, Huracán Juana 1.14m y evento 1.50m*

(GPS11) 50cm

(GPS12) no llego el agua

(GPS13) no llego el agua

(GPS14) no llego el agua

(GPS15) 43cm y 103 cm zona del establo

(GPS16) 110cm

(GPS17) 83cm

(GPS18) llego con barro

(GPS19) 135cm agua y lodo*

(GPS20) marca de lodo 72cm

(GPS21) Extracción de muestras de lodo 23cm

(GPS22) Ubicación de estación

(GPS23) 2m

Toma 1 Bijagua

(GPS 24) Extracción de muestra suelo cercana a represa.

(GPS 25) Muestra de lecho del río.

(GPS 26) Toma 1 Bijagua

Toma Bijagua: $8 \text{ m}^3/\text{s} + Q$. ecológico

2019-2-21 / 11-48-50 y 11-54-49 Perfil Presa Derivadora

Toma 2 Bijagua

(GPS 27) (13 pts) 2019-2-21 / 13-12-52 Perfil Aguas Arriba

(GPS 28) (10 pts) 2019-2-21 / 13-06-59 Perfil Aguas Abajo

Toma 3 Bijagua

(GPS 29) Altura que llegó el agua en la parte superior de la estructura del embalse: 1,30m

(11 pts) 2019-02-21 / 15-13-13 Perfil Aguas Abajo de Represa (antes del puente)

2019-02-21 / 15-27-56 Perfil Aguas Abajo de Represa (después del puente)

****Se realiza en el embalse aforos de cinta, con los cuales se mide el nivel del agua.**

(GPS 30) 2019-02-21 / 15-53-29 Perfiles de Zapote

Medidas de piedras: A. 2,55 m y B. 4 a 4.5 m

(GPS 31) No se llenó

(GPS 32) Sí, 86 cm. De aquí en adelante se inundó. Durante evento Juana el nivel fue el mismo.

(GPS 33) No, pero atrás de la casa si se inundó.

(GPS 34) Punto 0

(GPS 35) Sí, 60 cm. Fue arena más que todo

(GPS 36) Si, 90 cm

(GPS 37) Sí, 25 cm

(GPS 38) Sí, 70 cm

(GPS 39) Sí, 1,43 m con mucho lodo.

(GPS 40) NO

(GPS 41) Quebrada límite de llanura de inundación

(GPS 42) Sí, 70 cm

(GPS 43) Sí, 50 cm (hora de afectación 7 a 10 pm)

(GPS 44) Sí, 1,15 m. 70 cm de barro.

(GPS 45) Sí, 40 cm con mucho barro (1/4 y media: **25,5 cm**)

(GPS 46) Sí, 50 cm. Flujo de agua superficial con lodo entre 7 – 8 pm. Mucha velocidad

(GPS 47) 15 cm

(GPS 48) NO, pero se inundó unos 10 cm.

(GPS 49) Puente relevante en huracán Otto

(GPS 50) NO

22-2-2019

(GPS 51) Sí, 150 cm. Gasolinera sin factura digital.

(GPS 52) Sí, 50 cm de agua y 25 cm de barro. **Escuela El Rosario**. Evento Juana no inundó.

En el Oasis, a 1 km de la Escuela fue donde comenzó la inundación.

(GPS 53) Medición de altura de calle, 1,65 m

(GPS 54) Sí, 1,50 m de lodo

(GPS 55) Sí, 1,80 m de lodo

(GPS 56) Sí, hasta el techo de la casa verde. Aproximadamente 2,50 m el nivel al que llegó la inundación.

(GPS 57) 30 cm. No llegó a la casa. Con Juana llegó hasta el borde del río.

(GPS 58) Sí, 1,70 m llegó hasta la raíz del árbol.

(GPS 59) Oasis, Pto 0. Inicio de la inundación.

(GPS 60) Sí, 1,60 m. Segunda de calle hacia adentro.

(GPS 61) Divisoria de aguas

(GPS 62) Sí, 74 cm. **TALLER** Afectación se dio por ahí de las 9 pm, 2 horas después del huracán. Hubo un efecto con 2 puentes colgantes (en el río había uno ubicado abajo y otro arriba del local), los cuales sirvieron como presa del flujo de la inundación.

(GPS 63) Medición de altura de loco en casa abandonada 1,70 m.

(GPS 64) Sí, 1,55 m con lodo. Dentro del taller el nivel llegó a 71 cm y detrás hay una marca de 1,08 m. Con Juana no se inundó el local.

(GPS 65) Sí, 1 m

(GPS 66) Sí, 1,94 m. Agua con todo

(GPS 67) Altura al ras del suelo, aproximadamente 10 cm debido al nivel de la casa. Con Juana no se inundó.

(GPS 68) No. Con Juana tampoco se inundó, pero el nivel de agua en el centro de Upala fue de 1 m según entrevistado.

(GPS 69) Sí, 1,40 m. **Hubo de todo. Afectación se dio luego de las 10 pm.**

(GPS 70) No se inundó el taller de buses.

(GPS 71) 30 cm de altura aproximadamente

(GPS 72) No se inundó

(GPS 73) No

(GPS 74) No, Pto 0. Taller TRAA

(GPS 75) Sí, 90 cm

(GPS 76) No, agua pasó detrás de la soda. En el Hospital, el INA y el Colegio Técnico no se inundó.

(GPS 77) Sí, 65 cm. Pasó al otro lado de la calle.

(GPS 78) Sí, 1,30 m de los cuales 20 cm fueron lodo. Juana no afectó dicha ubicación.

(GPS 79) Sí, 50 cm que fue puro lodo.

(GPS 80) Sí, 1,35 m y 44 cm de lodo. Se le debe sumar 26 cm de altura de grada. **Pulpería [1,61 m y 0,70 m]**

(GPS 81) Sí, 1,95 m

(GPS 82) Sí, 2,30 m total, 55 cm de lodo.

(GPS 83) Sí, 1,57 m + 0.23 m (grada). Lodo 53 cm. **[1,80 m y 0.76 m]**

(GPS 84) Sí, 1 m. Lodo, aproximadamente 60 cm. Con Juana sí se inundó pero no llegó tan alto.

(GPS 85) Sí, 1,70 m y 90 cm de lodo.

(GPS 86) Sí, 1,04 m. **Pulpería**

(GPS 87) Sí, 1,54 m. Lodo 50 cm.

(GPS 88) Sí, 1,10 m y 50 cm de lodo. Se debe sumar 13 cm por grada. **[1,23 m y 0,63 m]**

(GPS 89) Sí, 1 m (lodo + agua). Flujo con mucha velocidad y su dirección venía del río.

(GPS 90) Sí, 1 m (agua) y 45 cm de lodo.

(GPS 91) Sí, 1 m (lodo completamente)

(GPS 92) No llegó el agua.

(GPS 93) Dique, no paso agua más allá. **PTO 0**

(GPS 94) Sí, 70 cm (mezcla de todo material).

(GPS 95) Sí, 83 cm con lodo. Iba en dirección hacia el Carmen. A Nazareth sí llegó. En las partes altas del Carmen no llegó según entrevistada; sin embargo, hubo zonas que sí se vieron afectadas por la inundación. A la casa enfrente del plantel del ICE sí llegó flujo.

(GPS 96) Sí, 70 cm total y 35 cm de lodo.

(GPS 97) Sí, 0,60 m total y 0,34 m de lodo. Se le debe suma 0,15 m de grada **[0,75 m y 0,49 m]**.

(GPS 98) Sí, 0,60 m y 0,10 de lodo.

(GPS 99) Sí, 0,60 m. **Plantel del ICE**

(GPS 100) Sí, 103 cm en total con 30 cm de lodo. En la casa salieron a las 12 am. El flujo de agua llevaba mucha velocidad.

(GPS 101) PTO de posible límite.

(GPS 102) No hubo afectación. Escuela del Carmen (Se utilizó como centro de evacuación). El entrevistador indicó que más arriba del Carmen, el agua pudo haber llegado a unos 75 cm en total y 30 cm de lodo.

(GPS 103) No, unos 100 m antes llegó el agua [PTO 0]. Se indicó que en el barrio “El Real” fue parecido pero en dicho momento no había casas construidas.

(GPS 104) Sí, 30 cm de barro y agua.

(GPS 105) Sí, 56 cm de barro.

(GPS 106) Sí, 80 cm y 50 cm de barro.

(GPS 107) Sí, 70 cm barro.

(GPS 108) Sí, 50 cm de barro (casa esquinera)

(GPS 109) No

(GPS 110) Sí, 70 cm.

(GPS 111) Sí, 49 cm. **Hotel Wilson**

(GPS 112) Toma puente Upala

(GPS 113) Sí, 40 cm total y 25 cm de lodo.

(GPS 114) Sí, 30 cm, barro.

(GPS 115) Sí, 50 cm, barro.

(GPS 116) Sí, 90 cm, barro. Flujo iba con mucha velocidad.

(GPS 117) Sí, 1,32 m. Agua con barro.

(GPS 118) Sí, 1,25 m. Barro

(GPS 119) Sí, 97 cm de barro y 1,65 m en total.

(GPS 120) Sí, entre 1 a 1,50 m en total con 50 cm de barro.

(GPS 121) Sí, 1.05 m en total y 0,25 m de barro. **Restaurante Esquinero en Upala cerca del río Zapote.**

(GPS 122) Sí, 1,51 m

*Altura de la barrera de Upala es de 90 cm.

(GPS 123) Sí, 1,55 m.	} Marcas de agua
(GPS 124) Sí, 1,45 m.	
(GPS 125) Sí, 1,56 m.	
(GPS 126) Sí, 1,34 m.	

(GPS 127) Sí, 1,02 m de barro. **Lavacar**

(GPS 128) Sí, 1.30 m

(GPS 129) PTO 0

(GPS 130) No

(GPS 131) No

(GPS 132) 10 cm, flujo superficial.

(GPS 133) Sí, 2 m.

(GPS 134) Sí, 2 m. Lodo, piedras.

(GPS 135) Sí, 1 m.

(GPS 136) Sí, 0,50 m. Punto cercano al oasis. Cercano había un puente de 2m de ancho que se lo llevó el río.

(GPS 137) Toma de muestra de banco derecho de inicio de llanura de inundación.

(GPS 138) Casa de atrás, 6 m. Entre las 9 pm y 1 am fue el tiempo en que se vieron afectados por el evento.

(GPS 139) Medida de perfil del puente de Canalete.



Puente Canalete

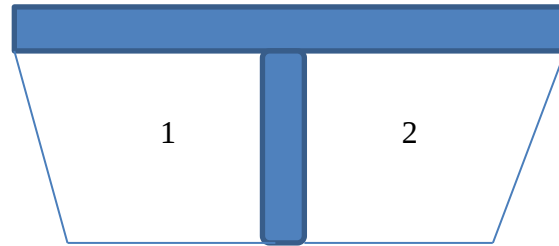
Altura desde lecho del río: 10 m

Largo: 53,459 m.

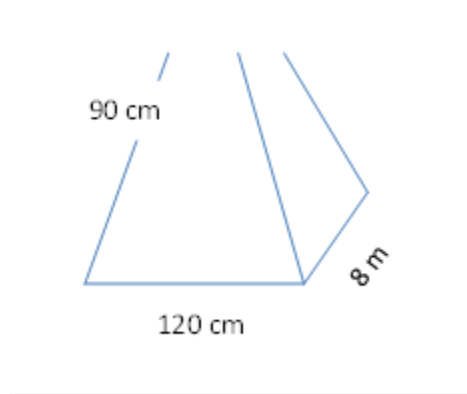
Ancho del puente (carriles): 2.04 m

Perfil tramo 1: 2019-02-22 / 15-10-05

Perfil tramo 2: 2019-02-22 / 15-16-05



Base del puente



(GPS 140) Toma de muestra banco derecho aguas arriba de puente Canalete

(GPS 141) Toma de muestra orilla aguas arriba puente Canalete.

Puente Zapote

Alto desde lecho del río: 11.922 m

Largo: 62.387 m

Ancho contemplando sección de concreto: 8 m

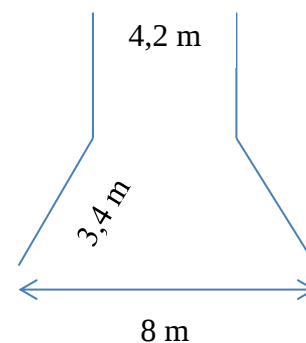
Ancho de carriles: 4.20 m

(25 pts) 2019-2-22 / 17-01-17 Perfil de puente

(GPS 142) Perfil puente zapote

(GPS 143) Pto derecho del puente visto desde aguas arriba

Vista Aérea



(GPS 144) Pto izquierdo del puente visto desde aguas arriba

5 - 6 de marzo de 2019

5 de marzo

Zona visitada: Bijagua

En Catarata Bijagua Lodge, a las 6 pm comenzó a llover y a las 7:30 pm fue la avalancha.

(GPS 145) Punto donde llegó el agua en pichardo (tilapias zona con desastre)

(GPS 146) 1,5 m de nivel de agua

(GPS 147) Brazo del río. El río se ha desviado.

(GPS 148) Punto cero

(GPS 149) 30 cm nivel de agua

(GPS 150) 50 cm nivel de agua

- El 6 de agosto hubo un temblor.
- Hubo rellenos. El río hizo caminos.
- En la zona por 1 año se tuvo lodos (olor fuerte).

(GPS 151) Dique suelo al lado de Bijagua Lodge.

(GPS 152) Tanque de agua. No llegó

(GPS 153) No llegó

(GPS 154) 80 cm nivel de agua

(GPS 155) Toma de perfil puente aguas debajo de Q. Pichardo cerca de entrada a carretera principal. Perfil 2019-03-05/ 15-01-30

(GPS 156) Nivel de agua por ventana (1,20 m). Casa cerca de carretera principal.

(GPS 157) Al margen derecho del río había 7 casas que fueron arrasadas durante el evento.

- Sección aguas arriba: Ancho: 18.857 m y Altura: 4 m.
- Sección aguas abajo: Ancho: 20.462 m
- Sección longitudinal: 2019-3-05/ 15-30-22

(GPS 158) Punto cero



(GPS 159) Ubicación cercana a las 7 casas que fueron arrasadas.

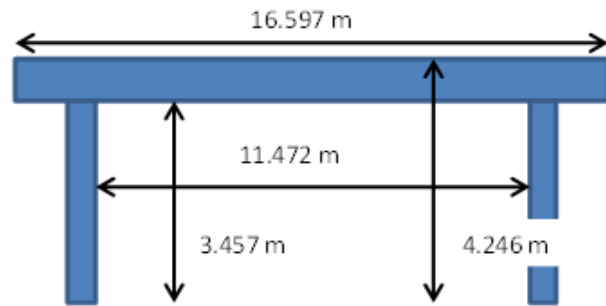
(GPS 160) Puente altura al perfil

Largo total: 16.597 m

Largo interno del puente: 11.472 m

Altura de lecho de río a viga de metal: 3.457 m

Altura de lecho de río a nivel de carretera en puente: 4.246 m

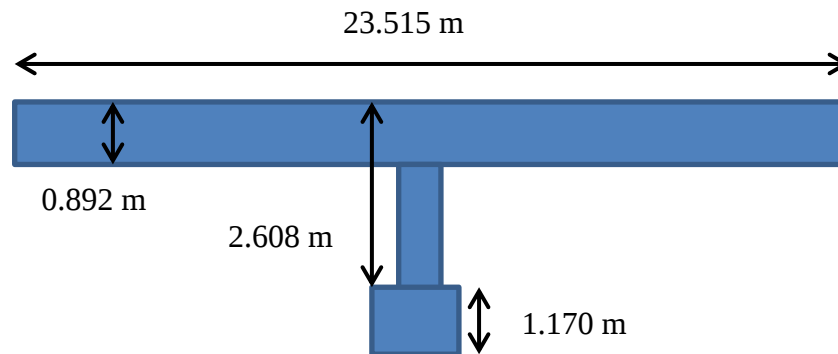


(GPS 161) No contar

(GPS 162) No se metió

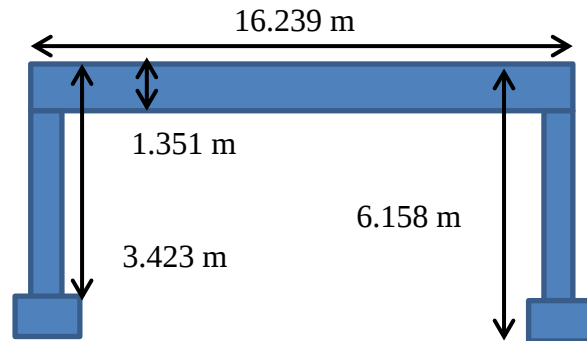
(GPS 163) Punto cero

(GPS 164) Perfil de puente Bijagua 1: 2019-03-05/ 16-23-57

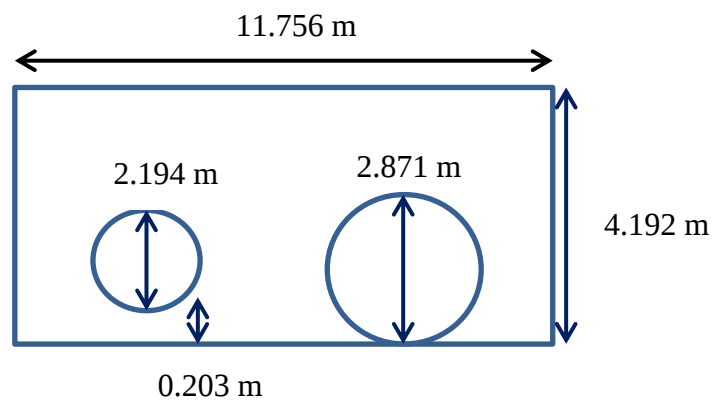




(GPS 165) Perfil puente bijagua 2



(GPS 166) Puente cruce Río Frío



- Perfil 1 Aguas Arriba: 2019-03-05 / 17-23-01
- Perfil Longitudinal: 2019-03-05 / 17-28-27
- Perfil 2 Aguas Arriba: 2019-03-05 / 17-32-04

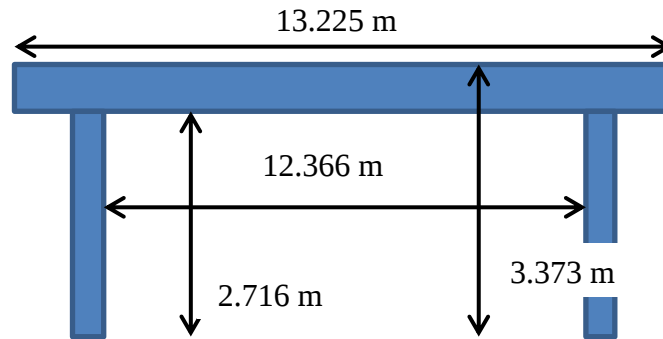
(GPS 168) Río Celeste

6 de marzo

Zona visitada: Aguas Claras

(GPS 169) Quebrada, solo meter caudal (son 2 quebradas en la zona).

(GPS 170) Puente río Raudales. Ancho de carril de puente: 3.60 m.



- Perfil Aguas Abajo 2019-03-06 / 08-42-15 (8)
- Perfil Aguas Arriba 2019-03-09 / 8-37-38 (10) En el puno del árbol se debe bajar 1.22 m para que quede a nivel de suelo.

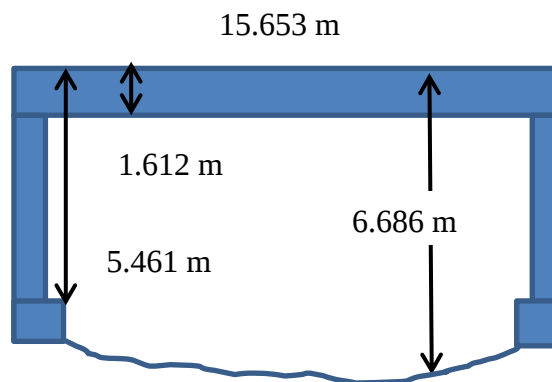
(GPS 171) No llegó el agua.

(GPS 172-173) 25 cm de nivel de agua. El huracán Juana si afectó dicha zona. Cerca de la casa se encuentra un árbol que fue botado debido al flujo de agua durante el evento.

(GPS 174) Punto río

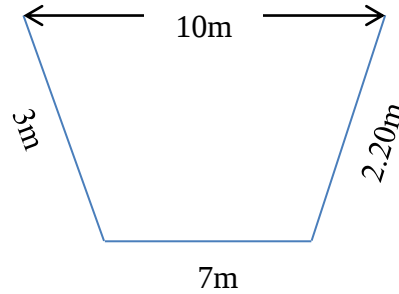
(GPS 175) Punto cero

(GPS 176) Punto cero: inicio de modelación. En esta sección se encuentra un puente con el siguiente perfil.



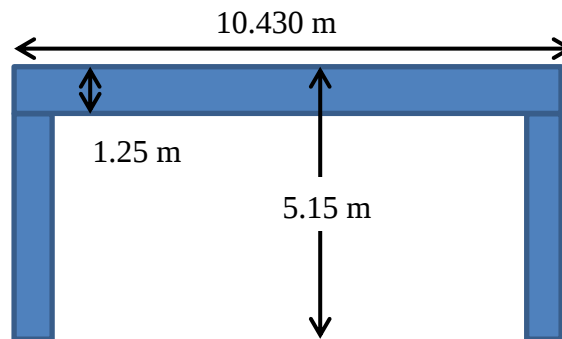
(GPS 177) Río Sin Nombre. Se debe incluir perfil en la modelación.

(GPS 178) Medición de Sección



(GPS 179) Quebrada minúscula 1.5 m de ancho.

(GPS 180) Perfil de puente



- Aguas Arriba: 2019-05-06 / 9-59-57 (9)
- Aguas Abajo: 2019-05-06 / 9-51-52 (11)

(GPS 181) No se inundó

(GPS 182) Llegó pero a unos 25 cm

(GPS 183) No llegó

(GPS 184) Toma de perfil de puente por Iglesia San Isidro (esta última no se vio afectada). El río entra alrededor de una dirección de 40 grados en relación a la vista frontal del puente aguas arriba.



- Aguas Abajo: 2019-03-16 / 10-20-14
- Aguas Arriba: 2019-03-16 / 10-27-04

(GPS 185) Box Culvert.

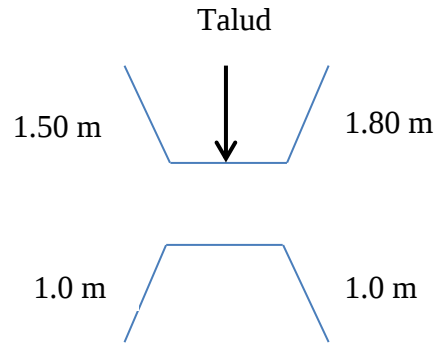
Aguas Arriba.

Altura: 2.40 m

Viga: 40 cm

Alerón: 2.40 m

Talud 1:1



Aguas Abajo

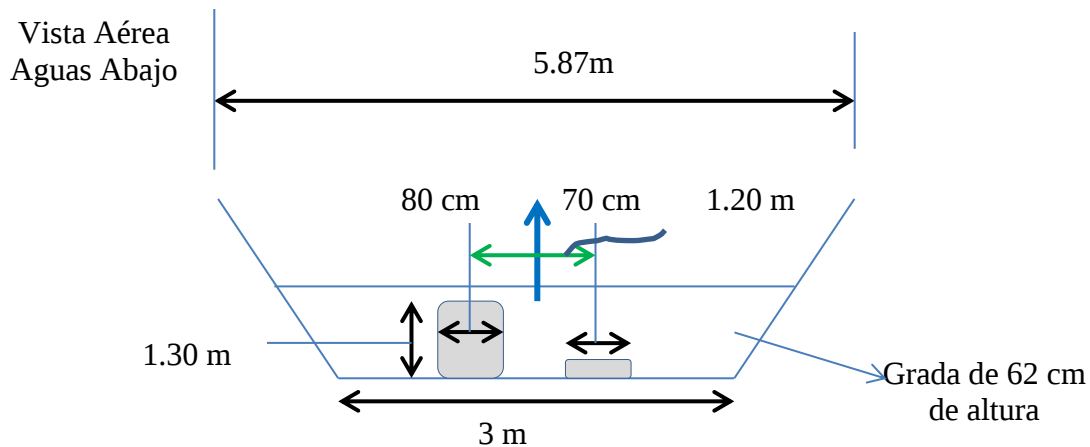
Altura a grada que conecta con lecho del río: 3.60 m

(GPS 186) No se inundó

(GPS 187 y 188) Toma de mediciones de alcantarillas.

Aguas Abajo: Altura de grada hasta nivel calle: 1.72 m

Aguas Arriba: Altura desde nivel de calle a lecho: 1.84 m



(GPS 189) Q. Huacas, toma de perfiles

- Aguas Arriba: 2019-03-16 / 11-28-37 (16)
- Aguas Abajo: 2019-03-16 / 11-35-20 (12)

Dimensiones del puente:

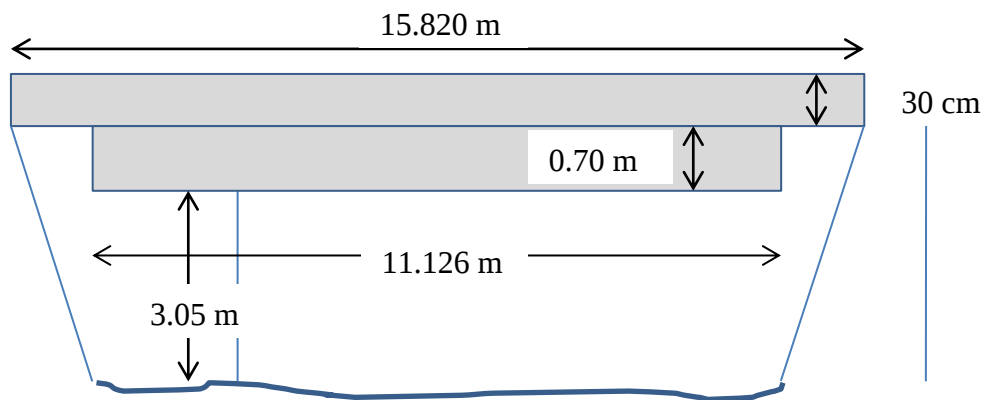


- Apertura: 8.50 m
- Altura de viga de metal: 55 cm
- Altura de lecho del río a base del puente: 1.30 m
- Altura de base del puente a viga de metal: 2.47 m
- Ancho del puente (carril + paso peatonal): 5.40 m (3.65 + 1.75 respectivamente)

(GPS 190) Dimensiones del puente cercana a confluencia rio frijoles y Q.Huacas.

- Ancho de carril (placa de metal que sirve de paso): 2.40 m
- Altura a lecho del río: 2.60 m
- Altura de viga de metal: 33 cm
- Apertura: 9.5 m

(GPS 191) Puente Quebrada Brava



- Perfil Aguas Arriba: 12-11-30 (9)
- Perfil Aguas Abajo: 12-18-02 (12)

(GPS 192) Sí, 0.5 m

(GPS 193) Supermercado, 49 cm + grada de 6 cm

(GPS 194) Sí, 20 cm

(GPS 195) Sí, 30 cm “Por Soda Flory cerca de Hinos Bar, no se inundó.

(GPS 196) Sí, 15 cm pero con mucha fuerza

(GPS 197) Nivel de piso, no entro a la casa

(GPS 198) No llegó

(GPS 199) 75 cm

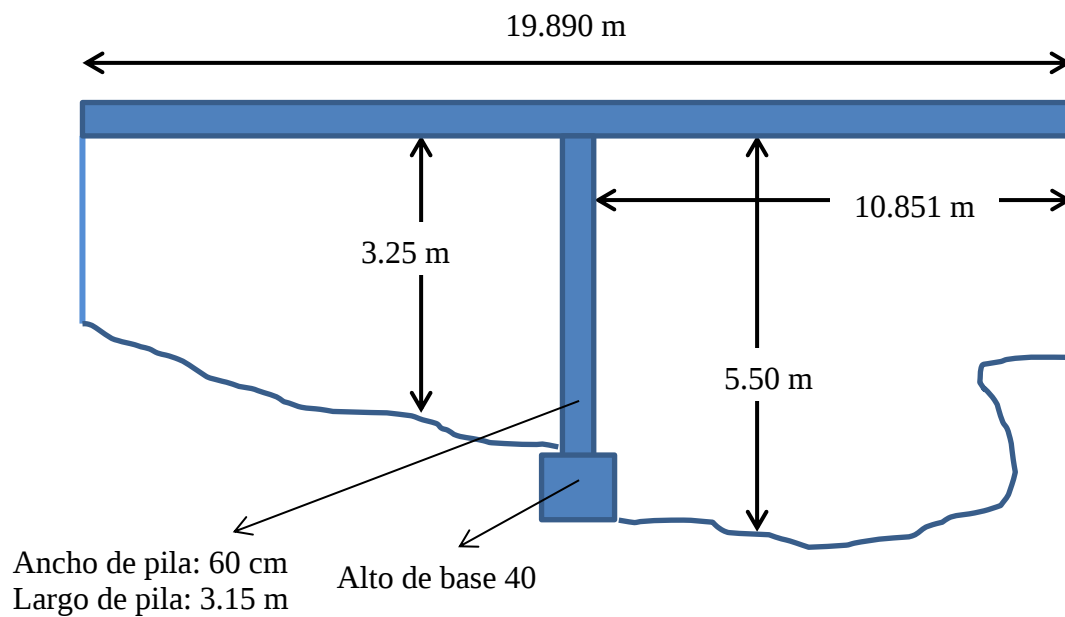
(GPS 200) Sí, 50 cm

(GPS 201) Río

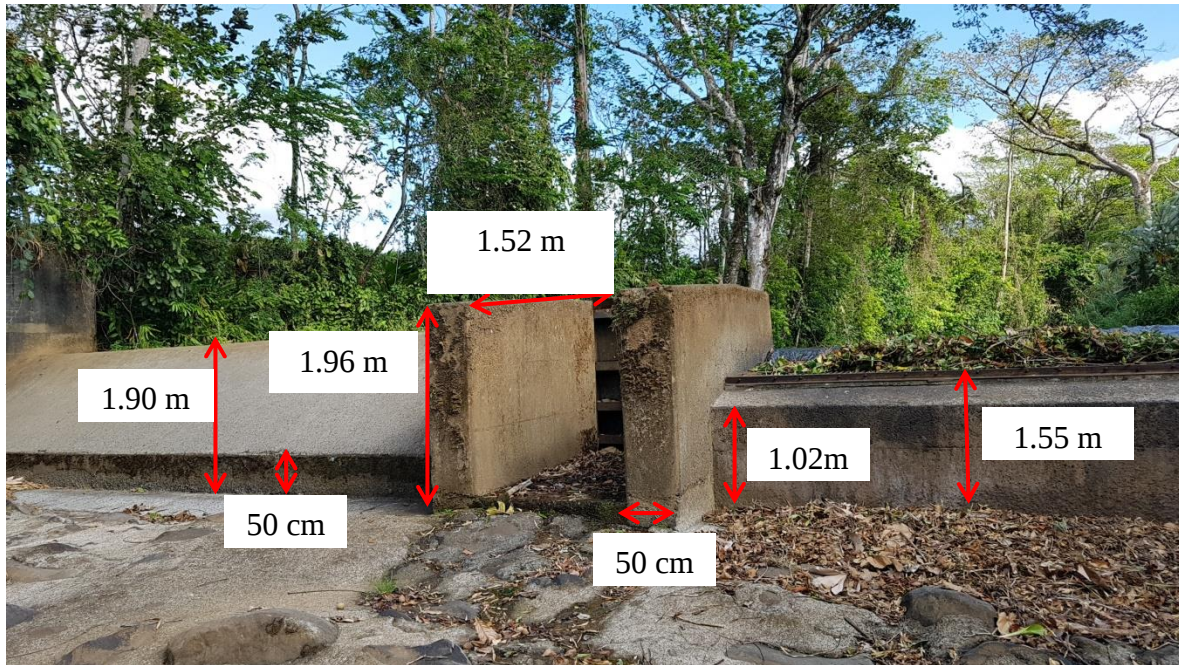
(GPS 202) No

(GPS 203) Puente con bases. Ancho del puente (carril): 3.525 m

- Perfil Aguas Arriba: 2019-03-06 / 14-00-14 (11)
- Perfil Aguas Abajo: 2019-03-06 / 13-56-15 (10)



(GPS 204 y 205) Caída de puente y punto de control (Infraestructura hidráulica) respectivamente.



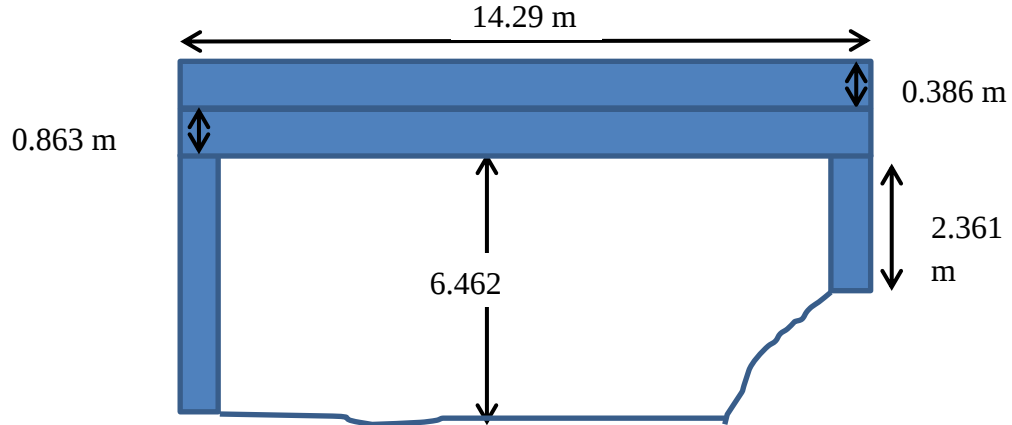
Espacio entre concreto y nivel del agua debajo de la estructura: 2.261 m

- Perfil 14-34-13 (7) estructura
- Perfil longitudinal estructura – punto de caída de parte concreto 14-37-01 (2)
- Perfil aguas abajo 14-40-10 (20)
- Perfil longitudinal estructura – aguas abajo 14-47-09 (10)

(GPS 206) Puente, perfil lo tiene Alejandra en foto.

(GPS 207) Puente y perfil de río. 15-22-12 (11)

Ancho de carril: 4.82 m



Casa esquinera cercana al puente no se inundó.

(GPS 208) No llegó el agua.

(GPS 209) Salida de río y sigue por la calle.

(GPS 210) Ramal que conecta con Raudales.

(GPS 211) Planicie sin desbordar.

Apéndice B: Descripción visual de estructuras hidráulicas



Puente en Quebrada Brava



Puente en Quebrada Huacas

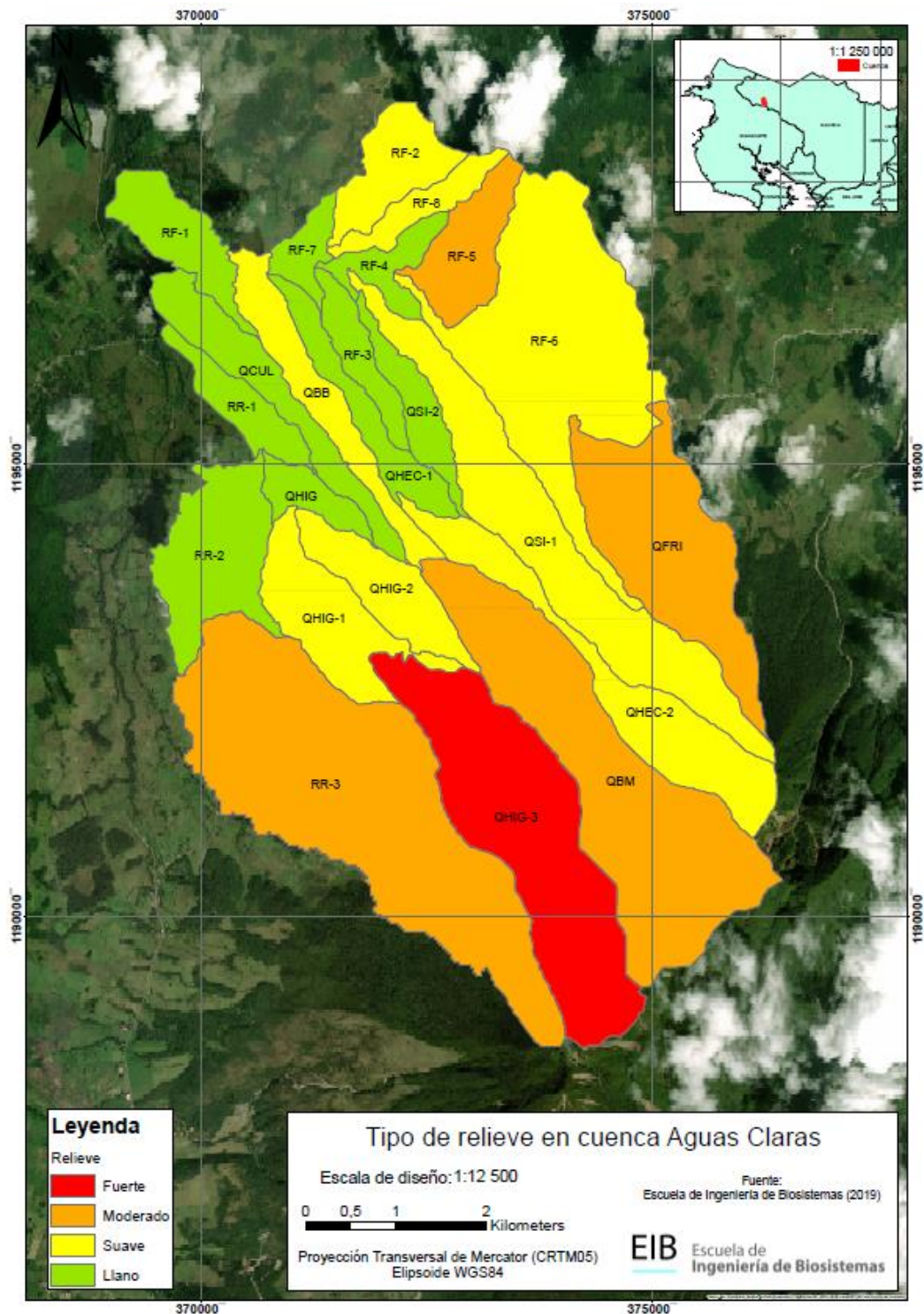


Alcantarilla localizada en el centro del poblado de San Isidro

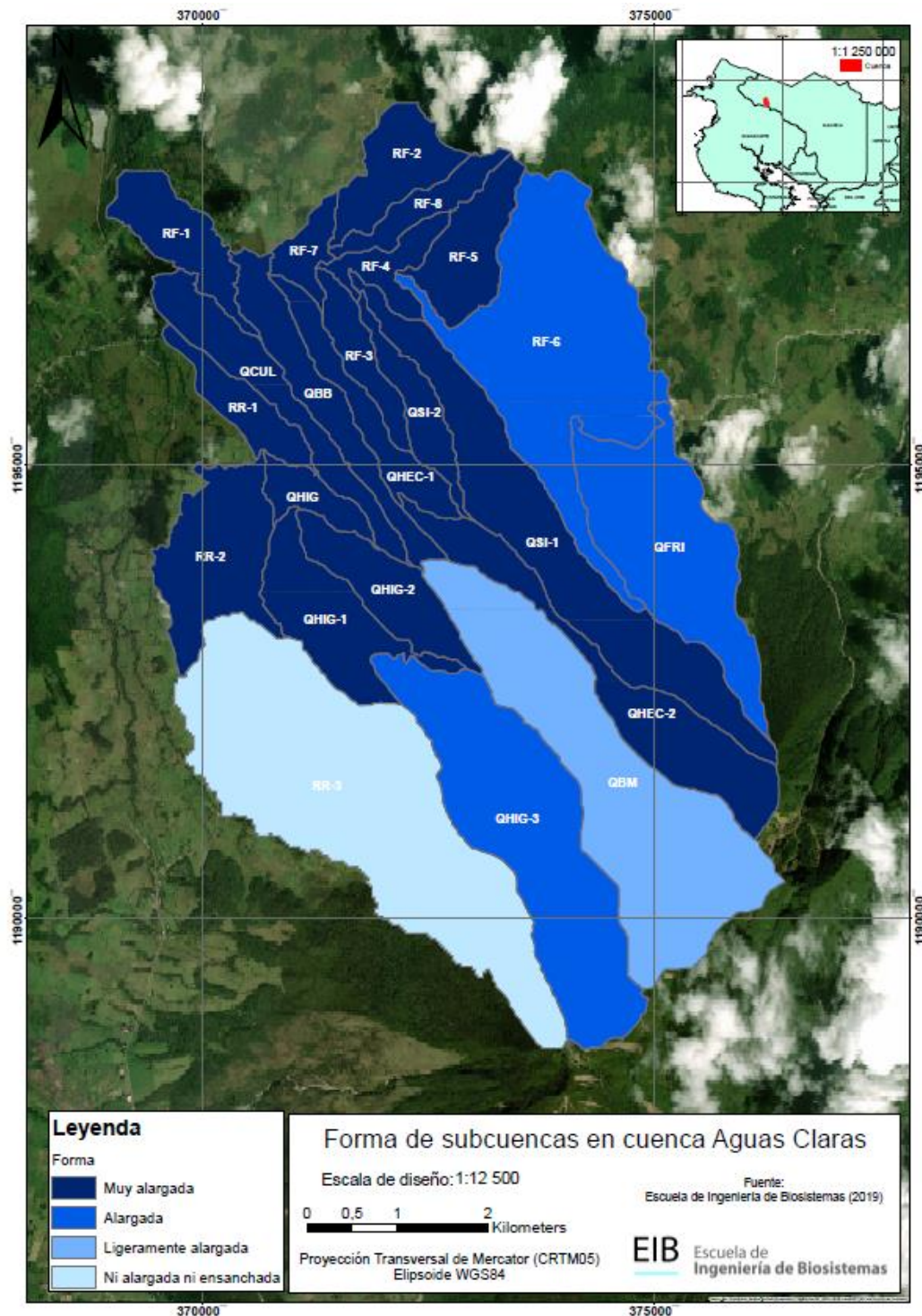


Puente ubicado el Norte del centro del poblado de San Isidro (arriba) y dique en última sección del Río Frijoles (abajo)

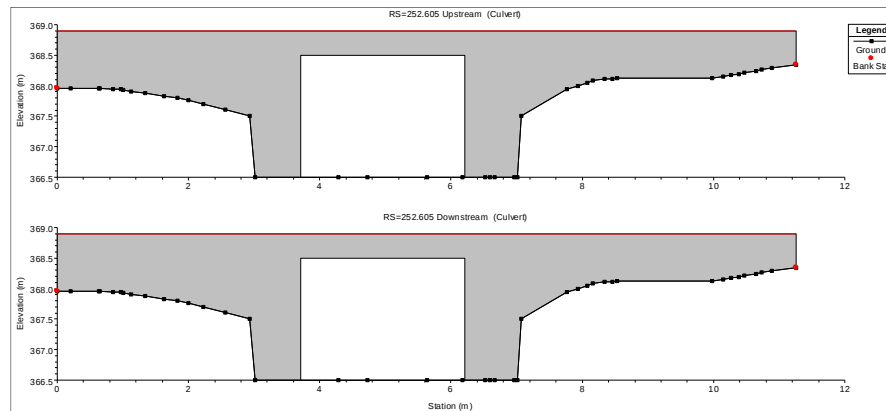
Apéndice C: Tipo de relieve en la cuenca Aguas Claras



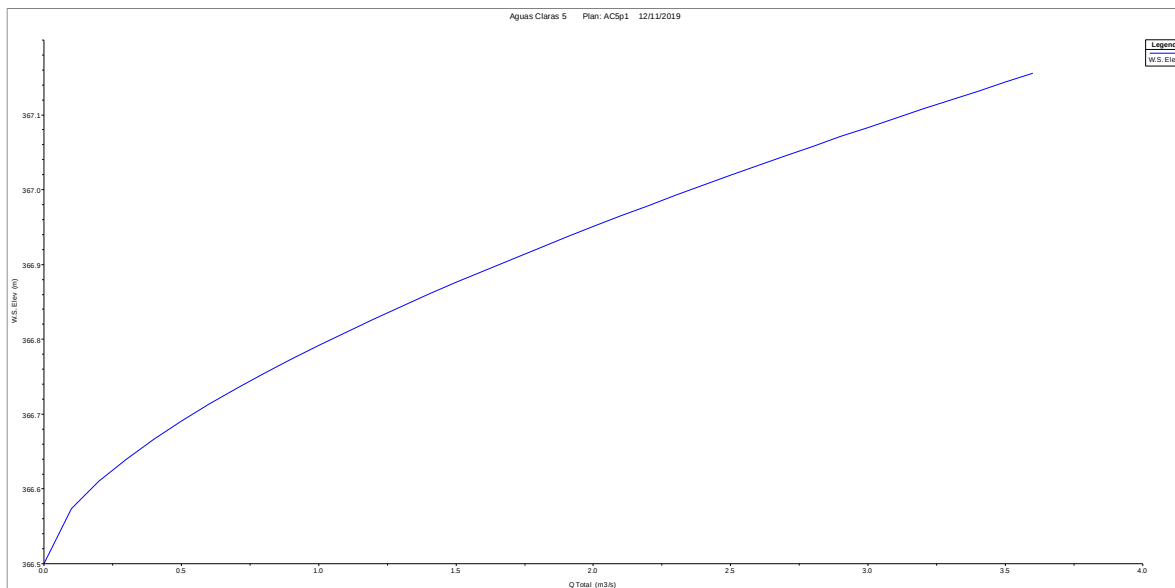
Apéndice D: Factor de Forma por subcuenca



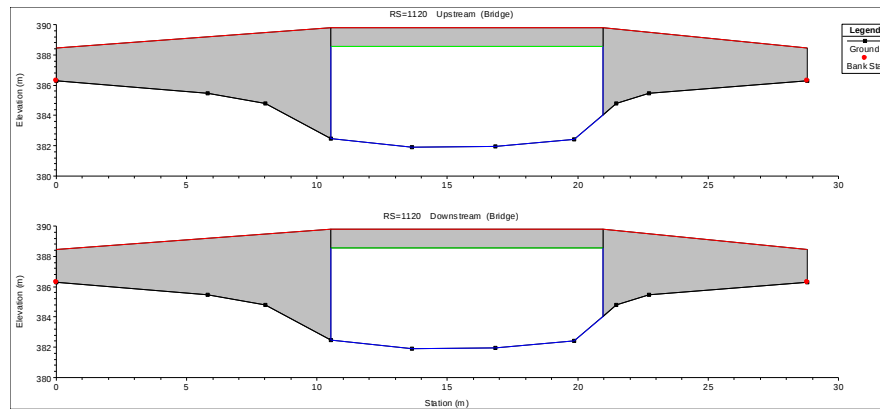
Apéndice E: Modelaciones hidráulicas unidimensionales adicionales



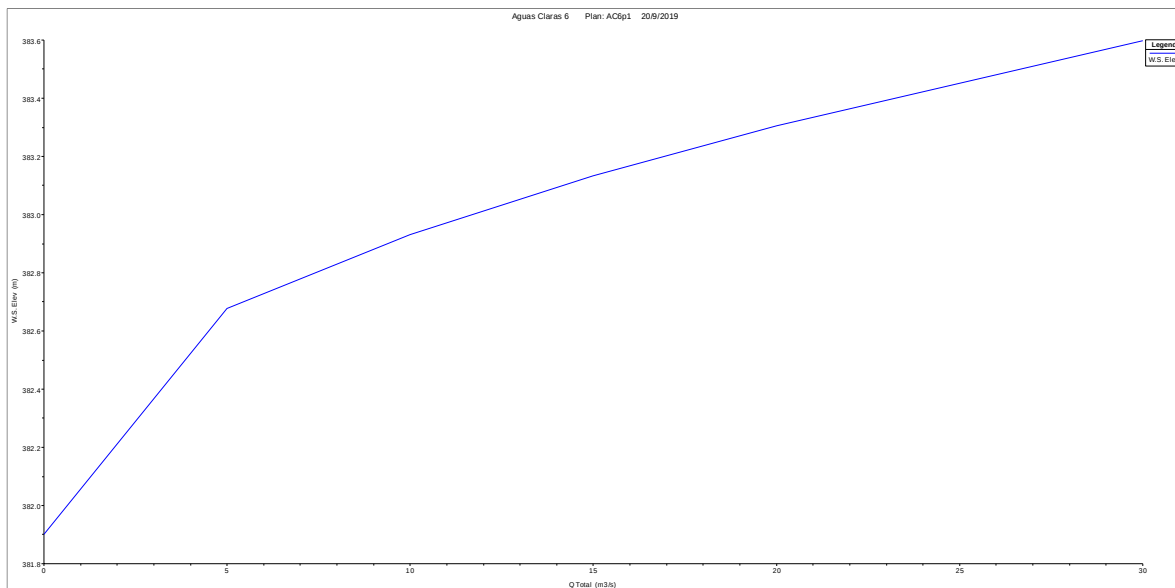
Perfiles aguas arriba y aguas debajo del box culvert ubicado cerca de la plaza deportiva en el centro del pueblo de San Isidro



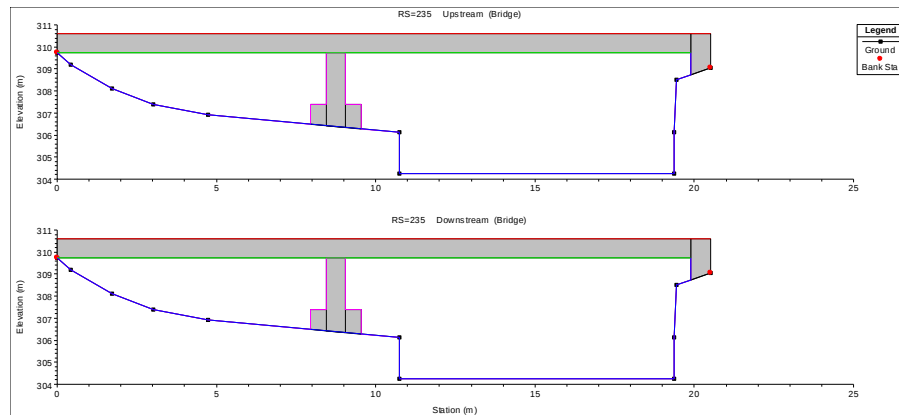
Curva de descarga para el box culvert ubicado cerca de la plaza deportiva en el centro del pueblo de San Isidro



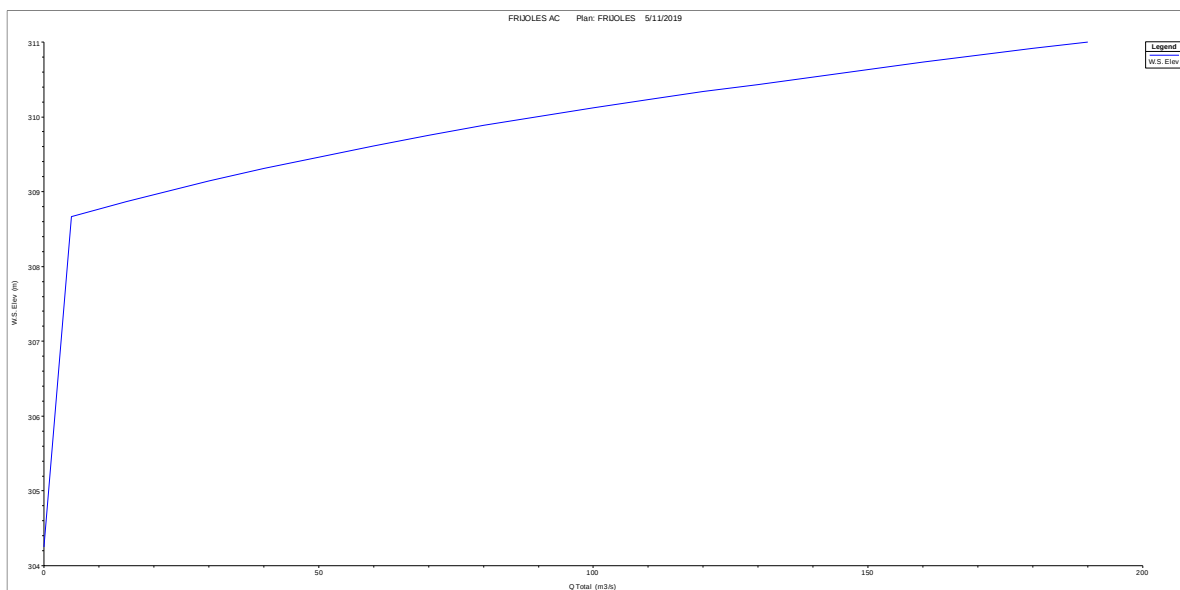
Perfiles aguas arriba y aguas debajo de puente cercano a la Iglesia católica del pueblo de San Isidro



Curva de descarga para el puente cercano a la Iglesia católica del pueblo de San Isidro

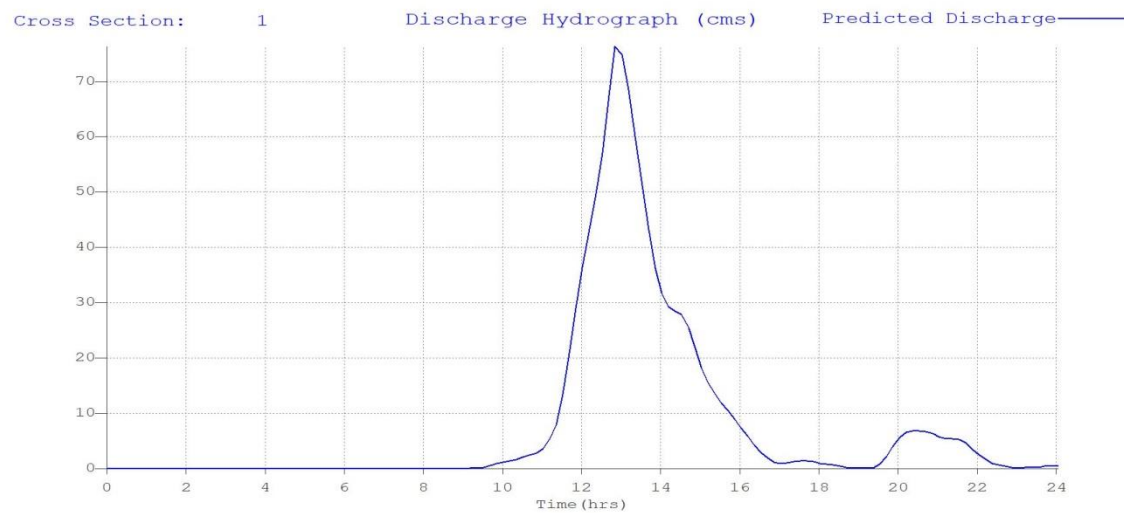


Perfil aguas arriba y aguas debajo de puente ubicado antes de la unión de los ríos Frijoles y Negro

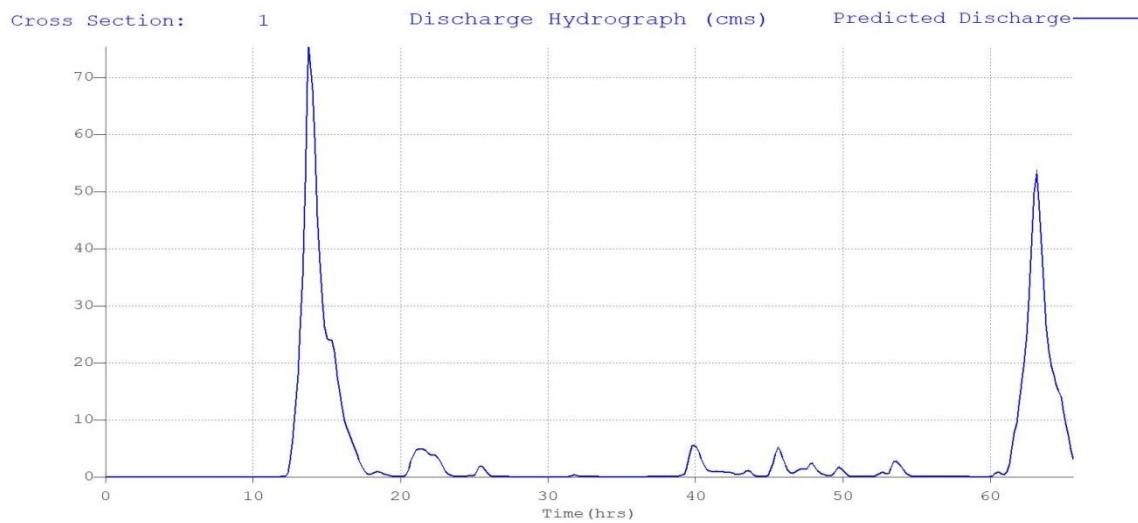


Curva de descarga de puente ubicado antes de la unión de los ríos Frijoles y Negro

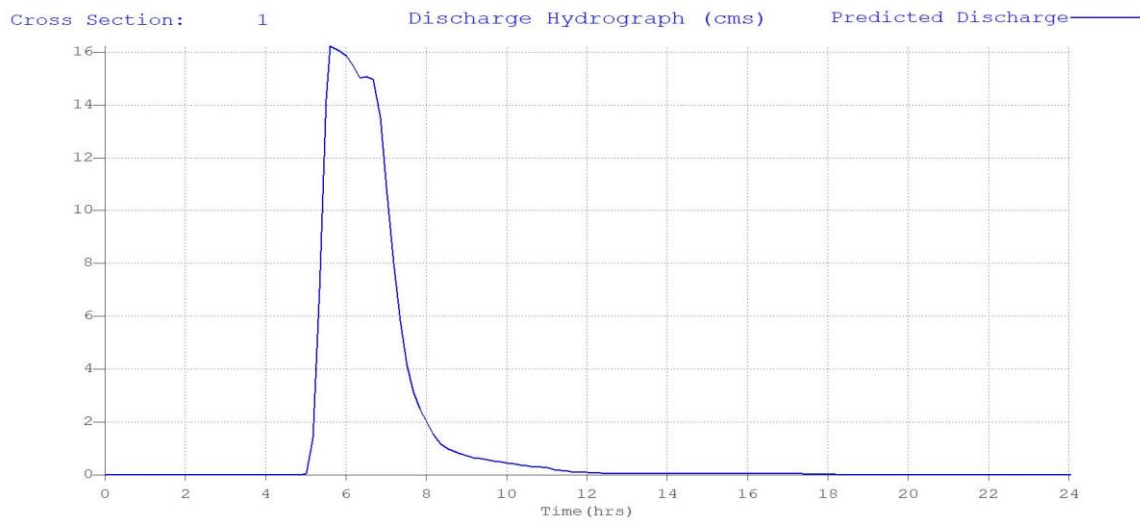
Apéndice F: Verificación de resultados de Flo-2D



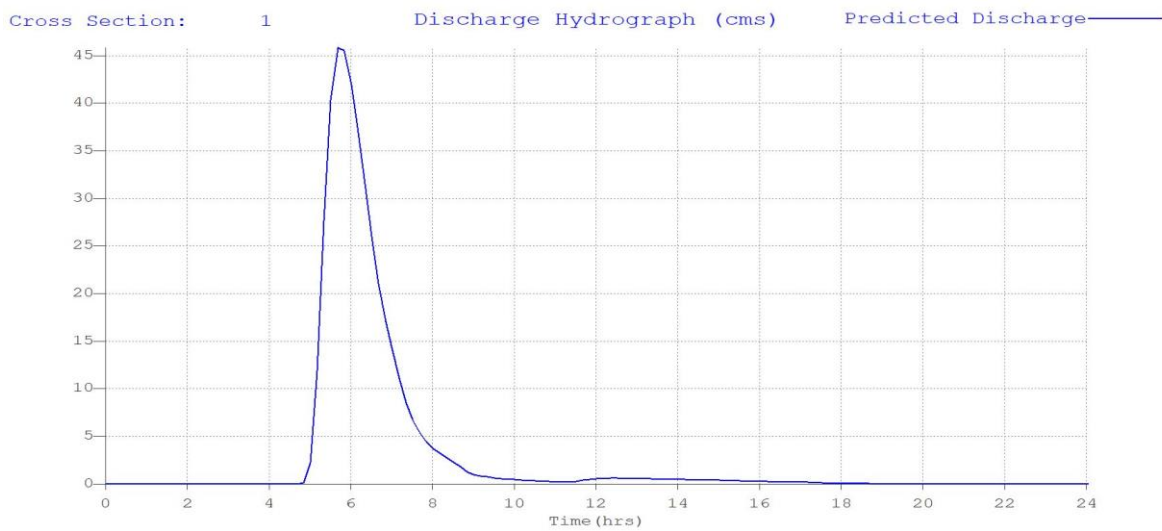
Elemento 205223 de comprobación para escenario CN III



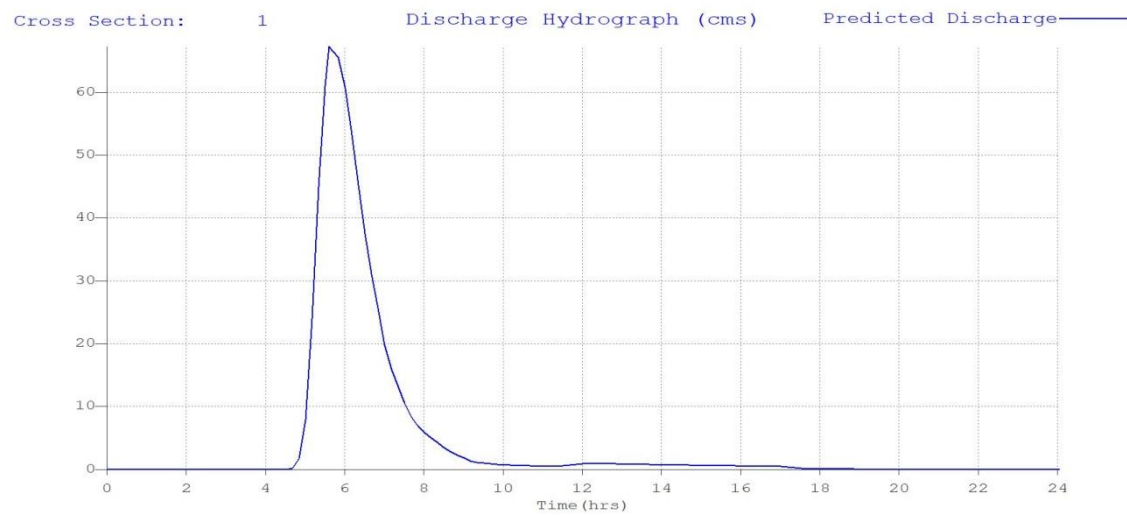
Elemento 205223 de comprobación para escenario CN II con CV de 0.45



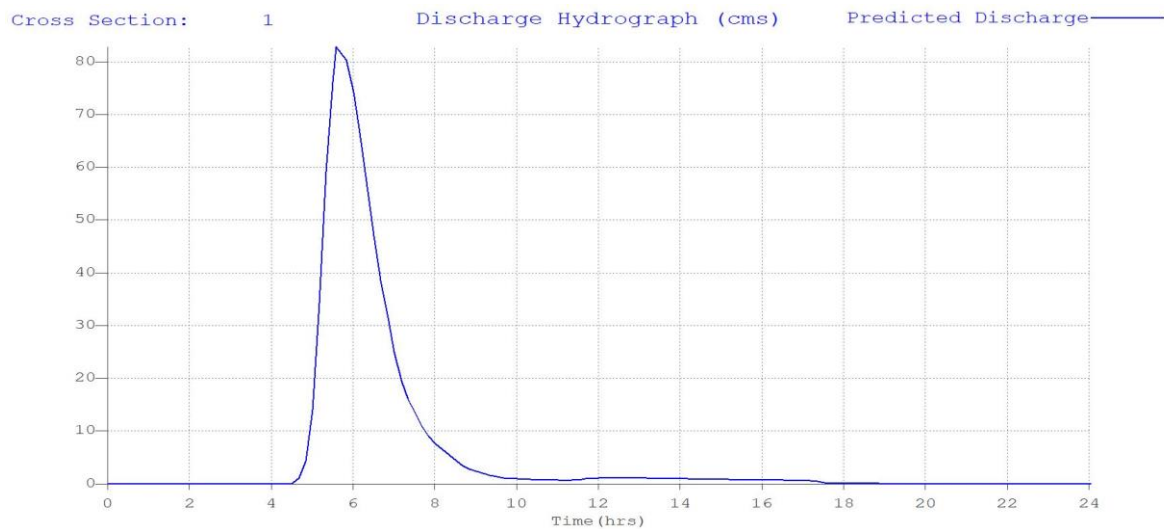
Elemento 205223 de comprobación para un período de retorno de 5 años



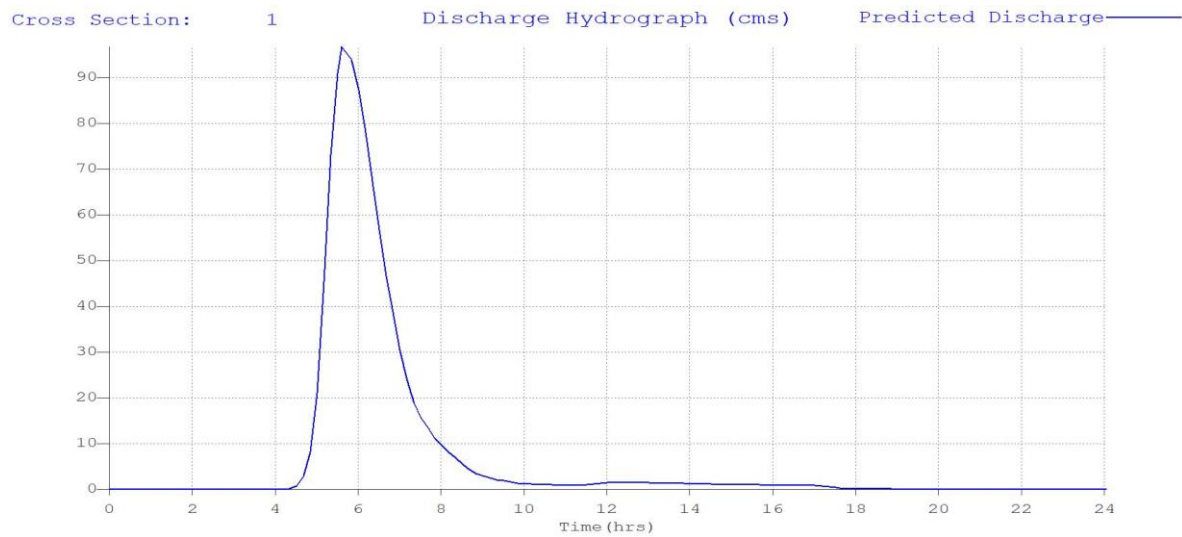
Elemento 205223 de comprobación para un período de retorno de 10 años



Elemento 205223 de comprobación para un período de retorno de 25 años



Elemento 205223 de comprobación para un período de retorno de 50 años

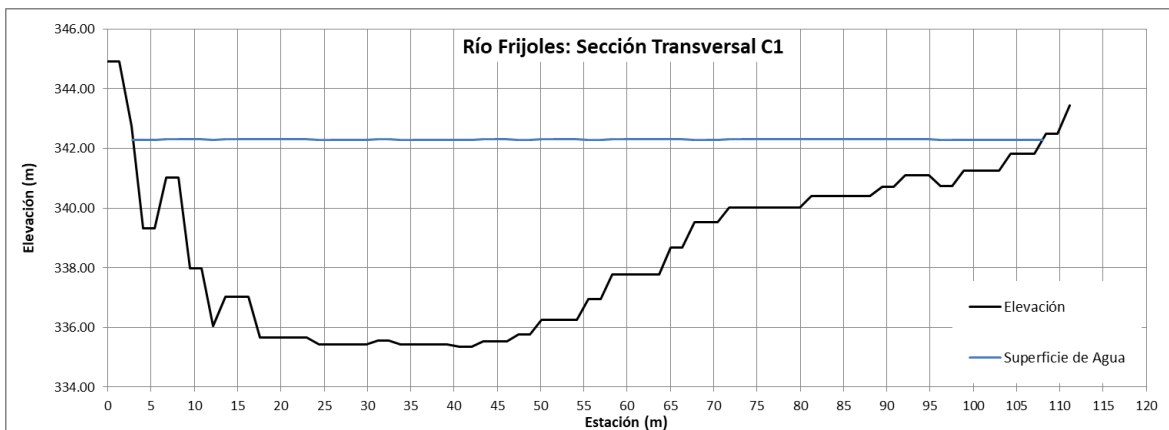
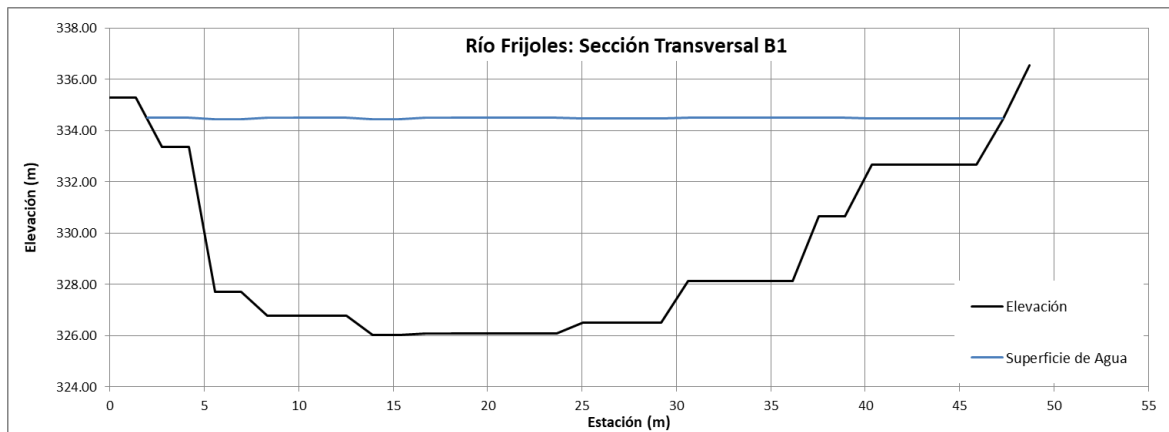
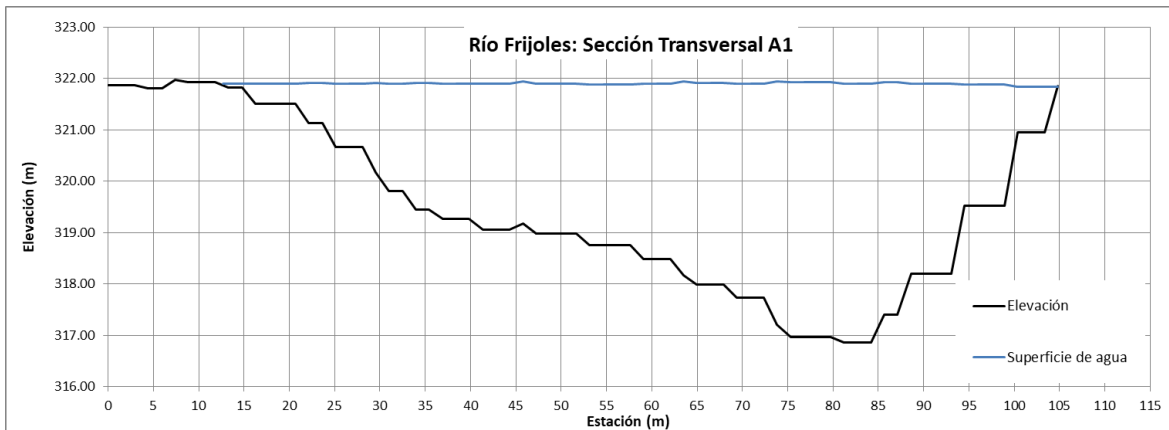


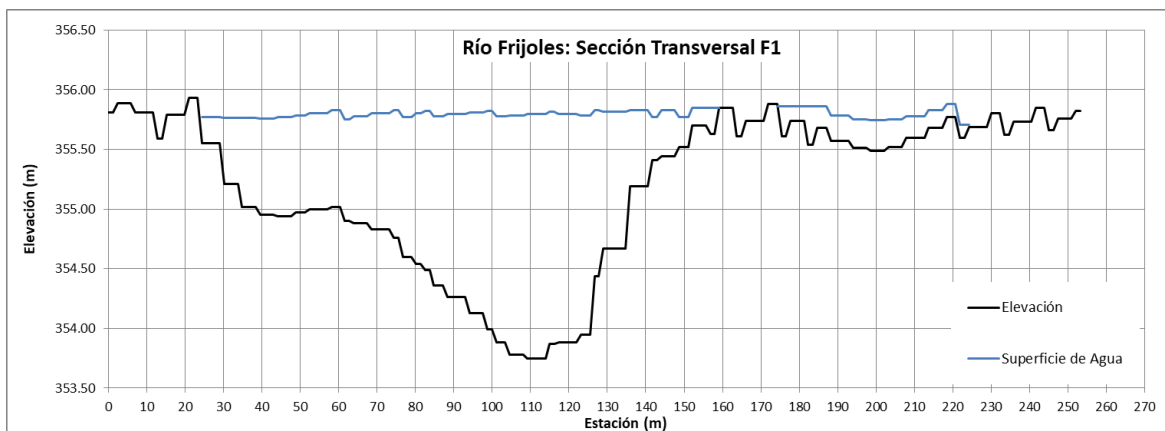
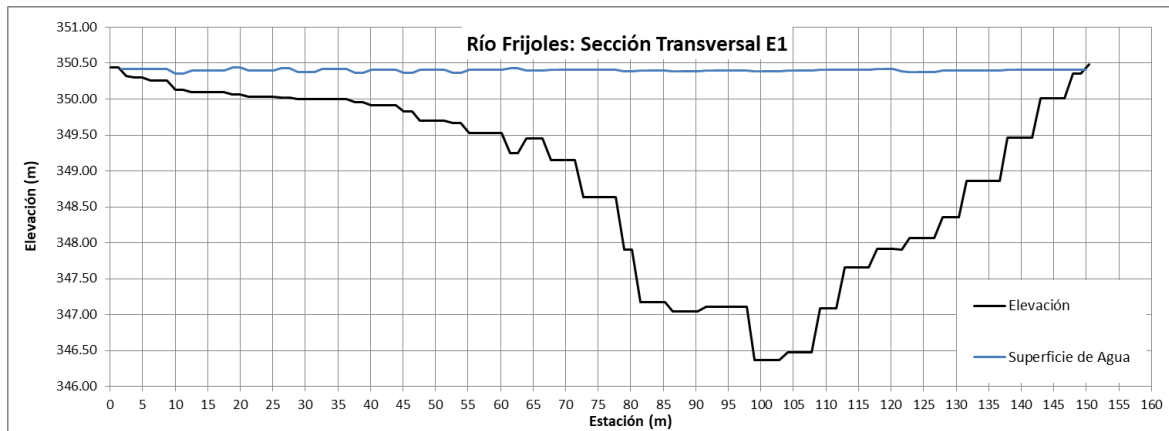
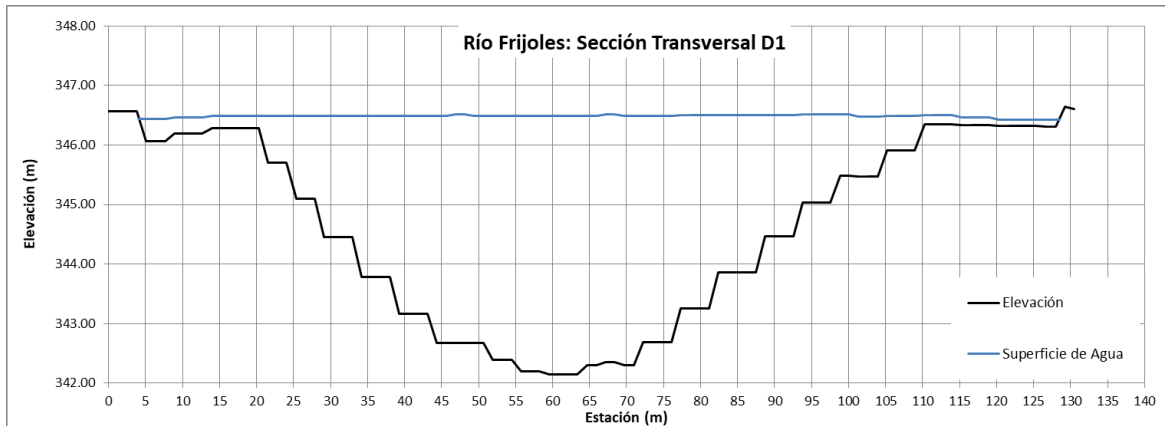
Elemento 205323 de comprobación para un período de retorno de 100 años

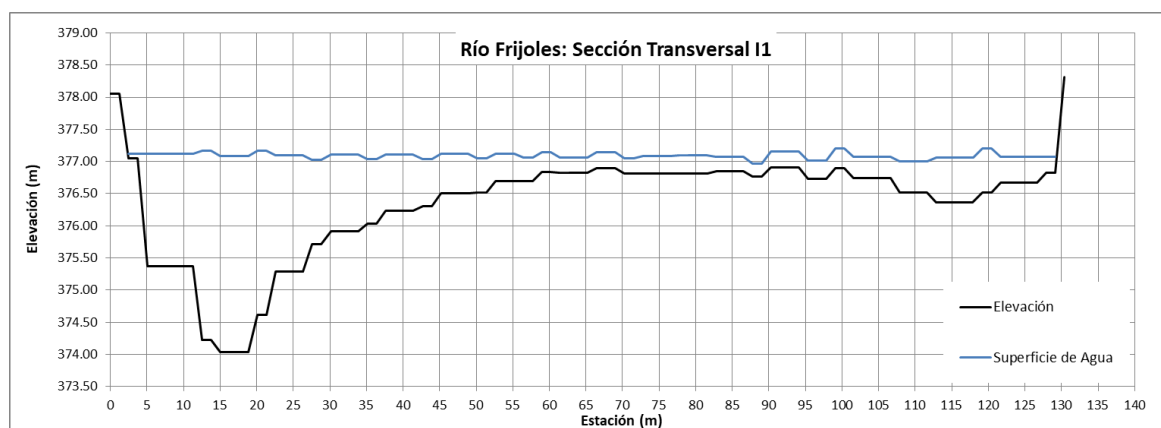
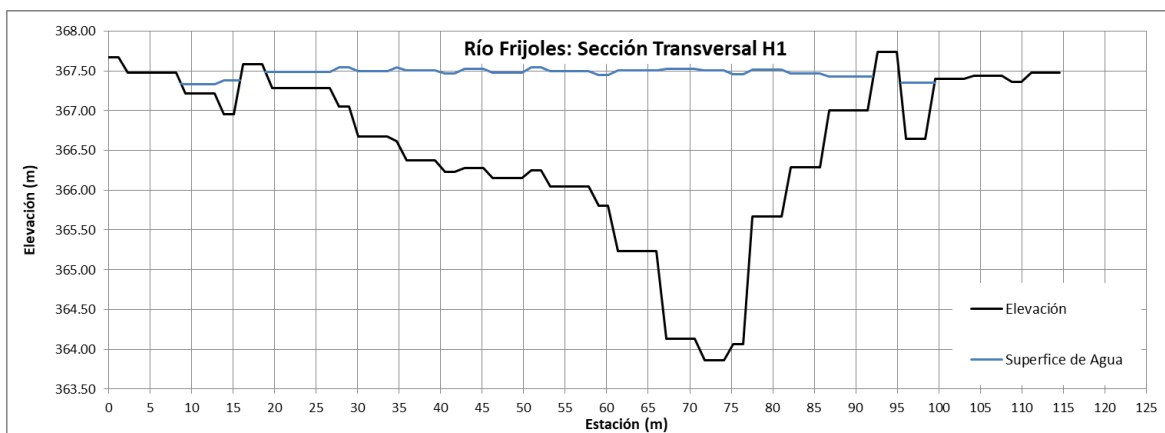
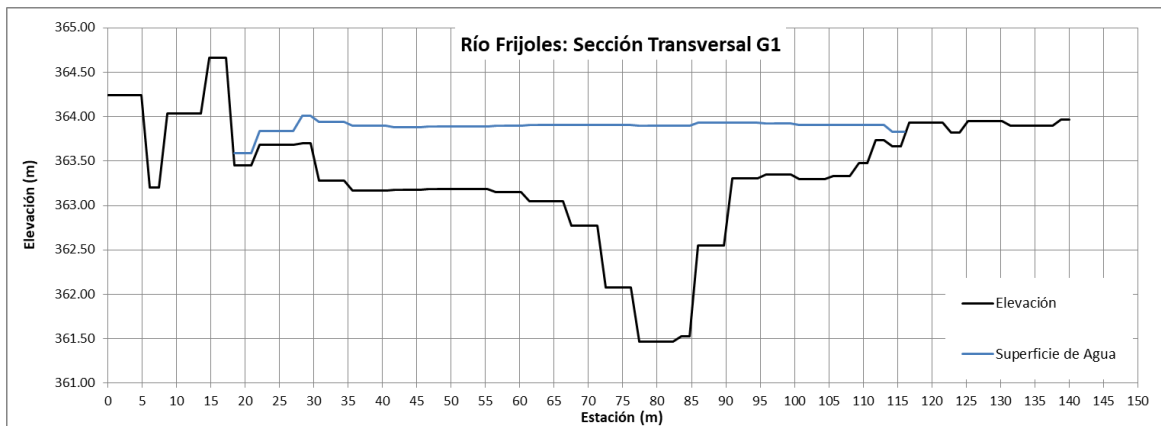
Apéndice G: Secciones de cotas de inundación

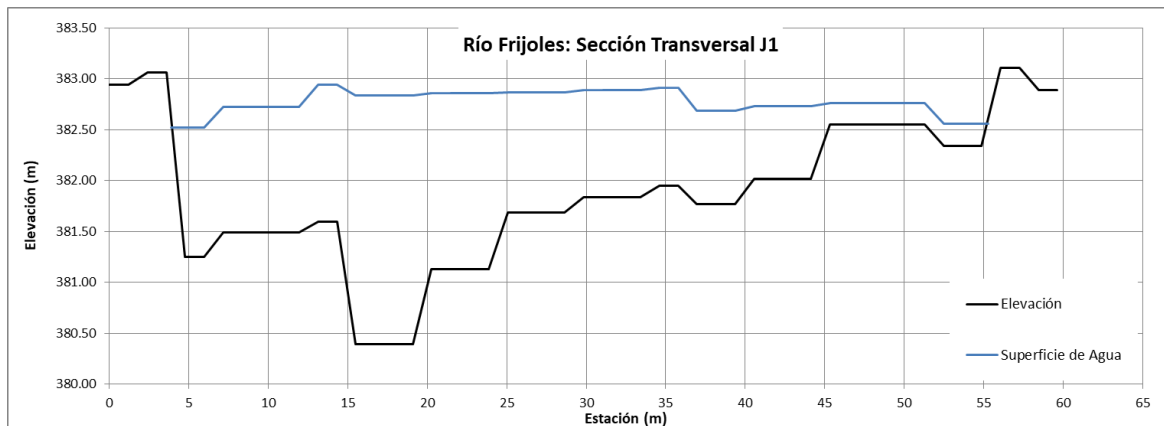


Río Frijoles

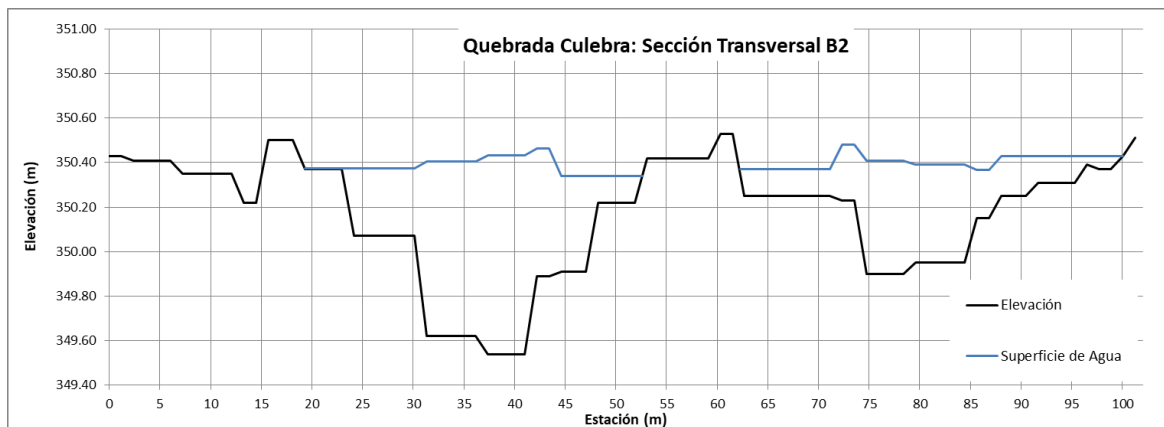
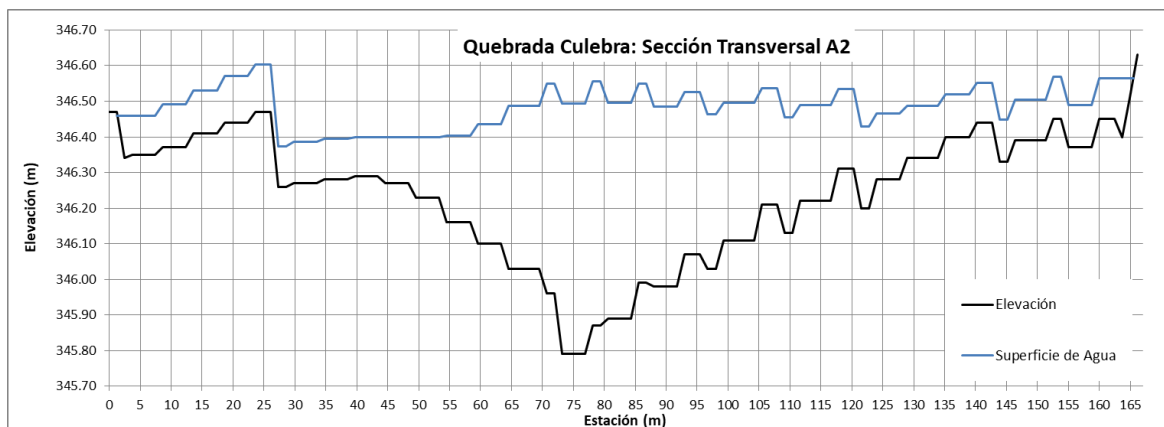


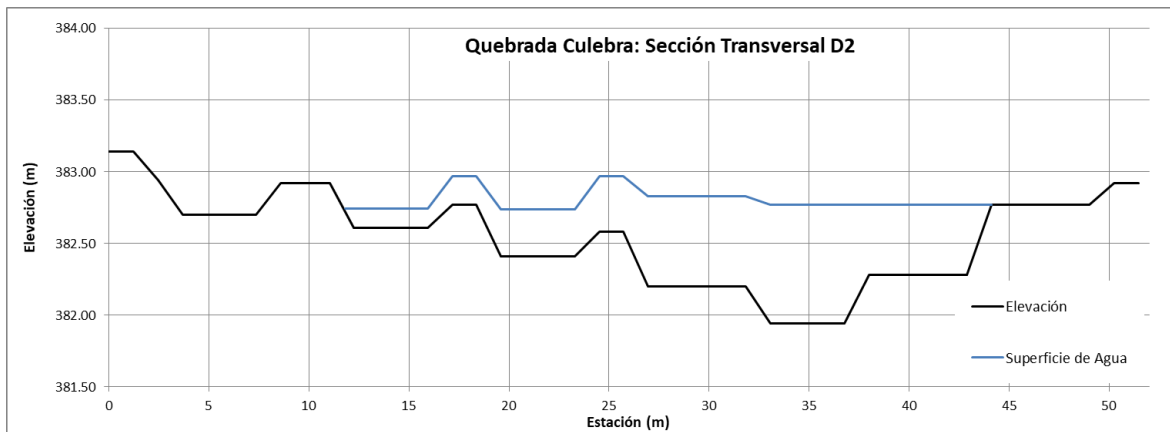
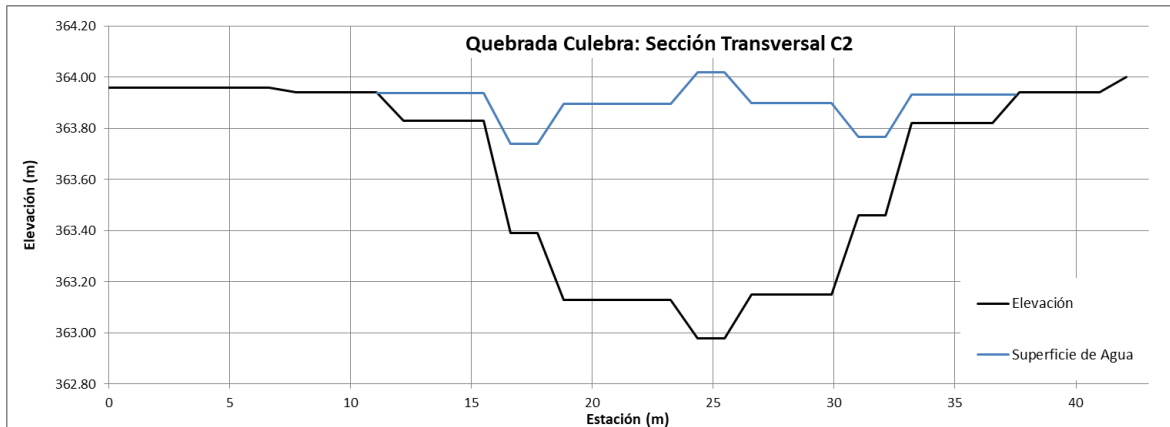




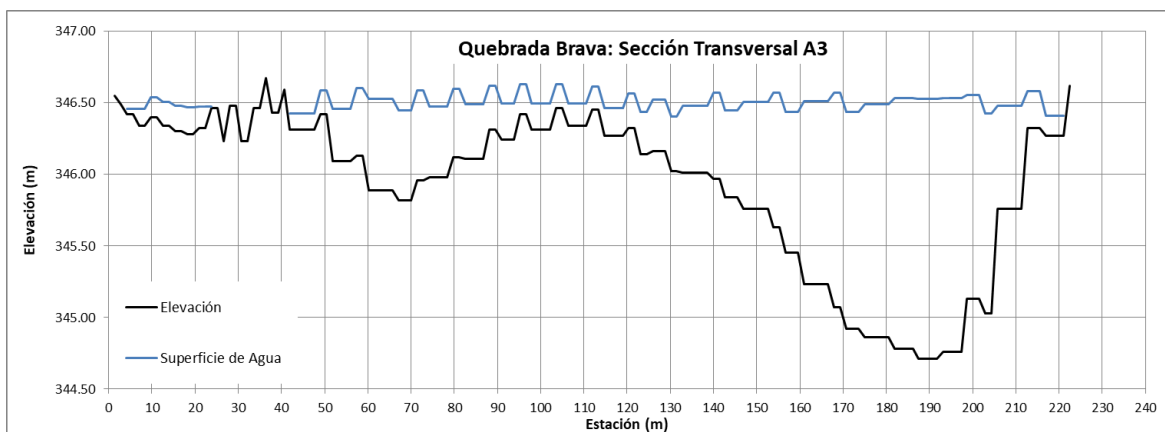


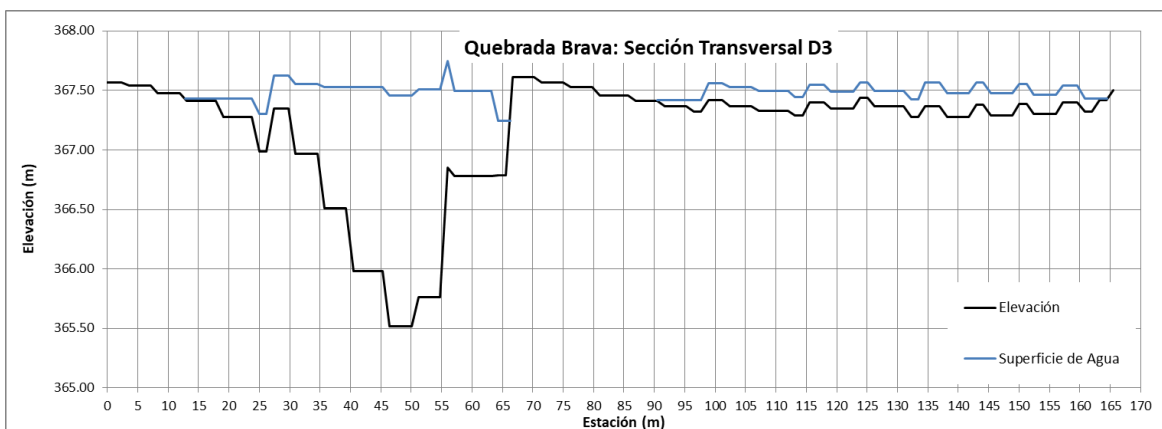
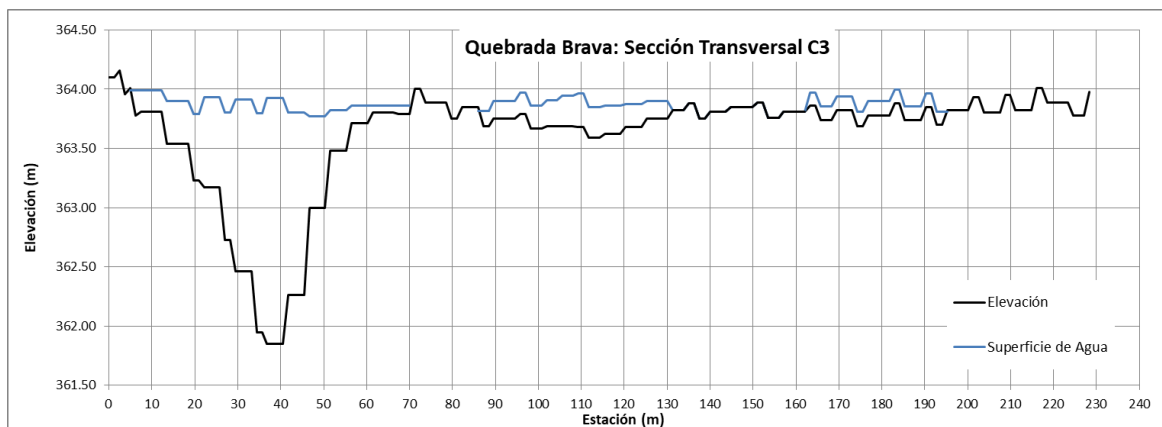
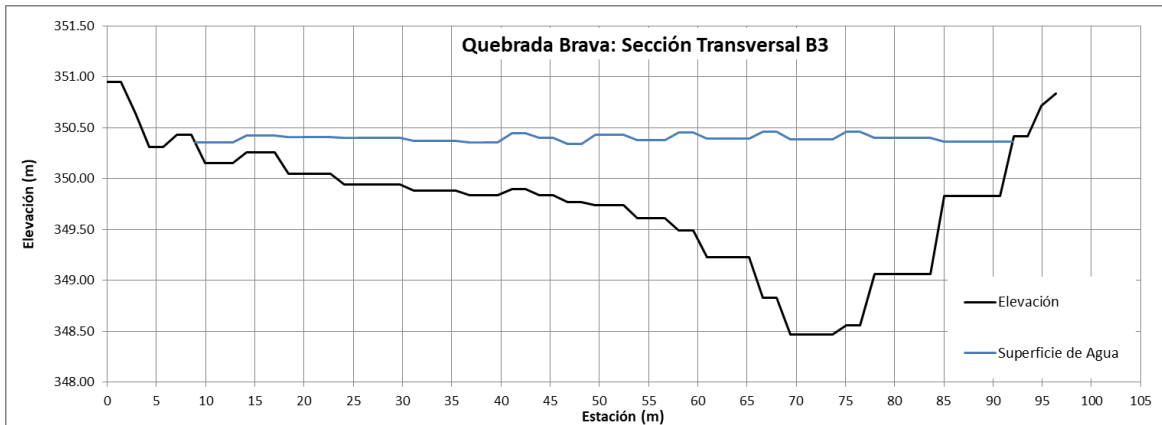
Quebrada Culebra

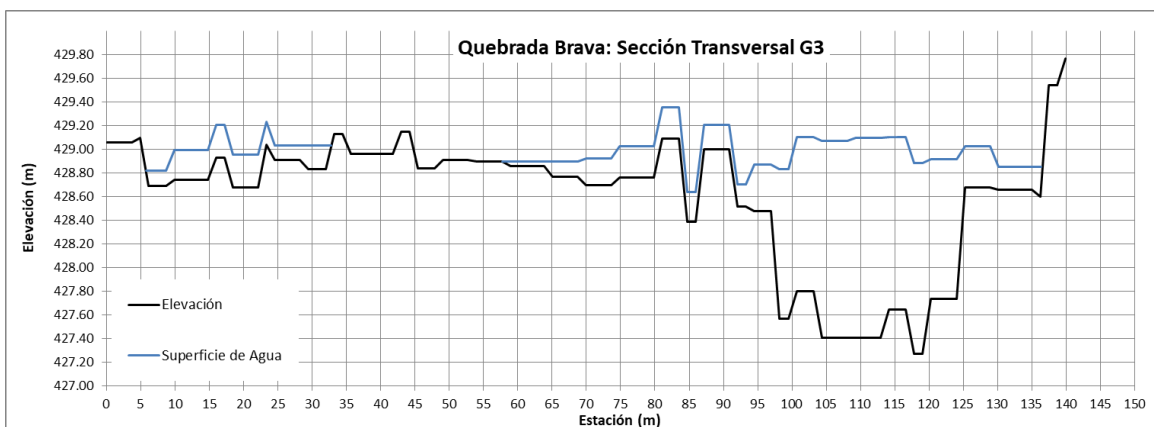
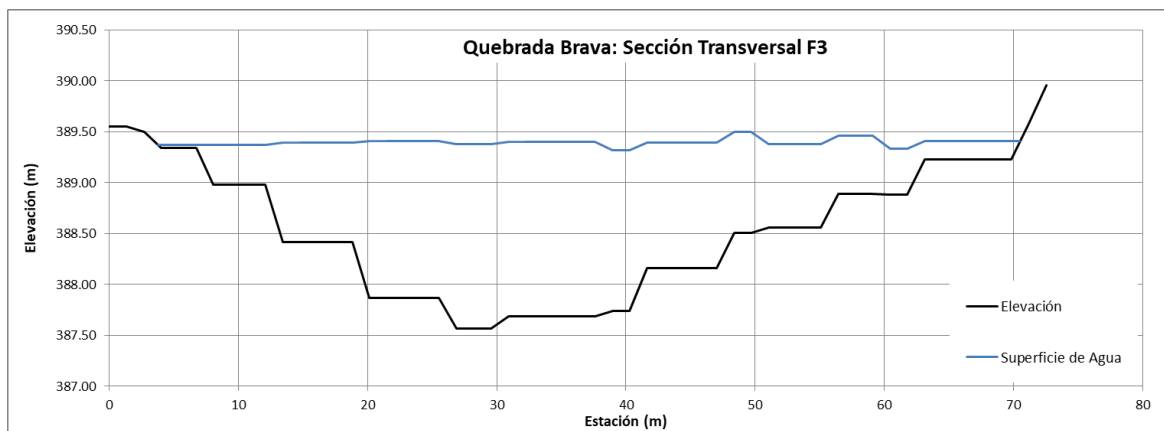
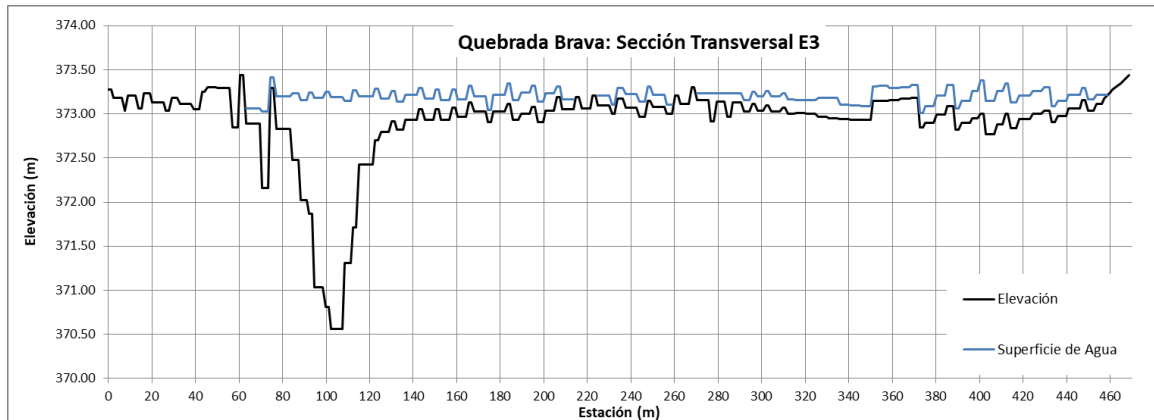




Quebrada Brava

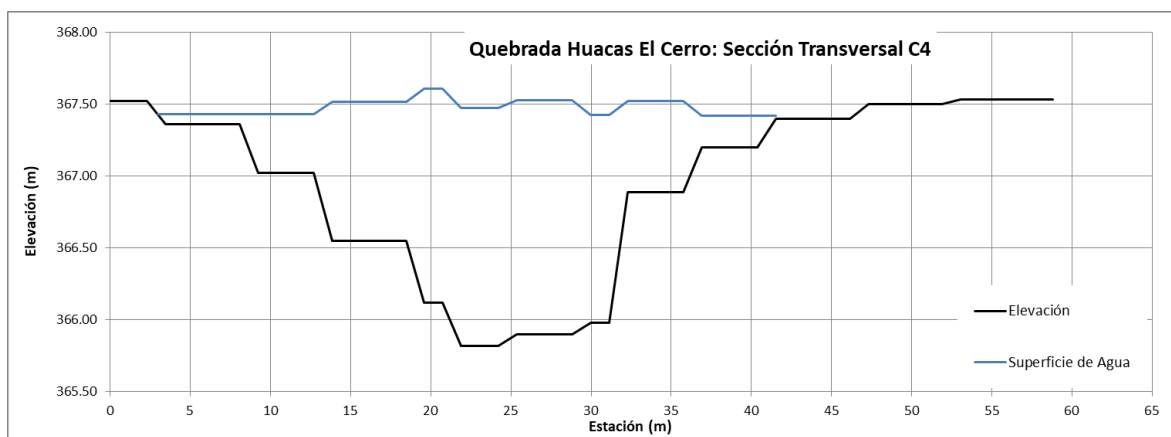
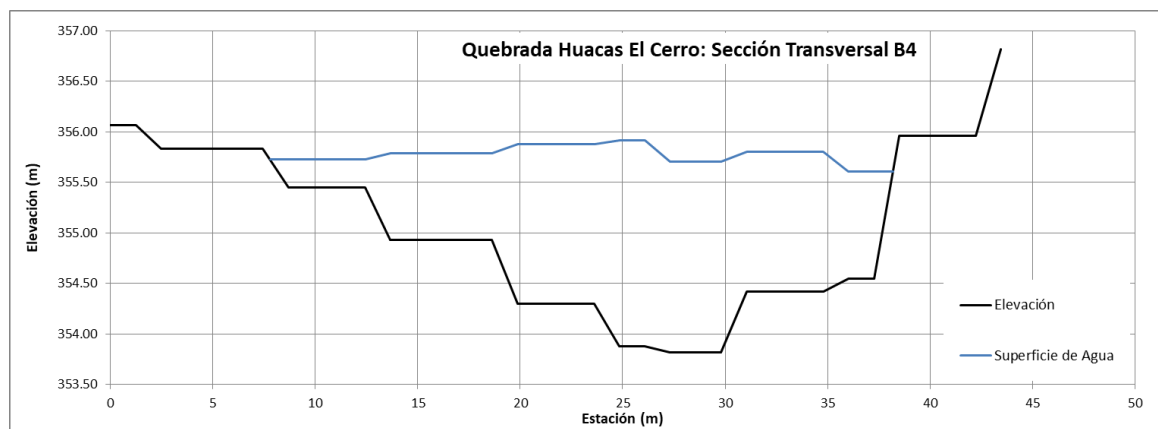
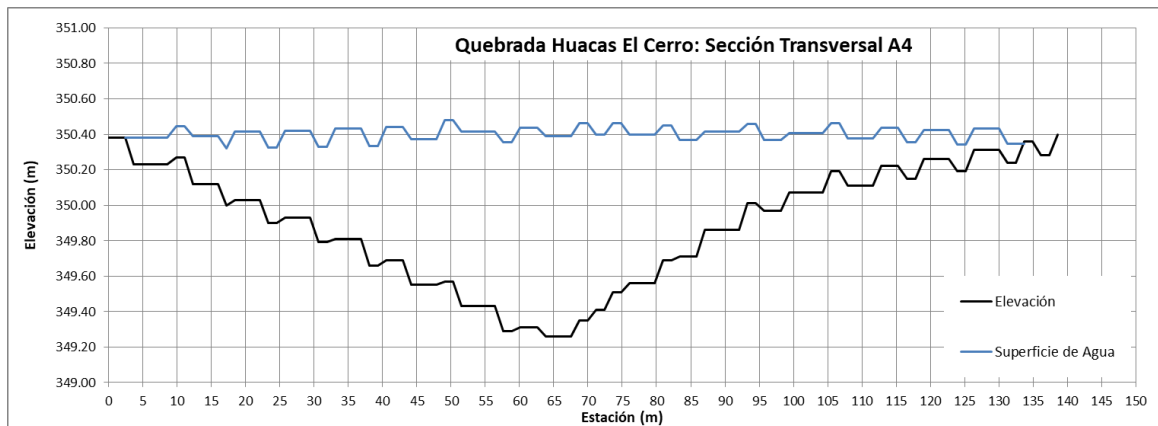


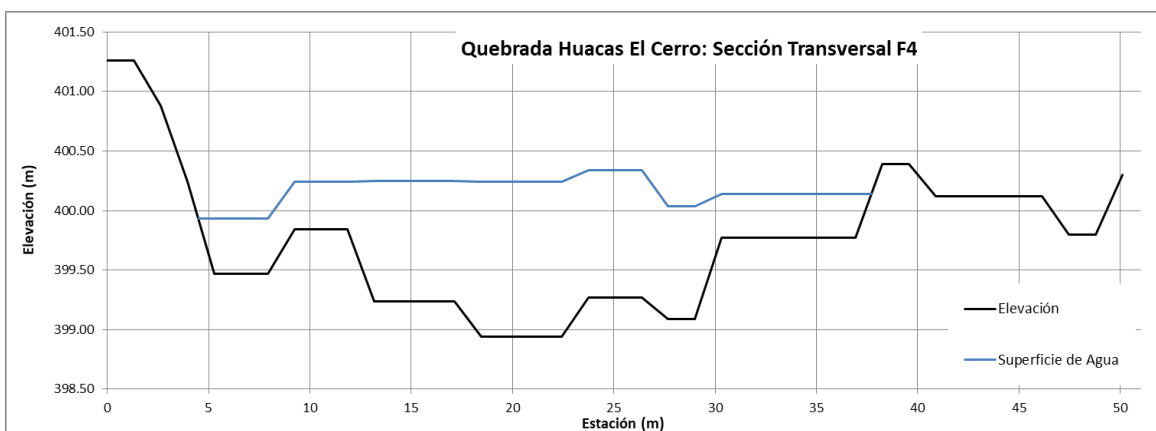
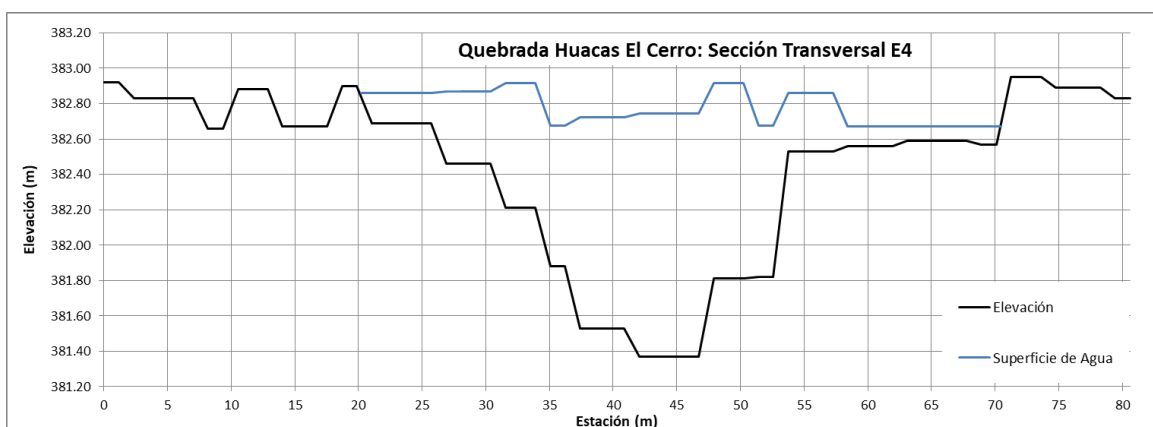
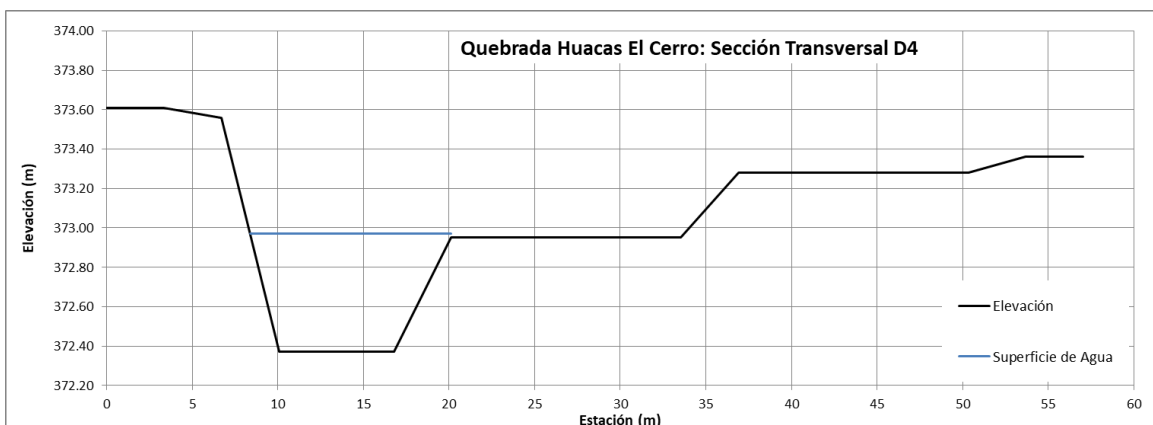


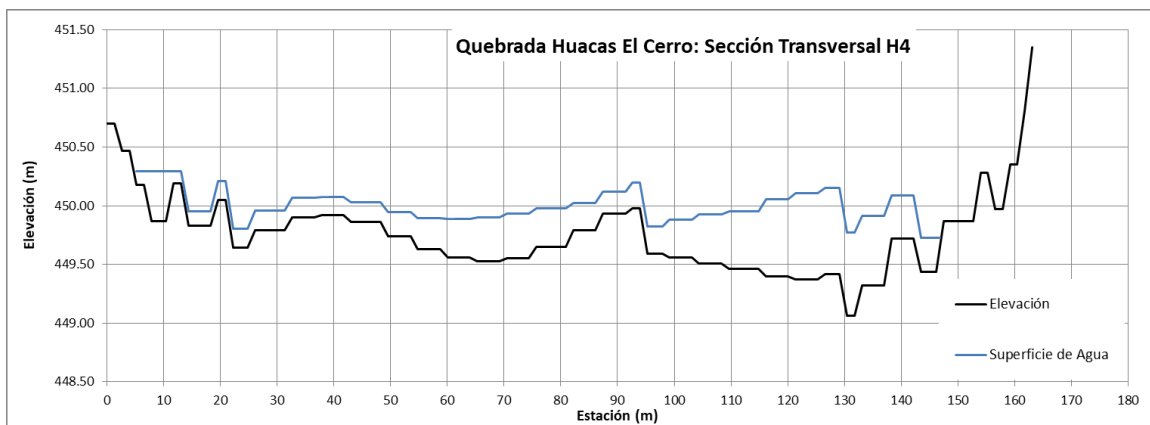
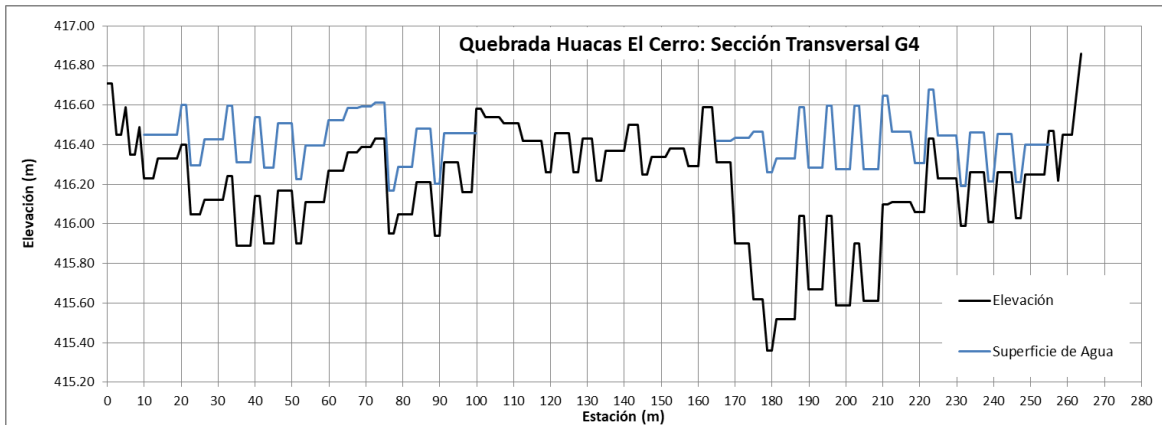




Quebrada Huacas - El Cerro







Apéndice H: Matrices de confusión

Matriz de confusión para la imagen P001.

	Clase	Nubes	Sombra Nube	Agua	Urbano	Zona Agrícola	Bosque	Pastizal	Suelo Desnudo	Total	Precisión del usuario (%)
Predicción	Nubes	80	0	0	0	0	0	0	1	81	98.77
	Sombra Nube	0	71	2	0	1	0	0	0	74	95.95
	Agua	0	8	104	1	0	0	0	0	113	92.04
	Urbano	0	0	2	82	0	0	0	9	93	88.17
	Zona Agrícola	0	0	0	0	82	13	0	0	95	86.32
	Bosque	0	1	0	0	8	79	10	0	98	80.61
	Pastizal	0	0	0	0	2	12	106	0	120	88.33
	Suelo Desnudo	0	0	0	3	0	0	0	83	86	96.51
Puntos de referencia		80	80	108	86	93	104	116	93	760	
Precisión del elaborador (%)		100.00	88.75	96.30	95.35	88.17	75.96	91.38	89.25		

Matriz de confusión para la imagen P003.

Clase	Nubes	Sombra Nube	Agua	Urbano	Zona Agrícola	Bosque	Pastizal	Suelo Desnudo	Total	Precisión del usuario (%)
Predicción	Nubes	65	1	0	3	0	0	0	69	94.20
	Sombra Nube	0	53	10	0	0	0	0	63	84.13
	Agua	0	0	114	0	0	0	0	114	100.00
	Urbano	0	0	6	78	0	0	3	87	89.66
	Zona Agrícola	0	1	0	0	23	11	19	54	42.59
	Bosque	0	0	0	0	1	61	1	63	96.83
	Pastizal	0	0	0	1	4	1	86	94	91.49
	Suelo Desnudo	0	0	23	9	1	0	0	58	63.74
Puntos de referencia	65	55	153	91	29	73	106	63	635	
Precisión del elaborador (%)	100.00	96.36	74.51	85.71	79.31	83.56	81.13	92.06		

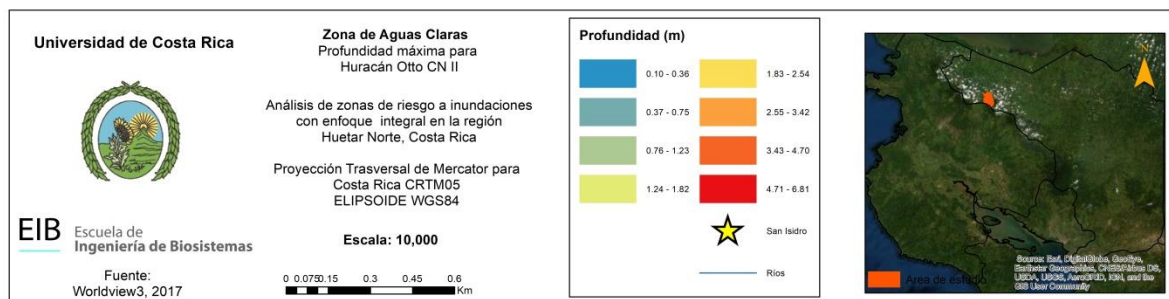
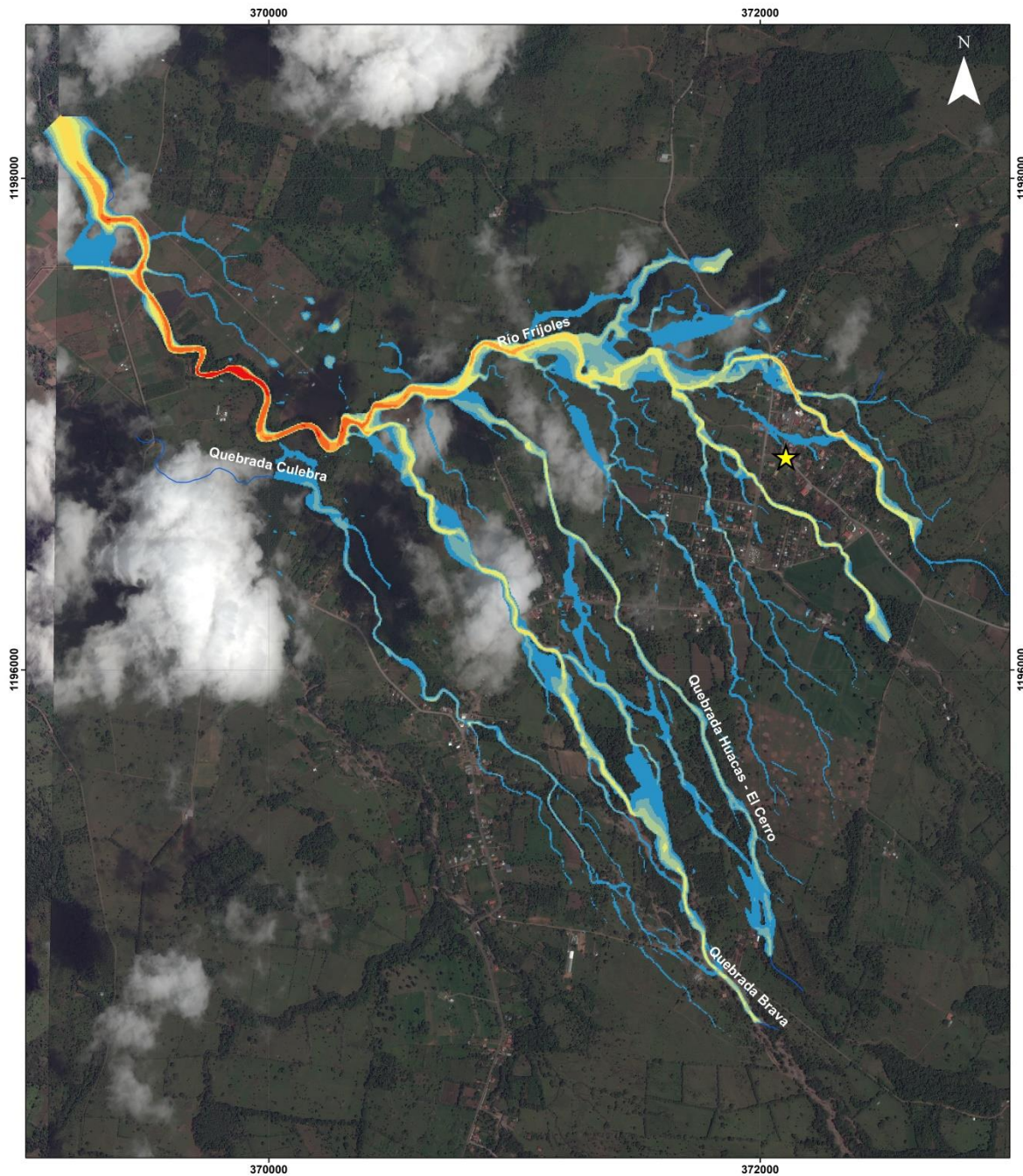
Matriz de confusión para la imagen P004.

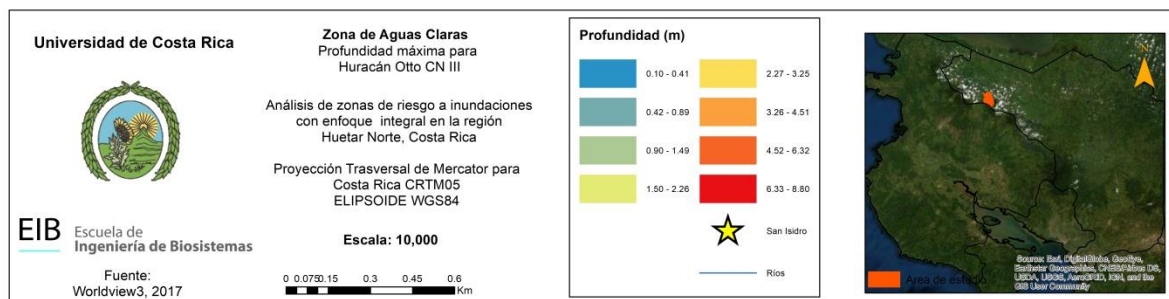
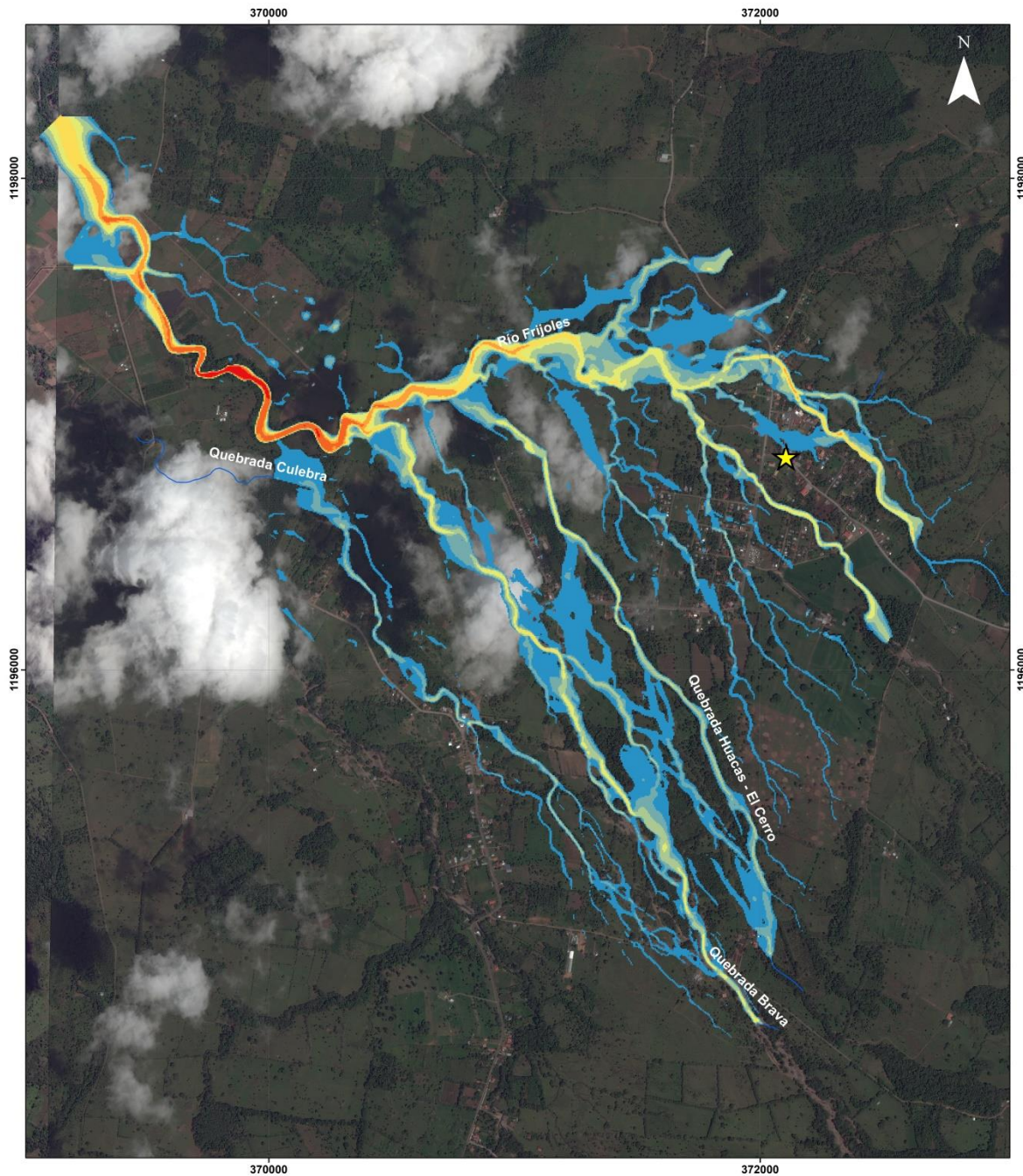
Clase	Nubes	Sombra Nube	Agua	Urbano	Zona Agrícola	Bosque	Pastizal	Suelo Desnudo	Total	Precisión del usuario (%)
Predicción	Nubes	99	0	0	2	0	0	0	101	98.02
	Sombra Nube	0	66	1	0	1	0	0	68	97.06
	Agua	0	0	114	0	0	0	0	114	100.00
	Urbano	0	0	3	94	0	0	4	101	93.07
	Zona Agrícola	0	1	15	0	76	17	0	109	69.72
	Bosque	0	0	0	1	10	71	5	87	81.61
	Pastizal	0	0	0	0	8	2	128	139	92.09
	Suelo Desnudo	0	0	0	12	1	0	0	87	87.00
Puntos de referencia	99	67	133	109	96	90	133	92	819	
Precisión del elaborador (%)	100.0	98.51	85.71	86.24	79.17	78.89	96.24	94.57		

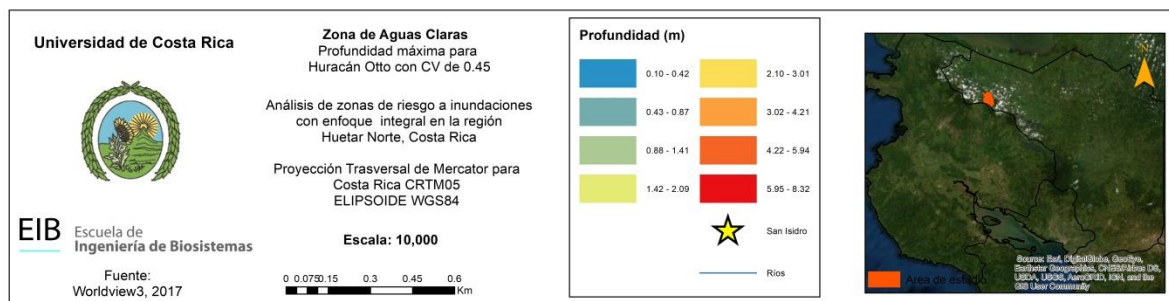
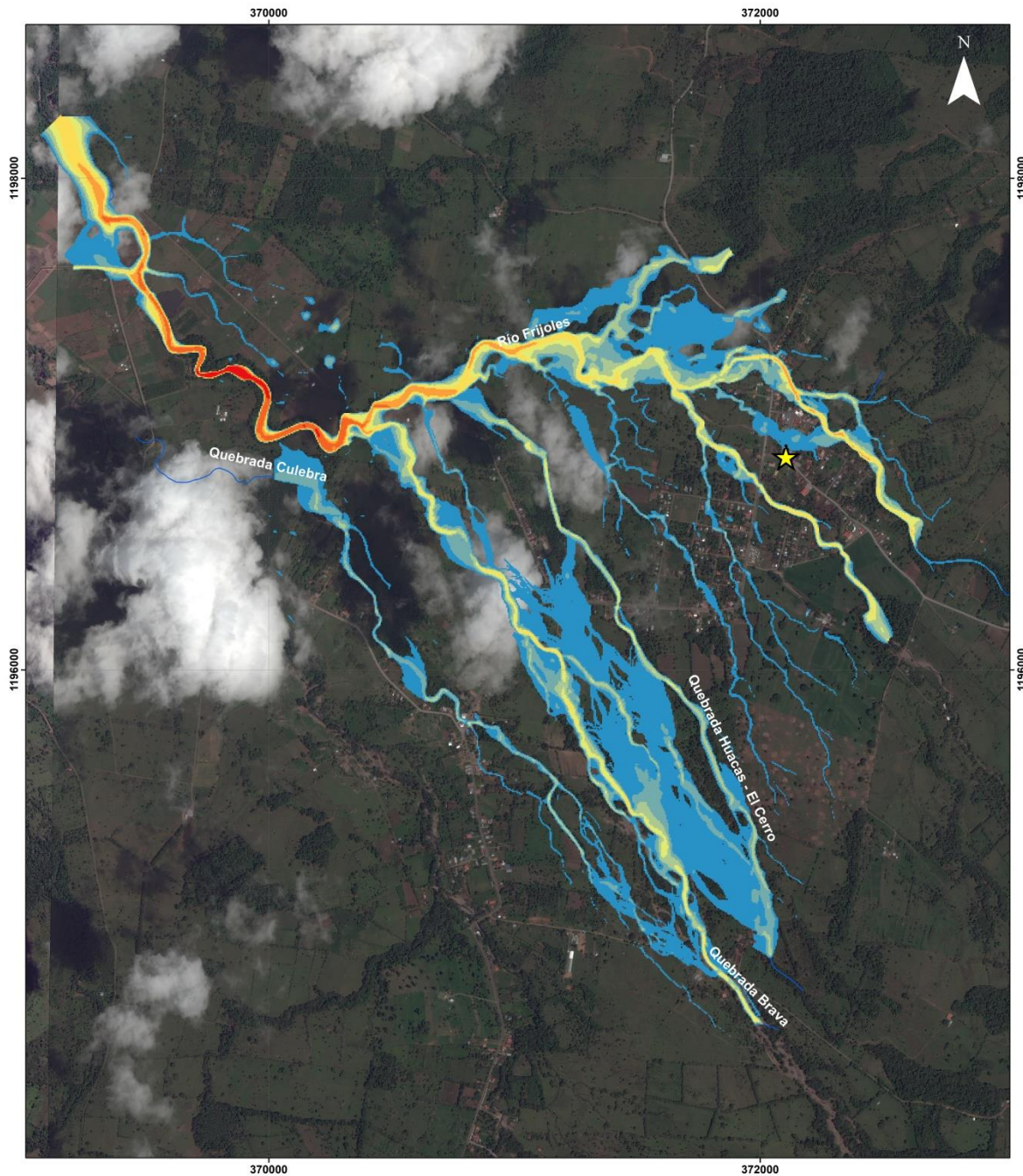
Matriz de confusión para la imagen P005.

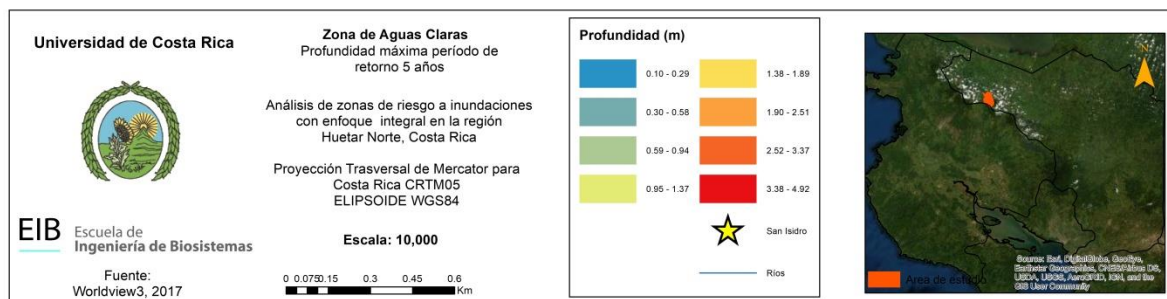
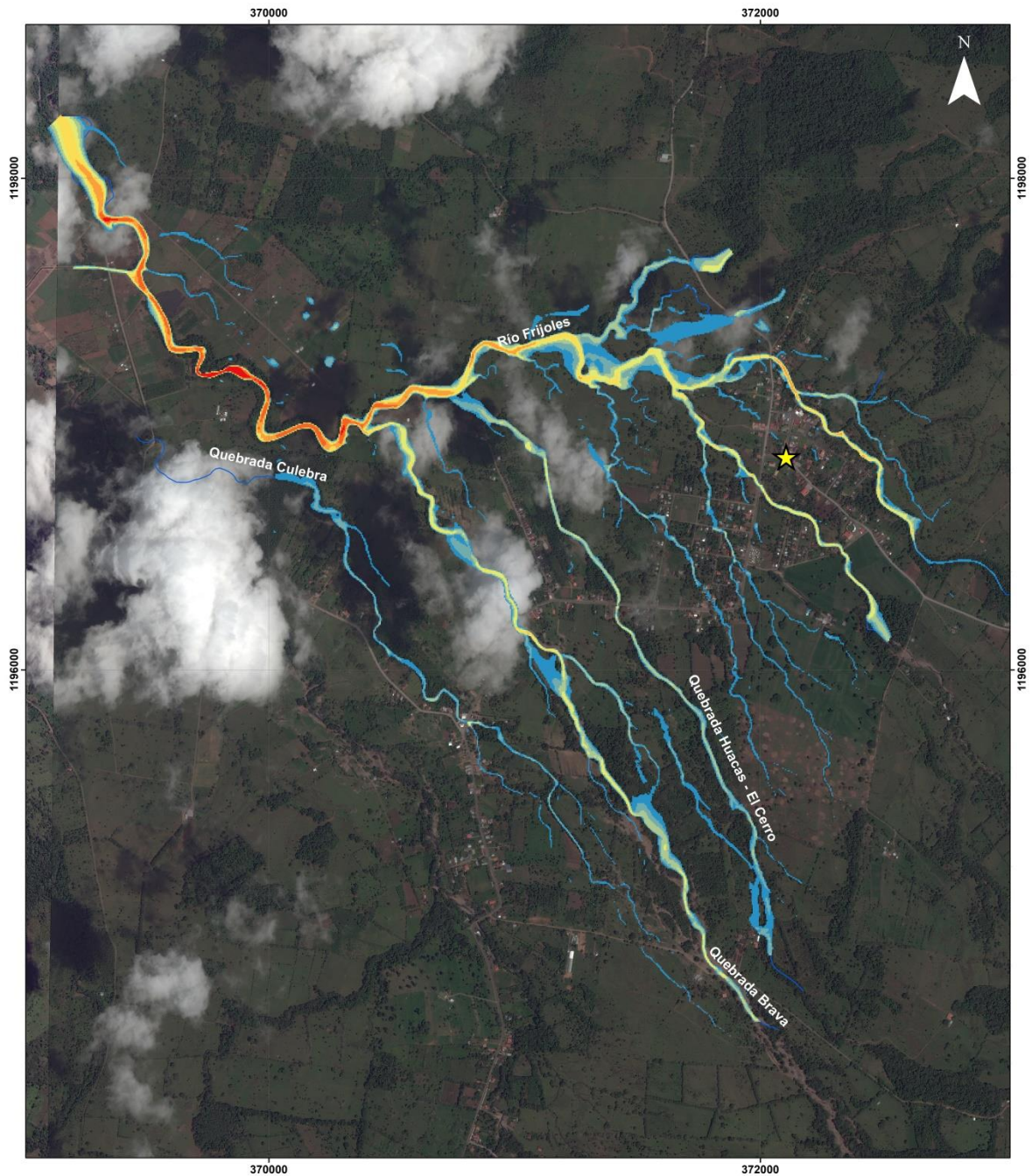
Clase	Nubes	Sombra Nube	Agua	Urbano	Zona Agrícola	Bosque	Pastizal	Suelo Desnudo	Total	Precisión del usuario (%)
Predicción	Nubes	73	0	0	4	0	0	0	77	94.81
	Sombra Nube	0	108	5	0	0	1	0	114	94.74
	Agua	0	9	87	1	0	0	0	97	89.69
	Urbano	0	0	1	115	0	0	0	116	99.14
	Zona Agrícola	0	0	0	0	12	12	33	57	21.05
	Bosque	0	3	23	0	9	111	6	152	73.03
	Pastizal	0	0	0	0	8	2	116	126	92.06
	Suelo Desnudo	0	4	26	12	0	2	0	111	71.61
Puntos de referencia		73	124	142	132	29	128	155	111	894
Precisión del elaborador (%)		100	87	61	87	41	87	75	100	

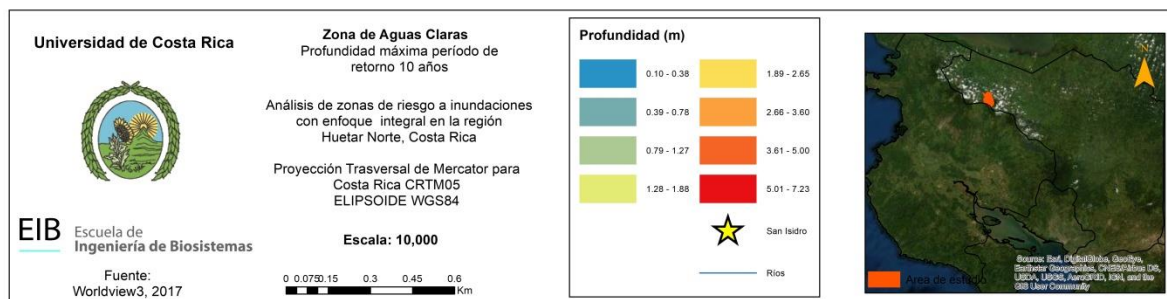
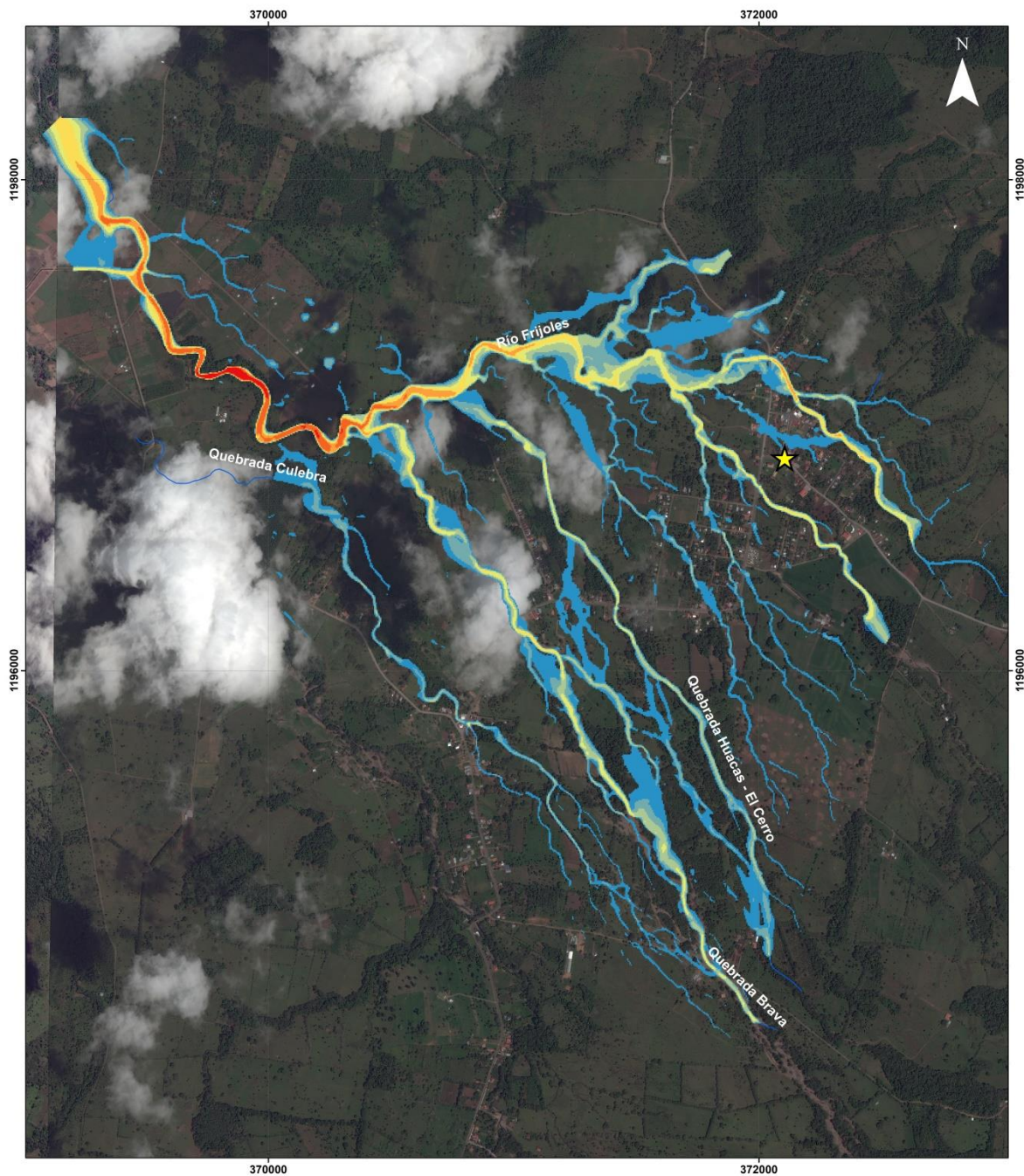
Apéndice I: Mapas de Profundidad Máxima de Inundación

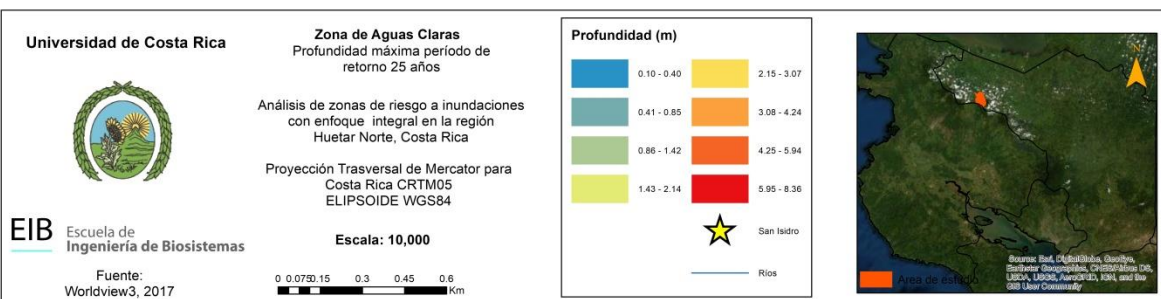
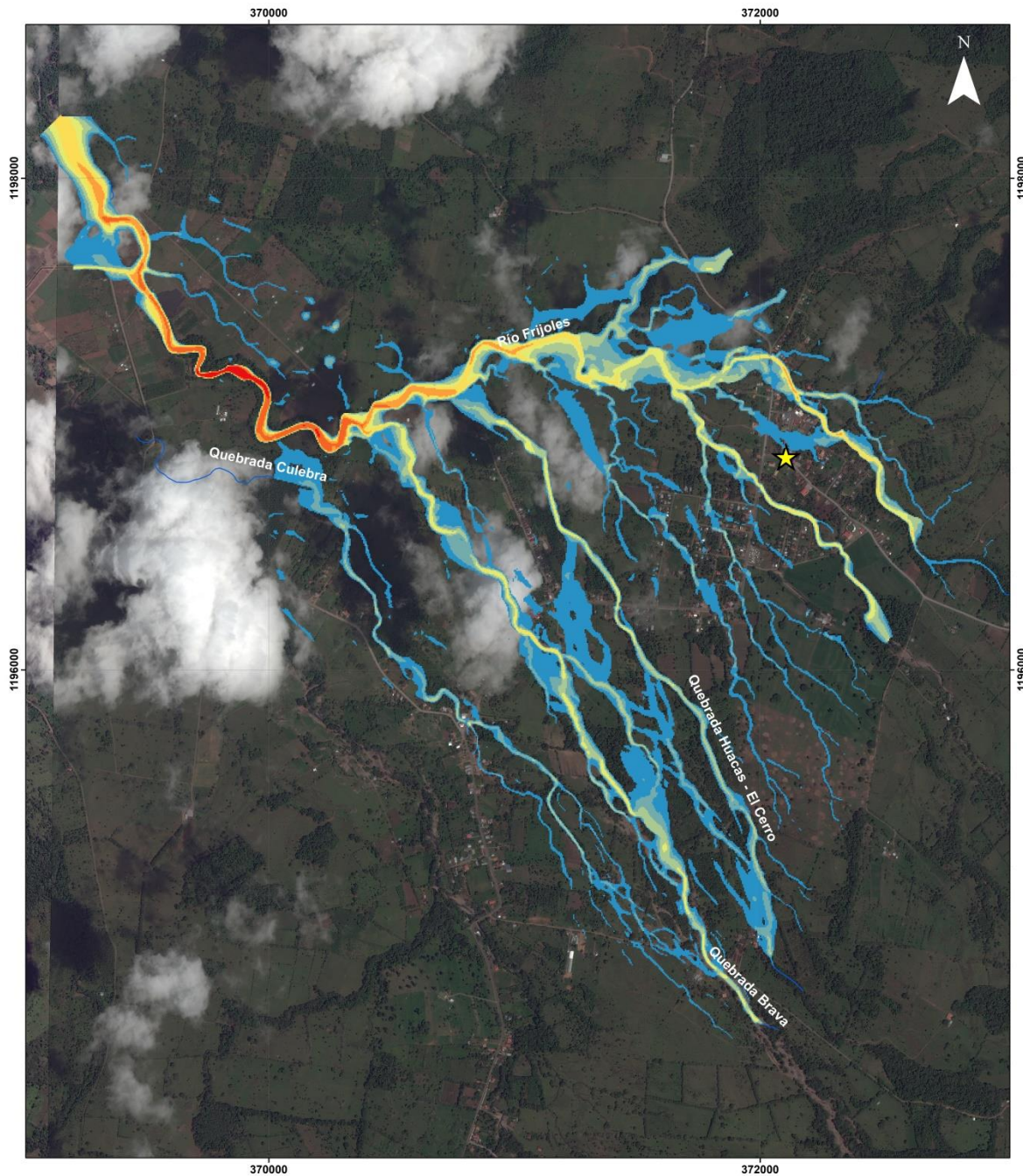


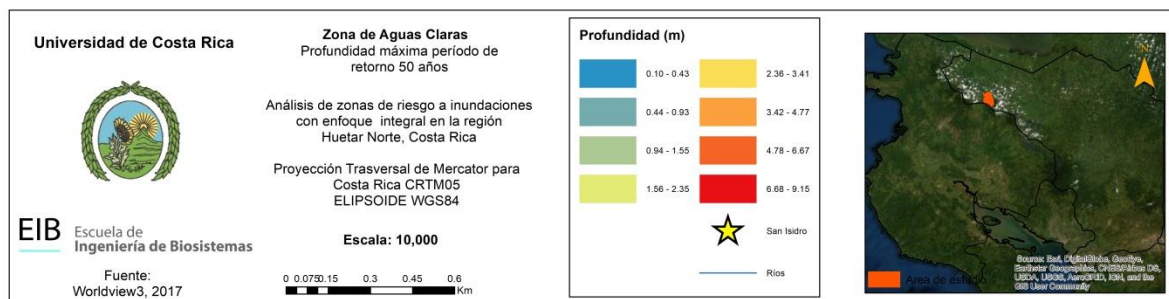
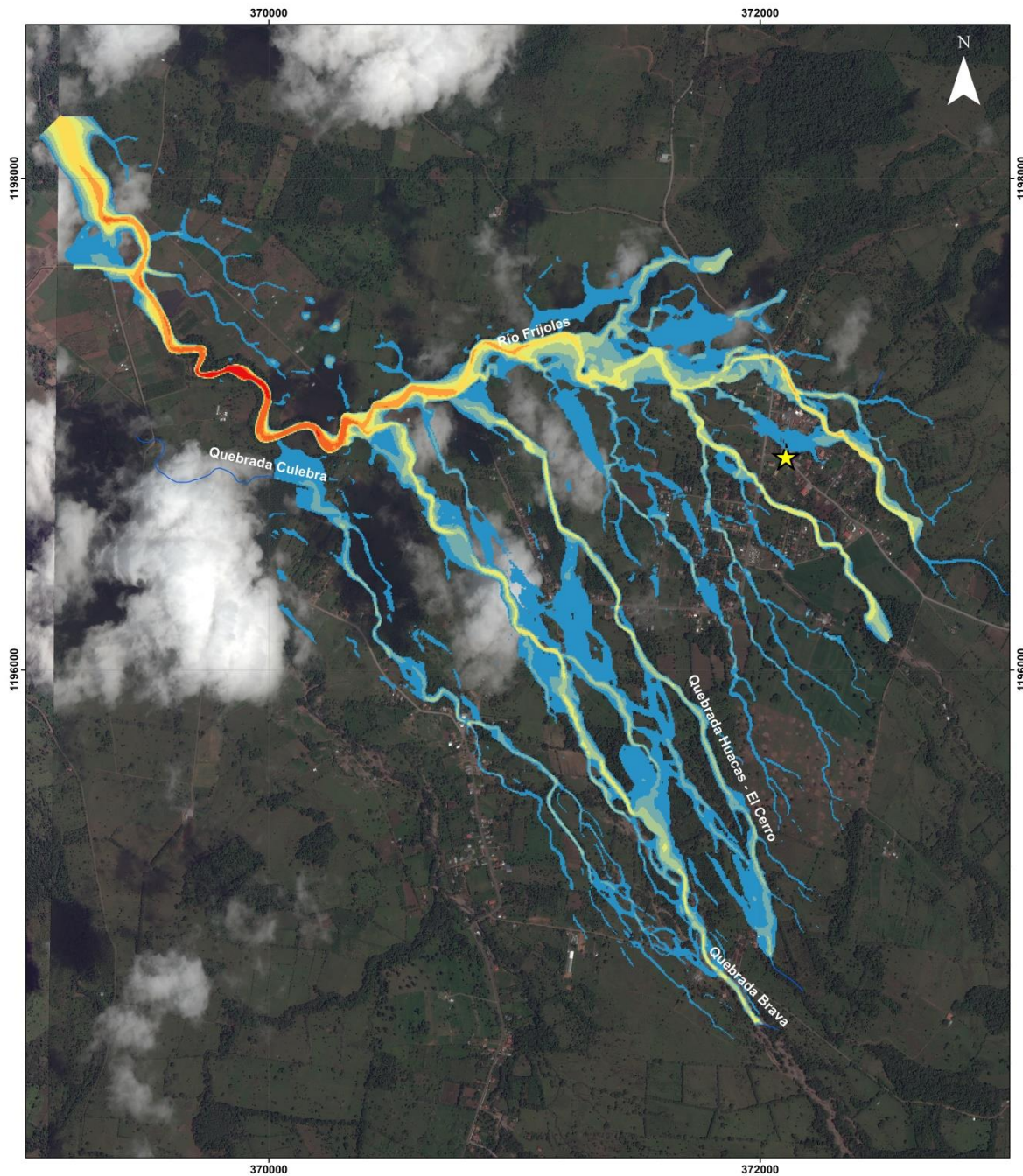


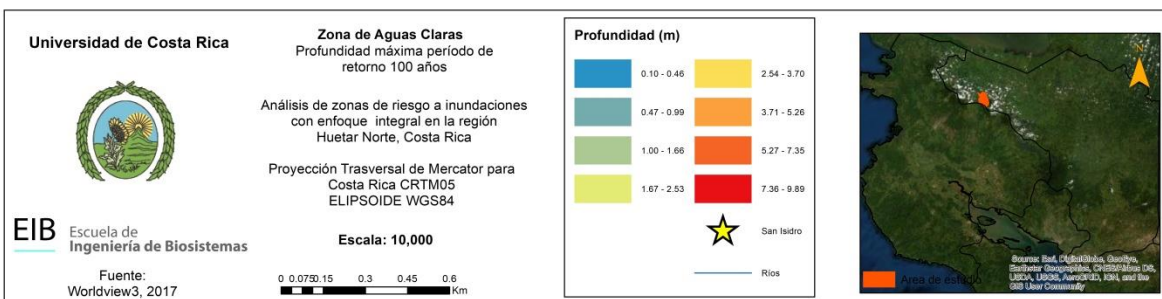
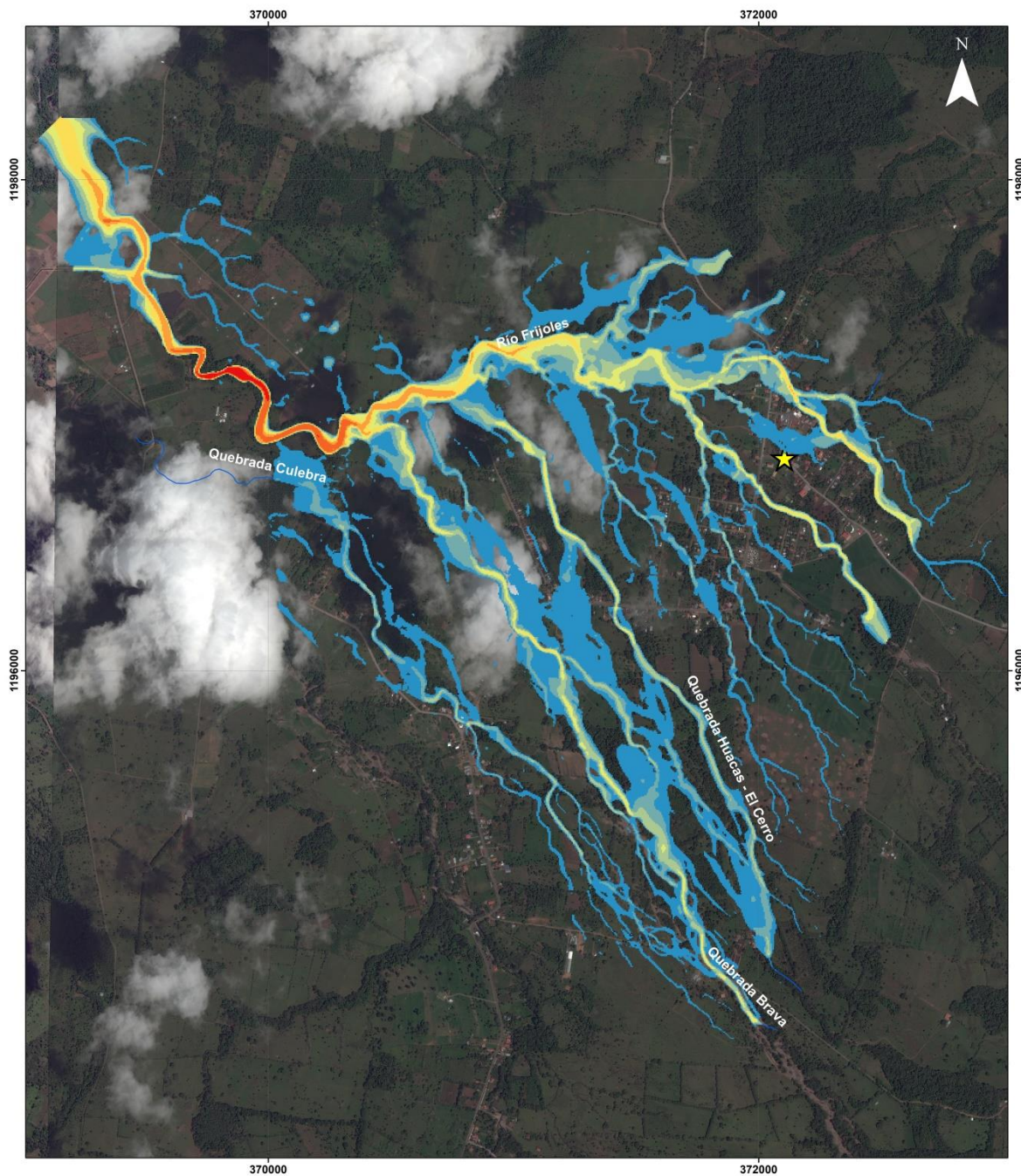




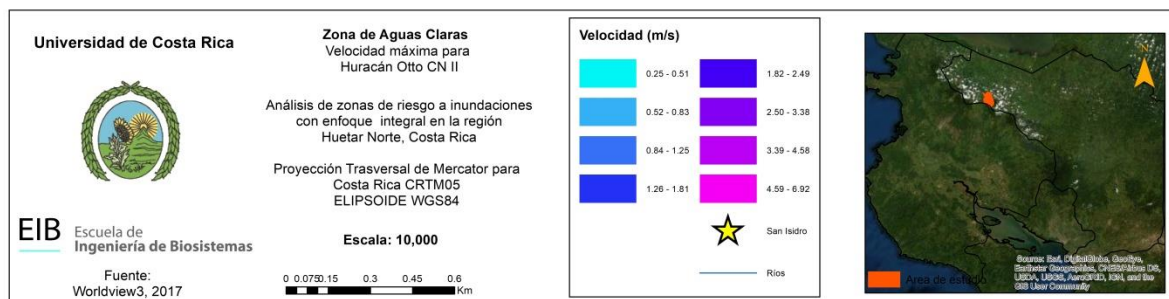
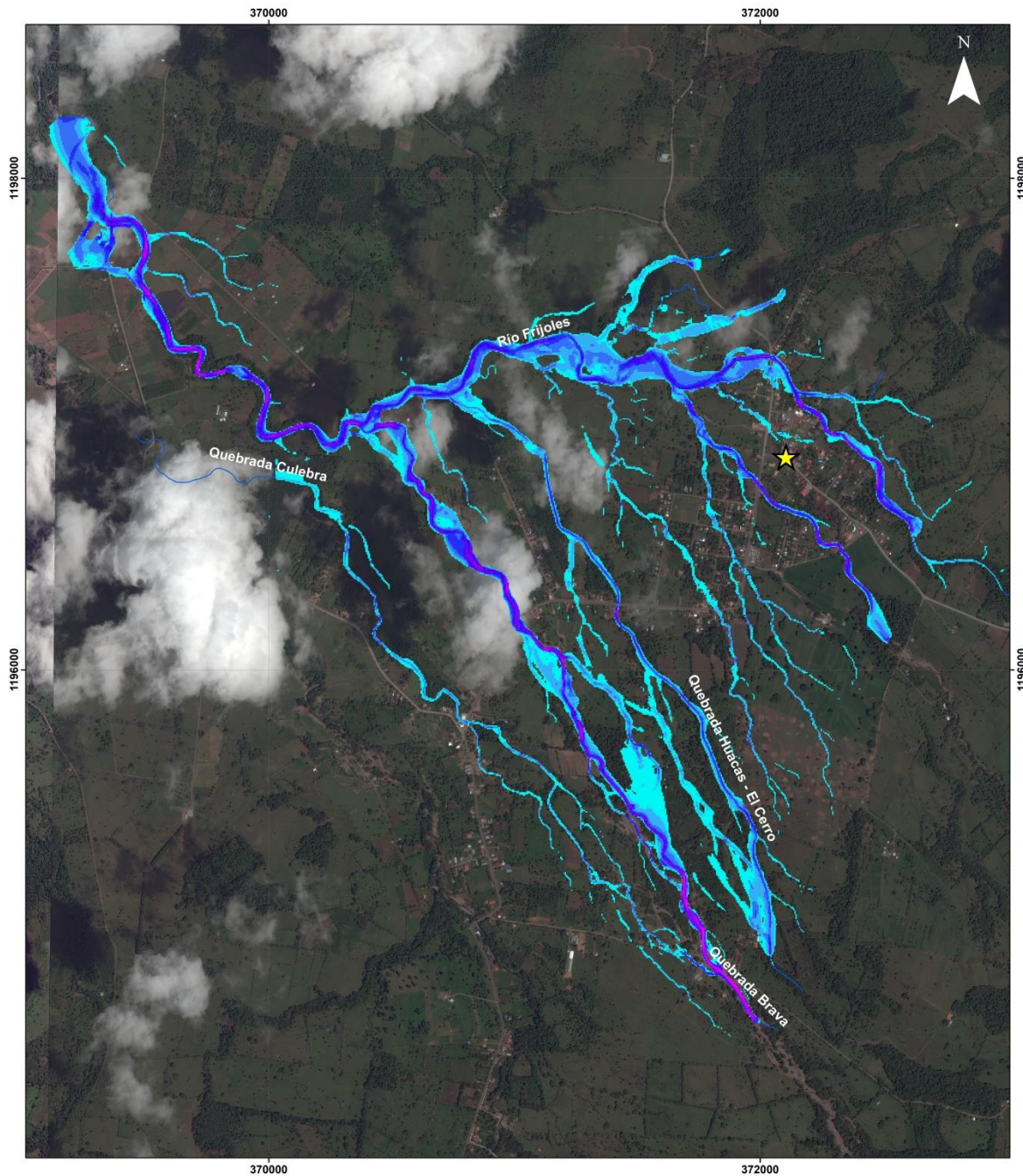


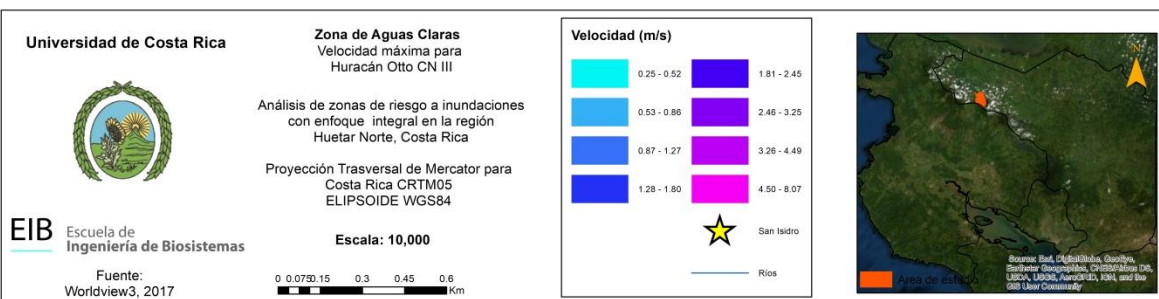
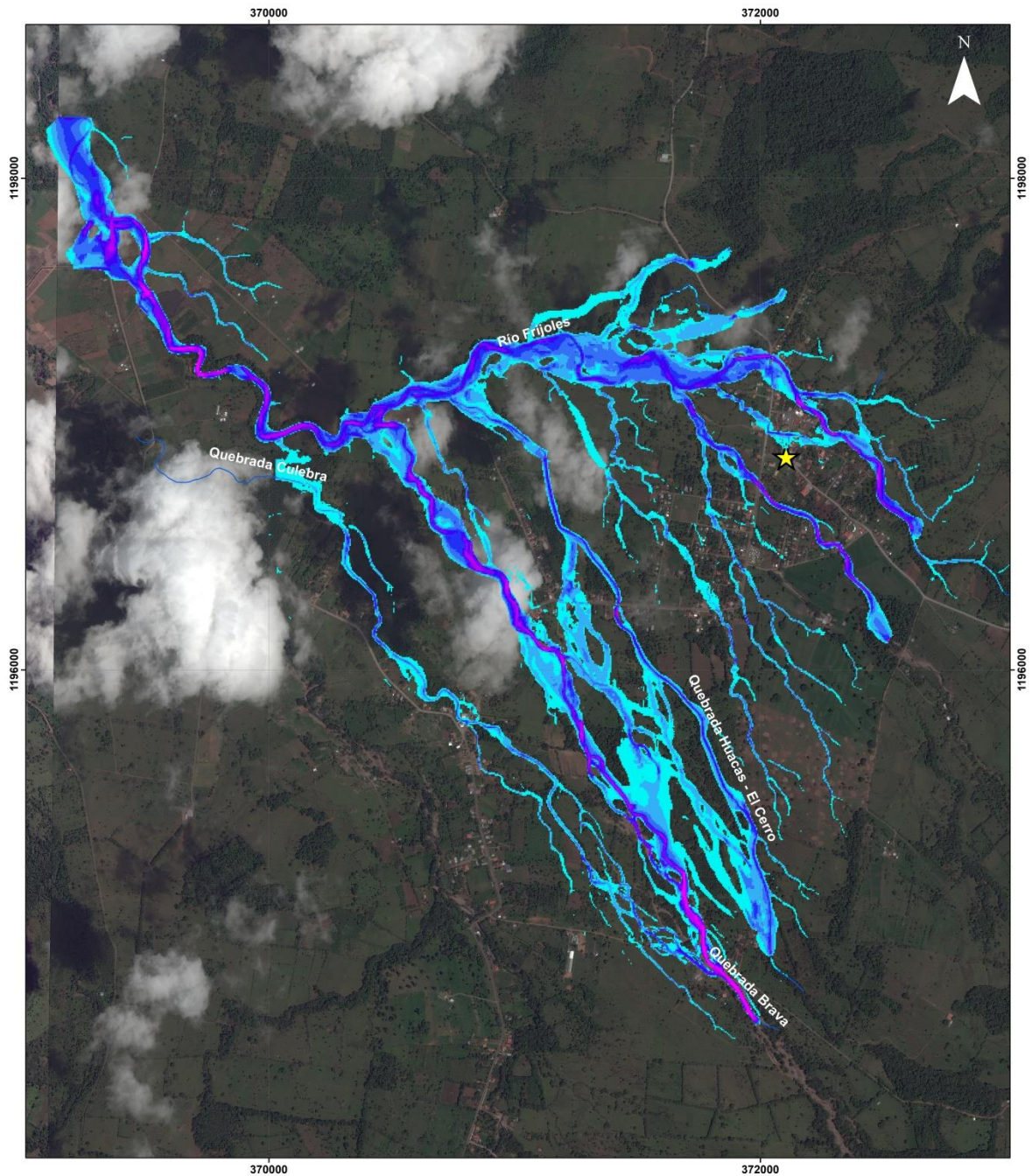


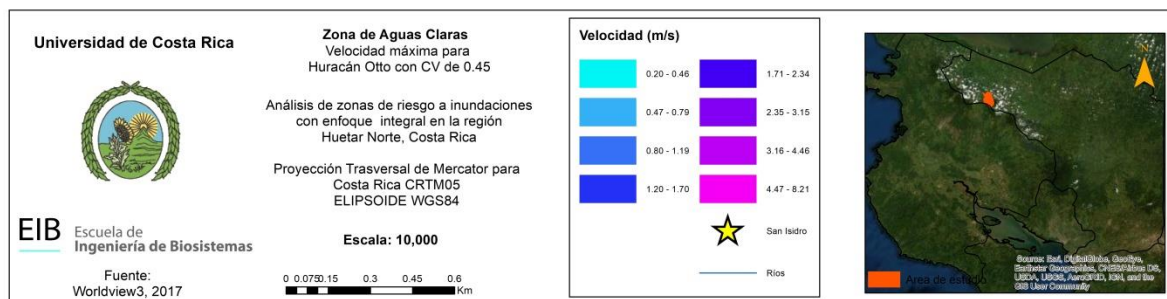
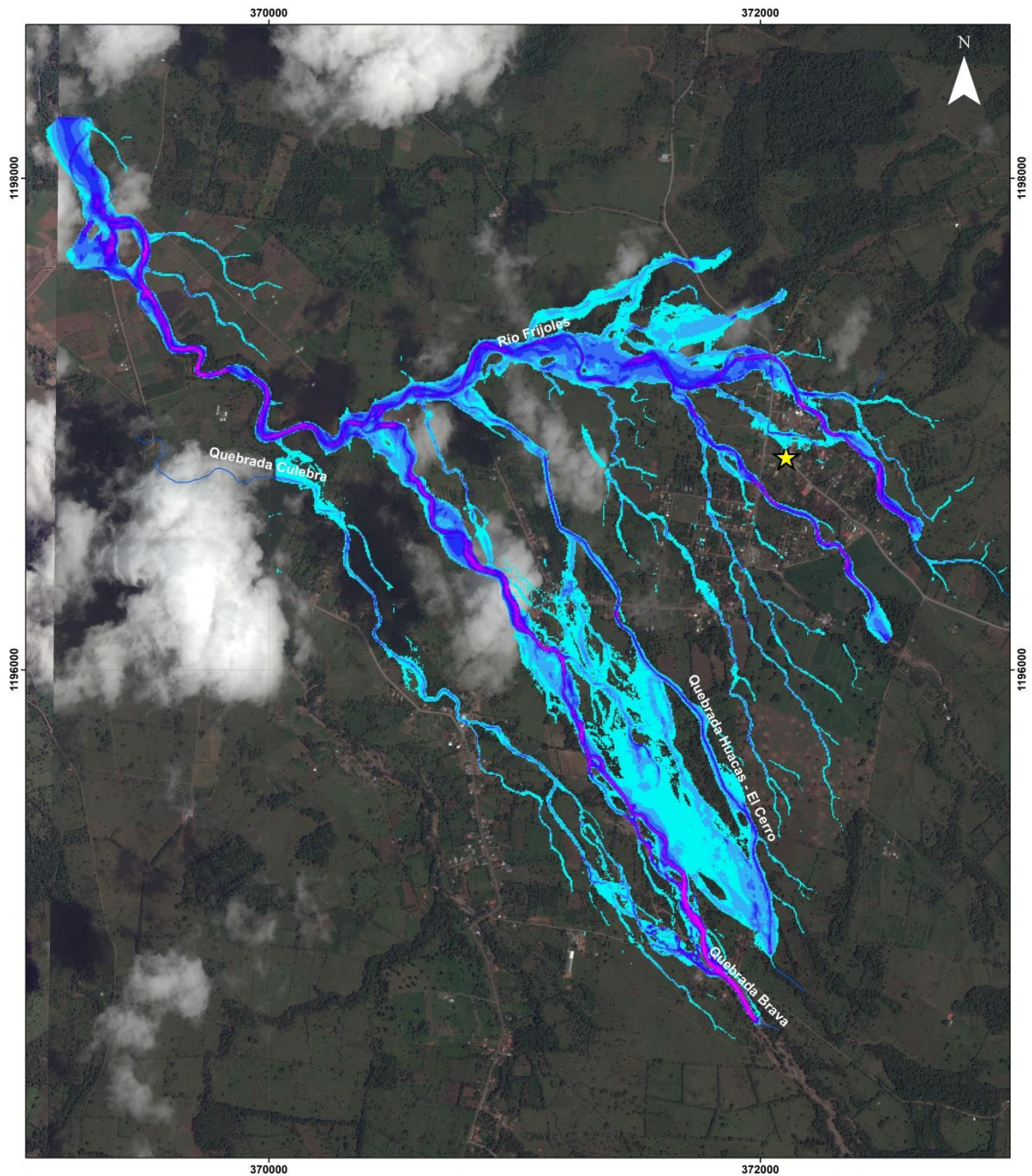


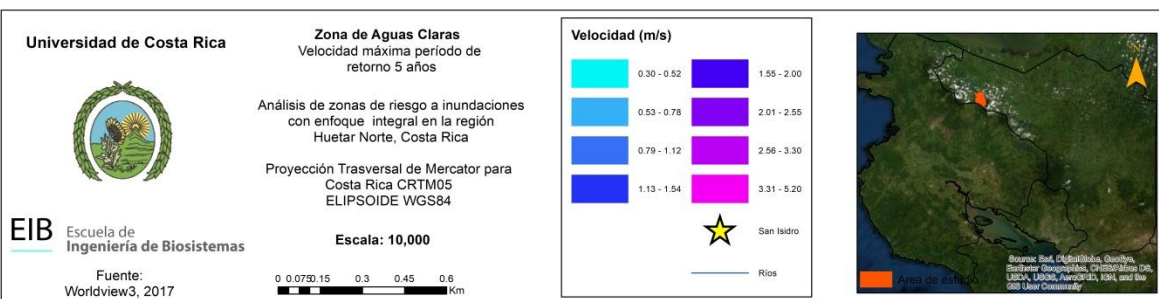
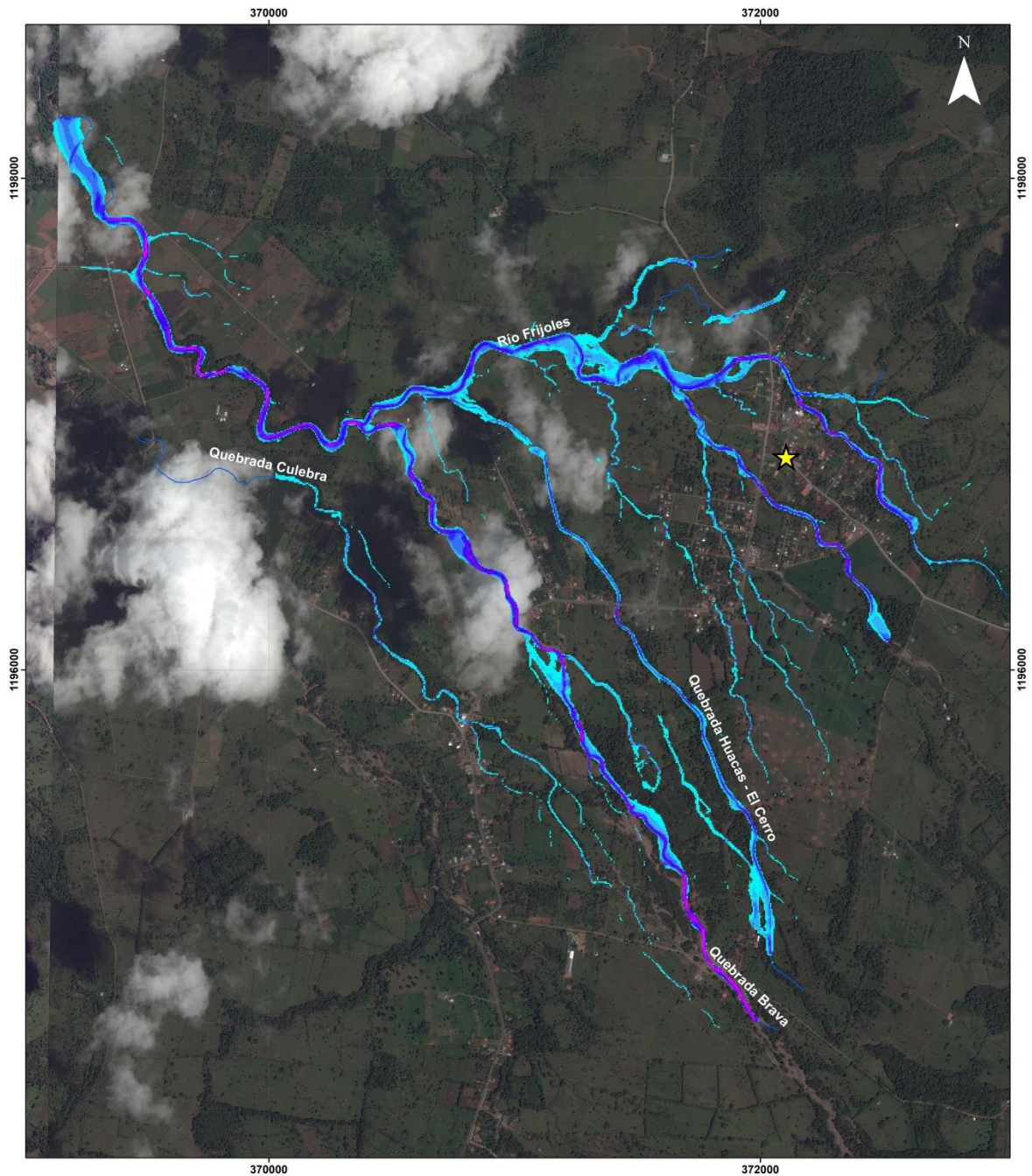


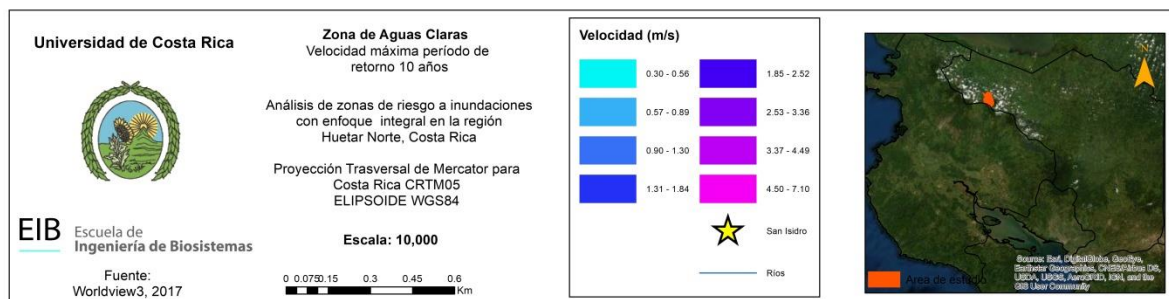
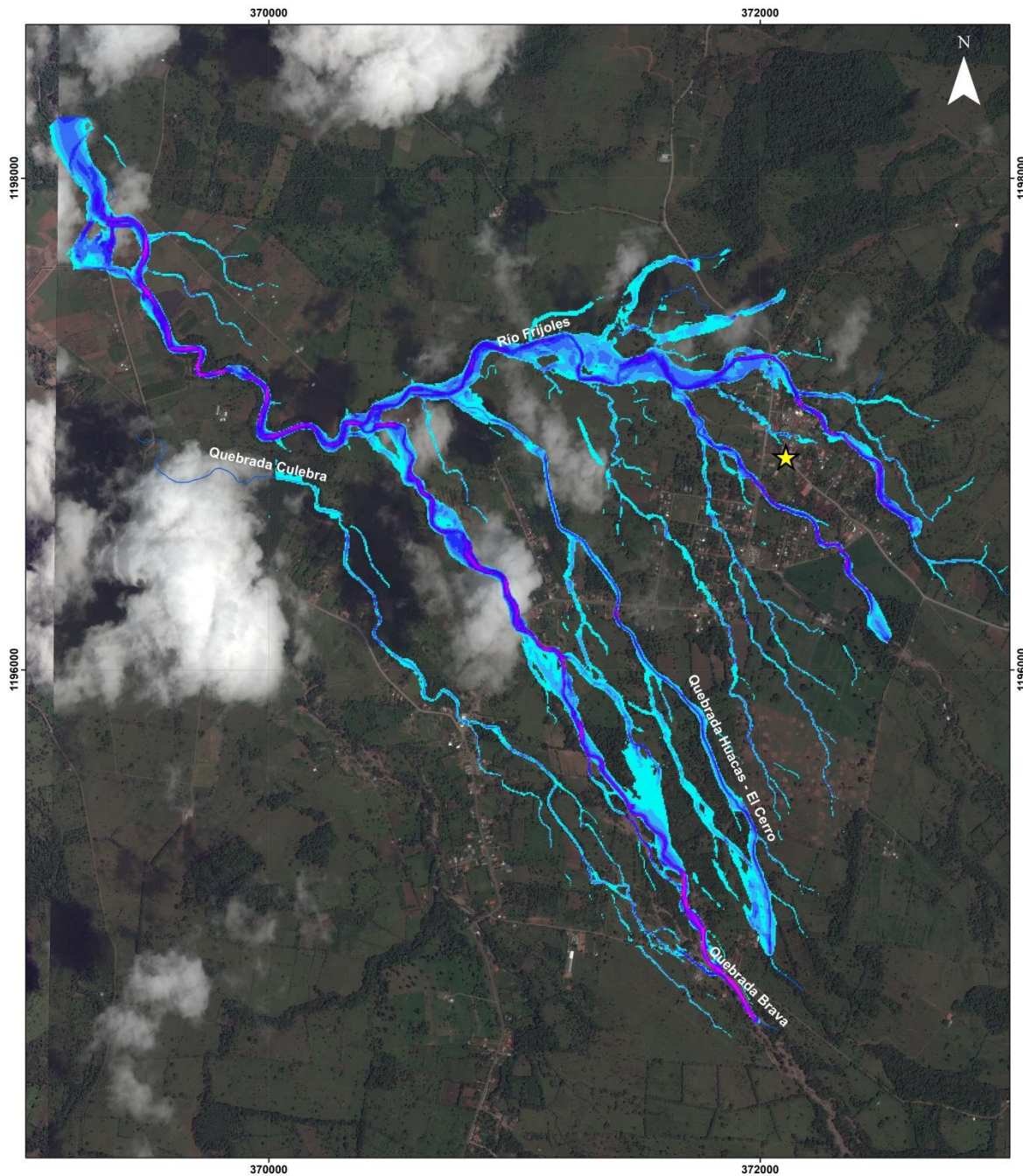
Apéndice J: Mapas de Velocidad Máxima de Inundación

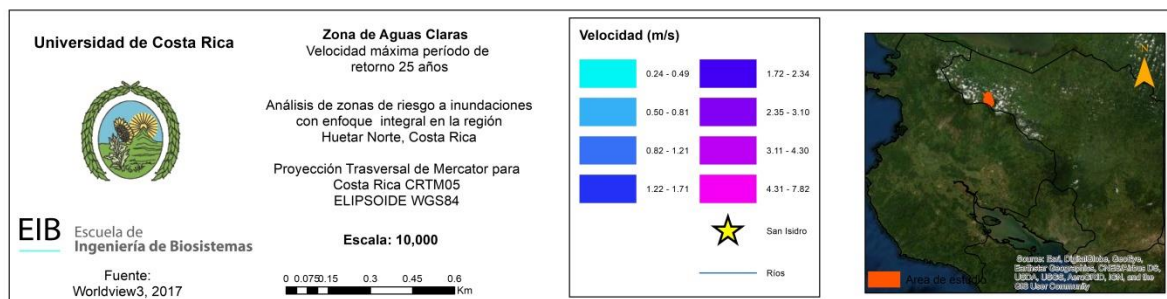
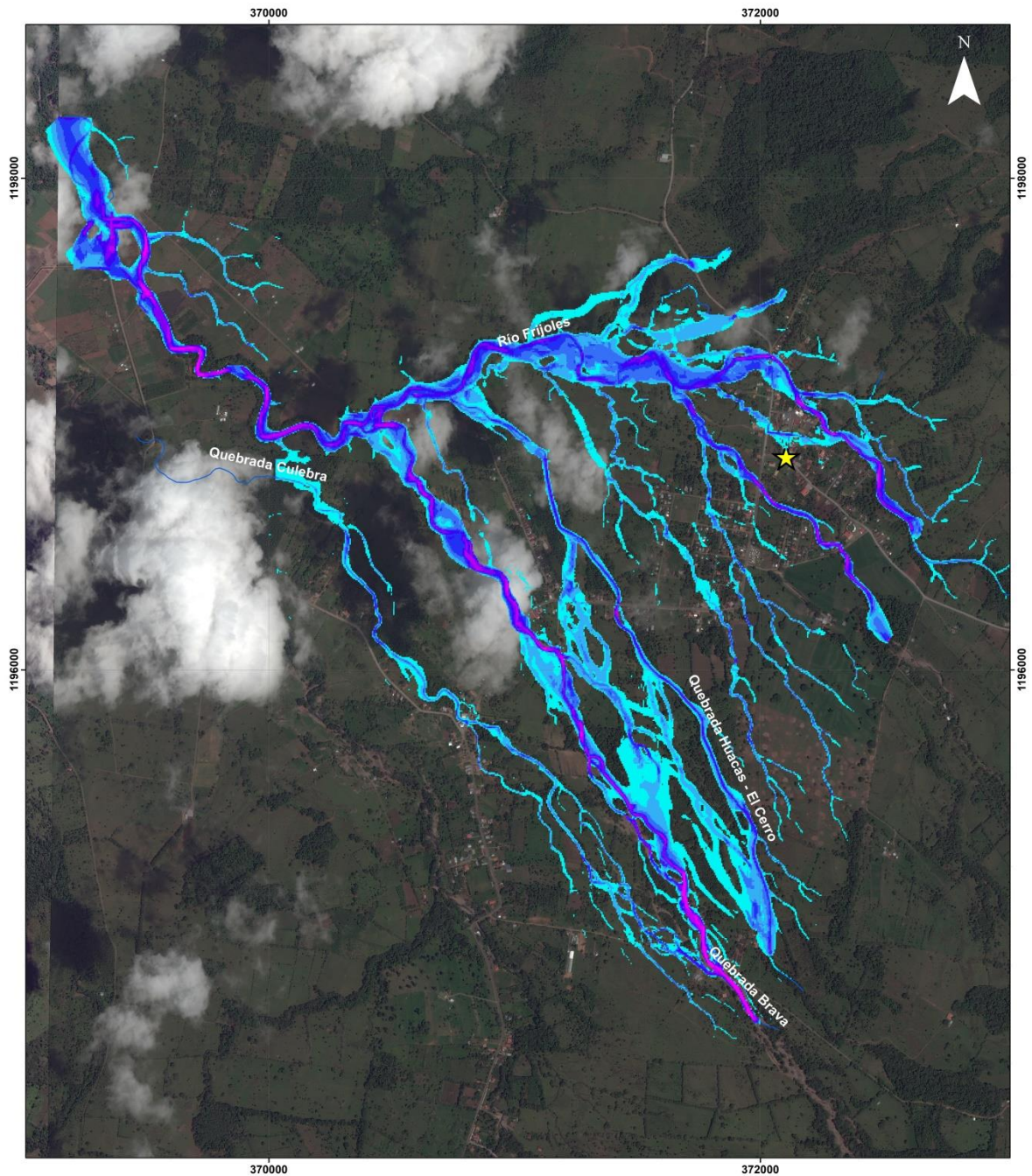


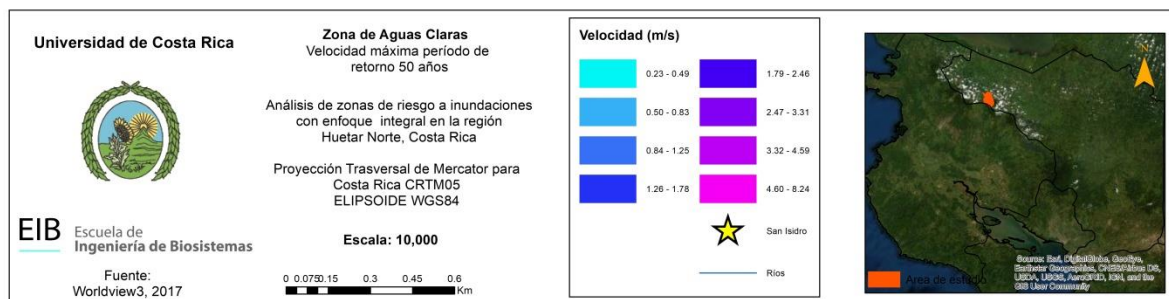


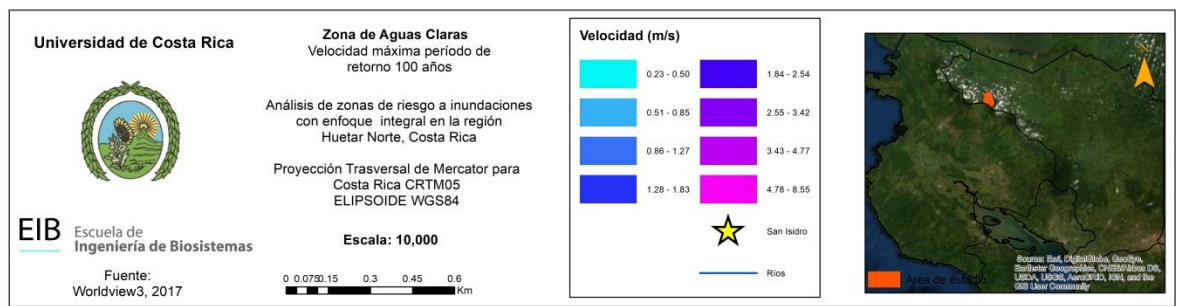












Apéndice K: Mapas de Amenaza de Inundación

