

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Topográfica

Informe de Proyecto de Investigación
Trabajo Final de Graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería Topográfica

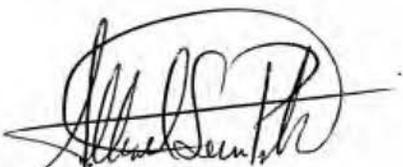
**Zonas de inundación en la Sede Rodrigo Facio de la Universidad
de Costa Rica producidas por la Quebrada Los Negritos**

Elena María Chaves Chaves
Carné: A81752

Octubre, 2018

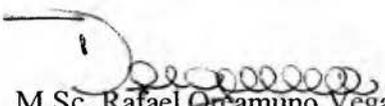
San Pedro, Costa Rica

Aprobación del Tribunal Evaluador del Trabajo Final de Graduación



Dr. Alberto Serrano Pacheco

Director del Trabajo Final de Graduación



M.Sc. Rafael Orcamuno Vega

Asesor del Trabajo Final de Graduación



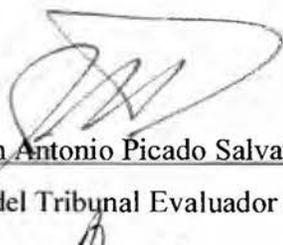
Lic. Carlos Eduardo Rueda Sáenz

Asesor del Trabajo Final de Graduación



M.S.c Jaime Garbanzo León

Miembro del Tribunal Evaluador del Trabajo Final de Graduación



M.S.c Juan Antonio Picado Salvatierra

Miembro del Tribunal Evaluador del Trabajo Final de Graduación



Elena María Chaves Chaves

Sustentante

Derechos de Propiedad Intelectual

La suscrita, **Elena María Chaves Chaves**, cédula 1-1449-0380, estudiante de la carrera de Bachillerato y Licenciatura en Ingeniería Topográfica de la Universidad de Costa Rica, con carné universitario A81752, manifiesto que soy autora del Trabajo Final de Graduación *Zonas de inundación en la Sede Rodrigo Facio de la Universidad de Costa Rica producidas por la Quebrada Los Negritos*, bajo la dirección del **Dr. Alberto Serrano Pacheco**, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, traspaso los derechos de utilización del presente Trabajo Final de Graduación a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Nota: Según la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos, No. 6683, en su artículo 7: “Toda persona puede utilizar, libremente, en cualquier forma y por cualquier proceso, las obras intelectuales pertenecientes al dominio público; pero si fueren de autor conocido, no podrá suprimirse su nombre en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales”. Además, como lo establece el artículo 13 de esta misma ley, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, siendo obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

Agradecimientos

Agradezco a todas aquellas personas que de una u otra manera se vieron envueltas en este proceso y en especial:

A mi familia, en particular a mi abuelita por los rezos.

A Mami por todo.

A mi hermana por todo.

Al Ing. Alberto Serrano por su valiosa asesoría y enseñanzas.

Al Ing. Rafael Oreamuno por sus aportes al documento.

Al Ing. Carlos Rueda por su colaboración en este proceso y por encaminarme a la docencia.

Al Ing. Jaime Garbanzo León por sus atinadas observaciones.

Al Ing. Juan Antonio Picado, por su apoyo y por confiar en mi para llevar a cabo un proyecto tan importante para la Escuela de Ingeniería Topográfica como lo es la autoevaluación.

A Carmencita, por su apoyo durante todo este tiempo.

A Rebe por su colaboración y en ocasiones correr conmigo.

A Juan McGregor y Saulo Richmond por su colaboración y amistad.

A mis compañeros y compañeras de la Escuela de Ingeniería Topográfica, Alonso Vega, Alex Cerdas, Gustavo Lara por su amistad y por hacer de la hora del almuerzo siempre todo un tema.

A Edson por su comprensión y apoyo.

A Niebla, Romero y Ticho por las ocasiones en que tuvieron que sacrificar su paseo matutino.

A las instituciones que me brindaron información para desarrollar el proyecto: IMN y UCR.

Contenido

Resumen	xvii
Capítulo I: Introducción	1
1.1 Área de Estudio	1
1.2 Justificación	2
1.3 Objetivos.....	8
1.2.1 Objetivo General	8
1.3.2 Objetivos Específicos.....	8
1.4 Delimitaciones.....	9
Capítulo II: Metodología	10
2.1 Descripción de los Instrumentos.....	12
Capítulo III: Marco Teórico	14
3.1 Características Físicas de una Cuenca	15
3.2 Características Climatológicas de una Cuenca	17
3.3 Características Geológicas de la Cuenca	19
3.4 Características de Infraestructura.....	19
3.5 Análisis Hidrológico	20
3.5.1 Análisis de frecuencia.....	20
3.5.2 Pruebas de bondad de Ajuste.....	23
3.5.3 Caudales Máximos	25
3.5.4 Método de Número de Curva de Escorrentía o SCS	26
3.5.5 Hidrograma adimensional del SCS	29
3.5.6 Modelos de transformación	31
3.5.7 Método Racional	33

3.5.8	Método Isócronas	36
3.6	Modelo Hidrológico e Hidráulico	37
3.6.1	Modelo Hidráulico HEC-RAS (Hydrological Engineering Center- River Analysis System).....	37
3.7	Zonas en riesgo de Inundación	39
Capítulo IV: Caracterización de la Zona de Estudio		41
4.1	Características físicas y morfológicas de la cuenca.....	41
4.1.1	Ubicación.....	41
4.1.2	Parámetros Físicos.....	42
4.1.3	Características de Relieve.....	43
4.2	Características Climatológicas.....	47
4.3	Características geológicas de la cuenca	48
4.4	Características Uso de suelo	48
Capítulo V: Análisis Hidrológico		51
5.1	Datos de precipitación	51
5.2	Análisis de frecuencia	51
5.3	Curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia	53
5.4	Caudales Máximos.....	56
5.4.1	Método Número de Curva de Escorrentía	56
5.4.2	Método Racional	64
5.4.3	Método Isócronas	67
5.4.4	Comparación métodos de cálculo hidrológico.....	70
Capítulo VI: Análisis Hidráulico		73
6.1	Resumen de resultados simulación en HEC-RAS.....	77
Capítulo VII: Zonas en riesgo de inundación		80

Capítulo XIII: Conclusiones y Recomendaciones.....	101
Bibliografía.....	105
Anexos.....	109

Índice de Cuadros

Cuadro 1: Períodos de retorno recomendados según estructura.....	26
Cuadro 2: Coordenadas del hidrograma adimensional.....	30
Cuadro 3: Distribución áreas de la cuenca según uso de suelo	49
Cuadro 4: Información sobre la estación meteorológica utilizadas en este proyecto.....	51
Cuadro 5: Comparación entre pruebas de bondad de ajuste Chi-cuadro y Smirnov-Komogorov.....	52
Cuadro 6: Valores de intensidad en mm/hr obtenidos a partir del análisis de frecuencia, según período de retorno e intervalo de tiempo para la estación CIGEFI.....	53
Cuadro 7: Valores de Intensidad obtenidos a partir de las curvas IDF según período de retorno para una duración de lluvia de 40 minutos.	56
Cuadro 8: Valores empleados para la aplicación del Método Número de Curva, según uso de suelo.....	58
Cuadro 9: Valores de precipitación total según período de retorno para una duración de la estación CIGEFI.	59
Cuadro 10: Valores de precipitación efectiva obtenidas para la estación Aranjuez según periodo de retorno.....	60
Cuadro 11: Caudales máximos obtenidos mediante el hidrograma efectivo para la Quebrada Los Negritos, según Período de Retorno	63
Cuadro 12: Coeficientes de escorrentía para la Quebrada Los Negritos, según periodo de retorno.....	64
Cuadro 13: Tiempos de concentración para la Quebrada Los Negritos, según método de cálculo.....	66
Cuadro 14: Caudales máximos obtenidos mediante el Método Racional para la Quebrada Los Negritos, según Período de Retorno	67
Cuadro 15: Caudales máximos obtenidos mediante el Método Isócronas para la Quebrada Los Negritos, según Período de Retorno	70
Cuadro 16: Cuadro comparativo caudales según método de cálculo	70
Cuadro 17: Parámetros empleados en la simulación de la Quebrada Los Negritos en el programa HEC-RAS.....	76

Cuadro 18:Profundidades máximas producto de la simulación de la Quebrada Los Negritos en el programa HEC-RAS según período de retorno	90
Cuadro 19:Velocidades máximas producto de la simulación de la Quebrada Los Negritos en el programa HEC-RAS según período de retorno	97
Cuadro 20:Velocidades de flujo según periodo de retorno para el sector 1 y 2 de la Quebrada Los Negritos.....	98
Cuadro 21:Parámetros estadísticos para datos de intensidad de lluvia en intervalos de 5 minutos para el período 2005-2015	109
Cuadro 22: Resultados aplicación de distribución Gumbel o Extrema Tipo I datos de intensidad de lluvia en intervalos de 5 minutos para el período 2005-2015	109
Cuadro 23:Parámetros estadísticos para datos de intensidad de lluvia en intervalos de 10 minutos para el período 2005-2015.....	110
Cuadro 24: Resultados aplicación de distribución Gumbel o Extrema Tipo I datos de intensidad de lluvia en intervalos de 10 minutos para el período 2005-2015	110
Cuadro 25:Parámetros estadísticos para datos de intensidad de lluvia en intervalos de 15 minutos para el período 2005-2015.....	111
Cuadro 26: Resultados aplicación de distribución Gumbel o Extrema Tipo I datos de intensidad de lluvia en intervalos de 15 minutos para el período 2005-2015	111
Cuadro 27:Parámetros estadísticos para datos de intensidad de lluvia en intervalos de 20 minutos para el período 2005-2015.....	112
Cuadro 28: Resultados aplicación de distribución Gumbel o Extrema Tipo I datos de intensidad de lluvia en intervalos de 20 minutos para el período 2005-2015	112
Cuadro 29:Parámetros estadísticos para datos de intensidad de lluvia en intervalos de 25 minutos para el período 2005-2015.....	113
Cuadro 30: Resultados aplicación de distribución Gumbel o Extrema Tipo I datos de intensidad de lluvia en intervalos de 25 minutos para el período 2005-2015	113
Cuadro 31:Parámetros estadísticos para datos de intensidad de lluvia en intervalos de 30 minutos para el período 2005-2015.....	114
Cuadro 32: Resultados aplicación de distribución Gumbel o Extrema Tipo I datos de intensidad de lluvia en intervalos de 30 minutos para el período 2005-2015	114
Cuadro 33: Datos iniciales para el cálculo de Curvas IDF.....	115

Cuadro 34: Cálculo de variables para el sistema de ecuaciones por Regresión Lineal Multivariable	116
Cuadro 35: Cálculo de intensidad para curvas IDF, según intervalo de tiempo.	120
Cuadro 36: Número de curva según grupo hidrológico de suelo. *	121
Cuadro 37: Clasificación hidrológica de suelos	122
Cuadro 38: Hidrograma Unitario para la Quebrada Los Negritos.....	123
Cuadro 39: Hidrograma de creciente de la Quebrada Los Negritos para T=25 años.....	124
Cuadro 40: Hidrograma de creciente de la Quebrada Los Negritos para T=50 años.....	125
Cuadro 41: Hidrograma de creciente de la Quebrada Los Negritos para T=100 años.....	126
Cuadro 42: Coeficientes de escorrentía para ser usados en el método racional	127
Cuadro 43: Obtención coeficientes de escorrentía para un periodo de retorno de 25 años en cuenca de la Quebrada Los Negritos	128
Cuadro 44: Obtención coeficientes de escorrentía para un periodo de retorno de 50 años en cuenca de la Quebrada Los Negritos	128
Cuadro 45: Obtención coeficientes de escorrentía para un periodo de retorno de 100 años en cuenca de la Quebrada Los Negritos	129
Cuadro 46: Prueba para cada Tiempo de Isocrónas.	130
Cuadro 47: Aplicación método Isocrónas	130
Cuadro 48: Coeficientes de n básica de Manning, según material en $m/s^{1/3}$	132
Cuadro 49: Coeficientes de ajuste para el cálculo de la n de Manning, según variante en $m/s^{1/3}$	133
Cuadro 50: Cálculo n de Manning, según variante en $m/s^{1/3}$	134
Cuadro 51: Resultados obtenidos en HEC-RAS para T= 25 años	161
Cuadro 52: Resultados obtenidos en HEC-RAS para T= 50 años	164
Cuadro 53: Resultados obtenidos en HEC-RAS para T= 100 años	167
Cuadro 54: Resultados de estructuras hidráulicas, obtenidos en HEC-RAS, para todos los periodos de retorno.....	170

Índice de gráficos

Gráfico 1: Hidrograma adimensional SCS para las coordenadas cuadro 2.....	31
Gráfico 2: Frecuencia de elevaciones en la cuenca de la Quebrada Los Negritos	45
Gráfico 3: Curva hipsométrica de la cuenca de la Quebrada Los Negritos.....	46
Gráfico 4: Perfil Longitudinal cauce Quebrada Los Negritos.....	47
Gráfico 5: Curvas Intensidad- Duración y Frecuencia (IDF) para la Quebrada Los Negritos basadas en datos de la estación CIGEFI.....	55
Gráfico 6: Hidrograma adimensional del SCS para la Quebrada Los Negritos	61
Gráfico 7: Hidrograma efectivo de creciente de la Quebrada Los Negritos para un periodo de retorno de 25 años.....	62
Gráfico 8: Hidrograma efectivo de creciente de la Quebrada Los Negritos para un periodo de retorno de 50 años.....	62
Gráfico 9: Hidrograma efectivo de creciente de la Quebrada Los Negritos para un periodo de retorno de 100 años.....	63
Gráfico 10: Área comprendida entre cada isócrona para la cuenca de la Quebrada Los Negritos	68

Índice de Figuras

Figura 1: Ubicación de Megaproyectos por desarrollar en la UCR	5
Figura 2: Objetos en La Quebrada Los Negritos.....	7
Figura 3: Gráfico comportamiento de la precipitación.....	27
Figura 4: Hidrograma Unitario Triangular	32
Figura 5: Ubicación cuenca de la Quebrada los Negritos	41
Figura 6: Relieve Cuenca Quebrada los Negritos	43
Figura 7: Modelo de elevaciones de Cuenca Quebrada los Negritos	44
Figura 8: Mapa Uso de suelo cuenca Quebrada Los Negritos	50
Figura 9: Mapa Isocrónas Quebrada los Negritos	69
Figura 10: Vista en planta modelo Quebrada Los Negritos en HEC-RAS	74
Figura 11: Cauce de la Quebrada Los Negritos.....	75
Figura 12: Vista en perfil simulación HEC-RAS para periodo de retorno de 25 años.....	77
Figura 13: Vista en perfil simulación HEC-RAS para periodo de retorno de 50 años.....	78
Figura 14: Vista en perfil simulación HEC-RAS para periodo de retorno de 100 años.....	78
Figura 15: Vista en perfil simulación HEC-RAS para todos los periodos de retorno.....	79
Figura 16: Exportación datos del HEC -RAS, al programa ArcGIS	80
Figura 17: Importación datos del HEC -RAS, al programa ArcGIS	81
Figura 18: Importación datos del HEC -RAS, al programa ArcGIS	81
Figura 19: Herramientas HEC-GeoRAS	81
Figura 20: Mapa de inundación para los periodos de retorno de 100 años.	82
Figura 21: Mapa de profundidad a partir de la simulación en HEC-RAS finca 1, para un periodo de retorno de 25 años.....	84
Figura 22: Mapa de profundidad a partir de la simulación en HEC-RAS finca 2 (Ciudad de la Investigación), para un periodo de retorno de 25 años.....	85
Figura 23: Mapa de profundidad a partir de la simulación en HEC-RAS finca 1, para un periodo de retorno de 50 años.....	86
Figura 24: Mapa de profundidad a partir de la simulación en HEC-RAS finca 2 (Ciudad de la Investigación), para un periodo de retorno de 50 años.....	87

Figura 25: Mapa de profundidad a partir de la simulación en HEC-RAS finca 1, para un periodo de retorno de 100 años.....	88
Figura 26: Mapa de profundidad a partir de la simulación en HEC-RAS finca 2 (Ciudad de la Investigación), para un periodo de retorno de 100 años	89
Figura 27: Mapa de velocidad a partir de la simulación en HEC-RAS finca 1, para un periodo de retorno de 25 años.....	91
Figura 28: Mapa de velocidad a partir de la simulación en HEC-RAS finca 2 (Ciudad de la Investigación), para un periodo de retorno de 25 años.....	92
Figura 29: Mapa de velocidad a partir de la simulación en HEC-RAS finca 1, para un periodo de retorno de 50 años.....	93
Figura 30: Mapa de velocidad a partir de la simulación en HEC-RAS finca 2 (Ciudad de la Investigación), para un periodo de retorno de 50 años.....	94
Figura 31: Mapa de velocidad a partir de la simulación en HEC-RAS finca 1, para un periodo de retorno de 100 años.....	95
Figura 32: Mapa de velocidad a partir de la simulación en HEC-RAS finca 2 (Ciudad de la Investigación), para un periodo de retorno de 100 años.....	96
Figura 33: Mapa de ubicación puente en Sector 1.....	99
Figura 34: Mapa de ubicación puente en Sector 2.....	100
Figura 35: Secciones transversales T=25, 50 y 100 años.....	135
Figura 36: Secciones transversales T=25, 50 y 100 años.....	136
Figura 37: Secciones transversales T=25, 50 y 100 años.....	137
Figura 38: Secciones transversales T=25, 50 y 100 años.....	138
Figura 39: Secciones transversales T=25, 50 y 100 años.....	139
Figura 40: Secciones transversales T=25, 50 y 100 años.....	140
Figura 41: Secciones transversales T=25, 50 y 100 años.....	141
Figura 42: Secciones transversales T=25, 50 y 100 años.....	142
Figura 43: Secciones transversales T=25, 50 y 100 años.....	143
Figura 44: Secciones transversales T=25, 50 y 100 años.....	144
Figura 45: Secciones transversales T=25, 50 y 100 años.....	145
Figura 46: Secciones transversales T=25, 50 y 100 años.....	146
Figura 47: Secciones transversales T=25, 50 y 100 años.....	147

Figura 48:Secciones trasversales T=25, 50 y 100 años	148
Figura 49:Secciones trasversales T=25, 50 y 100 años	149
Figura 50:Secciones trasversales T=25, 50 y 100 años	150
Figura 51:Secciones trasversales T=25, 50 y 100 años	151
Figura 52:Secciones trasversales T=25, 50 y 100 años	152
Figura 53:Secciones trasversales T=25, 50 y 100 años	153
Figura 54:Secciones trasversales T=25, 50 y 100 años	154
Figura 55:Secciones trasversales T=25, 50 y 100 años	155
Figura 56:Secciones trasversales T=25, 50 y 100 años	156
Figura 57:Secciones trasversales T=25, 50 y 100 años	157
Figura 58:Secciones trasversales T=25, 50 y 100 años	158
Figura 59:Secciones trasversales T=25, 50 y 100 años	159
Figura 60:Secciones trasversales T=25, 50 y 100 años	160

Índice de Anexos

Anexo 1: Cálculos análisis de frecuencia	109
Anexo 2: Cálculos curvas Intensidad – Duración -Frecuencia (IDF)	115
Anexo 3: Número de curva según grupo hidrológico de suelo para el método SCS.	121
Anexo 4: Clasificación hidrológica de los suelos.....	122
Anexo 5: Cálculos hidrogramas	123
Anexo 6: Coeficiente de Escorrentía	127
Anexo 7: Método Isocrónas.....	130
Anexo 8: Coeficiente de Rugosidad.....	132
Anexo 9: Principales resultados HEC-RAS	135

Abreviaturas

CRTM05: Costa Rica Transversal Mercator 2005

GAM: Gran Área Metropolitana

INVU: Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo

OUGAM: Observatorio Urbano de la Gran Área Metropolitana

ProDUS: Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible

UCR: Universidad de Costa Rica

CIGEFI: Centro de Investigaciones Geofísicas.

OEPI: Oficina Ejecutora del Programa de Inversiones de la Universidad de Costa Rica

SCS: Servicio de Conservación de Suelos

NRSC: Servicio de Conservación de Recursos Naturales

SNIT: Sistema Nacional de Información Territorial

IMN: Instituto Meteorológico Nacional

IDF: Curvas Intensidad, Duración y Frecuencia

Cita bibliográfica

Chaves Chaves, Elena. (2018). *Zonas de inundación en la Sede Rodrigo Facio de la Universidad de Costa Rica producidas por la Quebrada Los Negritos* Trabajo Final de Graduación. Escuela de Ingeniería Topográfica. Universidad de Costa Rica. Costa Rica. xvii, 114, [26]h, ils. col. – 70 refs.

Director del Trabajo

Ing. Alberto Serrano Pacheco, Doctor.

Resumen

La Universidad de Costa Rica constituye la mayor y más importante casa de enseñanza superior en el país. Su sede principal (Rodrigo Facio) se encuentra ubicada en el cantón de Montes de Oca y es atravesada por la Quebrada Los Negritos desde la Ciudad de la Investigación hasta la Facultad de Derecho existiendo una serie de edificaciones aledañas a ella. Por lo anterior es importante conocer el comportamiento del flujo de agua dentro las instalaciones universitarias. El principio general de este proyecto es establecer las zonas de inundación producidas por de la Quebrada Los Negritos en el tramo dentro del campus. Para lo cual es necesario realizar una caracterización completa de la zona de los aspectos físicos, climáticos, geológicos, antropológicos, hidrológicos e hidráulicos que inciden directamente en la zona. La investigación consiste en tres etapas principales: caracterización de la zona, análisis hidrológico y análisis hidráulico.

Con respecto a la caracterización de la zona de estudio, esta consistió en recopilación de información bibliográfica y de campo que permitiera su descripción bajo los condiciones físicas, climáticas, geológicas y de uso de suelo de la cuenca de la Quebrada Los Negritos.

Referente al análisis hidrológico primeramente se aplicó la distribución Gumbel o Extrema Tipo I a los datos de precipitación, ya que al ser sometida a la prueba de bondad de ajuste Smirnov-Kolmogorov obtuvo buena confiabilidad. Posteriormente, por medio de regresión

lineal multivariable se construyeron las curvas de Intensidad-Duración y Frecuencia (IDF) para la zona de estudio, y finalmente se obtuvieron los caudales máximos para la Quebrada Los Negritos por tres métodos de cálculo a saber: racional, número de curva de escorrentía, e isocrónas para los periodos de retorno de 25, 50 y 100 años, con el fin de poder efectuar una comparación entre los valores obtenidos para cada caso y determinar así los que mejor se ajusten a la zona de estudio. Se decide utilizar los valores de caudal de 72,7 m³/s, 92,1 m³/s y 118,0 m³/s para 25, 50 y 100 años respectivamente, generados mediante el método racional.

Por su parte, para el análisis hidráulico se utilizó la herramienta computacional HEC-RAS, la cual realiza una simulación basada en las condiciones físicas e hidrológicas de la zona generando así los insumos necesarios para la elaboración de los mapas de inundación. La representación gráfica de los resultados obtenidos, producto de esta investigación, se generaron con la herramienta GEO-RAS que funciona como un complemento a instalar en ArcGIS para que este último pueda procesar los datos generados en HEC-RAS de manera automatizada.

Finalmente, se obtienen los mapas de profundidad y velocidad del flujo de la Quebrada Los Negritos para los periodos de retorno de 25, 50 y 100 años.

Palabras clave:

ANÁLISIS HIDROLÓGICO; ANÁLISIS HIDRÁULICO; CAUDAL MÁXIMO; MÉTODO RACIONAL; MÉTODO NÚMERO DE CURVA DE ESCORRENTÍA; MÉTODO ISOCRÓNAS; ZONAS DE INUNDACIÓN.

Capítulo I: Introducción

1.1 Área de Estudio

El área de estudio principal sobre la cual versará esta investigación es la hidrología e hidráulica, ya que se pretende determinar las zonas de inundación de la Quebrada Los Negritos, en el tramo comprendido entre las coordenadas CRTM05 (494093,182m, 1098858,515m) y (495482,824m, 1098905,615m), para lo que es indispensable establecer los caudales máximos que se puedan generar en los periodos de retorno de 25, 50 y 100 años establecidos para esta investigación. Adicionalmente, es necesario identificar muy bien el lugar de estudio, siendo el área de la topografía muy importante, ya que debe de efectuarse una serie de mediciones topográficas para obtener las coordenadas de estos sitios.

Cabe destacar que, para el desarrollo de esta investigación, se incluyen otras áreas de estudio, tales como: geología, ordenamiento territorial, estadística, cartografía. Estas áreas sirven de base o complemento de la hidrología e hidráulica y que contribuyen a lograr el objetivo general fijado.

1.2 Justificación

El desarrollo urbano, en el que se encuentra sometido la Gran Área Metropolitana (GAM) en general donde el cantón de Montes de Oca se encuentra inmerso, lo que tiene una incidencia directa en los cuerpos de agua cercanos. Este tema es antiguo y “*se remonta a la época de la colonia cuando aparecen: San José en el año 1737, Alajuela en 1782, Heredia en 1714 y Cartago en 1575*” (Mora Ramírez, 2003).

A raíz del desordenado crecimiento poblacional natural de las ciudades, mediante el Decreto Ejecutivo 13583 del Instituto Nacional de Vivienda, publicado en el diario oficial La Gaceta del 18 de mayo de 1982, se establece el Plan Regional Metropolitano y se delimita el GAM, la cual se ubica entre las *coordenadas planas 192000 a 238000 norte y 485000 a 562000 este* (Mora Ramírez, 2003) y comprende *3 municipios de Alajuela, 6 de Cartago, 9 de Heredia y 13 de San José, un total de 31 cantones, que incluyen totalmente o parcialmente 152 distritos.* (Unidad de Planificación Territorial, INVU, 2011). Dentro de las propuestas incluidas en el Plan Regional Metropolitano, de interés para esta investigación destacan las siguientes:

- Desarrollar preferentemente las ciudades y centros poblados en los alrededores de San José dentro de un ordenamiento jerárquico aprovechando al máximo la infraestructura y servicios existentes.
- Promover una mayor densidad de población en las áreas destinadas a vivienda, con objeto de recortar distancias, economizar en gastos de infraestructura y evitar la dispersión de actividades urbanas sobre tierras agrícolas.
- Desalentar el crecimiento urbano y la deforestación en las alturas de San José y alrededores, con el objeto de proteger los acuíferos y evitar inundaciones en las partes bajas.
- Identificar y reservar áreas destinadas a la eliminación de desechos sólidos y tratamiento de aguas cloacales. (Mora Ramírez, 2003)

Es importante destacar que dado como objeto de investigación la Quebrada Los Negritos, el cantón de interés es Montes de Oca mencionado en el Decreto Ejecutivo 13583 del Instituto Nacional de Vivienda como perteneciente al GAM incluyendo completamente los distritos de

San Pedro, Sabanilla y Mercedes. En el caso del distrito de San Rafael *“parte de este distrito se encuentra dentro del anillo de contención.”* (Garbanzo León & Vargas Vargas, 2011)

Como parte del Plan Regional Metropolitano, se delimitó el *“Área para Desarrollo Urbano, cuyo límite se denominó como “anillo de contención” con un área interior de 44.200 ha y una Zona Especial de Protección con 152.500ha donde se localiza la zona con restricciones urbanas.”* (Mora Ramírez, 2003). Dicho anillo de contención constituye un mecanismo para controlar el desarrollo urbano y proteger zonas vulnerables o de importancia forestal e hídrica. Ahora bien, con el objetivo de subsanar el déficit habitacional generado por el crecimiento de las ciudades, dentro de la GAM, en el 2001 mediante del Decreto 29415 MP-MIVAH-MINAE se permitió la construcción en zonas de baja aptitud agrícola o forestal, siempre y cuando no tuviesen problemas de estabilización de suelos, problemas de escorrentía, o que afecten zonas acuíferas. Esto a pesar de la delimitación del anillo de contención urbano viéndose inmersa en esta situación la cuenca de la Quebrada Los Negritos.

Por otro lado, según datos del Censo Nacional, en el año 2000 existían un total de 16032 viviendas en el cantón de Montes de Oca. Mientras que para el 2011 se contabilizaban ya 18260 (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2010); es decir, se presentó un aumento del 14%, lo cual evidencia un crecimiento habitacional importante. Aunado a lo anterior, de acuerdo con datos generados por el Observatorio Urbano de la Gran Área Metropolitana (OUGAM) el cual se encuentra vinculado al Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible (ProDUS), en términos de área, en el cantón de Montes de Oca para el año 2000 tenía unos 205454 metros cuadrados destinados a residencias mientras que ya para el 2011 se registraron 322842 metros cuadrados (Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible, 2016), teniéndose un incremento de un 57%.

Continuando con la información proveniente del Censo Nacional, en el año 2000 existían un total de 8746 viviendas en el distrito de San Pedro. Para el año 2011 el dato aumentó a 9644, es decir se registró un incremento del 10% (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2010). Visto desde otra perspectiva, 98285 metros cuadrados fueron destinados a uso residencial en el año 2000 en el distrito de San Pedro, según datos del OUGAM. Mientras que para el 2011

esta cifra aumentó a 129604 metros cuadrados, es decir un incremento del 32%. (Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible, 2016)

Ahora bien, Montes de Oca alberga una cantidad importante de servicios entre los que se encuentran centros educativos a nivel de primaria, secundaria y universitarios, en donde destacan tres de las más importantes universidades a nivel de país: la Universidad de Costa Rica (UCR), la Universidad Estatal a Distancia (UNED) y la Universidad Latina de Costa Rica; las cuales constituyen instituciones de gran envergadura en cuanto a sus construcciones y crecimiento poblacional. Con respecto a los datos que muestra el OUGAM, el cantón presenta un aumento importante en infraestructura destinada a prestación de servicios teniéndose en el 2000 un total de 19046 metros cuadrados aumentado a 74084 metros cuadrados en 2011 (Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible, 2016), es decir, un aumento de casi el triple de lo existente en el 2000.

Para el caso particular del distrito de San Pedro en el año 2000 se contaban con 15268 metros cuadrados de construcciones destinadas a servicios. Mientras que para el 2011 se contabilizan 52595 metros cuadrado. La anterior implica un crecimiento de 37327 metros cuadrados (Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible, 2016), constituyendo un incremento de más del 200%.

Tal desarrollo urbano gestado en el cantón de Montes de Oca, ha producido un aumento en la impermeabilización de los suelos a raíz del crecimiento en construcciones que han disminuido la cantidad de área verde o suelos de infiltración natural. Esta situación tiene una incidencia directa en el volumen de escorrentía, al momento en que se dan las lluvias, provocando que gran cantidad de agua se dirija directamente a las Quebradas o ríos cercanos aumentando así el caudal de los mismos y con esto acrecentando el riesgo de inundación. A dicha situación la Universidad de Costa Rica no escapa, tal y como se menciona en el periódico La Nación versión digital:

En un plazo de cinco años, la Universidad de Costa Rica (UCR), por medio de un fideicomiso, invertirá unos \$95 millones en la construcción de ocho edificios. La nueva infraestructura albergará los edificios para las facultades de Ciencias Sociales, Derecho e Ingenierías, así como residencias estudiantiles, clínicas odontológicas, una biblioteca y un centro especializado en artes. “También se incluyen proyectos para tres edificios de parqueos que puedan incluir 500 vehículos cada uno; queremos liberar las calles del campus y las externas”, comentó Eduardo Rojas, director de Megaproyectos de la UCR. (La Nación, 2012)

En la figura 1 se muestra la ubicación que tendrán estos megaproyectos dentro de la Sede Rodrigo Facio y Finca 2.

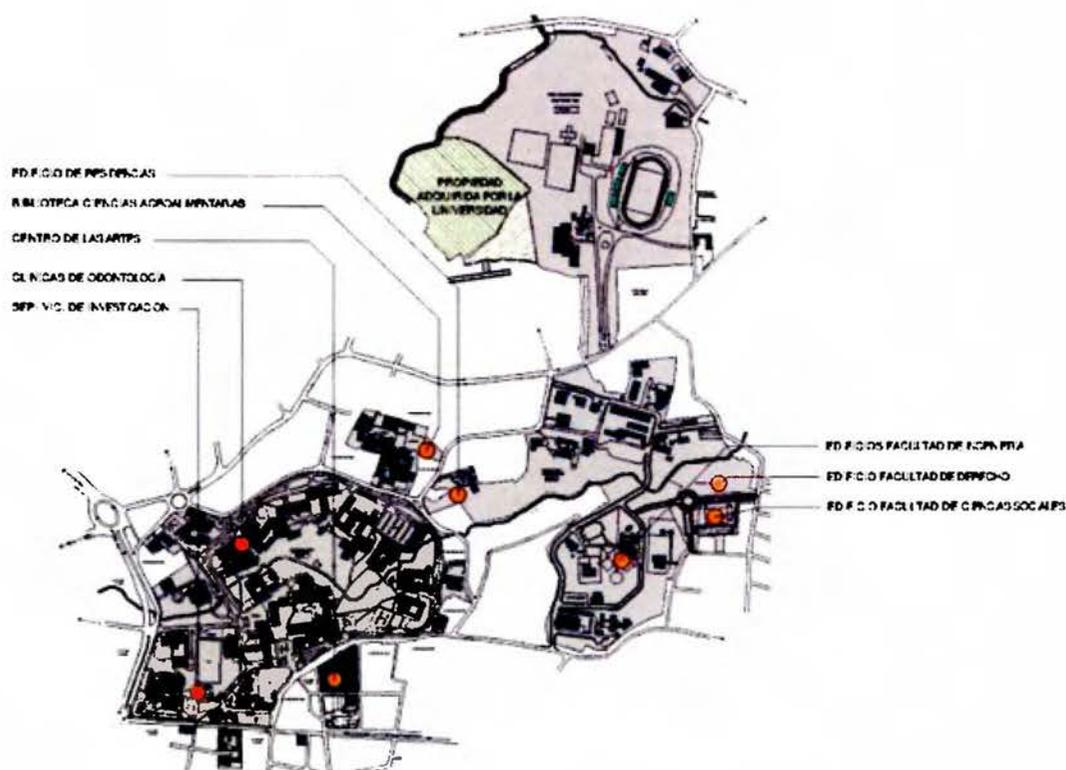


Figura 1: Ubicación de Megaproyectos por desarrollar en la UCR

Fuente: www.ucr.ac.cr, (2011)

En el año 2014 se concluyó con la construcción de la torre de parqueos ubicada en la Ciudad de la Investigación, tal y como se indica en el diario digital crhoy.com el día 12 de febrero “la torre de parqueo de la Universidad de Costa Rica (UCR) ubicada en la Ciudad de la Investigación, en Finca 2, estará habilitada para el inicio del próximo semestre lectivo.”

(crhoy.com, 2014). También se culminó con la construcción del Edificio de Ciencias Sociales, ubicado en Finca 2,

La Universidad de Costa Rica (UCR) inauguró esta mañana el nuevo edificio de la Facultad de Ciencias Sociales, a la espera de que 9.000 estudiantes abran las puertas de sus aulas en el año 2015. Esta edificación de 25.000 metros cuadrados es el resultado de un financiamiento vía fideicomiso con el Banco de Costa Rica firmado desde el 2011. (El Financiero, 2014)

De todo lo expuesto, referente al desarrollo urbano, se puede notar un aumento del mismo en el cantón de Montes de Oca. Este está focalizado en el distrito de San Pedro, de donde la Universidad de Costa Rica no es ajena ya que cuenta con ocho megaproyectos de los cuales, para el 2018, algunos ya fueron concluidos tal es el caso del edificio de la Facultad de Ingeniería, Derecho, Informática, Ciencias Básicas, las torres de parqueo, el Centro Infantil Laboratorio, entre otros que pronto serán finalizados, lo que sin duda refuerza el crecimiento urbano de la zona e impacta en alguna medida el medio ambiente que los rodea, siendo que la mayoría, de ellos se encuentran inmersos dentro de la cuenca de la Quebrada Los Negritos lo que eventualmente pudiese generar inconvenientes con el flujo de agua.

Sumando a lo anteriormente expuesto, existe otro componente a tomar en cuenta y es la problemática educacional en donde se depositan los materiales de desecho al río, Quebrada o lago más cercano; la presencia de objetos de gran tamaño dentro del cauce de la Quebrada Los Negritos podría ocasionar el colapso de las estructuras de alcantarillado, inundaciones y problemas en los puentes que se encuentran dentro del Campus Universitario. En la Figura 2, se muestra un claro ejemplo de dicha situación. La imagen izquierda fue tomada a un costado del comedor estudiantil, donde anteriormente se ubicaba un puente. Mientras que la otra fue realizada desde el puente que se ubica frente al comedor estudiantil entre la Facultad de Ciencias Económicas e Informática.



Figura 2: Objetos en la Quebrada Los Negritos

Fuente: Chaves Chaves E, (2014)

Lo anterior evidencia una necesidad de definir las zonas de inundación de la Quebrada Los Negritos dentro del Campus, las cuales deben ser debidamente delimitadas e identificadas mediante mapas con el fin de prevenir daños posteriores en el alcantarillado, puentes, vehículos y edificios universitarios aledaños y eventualmente podría convertirse en un insumo para una mejor planificación institucional.

1.3 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Establecer las zonas de inundación en el tramo comprendido entre las coordenadas CRTM05 (494093,182m, 1098858,515m) y (495482,824m, 1098905,615m) de la Quebrada Los Negritos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Describir la zona de estudio, de acuerdo con sus características físicas y morfológicas de la cuenca de la Quebrada Los Negritos.
- Generar un modelo digital del terreno de la cuenca de la Quebrada Los Negritos dentro del tramo comprendido entre las coordenadas CRTM05 (494093,182m, 1098858,515m) y (495482,824m, 1098905,615m).
- Determinar el uso de suelo en la cuenca de la Quebrada Los Negritos.
- Caracterizar los eventos extremos en la cuenca de la Quebrada Los Negritos.
- Comparar distintos métodos de cálculo hidrológico a saber: el método racional, número de curva de escorrentía e isócronas.
- Estimar el caudal máximo por los diferentes métodos hidrológicos utilizados para los períodos de retorno de 25, 50 y 100 años de período de retorno.
- Realizar un análisis hidráulico para definir las zonas de inundación en el tramo comprendido entre las coordenadas CRTM05 (494093,182m, 1098858,515m) y (495482,824m, 1098905,615m), para los períodos de retorno de 25, 50 y 100 años.
- Confeccionar los mapas de zonas de inundación para los períodos de retorno de 25, 50 y 100 años del cauce de la Quebrada Los Negritos en el tramo comprendido entre las coordenadas CRTM05 (494093,182m, 1098858,515m) y (495482,824m, 1098905,615m).

1.4 Delimitaciones

El problema que se desea abordar en esta investigación es el desconocer zonas de inundación en el tramo comprendido entre las coordenadas CRTM05 (494093,182m, 1098858,515m) y (495482,824m, 1098905,615m). de la Quebrada Los Negritos.

El objetivo de esta investigación se centra en la Sede Universitaria Rodrigo Facio ubicada en San Pedro de Montes de Oca en la provincia de San José, sin embargo, el comportamiento del flujo en este tramo se ve influenciado por factores y condiciones diversas que se den aguas arriba, por lo tanto para llevar a cabo la delimitación de las zonas de inundación en el área de estudio es necesario analizar las características físicas y morfológicas, así como las tormentas de lluvia que afectan a la cuenca como un todo.

Por lo anterior es que la unidad geográfica de estudio para esta investigación es la cuenca de la Quebrada Los Negritos, en cuanto a las características físicas, morfológicas y eventos extremos se refiere. Para el caso específico de la delimitación de zonas de inundación estas quedan delimitadas al espacio comprendido entre el intervalo de coordenadas (494093,182m, 1098858,515m) y (495482,824m, 1098905,615m), es decir los puntos de control.

Capítulo II: Metodología

La metodología que se empleó en esta investigación se dividió en varias etapas, las cuales se describen a continuación.

a) Recopilación de la información

En este punto se recabó toda la información, bibliográfica y de campo, pertinente para llevar a cabo esta investigación referente a geología, vegetación, infraestructura y precipitación máxima diaria de la estación meteorológica propiedad del Instituto Meteorológico Nacional:

- CIGEFI: Latitud 09°56'11"N, Longitud 84° 02' 43'O, Altitud 1210 m.s.n.m.

b) Mediciones topográficas

Se utilizó la información topográfica suministrada por la Oficina Ejecutora del Programa de Inversiones de la Universidad de Costa Rica (OEPI).

c) Caracterización física y morfológica

Se efectuó un análisis de la información obtenida con las mediciones topográficas a fin de obtener parámetros importantes tales como área, perímetro, pendiente de la cuenca y del cauce, curva hipsométrica, índice de factor de forma y de compacidad, perfil longitudinal y secciones transversales.

d) Análisis Hidrológico

Los datos suministrados de precipitación diaria fueron sometidos a un análisis estadístico de frecuencias, para determinar los eventos máximos en la zona según periodo de retorno.

El proceso de estimación de los caudales máximos para los periodos de retorno de 25, 50 y 100 años se utilizaron los métodos de número de curva de escorrentía, racional e isócronas. Con los valores que se generaron se llevó a cabo una comparación de los resultados determinándose cual se ajustaba mejor al área de estudio.

e) Análisis hidráulico

Para el análisis hidráulico se utilizó el software HEC-RAS. Con dicha herramienta se realizó una simulación con los valores de caudal máximo determinados previamente y la topografía de la zona.

f) Generación de Mapas de Zonas de Inundación

Una vez que los datos fueron procesados en HEC RAS, se elaboraron los mapas de la zona de estudio en ARC GIS con intervención de la herramienta Geo-RAS, en donde se representaron las zonas de inundación obtenidas con los caudales estimados para 25, 50 y 100 años.

g) Análisis de los mapas obtenidos, conclusiones y resultados.

Luego de obtener el producto final (mapas de zonas de inundación), se analizaron los mismos y se generó un documento escrito en donde se indicaron las conclusiones y recomendaciones a seguir.

2.1 Descripción de los Instrumentos

Para la obtención de los resultados necesarios se utilizaron las siguientes herramientas:

AutoCad Civil 3D 2017

Es un programa desarrollado para dibujo asistido por computador. Utilizado en este caso para la generación de curvas de nivel, perfil longitudinal y secciones transversales de la zona de estudio, con la información topográfica suministrada por la Oficina de Ejecutora del Programa de Inversiones de la Universidad de Costa Rica.

ArcGIS

Es un sistema de información geográfica, con una plataforma de información que permite crear, analizar, almacenar y difundir datos, modelos, mapas y modelos en 3D, integrando la parte física con una base de datos con información respecto a una porción de terreno, el cual se implementó en la delimitación del tramo de estudio, determinación del área, perímetro, longitud, manipulación de fotografías ortorectificadas suministradas por el Registro Nacional y generación de mapas de las zonas de inundación en la Quebrada Los Negritos.

Microsoft Excel 2013

Para los cálculos necesarios, se utilizó Excel 2016, el cual tiene una gran gama de funciones.

Modelo Hidráulico HEC-RAS (Hydrological Engineering Center- River Analysis System)

El HEC-RAS es un software de hidráulica el cual permite realizar modelos del comportamiento de un caudal en un canal artificial o en un cauce natural. Sirve además para conocer si un volumen de agua dado se desborda del cauce o no y por tanto hacer estudios y determinar las zonas inundables.

HEC-GeoRAS

Este software es un conjunto de procesos y herramientas que permite el procesamiento de datos geospaciales en ArcGIS. Este se utilizó en el procesamiento de la información generada por la simulación hidráulica en HEC-RAS, es decir permitió la importación de la información producida en HEC-RAS al formato ARC-GIS en donde puede editarse según las necesidades del operador. Esta herramienta fue creada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, y debe ser instalada en ArcGIS como un complemento para su utilización.

Finalmente, es importante mencionar que todo el software antes implementado en las diferentes fases del proyecto fue ejecutado desde una computadora marca Toshiba modelo Satellite S55T-B5260, con procesador Intel Core i7-4710HQ, 12 GB DIMM RAM y un disco duro de 1 TB 5400 rpm.

Capítulo III: Marco Teórico

Como parte del desarrollo de esta investigación es necesario establecer los conceptos y teorías científicas que serán utilizados posteriormente para el análisis de los datos que se generen y discusión de resultados.

Se inicia con la definición de cuenca hidrográfica, la cual es entendida como “... *el área donde todas las aguas caídas por precipitación se unen para formar un solo curso de agua.*” (Villón Béjar, 2004, pág. 29); es decir, es el punto en común que recoge todas las aguas caídas en forma natural conformada por barreras de relieve, montañas, comúnmente llamadas divisorias de aguas o parteaguas, el cual, “... *está formado por los puntos de mayor nivel topográfico y cruza las corrientes en los puntos de salida.*” (Villón Béjar, 2004, pág. 29). Es claro entonces que para su delimitación es necesario la utilización de las hojas topográficas del lugar de estudio ya que se requieren de las curvas de nivel.

Una vez efectuada la delimitación de la cuenca, esta se puede clasificar en dos categorías (según lo menciona Villón en su libro):

Cuenca Grande, es aquella en la que predominan las características fisiográficas (pendiente, elevación, área, cauce). Una cuenca, para fines prácticos se considera grande, cuando el área es mayor a 250 m².

Cuenca pequeña, es aquella que responde a las lluvias de fuerte intensidad y pequeña duración, y en la cual las características físicas (tipo de suelo y vegetación) son más importantes que las del cauce. Se considera cuenca pequeña aquella cuya área varíe desde unas pocas hectáreas hasta un límite que, para propósitos prácticos, se considera 250 m². (Villón Béjar, 2004, pág. 30)

Dependiendo de la clasificación que se le asigne a la cuenca, así será el estudio que se efectúe sobre ella. De ahí que resulte importante efectuar un análisis sobre las características físicas donde se debe considerar *superficie, topografía, altitudes, geología, suelos, cobertura* (Villón Béjar, 2004, pág. 31), y de otra serie de factores climatológicos y urbanísticos que intervienen en su comportamiento.

3.1 Características Físicas de una Cuenca

Con respecto a la caracterización física de la cuenca se debe de establecer el área, perímetro, ancho, índice de forma, índice de compacidad, relieve, curva hipsométrica, polígono de frecuencia, rectángulo equivalente, red de drenaje. Cada una de estas será brevemente explicada de acuerdo a lo que menciona Máximo Villón en su libro Hidrología a continuación:

Superficie de la Cuenca: *“Se refiere al área proyectada en un plano horizontal, es de forma muy irregular; se obtiene después de delimitar la cuenca.”* (Villón Béjar, 2004, pág. 31)

Una vez delimitada la cuenca en la hoja topográfica, se procede con la estimación del área, anteriormente se utilizaban los métodos de la balanza analítica, o el planímetro, sin embargo, no son muy precisos. En la actualidad, se cuenta con software que facilita este proceso, tal es el caso de AutoCAD, que mediante el comando “Área”, *“permite calcular el área comprendida por una serie de puntos que se van pinchando”* (Mora Navarro, 2006, pág. 110)

Perímetro de una cuenca: *De igual forma que el área, este puede ser obtenido mediante el programa AutoCAD, “La orden área se utiliza para calcular el área y perímetro de cualquier superficie cerrada”* (Mora Navarro, 2006, pág. 110) sin embargo, anteriormente se utilizaba un *mecate o el curvímetro* (Villón Béjar, 2004, pág. 40), para calcular el perímetro, ya que la cuenca al presentar una forma irregular no es posible su obtención por métodos gráficos.

Curva hipsométrica: *“Es la curva que, puesta en coordenadas rectangulares, representa la relación entre la altitud, y la superficie de la cuenca que queda sobre esa altitud”* (Villón Béjar, 2004, pág. 42), es decir, la manera de representar en planta la elevación del terreno versus el área que la cuenca que cubre dicha altura mediante un gráfico en el cual se puede agregar la frecuencia de altitudes definidas como *“porcentaje de las superficies ocupadas por diferentes altitudes”* (Villón Béjar, 2004, pág. 45)

Ahora bien, a partir de la curva de frecuencia de altitudes se definen las siguientes altitudes características:

Altitud media es la ordenada media de la curva hipsométrica, en ella, el 50% del área de la cuenca se encuentra situada por encima de esa altitud y el 50% está situada por debajo de ella.

Altitud más frecuente es el máximo valor en porcentaje de la curva de frecuencia de altitudes.

Altitud de frecuencia $\frac{1}{2}$ es la altitud correspondiente al punto de abscisa $\frac{1}{2}$ de la curva de frecuencia de altitudes. (Villón Béjar, 2004, pág. 45)

Dichos valores de altitud pueden ser determinados matemáticamente (promedios) o gráficamente.

Factor de Forma: *“Expresa la relación entre el ancho promedio de la cuenca y su longitud”* (Villón Béjar, 2004, pág. 47). Representado matemáticamente como $F = \text{ancho}/\text{longitud}$, siendo la longitud desde el punto más lejano dentro de la cuenca hasta la desembocadura.

Índice de Compacidad: También llamado Índice de Gravelius, *“... expresa la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro equivalente de una circunferencia que tiene la misma área de la cuenca.”* (Villón Béjar, 2004, pág. 49), lo que trata de modelar es el comportamiento de respuesta que tendrá un río en cuanto escorrentía.

Rectángulo Equivalente: *“Es una transformación geométrica que permite representar la cuenca, de su forma heterogénea, con la forma de un rectángulo...”* (Villón Béjar, 2004, pág. 48). En otras palabras, transforma la cuenca en una figura homogénea en donde se pueden calcular fácilmente su área, perímetro, largo y ancho.

Red de Drenaje: *“Se refiere a las trayectorias o arreglo que guardan entre si los cauces de las corrientes naturales dentro de ella.”* (Villón Béjar, 2004, pág. 67). Lo que indica es que tan rápido la cuenca desaloja el agua que recibe, para ello debe describirse el orden de las corrientes, densidad de corriente y drenaje, así como la longitud de los tributarios.

Continuando con el establecimiento de las características de la cuenca, la topografía que la rodea es de gran importancia, por lo que se deben determinar los niveles altimétricos necesarios en el cálculo de las diferentes pendientes a saber:

Pendiente de la cuenca: Directamente relacionada “...con la infiltración, la escorrentía superficial, la humedad del suelo, y la contribución del agua subterránea a la escorrentía... Controla el tiempo de escurrimiento y tiene relación directa a la magnitud de las crecidas” (Villón Béjar, 2004, pág. 56). Existen varios métodos para calcularla, entre los que se pueden citar el criterio de Alvord y el de rectángulo equivalente.

Pendiente del Cauce: Considerada como “el cociente que resulta de dividir, el desnivel de los extremos del tramo, entre la longitud horizontal del tramo” (Villón Béjar, 2004, pág. 61). Su estudio resulta útil para varias aplicaciones, entre ellas la solución a problemas de inundación, existen varios métodos para calcularla como el de pendiente uniforme, compensación de áreas y ecuación de Taylor y Schwarz.

3.2 Características Climatológicas de una Cuenca

Costa Rica posee un clima tropical el cual se encuentra estrechamente relacionado con el relieve. Como se menciona Carmen Rocío González en su libro Geografía de Costa Rica:

No obstante, en las condiciones de climas húmedos y cálidos, con las características del clima tropical, el proceso que da origen a la mayor parte de las formas de relieve actual se debe al modelado terrestre bajo las condiciones del clima... El modelado del relieve es, en realidad, un proceso de ajuste o equilibrio con respecto a las condiciones ambientales en que evolucionan las formas iniciales. (González, 1998, pág. 109)

Los factores climáticos constituyen un importante papel en la formación del relieve ya que son agentes erosivos que van desgastando los conos montañosos y a su vez van transportando los sedimentos y depositando en llanuras. Además, de tener una fuerte incidencia en la meteorización de las rocas, es decir, un cambio químico producido por la interacción con el medio ambiente, que termina formando nuevos materiales.

Por otro lado, la configuración de relieve existente tiene gran efecto en el comportamiento climático del país como lo describe Brenes & Saborío (1995), en su libro Elementos de Climatología: Su Aplicación Didáctica a Costa Rica, en donde se expresa:

Las condiciones de temperatura, precipitaciones, combinadas con las diferencias de presión atmosférica, son los elementos del clima que predominan en la definición climática de un país. Sin embargo, un factor determinante para modificar en alguna medida el clima de Costa Rica es la existencia de un sistema montañoso en sentido NW-SE, que actúa como una barrera para que los vientos descarguen su humedad en la vertiente del Caribe o del Pacífico. (Brenes & Saborio, 1995, pág. 36)

En síntesis, el relieve contribuye a definir el clima de una región, pero de manera sincrónica el clima constituye es agente moldeador del relieve, demostrándose así la relación muy estrecha entre ellos. Propiamente para el caso del Valle Central ubicado al suroeste de la Cordillera Volcánica Central, en donde se encuentra San José, se tiene que:

La cordillera Volcánica Central forma un rasgo determinante en el clima del país, ya que divide dos regímenes climáticos diferentes: el del Atlántico y el del Pacífico... Por su forma, es común que estas montañas causen precipitación del tipo orográfico en ambos flancos, lo que ha hecho que en las partes altas y medias se presente una cobertura de bosque nubosos. (Losilla, Rodríguez, Schosinsky, Stimson, & Bethune, 2001, pág. 127)

3.3 Características Geológicas de la Cuenca

Las formaciones geológicas costarricenses vienen dadas por procesos de sedimentación, vulcanismo y tectónica de placas. Para el Valle Central, se sabe que:

Está constituido por un basamento de rocas sedimentarias y volcánicas terciarias (Grupo Aguacate), encima de las cuales yacen las lavas de la Formación Intracañón, depósitos de flujos piroclásticos de la Formación Avalancha Ardiente, las de la Formación Post- Avalancha y por último los estratovolcanes complejos de la cordillera Central. (Linkimer, Aguilar, & Kussmaul, Geología de Costa Rica, 2000, p. 80)

Dichas formaciones o capas se distinguen entre sí por su color, espesor de la capa, tamaño de la partícula, altura (en algunos casos), y edad geológica.

3.4 Características de Infraestructura

Es importante identificar las características de infraestructura urbana que rodean una cuenca con el fin de determinar el impacto que estas tienen sobre la zona de estudio. Al respecto en su libro *Geomorphology and River Management*, Brierley & Fryirs, (2006) quienes mencionan las principales formas en que el ser humano interviene en el ámbito hídrico clasificándolas en dos categorías:

Directa: Programas de canalización, incluyendo trabajos de control de inundaciones y estructuras de estabilización de laderas, deforestación en las riberas de los ríos.

Indirecta: cambios en el uso del suelo, incluyendo cambios en la cobertura del suelo, deforestación, cambios para practicar agricultura, urbanizaciones y edificaciones, infraestructura de construcción incluyendo sistemas para manejo de aguas. (*Traducción propia*) (Brierley & Fryirs, 2006, p. 209)

Es necesario tener claro que cualquier actividad que se lleve a cabo en los alrededores de la cuenca va a tener un impacto sobre la misma, el cual rara vez es positivo. Para el caso concreto de urbanizaciones se dice que:

... aparte de la deforestación, la impermeabilización de superficies y la instalación de sistemas de alcantarillado eficientes con baja o cero capacidades de infiltración y mayor velocidad de transmisión del agua aumenta el volumen de escorrentía para una precipitación en poco tiempo, siendo mayor la cantidad para descargar, es por esto que actualmente son más frecuentes las inundaciones. (Traducción propia) (Brierley & Fryirs, 2006, p. 221)

3.5 Análisis Hidrológico

3.5.1 Análisis de frecuencia

Los datos de precipitación máxima diaria obtenidos de la estación meteorológica CIGEFI localizada en la cuenca de la Quebrada Los Negritos deben de recibir un tratamiento estadístico, a fin de poder realizar la interpretación que mejor se ajuste a la zona de estudio.

La pretensión es que, con los datos obtenidos de los eventos hidrológicos, se pueda inferir probabilidades de ocurrencias futuras. *“El objetivo del análisis de frecuencia de información hidrológica es relacionar la magnitud de los eventos extremos con su frecuencia de ocurrencia mediante el uso de distribuciones de probabilidad.”* (Ven Te Chow, Maidment, & Mays, 1994, p. 391)

Según Ven Te Chow, Maidment, & Mays, (1994), si se tiene una variable aleatoria (X) y esta es mayor o igual a cierto nivel (X_t). El intervalo de recurrencia (τ) es el tiempo de ocurrencias entre $X \geq X_t$. En tanto, el periodo de retorno puede entenderse como el intervalo de recurrencia promedio entre eventos que igualan o exceden una magnitud especificada.(pág. 391)

En el libro Hidrología Aplicada de Ven Te Chow, Maidment, & Mays, (1994) se presenta una metodología de análisis de frecuencias utilizando factores de frecuencia en donde el valor de X_t puede representarse como la media μ más un valor de desviación estándar ΔX_t , es decir:

$$X_t = \mu + \Delta X_t \quad (1)$$

La desviación estándar con respecto a la media puede interpretarse como el producto de la desviación estándar σ y el factor de frecuencia K_T , es decir $\Delta X_t = \sigma K_T$. Por lo tanto, la ecuación (1) se escribe como:

$$X_t = \mu + \sigma K_T \quad (2)$$

Lo que se puede aproximarse como:

$$X_t = \bar{x} + s K_T \quad (3)$$

El evento de que la variable analizada sea $y = \log x$, entonces se aplica el mismo método a las estadísticas para los logaritmos de los datos usando

$$Y_t = \bar{y} + s_y K_T \quad (4)$$

El valor de X_t se encuentra tomando el antilogaritmo de Y_t . Siendo esto el razonamiento de Ven Te Chow, para una distribución dada puede determinarse una relación $K - T$ entre los factores de frecuencia y el periodo de retorno correspondiente. Dicha relación puede ser calculada con cualquier distribución de probabilidad. (pág. 400)

Así mismo Ven Te Chow, et al (1994) describe las distribuciones de probabilidad que comúnmente se utilizan.

Distribución Normal: el factor de frecuencia (K_t) puede calcularse como

$$K_t = \frac{x_t - \mu}{\sigma} \quad (5)$$

Este es el mismo valor (z) de la variable normal, para obtenerla, primero debe de calcularse:

$$w = \left[\ln \frac{1}{p^2} \right]^{1/2} \quad 0 < p \leq 0,5 \quad (6)$$

Luego, z se obtiene con:

$$z = w - \frac{2,515517 + 0,802853w + 0,010328 w^2}{1 + 1,432788w + 0,189269w^2 + 0,001308w^3} \quad (7)$$

Debe recordarse que $K_t = z$

Distribuciones de valor extremo: para esta distribución Chow (1953) dedujo la siguiente fórmula

$$K_t = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left\{ 0,5772 + \ln \left[\ln \frac{T}{T-1} \right] \right\} \quad (8)$$

Distribución LOG-PEARSON tipo III: primero se deben calcular los logaritmos de la información hidrológica $y = \log x$. Se calcula la media \bar{y} , la desviación estándar s_y y el coeficiente C_s . Cuando $C_s = 0$ el factor de frecuencia es igual a la variable estándar z .

Cuando $C_s \neq 0$, K_t se aproxima por Kite (1977) como:

$$K_t = z + (z^2 - 1)k + \frac{1}{3}(z^3 - 6z)k^2 - (z^2 - 1)k^3 + z^4k + \frac{1}{3}k^5 \quad (9)$$

Dónde $k = \frac{C_s}{6}$.

Para obtener el valor z se puede utilizar la fórmula (7) y los factores de frecuencia para la distribución Pearson tipo III y Log Pearson tipo III.

3.5.2 Pruebas de bondad de Ajuste

Posteriormente a la aplicación de las diferentes distribuciones de probabilidad a los datos de precipitación es preciso determinar cuál utilizar, para lo que se requiere de las pruebas de bondad de ajuste que “...consisten en comprobar, gráfica y estadísticamente, si la frecuencia empírica de la serie analizada se ajusta a una determinada función de probabilidades teórica seleccionada a priori, con los parámetros estimados con base en los valores muestrales.” (Villón Bejár, 2006)

Las pruebas de ajuste de bondad estadístico más utilizadas son Chi-cuadrado y Smirnov-Kolmogorov

3.5.2.1 Prueba Chi-cuadrado (χ^2)

La prueba d Chi-cuadrado “...se basa en el cálculo de frecuencias tanto de los valores observados, como valores observados, para un número determinado de intervalos.” (Villón Bejár, 2006)

El comportamiento general de la prueba Chi-cuadrado se define como:

$$\chi_c^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\theta_i - e_i)^2}{e_i} \quad (10)$$

Donde:

$$\sum_{i=1}^k \theta_i = \sum_{i=1}^k e_i = N \quad (11)$$

Siendo que:

χ_c^2 : Valor calculado de Chi-cuadrado a partir de los datos

θ_i : número de valores obsarvados en el intervalo de clase i

e_i : número de valores esperados en el intervalo de clase i

k : número de intervalos de clase

Asignando igual probabilidad de ocurrencia a cada intervalo de clase a la ecuación 10, se tiene:

$$\chi_c^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(N_i - NP_i)^2}{NP_i} \quad (12)$$

Donde,

N_i : número de observaciones que caen dentro de los límites de clases ajustadas del intervalo i

N : tamaño muestral

P_i : probabilidad igual a todos los intervalos de clases

$P_i: \frac{1}{k}$ ó $e_i = P_i N$

Simplificando la ecuación se obtiene:

$$\chi_c^2 = \frac{K}{N} \sum_{i=1}^k N_i^2 - N \quad (13)$$

El valor de χ_c^2 obtenido de la ecuación 13 se compara con el χ_t^2 , es decir el valor teórico, siendo que si $\chi_c^2 \leq \chi_t^2$, entonces se acepta la hipótesis de que el ajuste es bueno al nivel de significación seleccionado es decir $\alpha = 5\%$ ó $\alpha = 1\%$. En el caso contrario $\chi_c^2 > \chi_t^2$ el ajuste es malo, siendo necesaria la aplicación de otra distribución de probabilidad.

3.5.2.2 Prueba Smirnov-Kolmogorov

La prueba de ajuste de Smirnov-Kolmogorov consiste en “comparar las diferencias existentes entre la probabilidad empírica de los datos de la muestra y la probabilidad teórica, tomando el valor máximo del valor absoluto de la diferencia entre el valor observado y el valor de la recta teórica del modelo.” (Villón Bejár, 2006)

La anterior puede expresarse como:

$$\Delta = \text{máx} |F(x) - P(x)| \quad (14)$$

Donde,

Δ : estadístico de Smirnov-Kolmogorov, cuyo valor es igual a la diferencia máxima existente entre la probabilidad ajustada y la empírica

$F(x)$: probabilidad de distribución teórica

$P(x)$: probabilidad experimental o empírica de los datos

Si Δ_0 es un valor crítico para un nivel de significación α entonces:

$$P[\text{máx} |F(x) - P(x)| \geq \Delta_0] = \alpha \quad \text{ó} \quad P(\Delta \geq \Delta_0) = \alpha \quad (15)$$

También,

$$P(\Delta < \Delta_0) = 1 - \alpha \quad (16)$$

Si el valor $\Delta < \Delta_0$ el ajuste puede considerarse como bueno, al nivel de significación seleccionado.

Caso contrario, si $\Delta \geq \Delta_0$ el ajuste no es adecuado al nivel de significación seleccionado siendo necesario aplicar otra distribución de probabilidad.

3.5.3 Caudales Máximos

Para la obtención de los caudales máximos existen varios métodos de cálculo. Para efectos de este trabajo se usarán isócronas, número de curva de escorrentía y método racional, a fin de efectuar una comparación entre los valores obtenidos y determinar el que mejor se ajusta a la zona de estudio.

Primeramente, es necesario definir los períodos de retorno con que se van a trabajar, es decir, “el intervalo de tiempo dentro del cual un evento de magnitud Q , puede ser igualado o excedido por lo menos una vez en promedio.” (Villón Béjar, 2004, pág. 261). En el siguiente cuadro se muestran los periodos de retorno recomendados para diferentes estructuras.

Cuadro 1: Períodos de retorno recomendados según estructura

Período de retorno de diseño recomendado para estructuras menores	
Tipo de estructura	Período de Retorno (años)
Puente sobre carretera importante	50-100
Puente sobre carretera menos importante o alcantarillas sobre carretera importante	25
Alcantarillas sobre camino secundario	5-10
Drenaje lateral de los pavimentos, donde puede tolerarse encharcamiento con lluvia de corta duración.	1-2
Drenaje de aeropuertos	5
Drenaje urbano	2-10
Drenaje agrícola	5-10
Muros de encauzamiento	2-50*

*Puede aumentar si estas obras protegen poblados de importancia

Fuente: Hidrología, Máximo Villón, 2004, (pág. 261)

Una vez que ya se tiene definidos los períodos de retorno se procede con los cálculos de caudal. Para efectos de este trabajo se utilizaron los periodos de retorno de 25, 50 y 100 años.

3.5.4 Método de Número de Curva de Escorrentía o SCS

Este método fue creado en 1972 por el Servicio de Conservación de Suelos (conocido por sus siglas en inglés SCS) ahora conocida como Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRSC, en inglés). Su principio se reduce a que:

Para la tormenta como un todo, la profundidad de exceso de precipitación o escorrentía directa P_e es siempre menor o igual que la profundidad de la precipitación P ; de manera similar después de que la escorrentía se inicia, la profundidad adicional del agua retenida en la cuenca F_a es menor o igual que alguna retención potencial máxima S . Existe una cierta cantidad de precipitación I_a (atracción inicial antes del encharcamiento) para la que no ocurrirá escorrentía, luego la escorrentía potencial es $P - I_a$. (Ven Te Chow, Maidment, & Mays, 1994, p. 150)

Lo anterior, se observa en la figura 3 la cual muestra en comportamiento de la precipitación con el tiempo en que transcurre la misma. inicialmente el suelo actúa como una esponja absorbiendo una buena parte de la lluvia que cae hasta el momento en que se alcanza el punto de saturación, lo cual varía dependiendo de su granulometría. Una vez alcanzado este punto es donde se inicia el proceso de escorrentía.

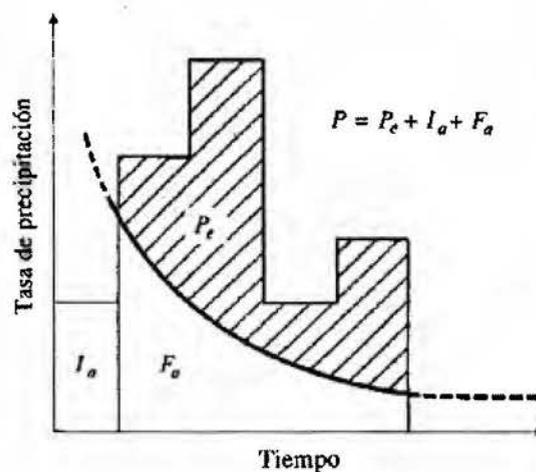


Figura 3: Gráfico comportamiento de la precipitación

Fuente: Hidrología Aplicada, Ven Te Chow, Maidment, & Mays, 1994, (pág 151)

El método de número de curva asume las cantidades reales y las potenciales por igual, es decir:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad (17)$$

De la figura 1, se puede notar que precipitación total es $P = P_e + F_a + I_a$, reemplazando este valor en (17) y resolviendo para P_e se obtiene la siguiente ecuación:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (18)$$

Luego de varios experimentos se desarrolla la siguiente relación empírica:

$$I_a = 0,2S \quad (19)$$

Combinando las ecuaciones (18) y (19) se obtiene:

$$P_e = \frac{(P - 0,25)^2}{P + 0,8S} \quad (20)$$

El método lo que busca es la estandarización de las curvas que se desprenden de la representación gráfica de las cuencas para lo cual se define el número de curva adimensional (CN), tal que $0 \leq CN \leq 100$. Para superficies de agua $CN = 100$; para superficies naturales $CN < 100$ (Ven Te Chow, Maidment, & Mays, 1994, p. 167)

El número de curva (CN) se obtiene de la siguiente fórmula para casos de humedad antecedente normal:

$$CN = \frac{1,000}{10 + S} \quad (21)$$

Para los casos de humedad antecedente seca (AMC I) o condiciones húmedas (AMC III), los números de curva pueden calcularse así:

$$CN(I) = \frac{4,2 CN(II)}{10 - 0,058CN(II)} \quad (22)$$

$$CN(III) = \frac{23 CN(II)}{10 + 0,13CN(II)} \quad (23)$$

Los valores de CN II se obtienen de los datos ya tabulados, los cuales se encuentran en de Ven Te Chow, et al, (1994) página 153.

Para la aplicación del método de Número de Curva de Escorrentía o SCS, se utilizará el hidrograma unitario sintético de Snyder y el hidrograma adimensional Soil Conservation Service (SCS).

3.5.5 Hidrograma adimensional del SCS

El hidrograma sintético se obtiene, *“del estudio de gran cantidad de hidrogramas registrados en una gran variedad de cuencas se obtuvieron hidrogramas adimensionales, dividiendo escala de caudales por caudal pico Q_p y la escala del tiempo por el tiempo al que se presenta el tiempo pico.”* (Villón Béjar, 2004)

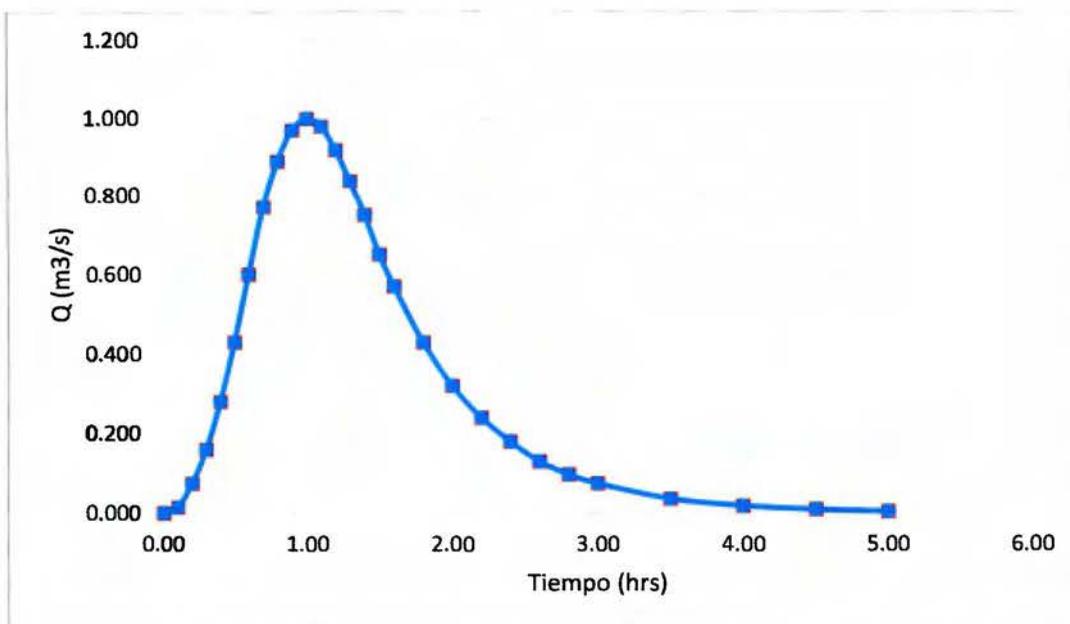
Para la aplicación de este método, se requiere del uso de las coordenadas del hidrograma adimensional común para gran cantidad de cuencas. Dicha información se encuentra en el siguiente cuadro 2 junto con el hidrograma representado en el gráfico 1.

Cuadro 2: Coordenadas del hidrograma adimensional

t/tp	Q/Qp
0,00	0,000
0,10	0,015
0,20	0,075
0,30	0,160
0,40	0,280
0,50	0,430
0,60	0,600
0,70	0,770
0,80	0,890
0,90	0,970
1,00	1,000
1,10	0,980
1,20	0,920
1,30	0,840
1,40	0,750
1,50	0,650
1,60	0,570
1,80	0,430
2,00	0,320
2,20	0,240
2,40	0,180
2,60	0,130
2,80	0,098
3,00	0,075
3,50	0,036
4,00	0,018
4,50	0,009
5,00	0,004

Fuente: Villón Béjar, 2004

Gráfico 1: Hidrograma adimensional del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) para las coordenadas cuadro 2



Fuente: Villón Béjar, 2004

3.5.6 Modelos de transformación

3.5.6.1 Hidrograma unitario sintético Triangular

Para la realización de un hidrograma unitario (figura 4), es necesario contar con al menos una lectura de una salida de la cuenca, así como los datos de precipitación, situación que se complica en Costa Rica donde son pocas las cuencas que se encuentran instrumentadas. Por lo que “es conveniente contar con métodos con los que se puedan obtener los hidrogramas unitarios usando únicamente datos de características generales de la cuenca. Los hidrogramas obtenidos así se denominan sintéticos”. (Villón Béjar, 2004)

Con respecto al hidrograma unitario triangular (Figura 4) este fue diseñado por Mockus y es utilizado por el SCS ya que, “a pesar de su simplicidad, proporciona los parámetros fundamentales del Hidrograma: caudal punta (Q_p), tiempo base (t_b) y el tiempo en que se produce la punta (t_p)” (Villón Béjar, 2004).

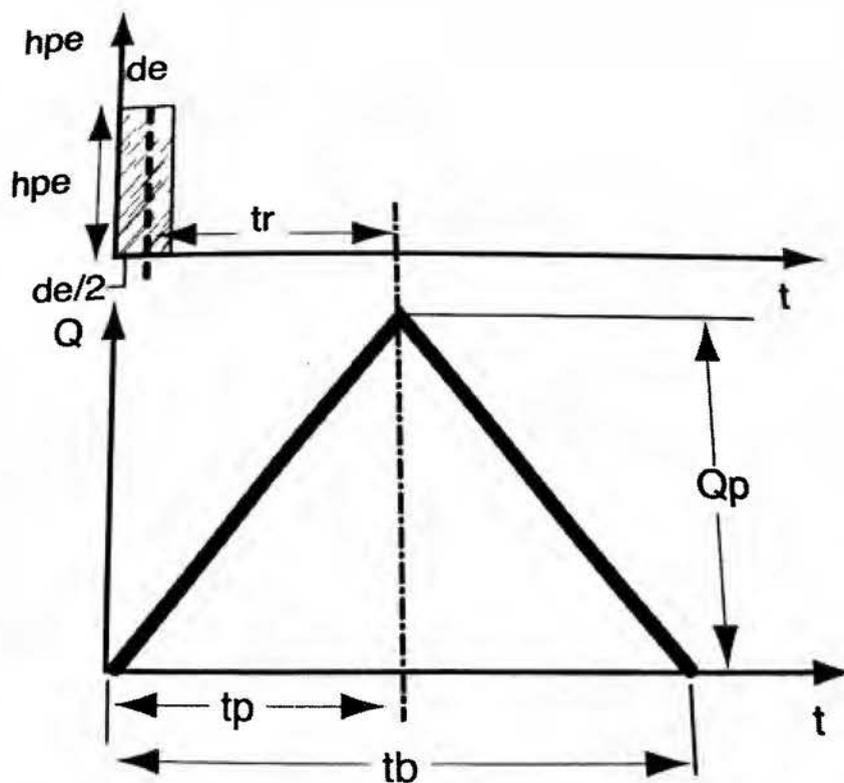


Figura 4: Hidrograma Unitario Triangular

Fuente: Villón Béjar, 2004

Para la obtención de los datos mencionados se utilizan las siguientes fórmulas de cálculo:

$$Q_p = 0,208 * \frac{A}{t_p} \quad (24)$$

Donde,

Q_p = caudal pico en m^3/s

A = área de la cuenca en Km^2

t_p = tiempo pico en horas.

El tiempo base se calcula como $t_b = 2,67t_p$ siendo t_p el tiempo pico en horas, el cual se estima mediante:

$$T_p = \frac{d_e}{2} + T_r \quad (25)$$

Donde,

T_p = tiempo pico en horas

T_r = tiempo de retraso en horas

d_e = duración en exceso en horas

El tiempo de retraso se calcula como $T_r = 0,6t_c$, siendo t_c el tiempo de concentración en horas.

Finalmente, la duración de exceso se obtiene por medio de:

$$d_e = 2\sqrt{t_c} \quad (26)$$

Donde,

d_e = duración en exceso, en horas.

t_c = tiempo de concentración en horas.

3.5.7 Método Racional

“Supone que la máxima escorrentía ocasionada por una lluvia se produce cuando la duración de ésta es igual al tiempo de concentración.” (Villón Béjar, 2004, pág. 271). El caudal máximo se calcula como:

$$Q = \frac{C * I * A}{360} \quad (27)$$

Donde,

Q: Caudal máximo, m³/s

I: Intensidad máxima de lluvia, para una duración igual al tiempo de concentración, mm/hr

C: Coeficiente de escorrentía.

A: Área, ha

3.5.7.1 Tiempo de concentración

Para el cálculo del tiempo de concentración (t_c) existen varias fórmulas como lo menciona Máximo Villón en su libro Hidrología, entre ellas la de Kirpich, es decir:

$$t_c = 0,0195 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \quad (28)$$

Donde,

t_c : Tiempo de concentración, en min

L: máxima longitud del recorrido, en m

H: diferencia de elevación entre los puntos extremos del cauce principal, en m.

El cálculo del tiempo de concentración por medio de la fórmula australiana se da de la siguiente manera:

$$t_c = \frac{58L}{A^{0,5} * S^{0,2}} \quad (29)$$

Existe también el método de George Rivero que consiste en:

$$t_c = \frac{16L}{(1,05 - 0,2p) (100S)^{0,04}} \quad (30)$$

Siendo:

L= Longitud máxima del recorrido en m.

P= relación entre área de la cubierta vegetal y el área total de la cuenca. (adimensional)

S= pendiente m/m

Finalmente, el método de cálculo del SCS para el t_c es:

$$t_c = 0,02872L^{0,80} * \frac{\left(\frac{1000}{NC} - 9 \right)^{1,67}}{S^{0,5}} \quad (31)$$

Donde,

L = Longitud máxima del recorrido en m.

NC = Número de curva.

S = pendiente m/m

3.5.7.2 Coeficiente de escorrentía

Ahora bien, para la implementación del método racional es necesario el coeficiente de escorrentía el cual indica que cantidad de precipitación se escurre por las diferentes superficies que existen dentro de la zona de estudio. “*El valor de escorrentía depende de factores topográficos, edafológicos, cobertura vegetal, etc.*” (Villón Béjar, 2004). Es una constante adimensional y se calcula como:

$$C = \frac{\text{Valor de escorrentía superficial total}}{\text{Valor precipitado total}} \quad (32)$$

Donde C es el valor de escorrentía.

Para la estimación del coeficiente de escorrentía correspondiente a la zona de estudio se utilizó la clasificación de uso de suelo descrita anteriormente (Cuadro 9), y los valores (C) para zonas urbanas disponible en el libro Hidrología Aplicada de Ven Te Chow, pág 511, dichos datos pueden ser consultados en el Anexo 5.

Se empleó la siguiente fórmula de cálculo para el coeficiente de escorrentía (C):

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n C_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (33)$$

3.5.8 Método Isócronas

Se define una Isócrona como “líneas de tiempo de tránsito constante hacia la salida de la cuenca” (Ven Te Chow, et al, 1994, p. 273)

En otras palabras, una isócrona representa el lugar espacial en donde se encuentran dos puntos para los cuales el tiempo que tarda una gota de agua que cae a la cuenca hasta llegar a la desembocadura es igual tiempo por lo que conforma una línea.

El método de isócronas radica en dividir la cuenca en varios segmentos según los tiempos de concentración para determinada área.

De acuerdo con Ven, Maidment, & Mays, (1994), el tiempo de tránsito en una cuenca, se puede determinar a partir de la relación velocidad y distancia, ya que si se tiene dos puntos separados por una distancia l , y la velocidad es una variable que depende de la distancia y el tiempo entonces

$$dl = v(l)dt \quad (34)$$

$$\int_0^T dt = \int_0^l \frac{dl}{v(l)} \quad (35)$$

Suponiéndose una velocidad constante en un intervalo de longitud $\Delta l_i; i = 1, 2, 3, \dots, n$ se obtiene la ecuación:

$$t = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta l_i}{v_i} \quad (36)$$

Es decir, la suma de los tiempos de las isócronas da como resultado el tiempo de concentración.

Para realizar el trazado de la distribución es necesario calcular el tiempo de recorrido y la velocidad del escurrimiento. El dibujo de las isócronas se efectúa en el mapa de la cuenca

basado en el tiempo de recorrido o la velocidad de flujo. Luego se calcula el área y se trazan los valores en función del tiempo de retraso.

La velocidad puede calcularse utilizando la fórmula de Gaukler-Manning $V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2}$ (Ven Te Chow, Maidment, & Mays, 1994)

3.6 Modelo Hidrológico e Hidráulico

Para el desarrollo de esta investigación, es fundamental llevar a cabo un análisis hidráulico que permita determinar los niveles de inundación para 25, 50 y 100 años.

3.6.1 Modelo Hidráulico HEC-RAS (Hydrological Engineering Center- River Analysis System)

El HEC-RAS es un software de hidráulica el cual permite realizar modelos del comportamiento de un caudal en un canal artificial o en un cauce natural, creado por el Centro de Estudios Hidrológicos del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos.

De acuerdo con el Centro de Estudios Hidrológicos del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos,

HEC- RAS está diseñado para realizar cálculos hidráulicos unidimensionales para una red completa de canales naturales y construidos. La siguiente es una descripción de las algunas de las capacidades de HEC- RAS.

- Interfaz de usuario
- Análisis de componentes hidráulicos
- Almacenamiento y gestión de datos
- Gráficos y generación de informes
- RAS Mapas (Centro de Estudios Hidrológicos del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, 2015)

Propiamente con respecto a las funciones relacionadas con el análisis hidráulico HEC- RAS

El sistema HEC- RAS contiene cuatro componentes de análisis unidimensional:

1. Perfil de la superficie del agua flujo constante cálculos
2. Simulación de flujo no permanente
3. Cálculos de transporte de sedimentos frontera móvil
4. El análisis de la calidad del agua

Un elemento clave es que los cuatro componentes utilizan una representación geométrica de datos común y rutinas de cálculos geométricos e hidráulicos comunes. Además de los cuatro componentes de análisis, el sistema contiene varias características de diseño hidráulicos que se pueden incorporar una vez que se calculan los perfiles básicos de la superficie del agua. (Centro de Estudios Hidrológicos del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, 2015)

3.6.1.1 Coeficiente de Rugosidad

El coeficiente de rugosidad (n) es necesario para completar el modelo de la Quebrada en el software HEC-RAS, para lo que se emplea la fórmula propuesta en un principio por Cowan:

$$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m \quad (37)$$

En donde,

n : coeficiente de rugosidad en $s/m^{1/3}$

n_b : es el valor de rugosidad base para un canal recto, uniforme y liso conformado por materiales naturales en $s/m^{1/3}$

n_1 : factor de corrección por irregularidades en la superficie en $s/m^{1/3}$.

n_2 : factor por variaciones en forma y tamaño de la sección transversal en $s/m^{1/3}$.

n_3 : factor que depende de la cantidad de obstrucciones presentes en $s/m^{1/3}$.

n_4 : factor por presencia de vegetación y condiciones de flujo en $s/m^{1/3}$.

m : factor por efecto de sinuosidad a lo largo del cauce.

La determinación de los valores antes mencionados se realiza mediante inspección de campo, en donde se evaluaron cada una de las condiciones de ambas márgenes y canal principal de la Quebrada Los Negritos, en cuanto a irregularidad, forma, tamaño, obstrucciones, vegetación y sinuosidad se refiera, para posteriormente contrastar con los valores propuestos por Arcement y Schneider, (1989) en su libro "*Guide for selecting*

Manning's Roughness Coefficients for natural Channels and Flood Plains" y obtener así el coeficiente de rugosidad. (Ver Anexo 8)

3.7 Zonas en riesgo de Inundación

Primeramente, es necesario definir el concepto de inundación como *"fenómenos hidrológicos extremos, de frecuencia variable, naturales o inducidos por la acción humana que consisten en la sumersión de un área"* (Ramos, 2013)

Por su parte, una zona o planicie de inundación se define como: *"un área usualmente seca adyacente a ríos, corrientes, lagos, bahías, océanos, la cual se inunda durante eventos de crecientes."* (Ven Te Chow, et al, 1994).

Se entiende como riesgo de inundación a *"la combinación de la probabilidad de inundación, teniendo en cuenta su magnitud, y sus potenciales consecuencias perjudiciales para la salud humana, el ambiente, el patrimonio cultural, las infraestructuras y las actividades económicas..."* (Ramos, 2013)

La Quebrada Los Negritos atraviesa la Ciudad Universitaria, por lo que se encuentra rodeada de edificaciones de gran importancia para el desempeño de la institución, las cuales a su vez contienen gran cantidad de recurso humano y económico, por lo que un potencial riesgo de inundación puede generar consecuencias perjudiciales para la salud, el ambiente y la infraestructura aledaña, de ahí que sea importante el análisis hidráulico de la zona.

tal y como se mencionó al inicio de este capítulo, todos los conceptos, postulados y teorías acerca de características físicas, geológicas, forestales, urbanísticas, caudales máximos, escorrentía superficial, que han sido expuestas, servirán como base para el análisis de los resultados que genere esta investigación. De acuerdo con Ven Te Chow, et al, (1994)., para el análisis de las zonas de inundación es necesario recolectar la información sobre: mapas topográficos, flujos de creciente si existiera una estación de aforo, información de precipitación, secciones transversales y coeficiente de rugosidad, importantes como punto de

referencia para la elaboración de conclusiones y recomendaciones, con el fin de tratar de encontrar la solución al problema planteado.

Capítulo IV: Caracterización de la Zona de Estudio

4.1 Características físicas y morfológicas de la cuenca

4.1.1 Ubicación

La Quebrada Los Negritos, se ubica en la provincia de San José, cantón Montes de Oca en donde recorre los distritos de Sabanilla, Mercedes y San Pedro. Su nacimiento se da “*en el patio de cinco viviendas en Calle del Chorro, Sabanilla, enfrente del Colegio Metodista.*” (Chaves, 2015).

En la figura 5 se muestra la cuenca de la Quebrada Los Negritos y por ende el área de trabajo en la que se centra esta investigación

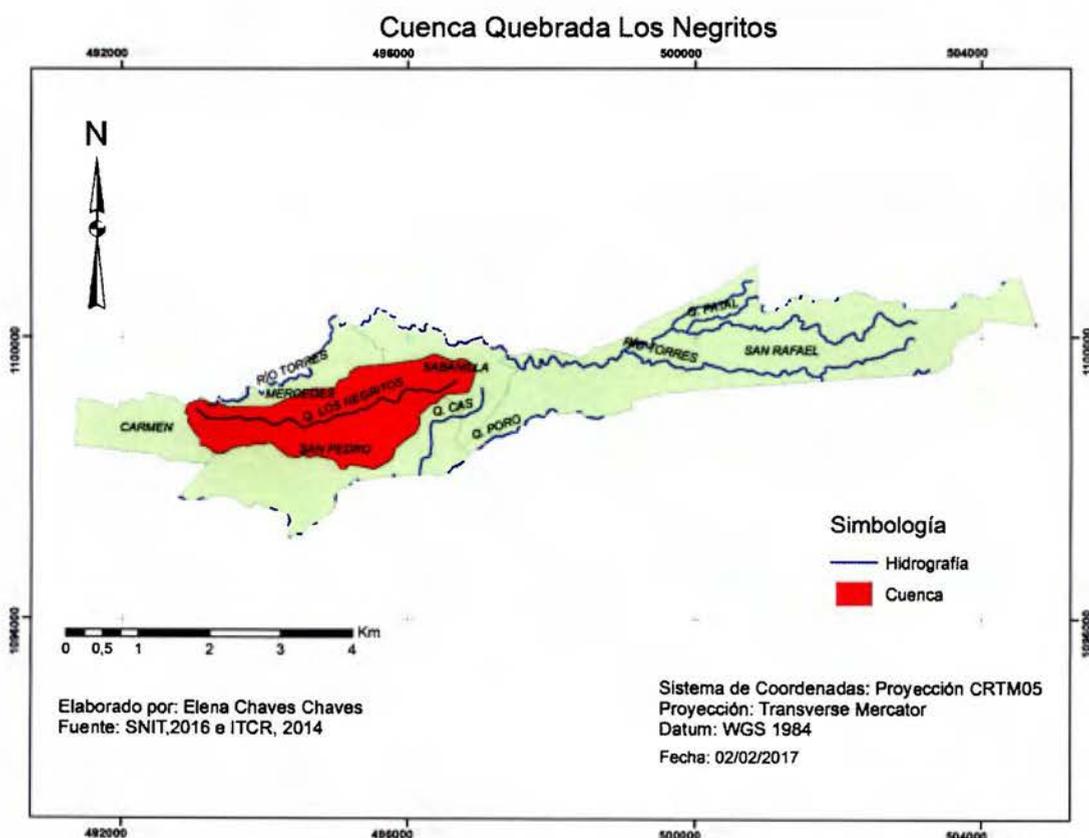


Figura 5: Ubicación cuenca de la Quebrada los Negritos

Fuente: Elaboración propia, 2016

Tal y como se puede observar en la imagen anterior, la Cuenca de la Quebrada Los Negritos se encuentra mayoritariamente en el Cantón de Montes de Oca, específicamente en los distritos de Sabanilla, Mercedes y San Pedro. Sus aguas recorren el Campus Universitario desde la Ciudad de la Investigación hasta la Facultad de Derecho específicamente en los puntos (495219,661, 1098927,105)m y (494077,808, 1098778,813)m, posteriormente “*avanza unos cientos de metros más y desemboca en el río Torres*” (Chaves, 2015), esto ubicado en el distrito Carmen del cantón de San José.

4.1.2 Parámetros Físicos

En total la cuenca de la Quebrada Los Negritos posee un área de 2,92 Km² y un perímetro de 10,03 Km.

Con los valores anteriores, área y perímetro, se procede al cálculo del índice de factor de forma (K_f) de la siguiente manera:

$$K_f = \frac{A}{L^2} = \frac{2,92 \text{ Km}^2}{(10,03 \text{ Km})^2} = 0,29 \quad (38)$$

Tal y como se puede notar, el un factor de forma de 0,29, lo cual muestra la relación que se da entre el ancho y largo de la cuenca, siendo que “*una cuenca con un factor de forma K_f bajo está menos sujeta a crecientes que otra del mismo tamaño, pero con mayor factor de forma*” (Serrano, 2011)

Aunado a lo anterior, se genera el índice de compacidad (índice de Gravelious (K)) empleando la siguiente ecuación:

$$K = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} = 0,28 \frac{10,03 \text{ Km}}{\sqrt{2,92 \text{ Km}^2}} = 1,64 \quad (39)$$

Dado que el índice de compacidad representa la relación que se da entre el perímetro de la cuenca y una circunferencia del tamaño de su área, el valor de $K=1,64$ siendo $K > 1$ lo que

indica una cuenca de tipo alargada, lo que reduce las posibilidades de que sea cubierta en su totalidad por una tormenta.

4.1.3 Características de Relieve

En la siguiente figura, se puede observar las curvas de nivel de los tres distritos del cantón de Montes de Oca, es decir, Sabanilla, Mercedes y San Pedro, y el distrito Carmen incluidos dentro de la cuenca de la Quebrada los Negritos,

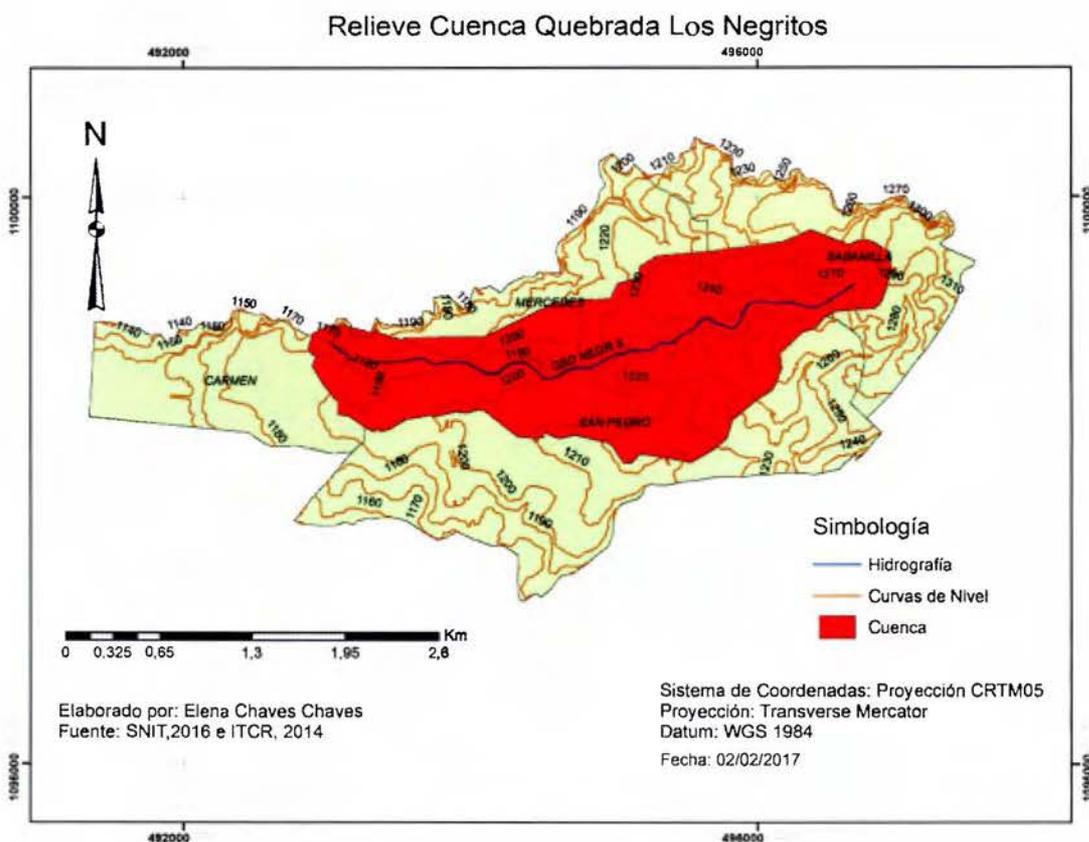


Figura 6: Relieve Cuenca Quebrada los Negritos

Fuente: Elaboración propia, 2016

Para la generación del mapa que se muestra en la figura 6, se utilizaron como insumos las curvas de nivel disponibles en el Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT) en escala 1:5000 disponibles para el sector de estudio.

Se registra entonces una elevación máxima de la cuenca de 1308,23 m.s.n.m. y una mínima de 1168,00 m.s.n.m, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura, en la cual se presenta un modelo de las elevaciones, figura 7, presente en la zona de estudio.

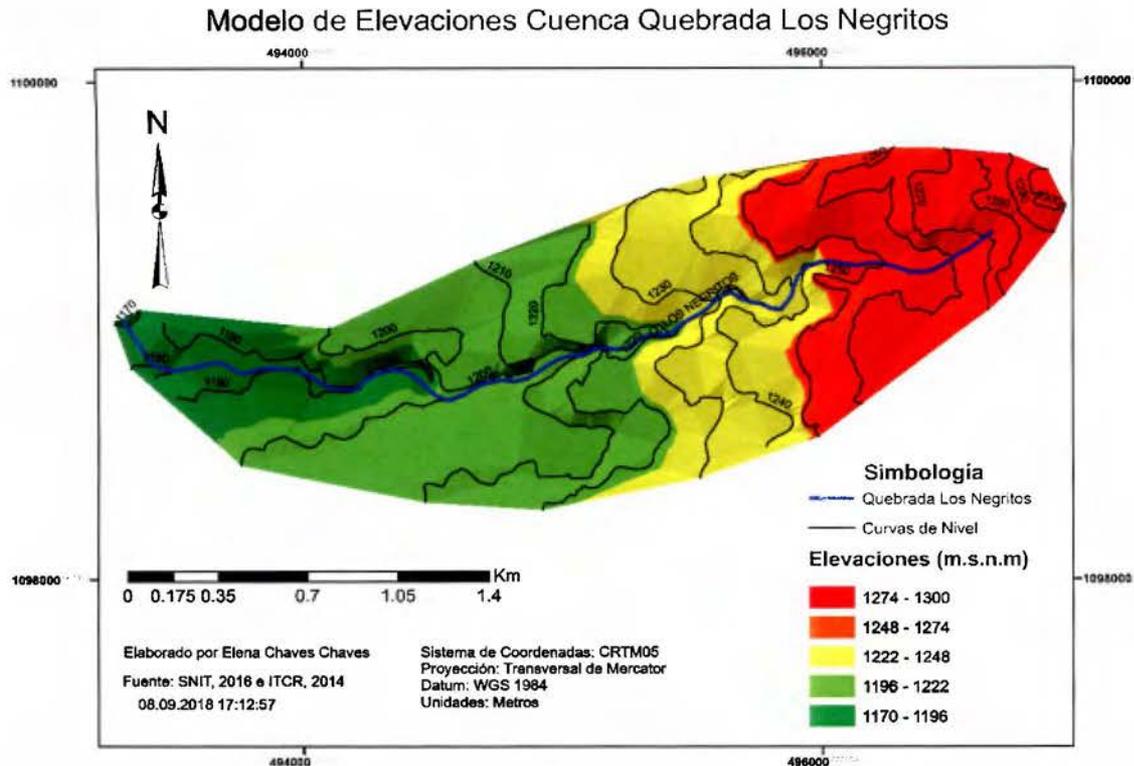
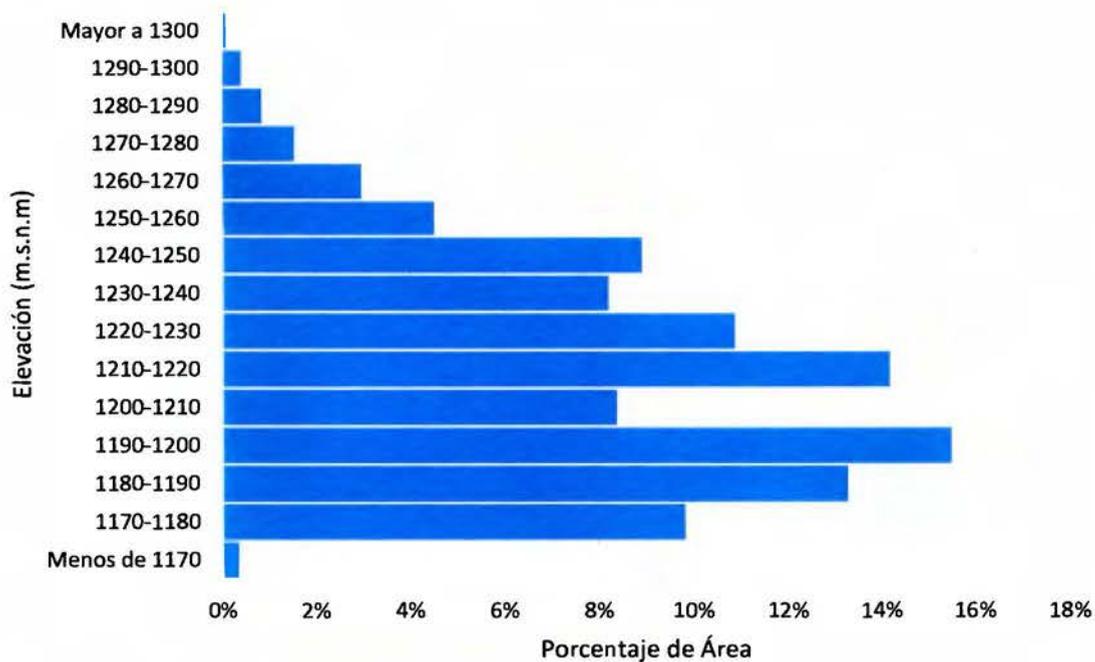


Figura 7: Modelo de elevaciones de Cuenca Quebrada los Negritos

Fuente: Elaboración propia, 2016

A continuación, en el gráfico 2 se muestra la representación de la superficie de la cuenca, en porcentaje, ocupada por las diferentes elevaciones de la cuenca. Tal y como se puede apreciar, en el mismo, la mayor porción de área de la cuenca se encuentra entre las elevaciones 1190 a 1200 m.s.n.m. Además, la elevación media de la cuenca es aproximadamente 1217,99 m.s.n.m.

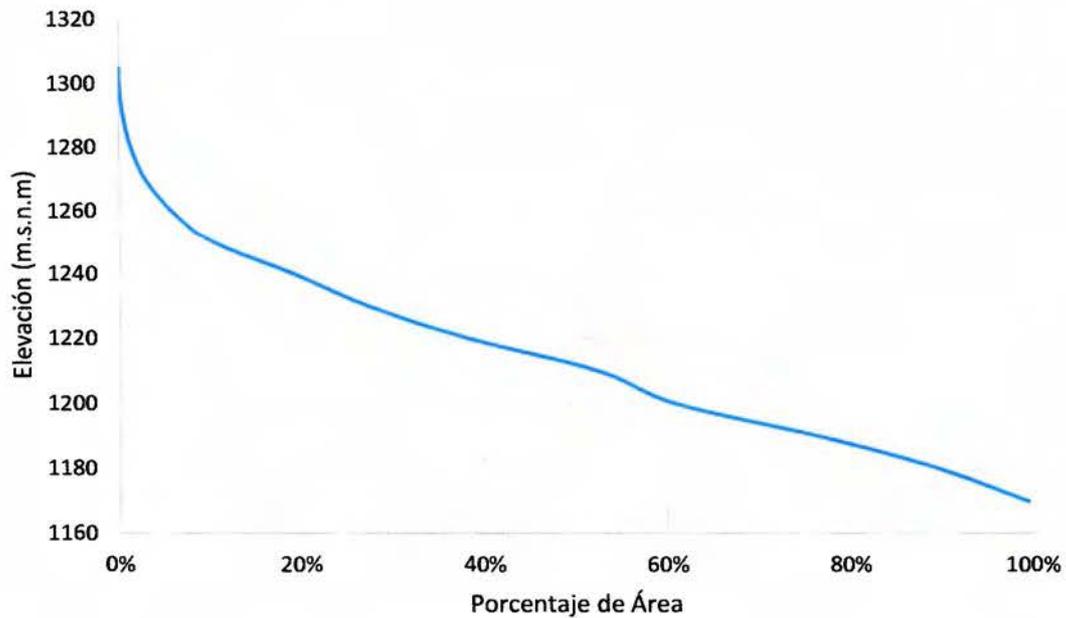
Gráfico 2: Frecuencia de elevaciones en la cuenca de la Quebrada Los Negritos



Fuente: Elaboración propia, 2016

De acuerdo con la información representada en la curva hipsométrica del gráfico 3, se puede notar que la cuenca no presenta cambios abruptos en sus elevaciones. En el primer 20% del área acumulada se registra la disminución de la elevación siendo este el cambio más significativo. En cuanto a variaciones en los rangos de área acumuladas que se emplearon (20%).

Gráfico 3: Curva hipsométrica de la cuenca de la Quebrada Los Negritos

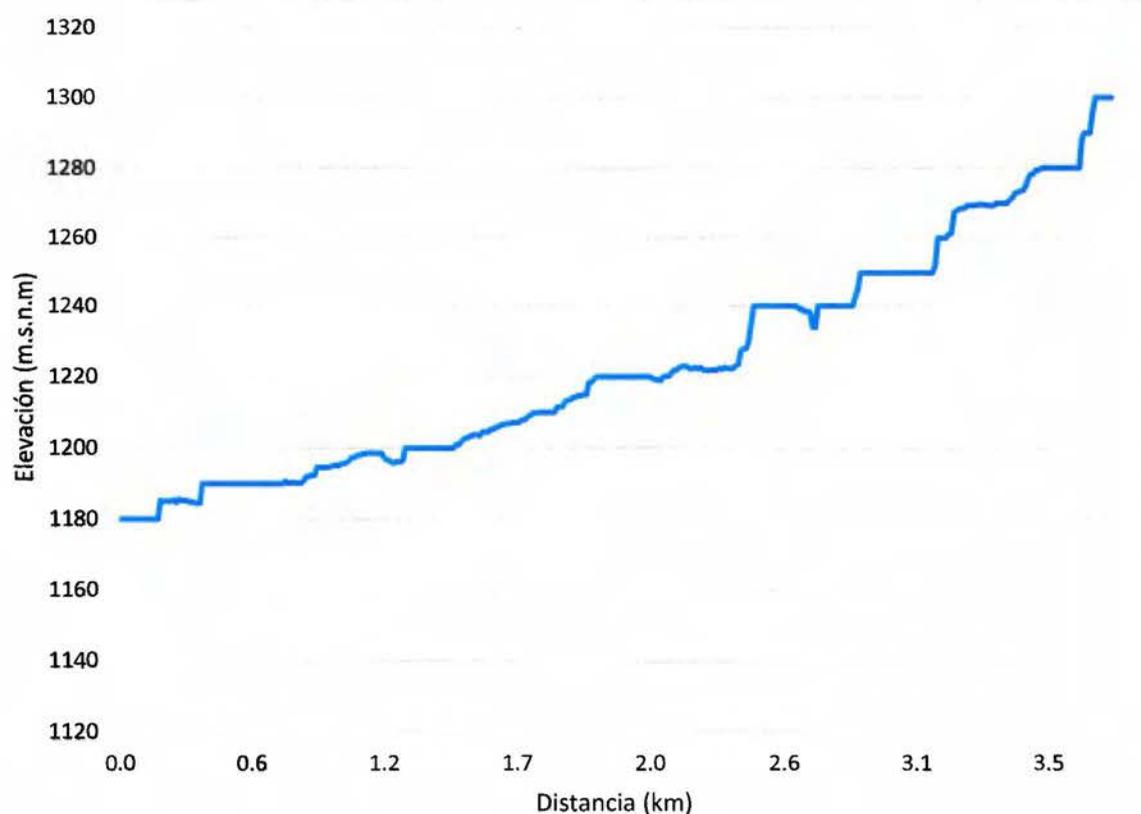


Fuente: Elaboración propia, 2016

La cuenca de la Quebrada Los Negritos posee una pendiente media de 3,47%, mientras que la pendiente promedio del cauce es de 2,44% aproximadamente.

Seguidamente, en el gráfico 4, se muestra el perfil longitudinal del cauce de la Quebrada Los Negritos, en donde se tiene como elevación máxima los 1271,98 m.s.n.m. y como mínima 1172,50 m.s.n.m. en una longitud de 4074,54 m.

Gráfico 4: Perfil Longitudinal cauce Quebrada Los Negritos



Fuente: Elaboración propia, 2016

4.2 Características Climatológicas

De acuerdo con la regionalización climatológica elaborada por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), la zona de estudio se encuentra en la Región Central, la cual a su vez se divide en Occidental y Oriental siendo que el Cantón de Montes de Oca se ubica dentro de esta última.

El Valle Oriental, posee más días con lluvia y posee mayor precipitación durante los meses de diciembre, enero y febrero producto de una mayor influencia del Caribe. La posición del Valle Oriental, más cercano a la litoral del Caribe junto con la depresión del río reventazón (entre el Volcán Irazú y Turrialba), permiten una mayor influencia de los vientos Alisios y los frentes fríos que afectan a fin y principio de año. (Instituto Meteorológico Nacional, 2015)

Tal y como se menciona anteriormente, la zona en donde se localiza la cuenca de la Quebrada los Negritos se ve influenciada por la presencia de vientos alisios provenientes del Caribe, lo cual afecta en la cantidad de precipitación y temperatura del lugar.

La temperatura de la zona oscila entre los 18 y 20°C, alcanzando mayores temperaturas en los “*meses de marzo y abril*” (Instituto Meteorológico Nacional, 2015). Referente a la precipitación “*en el Valle Occidental se presentan 148 días de lluvia*” (Instituto Meteorológico Nacional, 2015), esto debido a la influencia antes mencionada de los vientos alisios y frentes fríos provenientes del Caribe. Según datos del Atlas Climatológico elaborado por el IMN, se estima una precipitación media anual entre los 1500 y 2000 mm.

4.3 Características geológicas de la cuenca

En términos generales, el Valle Central se encuentra constituido por materiales de origen volcánico y sedimentario.

Propiamente la zona en donde se ubica la cuenca está conformada por la unidad geológica denominada Relleno Volcánico de Valle Central, en donde se pueden encontrar rocas duras de materiales volcánicos recientes tales como lavas, tobas y piroclastos, productos que datan del periodo Cuaternario.¹

4.4 Características Uso de suelo

Para efectos de esta investigación, es necesario un análisis de uso de suelo en los alrededores de la Quebrada Los Negritos, por lo que se utilizaron las ortofoto a escala 1:50000 del año 2016. Siendo está la información más reciente propiedad del Registro Nacional, para la confección de un mapa de uso de suelo en la cuenca.

En cuanto a la elaboración del mapa de uso de suelo, es importante mencionar que la cuenca posee una densidad y diversidad constructiva importante por lo que, de acuerdo con los fines de esta investigación, se efectuaron seis grandes categorizaciones:

¹ Datos geológicos tomados del Atlas 2014 del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC)

- Calles y Aceras: Comprende todas las áreas con capa asfáltica, aceras y zonas adoquinadas.
- Cementerio: Área en donde se encuentra el cementerio.
- Parqueos: Todos los estacionamientos dentro de la zona de estudio.
- Zona Boscosa: son aquellas zonas verdes de mayor densidad, como por ejemplo las reservas biológicas de la Universidad.
- Zona Urbana: en esta clasificación se agrupan todas las construcciones, es decir, viviendas, comercios, escuelas, colegios, iglesias, etc.
- Zona verde: zonas verdes de menor densidad, como jardines de viviendas por citar algún ejemplo.

Producto de esa categorización se obtiene la siguiente distribución de áreas:

Cuadro 3: Distribución áreas de la cuenca según uso de suelo

Uso	Área (m ²)	Porcentaje
Calles y aceras	510831,275	18%
Cementerio	25225,989	1%
Parqueos	124814,663	4%
Zona Boscosa	297114,584	10%
Zona Urbana	1516899,89	52%
Zona verde	443639,173	15%
Total	2918525,57	18%

Fuente: Elaboración propia, 2018

De acuerdo con la información del cuadro 3, aproximadamente un 75% del área de la cuenca se encuentra impermeabilizada, siendo el uso urbano el predominante, lo cual puede visualizarse en la figura 8:

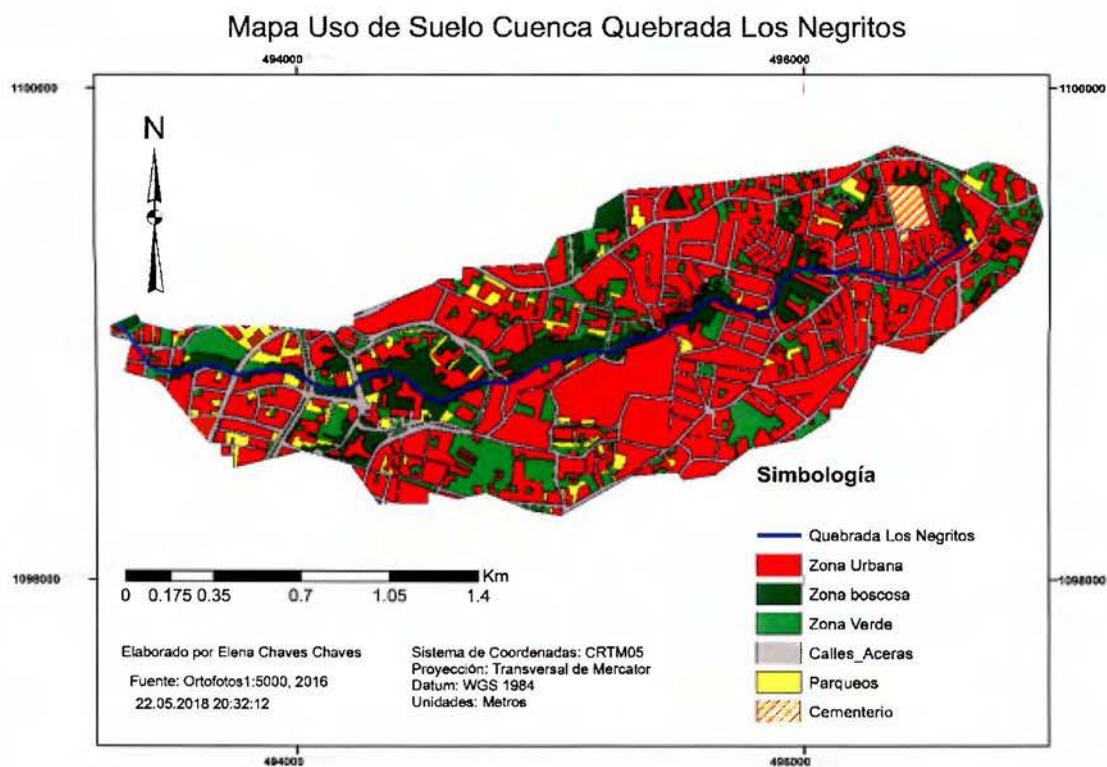


Figura 8: Mapa Uso de suelo cuenca Quebrada Los Negritos

Fuente: Elaboración propia, 2017

Capítulo V: Análisis Hidrológico

5.1 Datos de precipitación

Los insumos de precipitación para la elaboración de este proyecto provienen de la estación meteorológica CIGEFI, dentro de la zona de estudio, administrada por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) cuya información se encuentra en el cuadro 4.

Los datos de la estación CIGEFI obtenidos son de precipitación cada cinco minutos en un período de 10 años.

Cuadro 4: Información sobre la estación meteorológica utilizadas en este proyecto

Nombre de Estación	Latitud	Longitud	Altitud (m.s.n.m.)	Localización
CIGEFI	09° 56' 11''N	84° 02' 42''W	1210	San Pedro, Montes de Oca, San José

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (IMN), 2017

5.2 Análisis de frecuencia

Existen varias distribuciones de probabilidad que pueden ser empleadas para el análisis de los datos de precipitación, al igual que dos pruebas de bondad del ajuste, tal y como se mencionó en el capítulo de marco teórico. Dado que inicialmente no se conoce el comportamiento de los datos, se aplican las distribuciones de probabilidad Normal, Gumbel, y Log Gumbel. Es necesario entonces, la implementación de una prueba de ajuste de bondad de los datos para así determinar la calidad de los valores resultantes. Para este caso en particular se utilizó Smirnov-Kolmogorov ya que tal y como se menciona en el cuadro comparativo número 5, es aplicable a datos no agrupados en clases y a cualquier tipo de distribución.

Cuadro 5: Comparación entre pruebas de bondad de ajuste Chi-cuadrado y Smirnov-Kolmogorov

Chi- cuadrado	Smirnov-Kolmogorov
<ul style="list-style-type: none"> • Es aplicable solo para ajustes a la distribución normal, puesto que ha sido desarrollado con base en los datos normales e independientes. • Se realiza en la función densidad de datos agrupados en intervalos de clases • Requiere un conocimiento a priori de la función de distribución teórica utilizada en el ajuste. • En la práctica se usa para cualquier modelo de ajuste, pero estrictamente es válido solo para la normal. • Es de fácil aplicación 	<ul style="list-style-type: none"> • No requiere un conocimiento a priori de la función de distribución teórica. • Es aplicable a distribuciones de datos no agrupados, es decir, no se requiere hacer intervalos de clase • Es aplicable a cualquier distribución teórica. • Se aplica en función de distribución acumulada y no en función de densidad. • Comparándola con la prueba Chi-cuadrado, no se requiere que la frecuencia absoluta de cada clase sea igual o mayor que 5.

Fuente: Villón Bejár, 2006

Finalmente, se utilizó la distribución Gumbel o Extrema Tipo I ya que al ser sometida a la prueba de bondad del ajuste Smirnov-Kolmogorov se obtuvo un 99% de confiabilidad lo cual significa que esta función es la que mejor describe el comportamiento de las precipitaciones. En el cuadro 6 se presentan los valores de intensidad máxima obtenidas con los datos de la estación CIGEFI. (Ver Anexo I)

Cuadro 6: Valores de intensidad en mm/hr obtenidos a partir del análisis de frecuencia, según período de retorno e intervalo de tiempo para la estación CIGEFI

Período de Retorno (T)	Tiempo (min)					
	5	10	15	20	25	30
25 años	158,2	140,3	126,8	118,1	113,8	107,8
50 años	171,2	151,3	136,9	127,7	123,7	117,9
100 años	184,0	162,2	146,9	137,3	133,6	127,9

Fuente: Elaboración propia, 2017

Todo el detalle de cálculos y la prueba de bondad de ajuste para la obtención de los valores del cuadro 6 en el anexo 1.

5.3 Curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia

Para la determinación de la tormenta de diseño en cuencas pequeñas, comúnmente se utilizan las curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF), las cuales constituyen una representación gráfica y matemática de estos tres factores para la zona de estudio.

La relación matemática empleada para describir la relación entre la intensidad, duración y frecuencia es la siguiente:

$$i = \frac{CT^m}{(t + d)^n} \quad (40)$$

Donde;

i : Intensidad de la precipitación máxima en mm/hrs.

T : Período de retorno en años

t : duración de la lluvia en minutos.

d : constante que depende de la linealidad de los datos en minutos.

C, m, n : parámetros.

Las constantes C , m , n dentro de la ecuación 40 son incógnitas y deben ser determinadas, por lo que se aplican logaritmos generando lo siguiente:

$$\log(i) = \log(c) + m \log(T) - n \log(t + d) \quad (41)$$

Posteriormente, se realizan unos cambios de variable tales como:

$$y = \log(i), A_0 = \log(C), X_1 = \log(T), X_2 = \log(t + d), A_1 = m, A_2 = -n$$

La función de la ecuación 41 se convierte en:

$$y = A_0 + A_1 X_1 + A_2 X_2 \quad (42)$$

La ecuación anterior, se resuelve mediante un sistema de regresión lineal multivariable con el cual se obtiene los siguientes valores (Ver Anexo 2):

$$A_0 = 2,2235$$

$$A_1 = 0,2711$$

$$A_2 = -0,3168$$

Remplazando estos valores en los cambios de variable antes mencionados se obtiene (Ver Anexo 2):

$$C = 167,3016$$

$$m = 0,2711$$

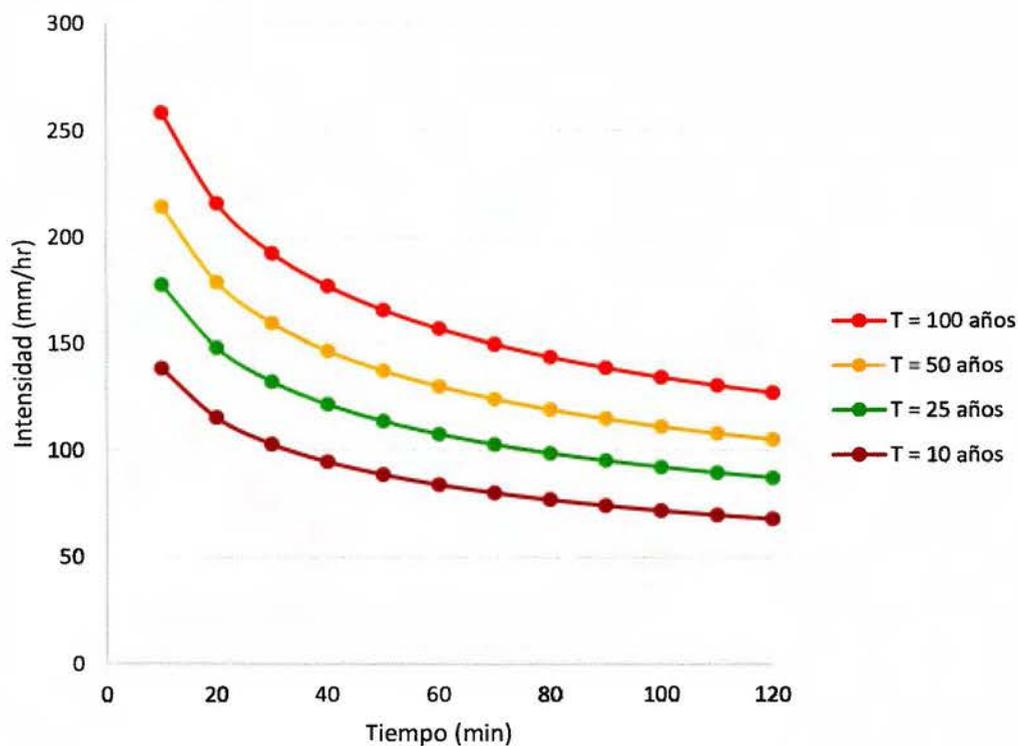
$$n = 0,3168$$

Por otro lado, la constante (d) depende de la linealidad de los datos, es decir conforme el grupo de datos se acerque a un comportamiento lineal la constante (d) tiende a uno.

Para la determinación del parámetro d , se realizaron pruebas utilizando desde $d=1$ hasta $d=7$ minutos, obteniéndose que el valor que gráficamente se ajusta mejor al comportamiento de los datos es $d=3$.

Una vez obtenidos los valores de las constantes C , m , y n , estos se rempazan en la ecuación 40, con su respectivo tiempo de duración y de retorno, produciéndose las curvas IDF del gráfico que se muestra a continuación.

Gráfico 5: Curvas Intensidad- Duración y Frecuencia (IDF) para la Quebrada Los Negritos basadas en datos de la estación CIGEFI



Fuente: Elaboración propia, 2017

Todo el detalle de cálculos para la obtención de los valores de las curvas IDF encuentra en el Anexo 2.

De las curvas IDF, representadas en el gráfico 5, se obtienen las intensidades de lluvia para los periodos de retorno a utilizar en esta investigación. Dichos valores serán empleados en el cálculo de caudales máximos y se encuentran el siguiente cuadro:

Cuadro 7: Valores de Intensidad obtenidos a partir de las curvas IDF según período de retorno para una duración de lluvia de 40 minutos.

Periodo de Retorno	Intensidad
(años)	(mm/hr)
25	121,6
50	146,8
100	177,1

Fuente: Elaboración propia, 2017

5.4 Caudales Máximos

De acuerdo con los objetivos de esta investigación para el cálculo de los caudales máximos necesarios en la determinación de las zonas de inundación se utilizaron tres métodos cálculo hidrológico a saber: el método racional, número de curva de escorrentía e isócronas. Con el fin de realizar una comparación entre los valores obtenidos y por ende utilizar el más idóneo para la Quebrada Los Negritos.

5.4.1 Método Número de Curva de Escorrentía

Con respecto al grupo hidrológico, necesario para la implementación de este método, se utilizó la descripción de suelos que se encuentra en el libro Hidrología de Máximo Villón, disponible en el anexo 4. En conjunto con la interpretación de los índices de fragilidad ambiental, geológico e hidrogeológico para el cantón de Montes de Oca, así como el artículo científico: Propiedades físicas, hidráulicas y mecánicas de suelos de origen volcánico, en sitios seleccionados del Valle Central, Costa Rica elaborado por Rolando Mora (1998).

Por cuanto de la interpretación de los índices de fragilidad, se desprende que la cuenca de la Quebrada Los Negritos se encuentra compuesta por depósitos de ceniza recientes, los cuales según Mora:

Es importante hacer notar los valores altos de la porosidad de los materiales volcánicos. Esto no significa una conductividad hidráulica alta, pues los vacíos no siempre se encuentran interconectados, o se da en ellos el desarrollo de minerales arcillosos secundarios por meteorización. (Mora, 1998)

Adicionalmente, Mora (1998) explica que producto de los procesos de meteorización de las cenizas se da un cambio en la composición física de las mismas, el cual normalmente concluye en la conformación de limos que bajo procesos de compactación tienden a convertirse en impermeables.

Por otro lado, desde el punto de vista edafológico, el Valle Central se encuentra conformado por andisoles, es decir, conformados por restos volcánicos tal y como se menciona en el documento Principales Suelos de Costa Rica, preparado por la Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (s.f.). En dicho artículo se explica que los andisoles son suelos con buen drenaje, pero a su vez retienen gran cantidad de humedad, lo que en condiciones de capacidad llena impide un adecuado traslado de flujo. También se indica que:

... estos suelos son de textura franco arenosa o más gruesa, mientras que en las posiciones intermedias del relieve presentan texturas franco limosas o francas, y en las partes inferiores ocurren con texturas arcillosas, particularmente en el horizonte B. (Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo, S.f.)

Lo anterior en contraste con lo expuesto por Mora (1998) confirma la presencia de suelos limo-arcillosos en la cuenca de la Quebrada Los Negritos, los cuales cuando llegan a su capacidad máxima de almacenamiento de agua y no son capaces de drenarla, por lo que este se convierte en esorrentía superficial.

Por otra parte, referente a la determinación del número de curva pertinente a la zona de estudio se utilizó el cuadro con número de curva para áreas urbanas del libro Handbook of Hidrology elaborado por David R. Maidment (1993). Dicho cuadro puede ser consultado en el Anexo 3.

Es importante recalcar que se dividió la cuenca en seis usos de suelo principales: calle y aceras, cementerio, parqueos, zona boscosa, zona urbana y zona verde.

A continuación, se muestran los valores de número de curva empleados para el cálculo de los caudales, según uso de suelo.

Cuadro 8: Valores empleados para la aplicación del Método Número de Curva, según uso de suelo

Uso De Suelo	Área (Km²)	Grupo Hidrológico	Número de Curva
Calles y Aceras	0,511	D	98
Cementerio	0,025	C	86
Parqueos	0,125	D	98
Zona Boscosa	0,297	B	61
Zona Urbana	1,517	D	98
Zona verde	0,444	B	61

Fuente: Elaboración propia, 2017

En la información del cuadro anterior, el área que abarca cada clasificación de uso de suelo se desprende del mapa (figura 8), para tal fin, elaborado en esta investigación a partir de las ortofotos 2016 suministradas por el Registro Nacional.

Dado que el uso de suelo de la zona no es homogéneo, es preciso la obtención de un número de curva ponderado para ser incluido en los cálculos próximos. el cual se genera mediante la ecuación:

$$\bar{N} = \frac{\sum N_i A_i}{A_T} \quad (43)$$

De conformidad con la información del cuadro 8, el número de curva ponderado es el siguiente:

$$\bar{N} = \frac{98 * 0,511 + 86 * 0,025 + 98 * 0,125 + 61 * 0,297 + 98 * 1,517 + 61 * 0,444}{2,918}$$

$$\bar{N} = 89$$

Ahora bien, referente a la información de precipitación total se utilizaron los valores mostrados en el cuadro 9, las cuales deben de ser reducidas a precipitación efectiva (P_e), por lo que primeramente es necesario obtener al almacenamiento de agua en el suelo (S) tal y como a continuación se muestra:

$$S = \frac{25400}{NC} - 254 \rightarrow S = \frac{25400}{89} - 254 = 31,4 \text{ mm}$$

Cuadro 9: Valores de precipitación total según período de retorno para una duración de la estación CIGEFI.

Periodo de Retorno	Precipitación
(años)	mm
25	81,1
50	97,8
100	118,1

Fuente: Elaboración propia, 2017

Posteriormente, se estima el valor I_a correspondiente a las pérdidas iniciales es decir al inicio de la precipitación cuando aún no se genera volumen de escorrentía pues la lluvia es absorbida por el suelo.

De acuerdo con Ven Te Chow, et al, 1994, al estudiar los resultados experimentales en cuencas pequeñas concluyeron que $I_a = 0,2 * S$, la es el caso de la Quebrada Los Negritos, por lo que:

$$I_a = 0,2 * 31,4 = 6,3 \text{ mm}$$

Seguidamente, se calcula la precipitación efectiva conociéndose que $P_e = P_t - I_a - F_a$, tal y como ya se mencionó en el marco teórico.

Cuadro 10: Valores de precipitación efectiva obtenidas para la estación CIGEFI según periodo de retorno.

Periodo de Retorno (años)	Precipitación efectiva (mm)
25	61,5
50	77,5
100	96,9

Fuente: Elaboración propia, 2018

Una vez que se cuenta con las precipitaciones efectivas, del cuadro 10, se procede al cálculo de los parámetros del hidrograma unitario triangular mediante las siguientes ecuaciones de caudal pico, tiempo base, tiempo pico, tiempo de retraso, y duración de exceso para un tiempo de concentración de 40 minutos, es decir, 0,7 hrs.

$$de = 2\sqrt{0,7} = 1,6 \text{ hrs}$$

$$T_r = 0,6 * 0,7 = 0,4 \text{ hrs}$$

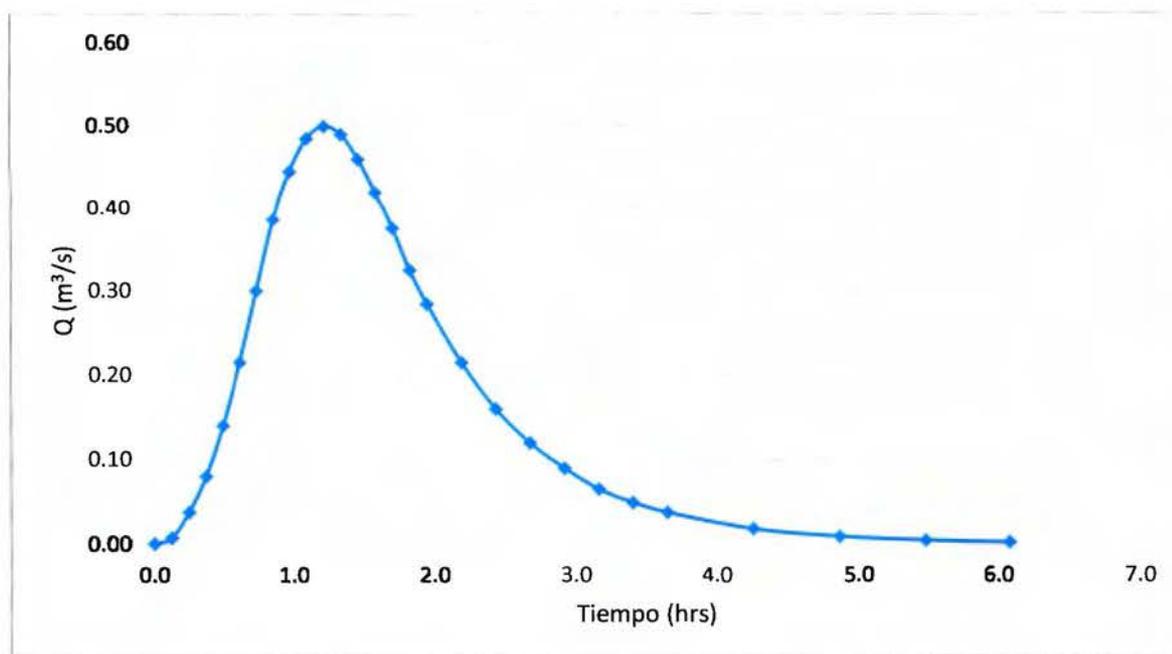
$$T_p = \frac{1,6}{2} + 0,4 = 1,2 \text{ hrs}$$

$$T_b = 2,67 * 1,2 = 3,2 \text{ hrs}$$

$$Q_p = 0,208 * \frac{2,92}{1,2} = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{mm}$$

Con el caudal pico se confecciona el hidrograma unitario adimensional de la cuenca; para lo que se multiplica el caudal pico (Q_p) por las coordenadas del hidrograma adimensional del cuadro 2.

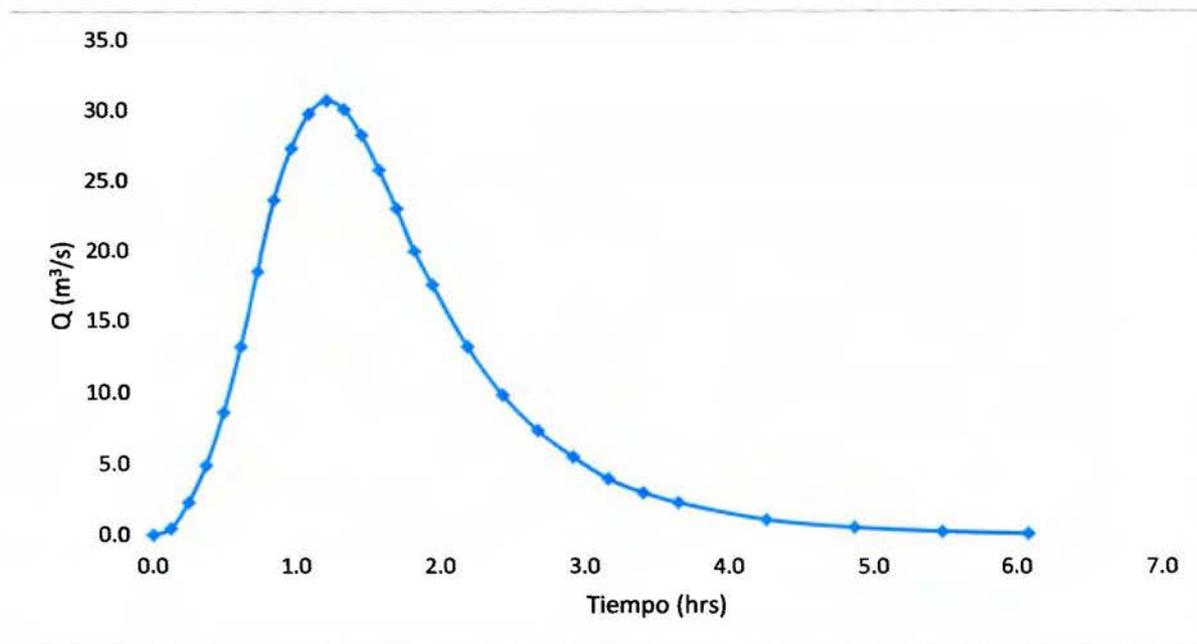
Gráfico 6: Hidrograma adimensional del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) para la Quebrada Los Negritos



Fuente: Elaboración propia, 2018

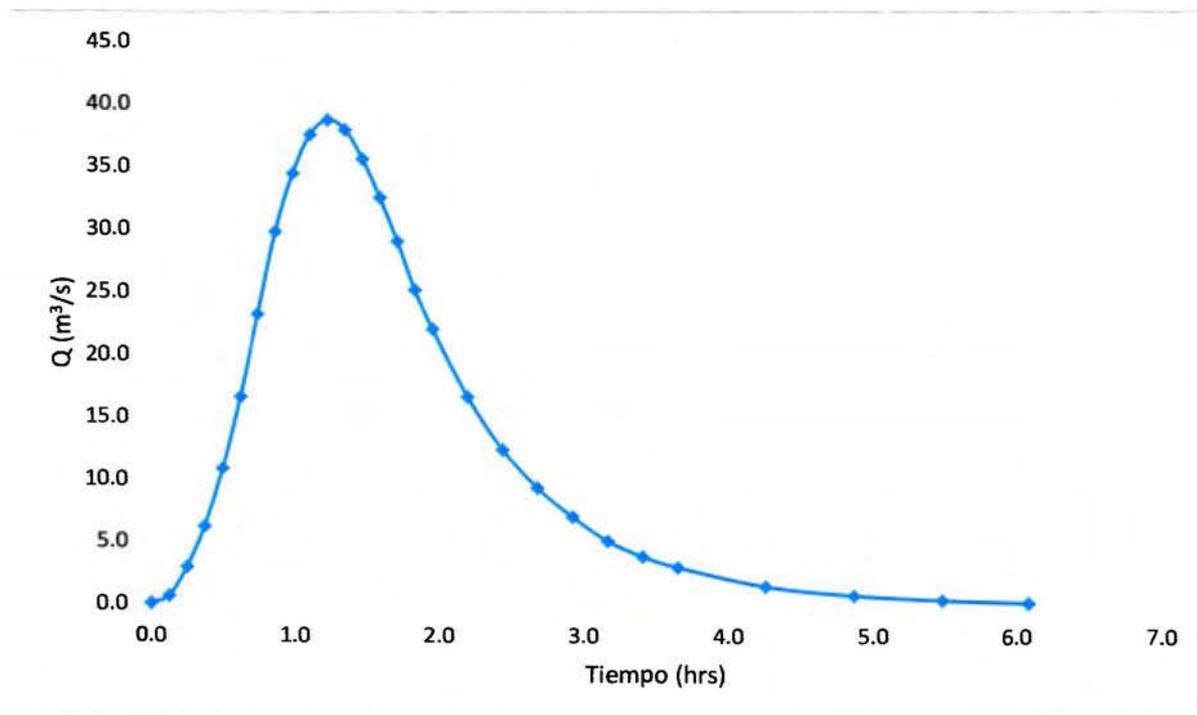
A partir del hidrograma anterior y la precipitación efectiva según periodo de retorno (cuadro 10) se generan los hidrogramas efectivos de creciente para la cuenca, los cuales se muestran a continuación (Gráfico 7 y 8).

Gráfico 7: Hidrograma efectivo de creciente de la Quebrada Los Negritos para un periodo de retorno de 25 años



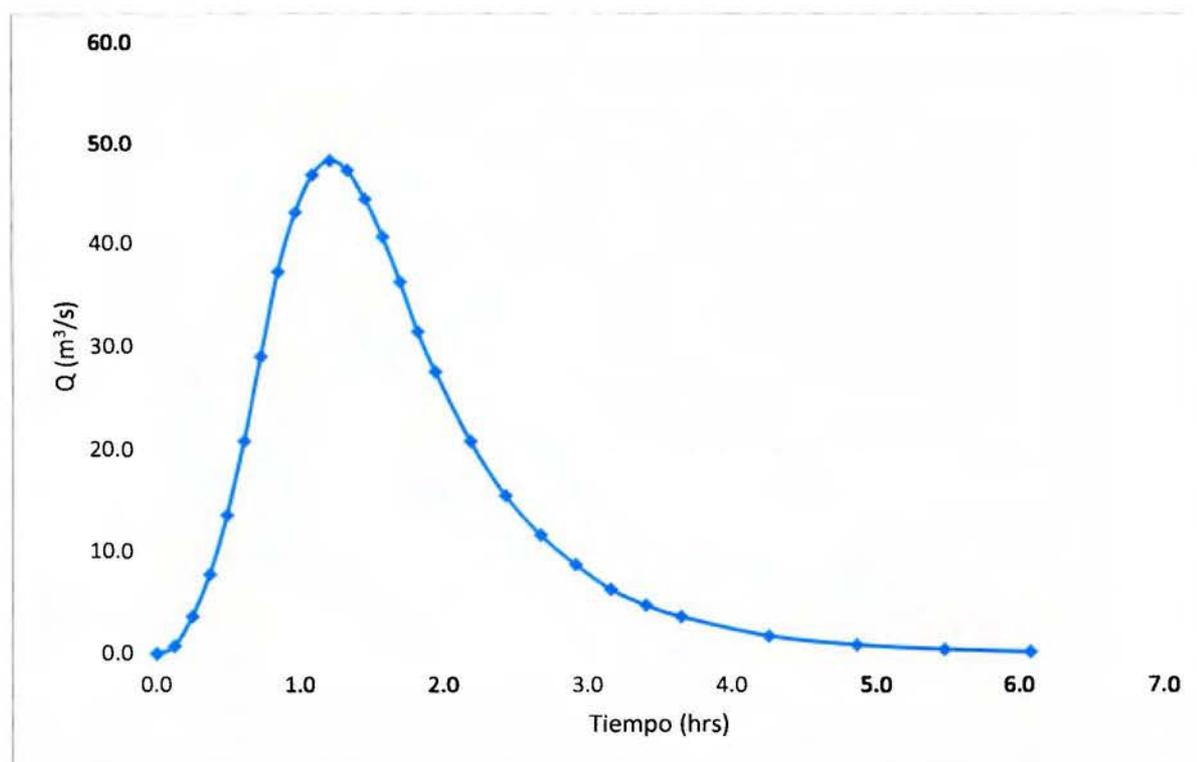
Fuente: Elaboración propia, 2018

Gráfico 8: Hidrograma efectivo de creciente de la Quebrada Los Negritos para un periodo de retorno de 50 años



Fuente: Elaboración propia, 2018

Gráfico 9: Hidrograma efectivo de creciente de la Quebrada Los Negritos para un periodo de retorno de 100 años



Fuente: Elaboración propia, 2018

De acuerdo con los hidrogramas anteriores los caudales pico a modo de resumen son:

Cuadro 11: Caudales máximos obtenidos mediante el hidrograma efectivo para la Quebrada Los Negritos, según Período de Retorno

Período de Retorno (años)	Caudal (m³/s)
25	30,7
50	38,7
100	48,4

Fuente: Elaboración propia, 2018

Todos los resultados producto de la simulación hidrológica se encuentran disponibles en el anexo 5.

5.4.2 Método Racional

5.4.2.1 Coeficiente de Escorrentía

Tal y como ya se mencionó en el marco teórico la constante adimensional coeficiente de escorrentía se calcula como:

$$C = \frac{\text{Valor de escorrentía superficial total}}{\text{Valor precipitado total}} \quad (44)$$

Para la estimación del coeficiente de escorrentía correspondiente a la zona de estudio, se utilizó la clasificación de uso de suelo descrita anteriormente (Cuadro 8), y los valores C para zonas urbanas disponible en el libro Hidrología Aplicada de Ven Te Chow, pág 511, dichos datos pueden ser consultados en el Anexo 6.

Cuadro 12: Coeficientes de escorrentía para la Quebrada Los Negritos, según periodo de retorno

Periodo de retorno (años)	C
25	0,74
50	0,77
100	0,82

Fuente: Elaboración propia, 2018

Para la estimación de los valores mostrados en cuadro anterior se tomó en cuenta lo observado en el sitio, las condiciones de uso de suelo y pendiente; elementos que fueron contrastados

con cuadro de valores de coeficiente de escorrentía para zonas urbanas de Ven Te Chow, et al, 1994 y obtener el C para cada período de retorno según categoría de uso.

Dado que cada categoría de uso de suelo posee su propio coeficiente de escorrentía es necesario generar C ponderado para la cuenca, por medio de la ecuación:

$$\bar{C} = \frac{\sum C_i A_i}{A_T} \quad (45)$$

Mediante la ecuación 45, se obtienen los coeficientes de escorrentía que se muestran en el cuadro 12, los cuales serán empleados en el cálculo de los caudales máximos para los periodos de retorno objeto de esta investigación.

5.4.2.2 Tiempo de Concentración

Para el cálculo del tiempo de concentración existen varias fórmulas tal y como se mencionó en el marco teórico.

Según Tomaz,2002 el cálculo del tiempo de concentración por medio de la fórmula de Kirpich es aplicable para cuencas en con una pendiente entre el 3-10%, mientras que, de acuerdo con Porto, 1995 cuando el valor de L supera los 10000m la fórmula de Kirpich subestima el valor de T_c .

Así mismo, Tomaz,2002, indica que la fórmula del SCS es aplicable a cuencas que poseen un área entre 1 y 800 ha y una pendiente comprendida entre 0,5 y 64%, siendo entonces aplicable a la Quebrada Los Negritos.

Las dos fórmulas restantes no son tan utilizadas, sin embargo, se cuenta con los parámetros necesarios para los cálculos y tal y como se puede interpretar en lo escrito por Ochoa Rubio, 2011 en su libro Hidrología, Hidráulica y Socavaión de puentes, existen fórmulas desarrolladas bajo ciertas condiciones que generalmente se aplican a zonas urbanas dadas su

origen, siendo por lo tanto la Australiana y la de George Rivero aplicables en este caso, más sin embargo por lo general producen resultados altos. Dicho de otra forma la son diseñadas para zonas rurales y cuando se adaptan a sectores urbanos tienden a generar tiempos sobreestimados. c A continuación, en el cuadro 13 se presentan los resultados obtenidos para el tiempo de concentración por medio de las cuatro fórmulas.

Cuadro 13: Tiempos de concentración para la Quebrada Los Negritos, según método de cálculo

Método	Tiempo de Concentración en minutos
Fórmula de Kirpich	40,4
Fórmula Australiana	98,2
Fórmula George Rivero	58,8
Fórmula del Servicio de Conservación de Suelos (SCS)	38,8

Fuente: Elaboración propia, 2018

Tal y como se observa en el cuadro anterior el método australiano proporciona un valor de tiempo de concentración muy elevado, por lo que se descarta para esta investigación. Para el caso del método del SCS y Kirpich los números obtenidos son similares, y dado que es mucho más común el uso de la fórmula de Kirpich se tomará el valor $T_c = 40$ minutos como el dato a utilizar en el cálculo de caudales.

Una vez obtenidos los valores de tiempo de concentración, coeficiente de escorrentía e intensidad de lluvia (ver cuadro 5) se procede a calcular los caudales máximos por medio del método racional, es decir:

$$Q = \frac{CIA}{360} \quad (46)$$

Donde,

Q: Caudal máximo, m^3/s

I: Intensidad máxima de lluvia, para una duración igual al tiempo de concentración, mm/hr

C: Coeficiente de escorrentía.

A: Área, ha

Sustituyendo valores en la ecuación 46 se generan los caudales máximos del siguiente cuadro:

Cuadro 14: Caudales máximos obtenidos mediante el Método Racional para la Quebrada Los Negritos, según Período de Retorno

Período de	
Retorno	Caudal
(años)	(m ³ /s)
25	72,68
50	92,15
100	118,00

Fuente: Elaboración propia, 2017

5.4.3 Método Isócronas

El método de isócronas radica en dividir la cuenca en varios segmentos según los tiempos de concentración para determinada área. Para este caso en particular, se dividió la cuenca de la Quebrada Los Negritos en isócronas cada cinco minutos hasta $T=40$ min que coincide con el tiempo de concentración. En el siguiente gráfico 10, se muestra el área comprendida entre cada isócrona.

Para el cálculo de área comprendida entre cada isócrona se emplean las siguientes fórmulas:

$$A_t = A * 1,414 * \left(\frac{t}{t_c}\right)^{1,5} \quad \text{para } t < 0,5 * t_c \quad (47)$$

$$A_t = A * \left(1 - 1,414 * \left(1 - \left(\frac{t}{t_c}\right)^{1,5}\right)\right) \quad \text{para } t \geq 0,5 * t_c \quad (48)$$

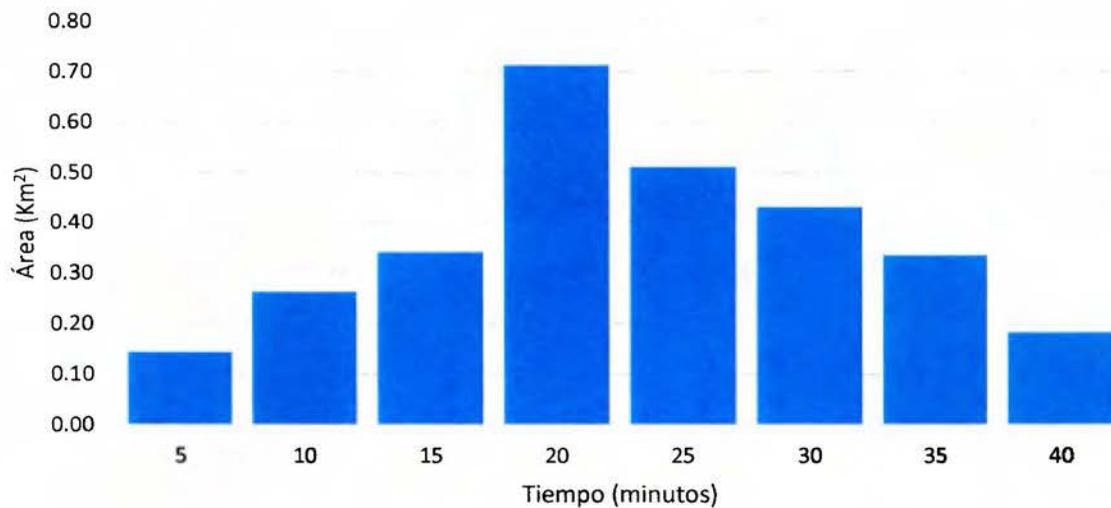
Donde,

A_t = Área acumulada hasta la isócrona de tiempo t , en Km².

A = Área de la cuenca en Km².

t_c = tiempo de concentración, en minutos.

Gráfico 10: Área comprendida entre cada isócrona para la cuenca de la Quebrada Los Negritos



Fuente: Elaboración propia, 2018

El gráfico 10, representa la relación existente en la cuenca entre área comprendida por cada isócrona, el cual se obtuvo mediante la aplicación de las ecuaciones 47 y 48.

Del gráfico anterior, se deduce que la mayor porción de área se cubre en la isócrona $T = 20$ min, en tanto la menor cantidad de terreno se encuentra en la $T = 5$ min., lo cual puede observarse gráficamente en el siguiente mapa.

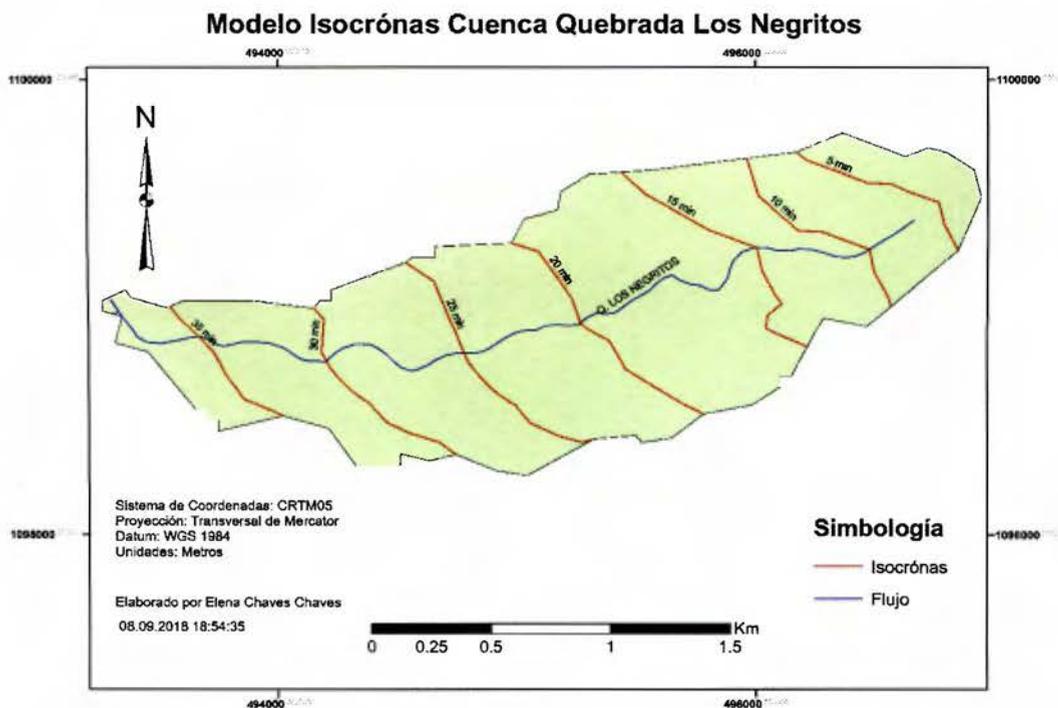


Figura 9: Mapa Isocrónas Quebrada los Negritos

Fuente: Elaboración propia, 2016

Posteriormente, se procede al cálculo de los caudales para cada una de las isócronas, utilizando los valores de intensidad del cuadro 5 para cada periodo de retorno. (Ver Anexo 7)

En resumen, de la información anterior, se puede decir que los caudales máximos para la Quebrada Los Negritos obtenidos a partir del método de Isócronas son los mostrados en el cuadro 15:

Cuadro 15: Caudales máximos obtenidos mediante el Método Isócronas para la Quebrada Los Negritos, según Período de Retorno

Período de	
Retorno	Caudal
(años)	(m³/s)
25	70,98
50	75,24
100	92,64

Fuente: Elaboración propia, 2018

5.4.4 Comparación métodos de cálculo hidrológico

Tal y como se ha mencionado se efectuó el cálculo de caudales máximos por varios métodos diferentes con el fin de observar el comportamiento de los mismos dentro de la cuenca de la Quebrada Los Negritos y determinar cuál se ajusta mejor a la zona de estudio.

En el cuadro 16 se encuentran los caudales máximos obtenidos de acuerdo con el método de cálculo ordenados de manera descendente, es decir de mayor a menor dato obtenido.

Cuadro 16: Cuadro comparativo caudales según método de cálculo

Método de cálculo de	Caudal (m³/s)		
	T=25 años	T=50 años	T= 100 años
caudal			
Método racional	72,7	92,1	118,0
Isócronas	71,0	75,2	92,6
Método SCS	53,4	58,3	63,2

Fuente: Elaboración propia, 2018

El método de número de curva o SCS, es muy utilizado para la determinación de escurrimiento total a partir de datos de precipitación sumado a otros factores de la cuenca en estudio. Ahora bien, para la determinación de los caudales bajo este método es necesario tomar en cuenta parámetros de condición hidrológica, grupo hidrológico y condición de humedad antecedente para determinar el número de curva que se empleará en la fórmula de cálculo, los cuales se

extraen de tablas predeterminadas para diferentes zonas con circunstancias diferentes a las de la zona de estudio procurándose seleccionar el valor que mejor represente la cuenca, por lo que puede decirse que el valor obtenido es una aproximación. Cabe resaltar que los caudales calculados por este procedimiento fueron los más bajos que se obtuvieron. (Ver cuadro 16)

Por otro lado, en el caso del método isocrónas, dado que una isócrona es una línea que une los puntos en los que el agua precipitada sobre ellos tarda el mismo tiempo en llegar a la sección de salida que delimita la cuenca hidrográfica, o bien, “*líneas de tiempo de tránsito constante hacia la salida de la cuenca*” (Ven Te Chow, Maidment, & Mays, 1994, p. 273). Lo anterior implica que, teniéndose las áreas comprendidas entre isócronas puede aplicarse la fórmula racional para la obtención de los respectivos caudales.

Los caudales obtenidos por medio de isócronas registran valores numéricos similares a los del método racional para los periodos de retorno de 25 y cien años; sin embargo, para los 50 años si se da una diferencia significativa.

Finalmente, el método racional “*es probablemente el método más ampliamente utilizado hoy en día para el diseño de alcantarillados de aguas de lluvia.*” (Serrano, 2011). Sin embargo es bastante criticado ya que proporciona solamente un caudal pico y supone que la lluvia es uniforme en el tiempo para toda el área de la cuenca. En este procedimiento el caudal es directamente proporcional a la intensidad de precipitación y al área de drenaje, al igual que el de isócronas. También, existen varias versiones sobre el tamaño que debe tener la cuenca para que pueda aplicarse, sin embargo, “*puede utilizarse para áreas a partir de 0,01 Km², pero nunca mayores a 4,86 Km²*”. (Linsley y Franzini, 1974: p. 79)

Conforme a la información contenida en el cuadro 16 el método racional tal y como es costumbre presenta los valores más elevados de caudal, sin embargo, para efectos del análisis hidráulico para la Quebrada Los Negritos dentro de la Ciudad Universitaria, se tomarán estos valores para el análisis hidráulico esto debido a que es el más utilizado para diseño, aunado a que la cuenca posee un área de 2,83 Km² (dentro del rango según Linsley y Franzini), y una pendiente baja del 3.6%, es decir, se cumple con las condiciones para su aplicación.

Además, la cuenca de la Quebrada Los Negritos se encuentra altamente impermeabilizada debido al importante desarrollo urbanístico que existe en el cantón de Montes de Oca. Resulta entonces importante destacar que basado en la versión más reciente de fotografías ortorectificadas del Registro Nacional del año 2016, la cuenca de la Quebrada Los Negritos posee aproximadamente un 75% de impermeabilización. Dato que probablemente aumentó con la construcción del nuevo complejo de edificios en la Ciudad de la Investigación y demás que se den en la zona, por lo que el hecho de los valores obtenidos por el método racional son los más elevados podría ser beneficioso a cierto plazo.

Por todo lo anterior, es que se decide trabajar con los valores generados a partir del método racional.

Capítulo VI: Análisis Hidráulico

En esta etapa se utilizó el software HEC-RAS (Hydrological Engineering Center- River Analysis System). El cual permite realizar simulaciones de caudal tanto en canales artificiales como en naturales en un ambiente gráfico y mediante cuadros de resultados, los cuales pueden ser vinculados de manera rápida y efectiva en sistemas de información geográfica tales como ArcGIS, por medio de la aplicación HEC-GeoRAS.

En la construcción del modelo para la Quebrada Los Negritos se utilizó, en un principio, el levantamiento topográfico de la zona en estudio suministrado por la Oficina Ejecutora del Programa de Inversiones (OEPI) de la Universidad de Costa Rica que se encuentra georreferenciada al sistema CRTM05; sin embargo, al momento de realizar el montaje de esta información en las fotografías aéreas oficiales del Registro Nacional, se detecta un error de desfase importante en las coordenadas X, Y , (del orden métrico) por lo que se decide crear una cuadrícula (*raster*) con esta información, corregir el problema en ArcGIS y crear todos los elementos necesarios para HEC-RAS desde aquí.

La longitud del tramo de estudio fue definida con base a los límites del Campus Universitario, teniéndose entonces una distancia de 1625.38 m sobre la cual con la herramienta HEC-GeoRAS se definieron las secciones transversales cada 20 metros. Esto debido a que la pendiente de la cuenca es baja, así como las capas necesarias para efectuar la simulación hidráulica en HEC-RAS tales como: línea centro de corriente (río), líneas de bancos, trayectoria del flujo y secciones transversales. La figura 10 se muestra una imagen de lo obtenido.

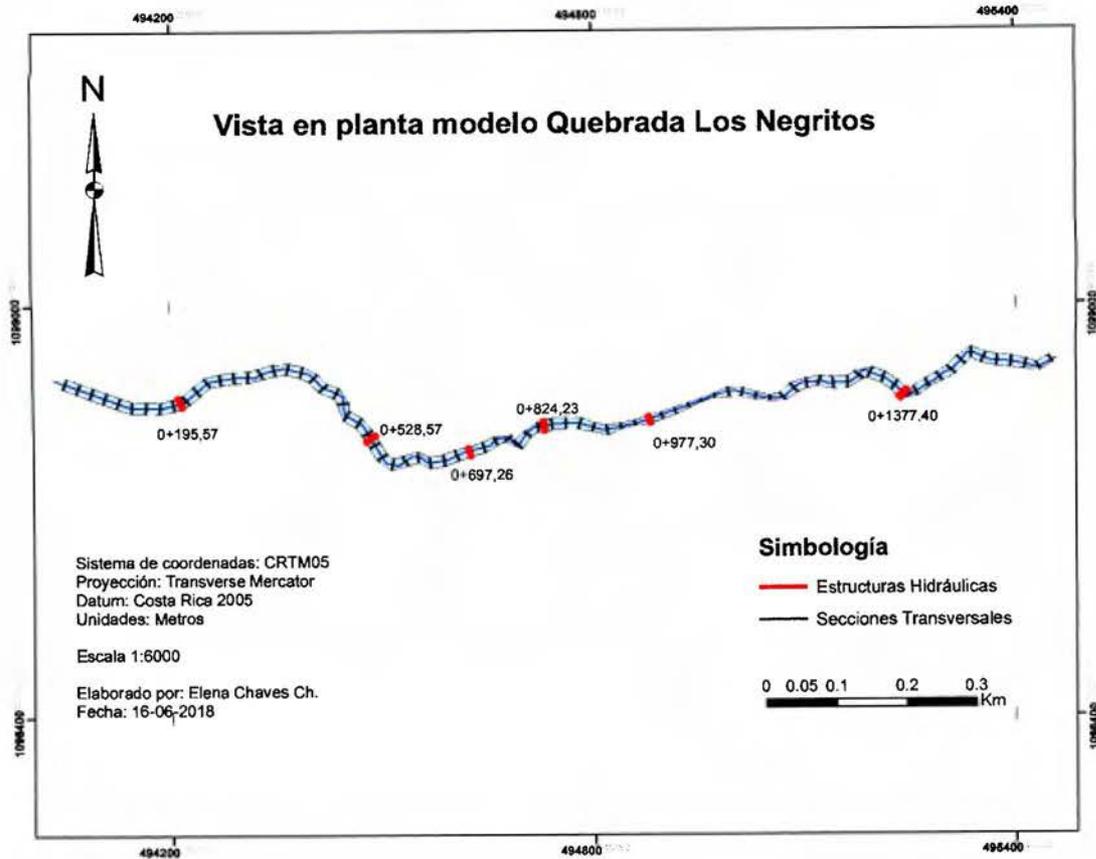


Figura 10: Vista en planta modelo Quebrada Los Negritos en HEC-RAS

Fuente: Elaboración propia, 2018

En cuanto al establecimiento de las condiciones de frontera se definió con pendiente normal de 3,6%, ya que es el dato disponible para este estudio.

Con respecto al coeficiente de rugosidad, este se obtiene por medio de la fórmula de Cowan para ambas márgenes de la quebrada y el canal principal.

Cabe destacar que en el caso de presencia de puentes y/o alcantarillas el coeficiente de rugosidad varía de acuerdo con el material empleado para su construcción. Las imágenes siguientes, muestran las condiciones del cauce de la Quebrada Los Negritos, en las cuales se puede notar la presencia de obstrucciones y vegetación. (Ver figura 11)

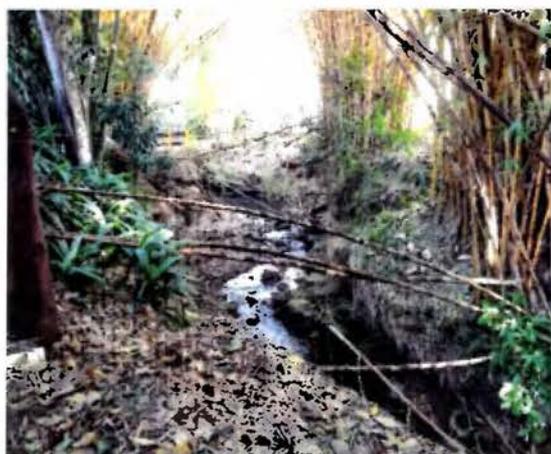
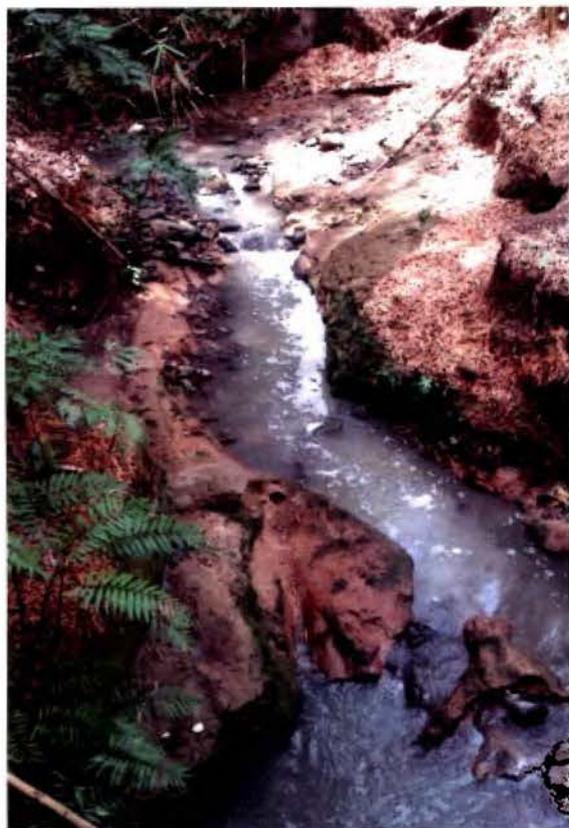


Figura 11: Cauce de la Quebrada Los Negritos

Fuente: Elaboración propia, 2018

Finalmente se obtienen tres coeficientes de rugosidad (Ver anexo 8):

- Canal principal: $0,067 \text{ m/s}^{1/3}$
- Margen derecha: $0,073 \text{ m/s}^{1/3}$
- Margen izquierda: $0,079 \text{ m/s}^{1/3}$

Tal y como ya se mencionó los caudales a evaluar en la simulación son los calculados por el método racional, disponibles en el cuadro 16, para los periodos de retorno de 25, 50 y 100 años respectivamente.

Seguidamente, se muestra un cuadro resumen con los principales parámetros empleados en la simulación hidráulica:

Cuadro 17: Parámetros empleados en la simulación de la Quebrada Los Negritos en el programa HEC-RAS

Parámetro	Especificación
Número total de secciones	87
Transversales	
Estación aguas abajo	0 + 000
Estación aguas arriba	0 + 1617,70
Estaciones con estructuras	0+195,57
	0+528,16
	0+697,26
	0+824,23
	0+977,30
	0+1377,40
Condición de frontera	Profundidad normal
	S= 3,6%
Caudal 25 años	72,68 m ³ /s
Caudal 50 años	92,15 m ³ /s
Caudal 100 años	118,00 m ³ /s

Fuente: Elaboración propia, 2018

6.1 Resumen de resultados simulación en HEC-RAS

El programa HEC-RAS muestra los resultados obtenidos de varias maneras, mediante tablas, perfiles, secciones transversales, gráficos según variables, vista múltiple en tres dimensiones, entre otras. A continuación, se presentan los perfiles generados para cada uno de los períodos de retorno. (12,13,14, y 15)

En todos los perfiles, se muestra la simbología en la esquina superior derecha, la cual debe ser interpretada de la siguiente forma:

- “*Water Surface*” (WS): Superficie de agua
- “*Critical depth elevation*”: cota de profundidad crítica.
- “*Ground*”: superficie terrestre.
- *T*: Tiempo de retorno

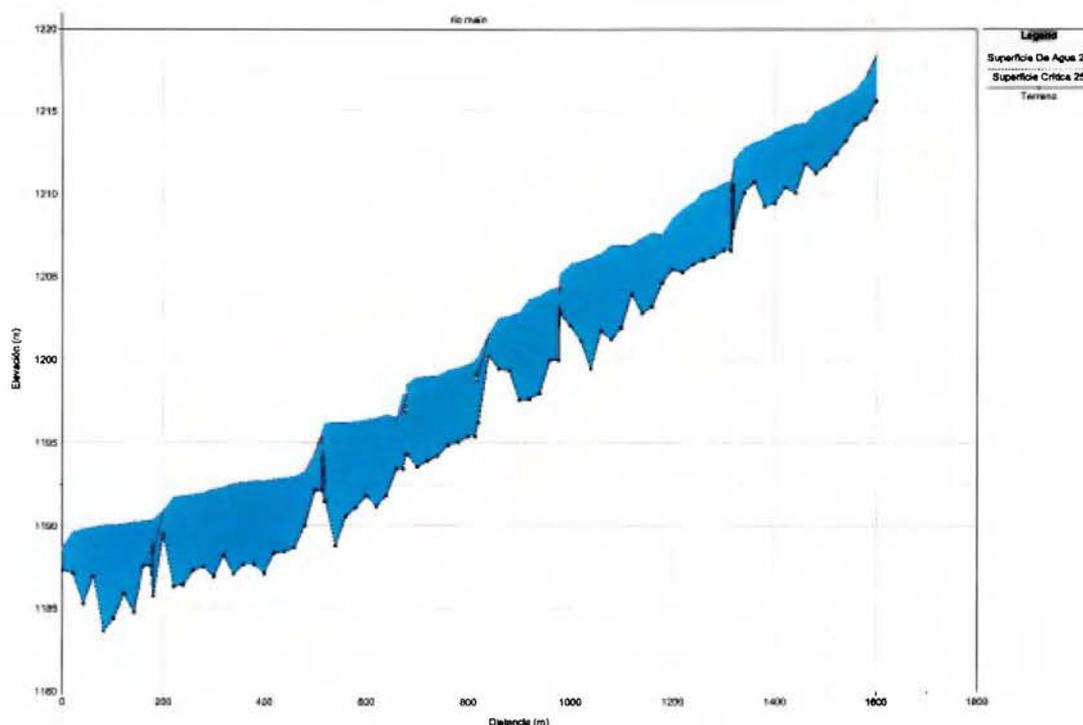


Figura 12: Vista en perfil simulación HEC-RAS para periodo de retorno de 25 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

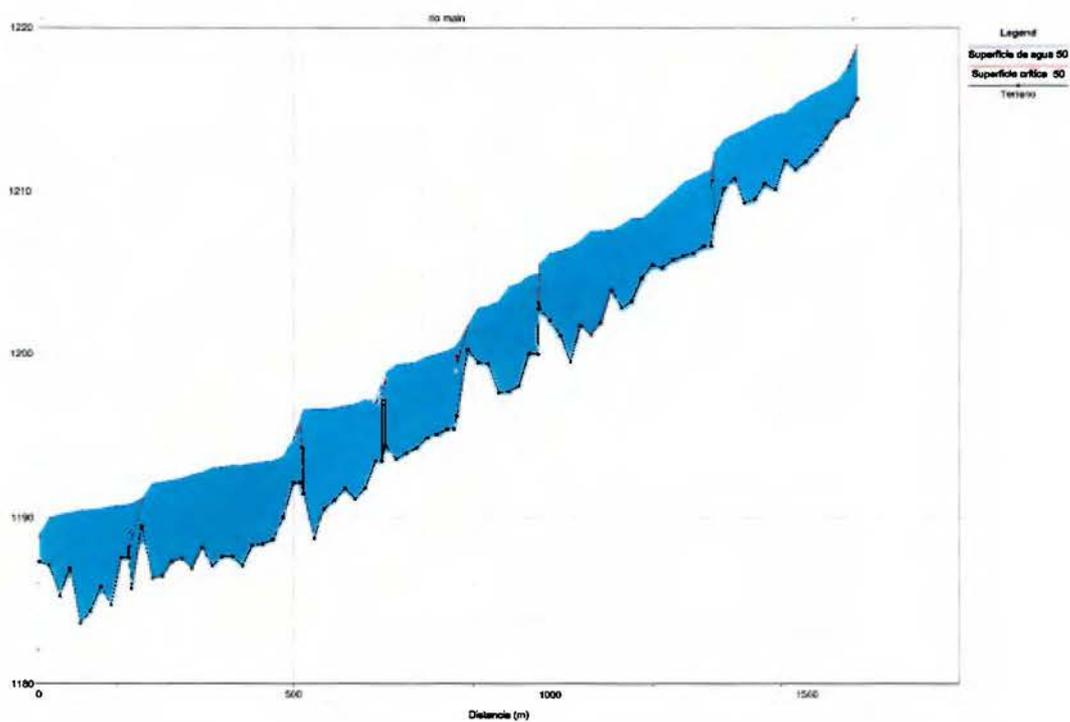


Figura 13: Vista en perfil simulación HEC-RAS para periodo de retorno de 50 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

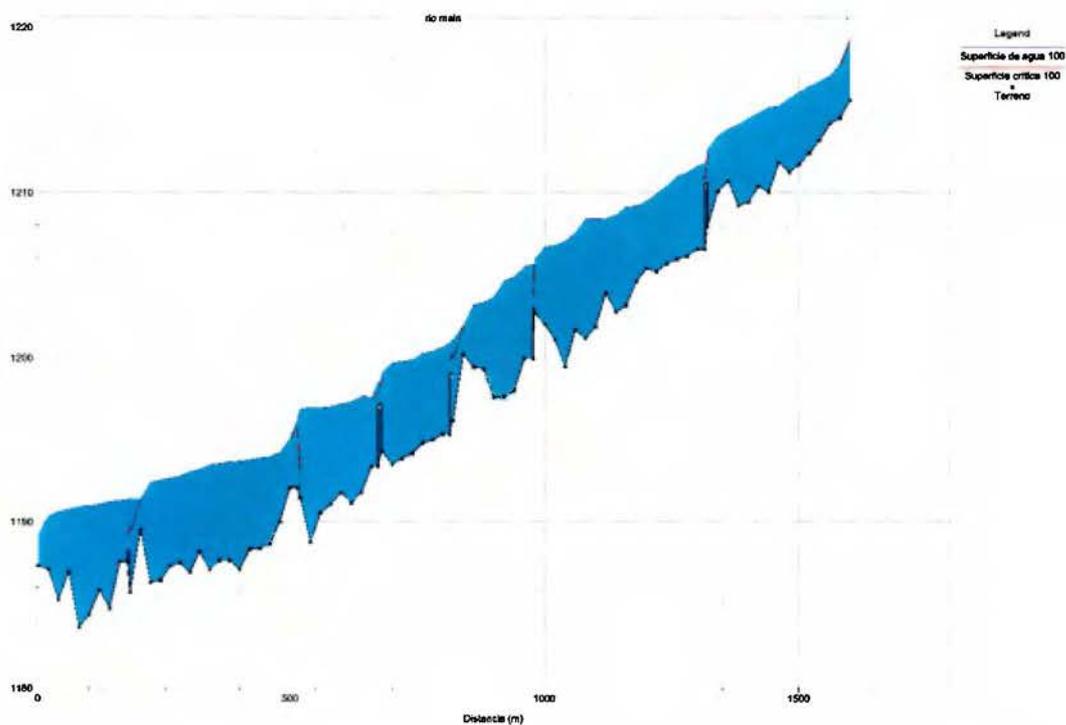


Figura 14: Vista en perfil simulación HEC-RAS para periodo de retorno de 100 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

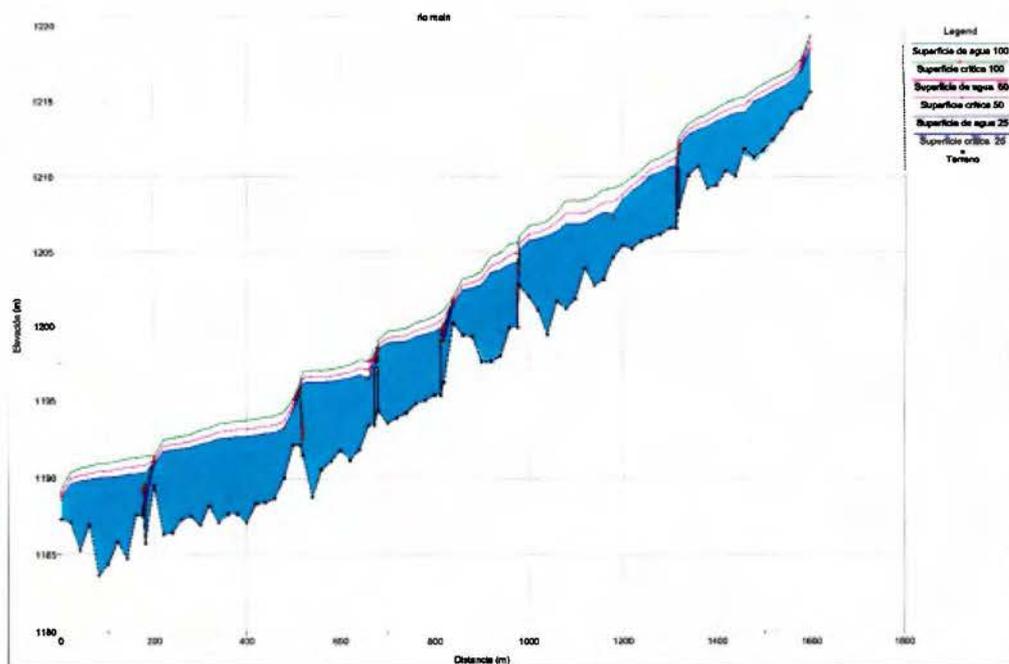


Figura 15: Vista en perfil simulación HEC-RAS para todos los periodos de retorno

Fuente: Elaboración propia, 2018

Capítulo VII: Zonas en riesgo de inundación

Posterior a la generación de los datos procedentes del análisis hidráulico, en el programa HEC-RAS, se procede a la confección de los mapas correspondientes a las zonas en riesgo de inundación de la Quebrada Los Negritos dentro del campus universitario, para lo cual se utilizó la herramienta HEC-GeoRAS.

De acuerdo con el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, creadores del programa, HEC-GeoRAS es un conjunto de procesos, herramientas para el procesamiento de datos geospaciales utilizando la interfaz gráfica del software ArcGIS.

Previo a la utilización de HEC-GeoRAS, es necesario la confección de un modelo digital del terreno en estudio, así como la elaboración del análisis hidráulico en HEC-RAS, el cual será exportado en un formato compatible con ArcGIS.

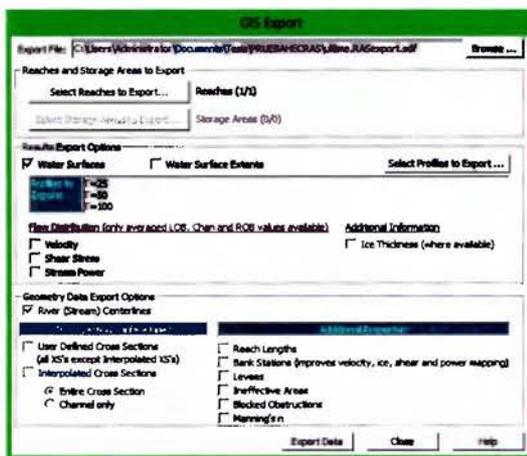


Figura 16: Exportación datos del HEC -RAS, al programa ArcGIS

Fuente: Elaboración propia, 2018

Una vez que se cuenta con los datos en un formato compatible se importan primero el modelo digital de elevación y posteriormente los datos generados en el programa HEC-RAS generándose un producto gráfico como el que se muestra seguidamente en las figuras 17 y 18:



Figura 17: Importación datos del HEC -RAS, al programa ArcGIS

Fuente: Elaboración propia, 2018



Figura 18: Importación datos del HEC -RAS, al programa ArcGIS

Fuente: Elaboración propia, 2018

Seguidamente, se genera una superficie de agua que delimitará las áreas de inundación mediante la herramienta de HEC-GeoRAS, utilizando primeramente la opción de “*Water Surface Generation*” y posteriormente “*Floodplain Delineation Using Raster*” para cada periodo de retorno.

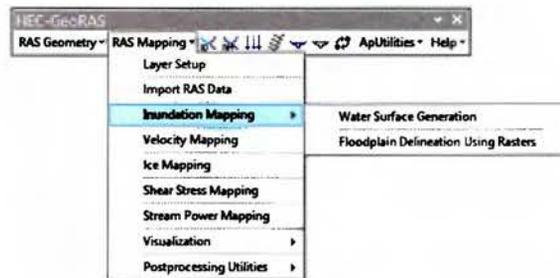


Figura 19: Herramientas HEC-GeoRAS

Fuente: Elaboración propia, 2018

Para el caso de un periodo de retorno de 25 años, se determinó la existencia de varios sectores que eventualmente podrían generar problemas de inundación, tales como:

- Tramo 0+17 -0+477 (Sector 1), Pueden tomarse como puntos de referencia aproximados, frente a la Facultad de Derecho hasta la parte trasera del edificio de Aulas Universitarias.
- Tramo 0+857- 0+1217 (Sector 2), es decir, desde frente a la Escuela de Música hasta aproximadamente frente a la Facultad de Ingeniería en la Ciudad de la Investigación.

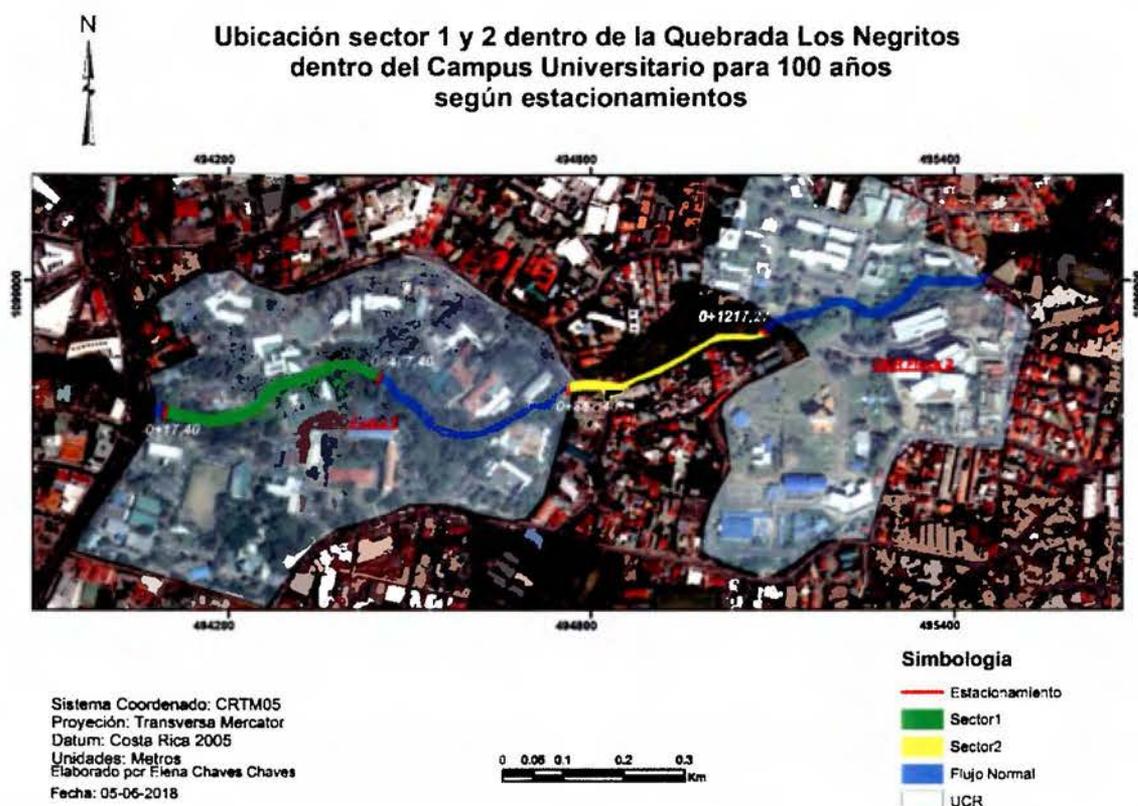


Figura 20: Mapa de inundación para los periodos de retorno de 100 años.

Fuente: Elaboración propia, 2018

En la figura 20, se muestra un mapa de ubicación para los sectores denominados como 1 y 2, con el objetivo de lograr una visualización gráfica de las zonas inundables dentro del campus universitario.

Seguidamente, se muestra un montaje de los resultados de profundidad obtenidos en el HEC-RAS sobre la ortofoto de la zona para cada periodo de retorno.

Resultado Simulación Quebrada Los Negritos para un período de retorno de 25 años

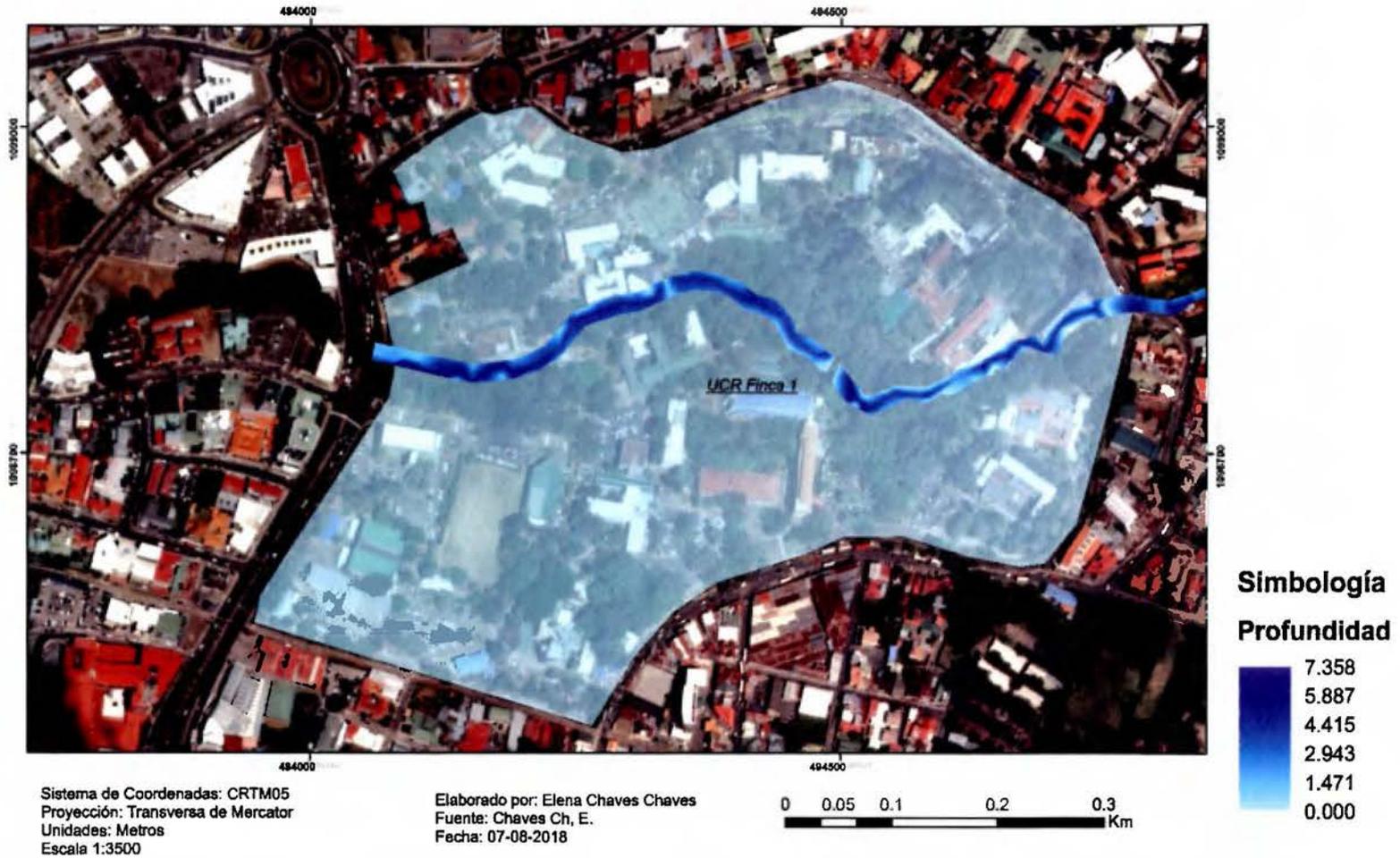


Figura 21: Mapa de profundidad a partir de la simulación en HEC-RAS finca 1, para un periodo de retorno de 25 años

Fuente: Elaboración propia, 2018



**Resultado Simulación Quebrada Los Negritos
para un período de retorno de 25 años**



Simbología

Profundidad



Sistema de Coordenadas: CRTM05
Proyección: Transversa de Mercator
Unidades: Metros
Escala 1:3500

Elaborado por: Elena Chaves Chaves
Fuente: Chaves Ch, E.
Fecha: 07-08-2018

Figura 22: Mapa de profundidad a partir de la simulación en HEC-RAS finca 2 (Ciudad de la Investigación), para un periodo de retorno de 25 años

Fuente: Elaboración propia, 2018



Resultado Simulación Quebrada Los Negritos para un período de 50 años

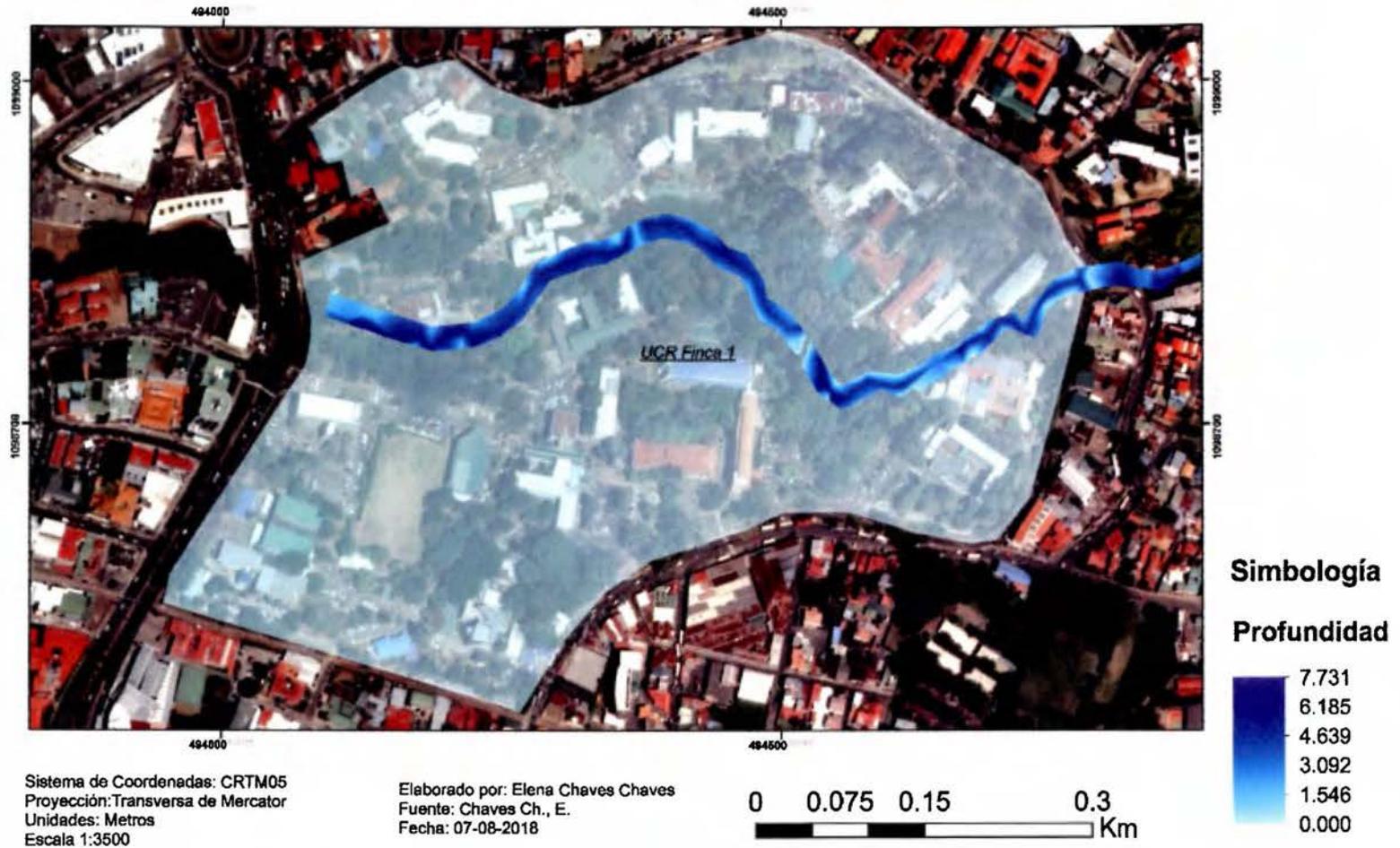


Figura 23: Mapa de profundidad a partir de la simulación en HEC-RAS finca 1, para un periodo de retorno de 50 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

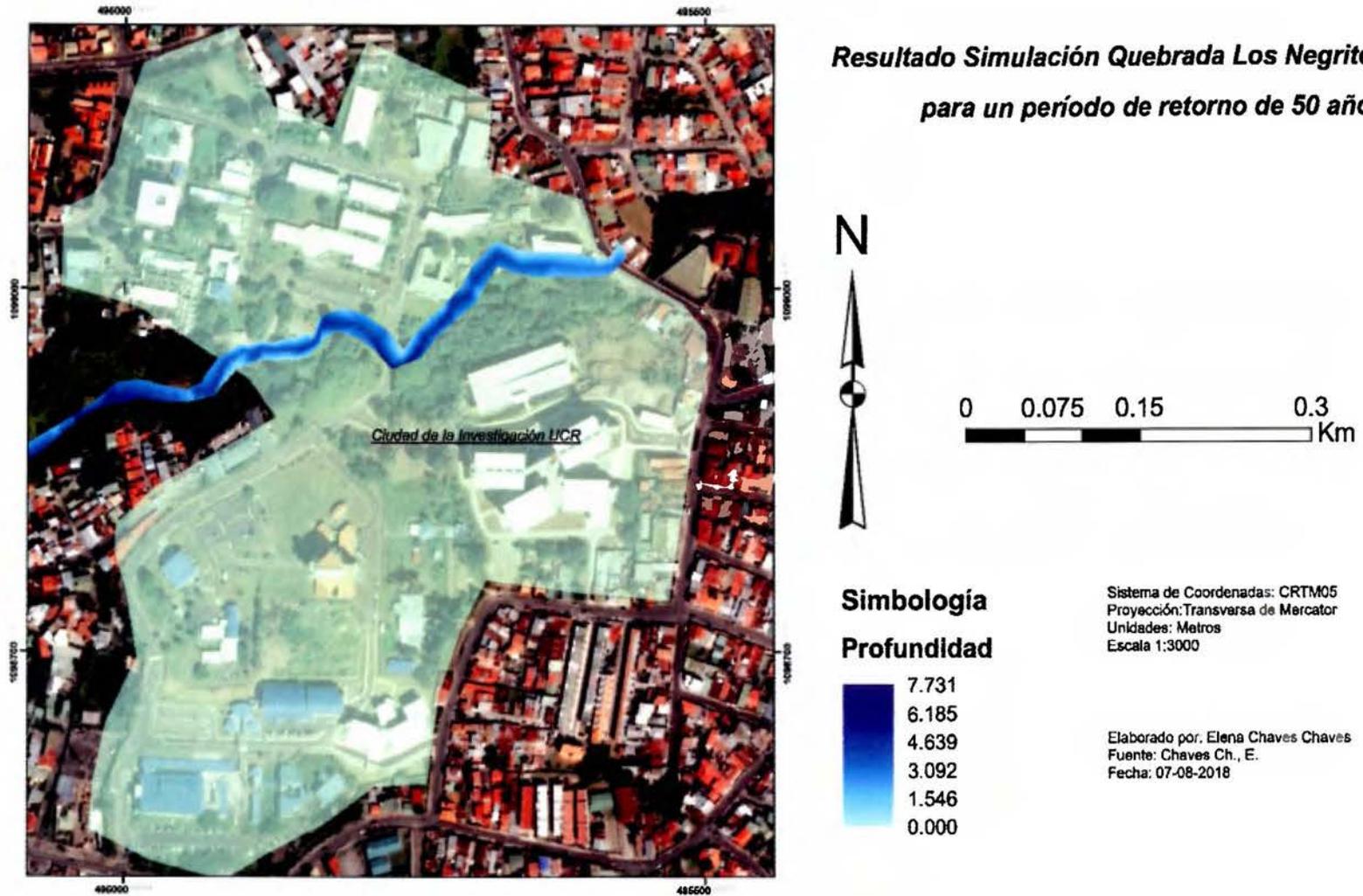


Figura 24: Mapa de profundidad a partir de la simulación en HEC-RAS finca 2 (Ciudad de la Investigación), para un periodo de retorno de 50 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

Resultado Simulación Quebrada Los Negritos para un período de retorno de 100 años

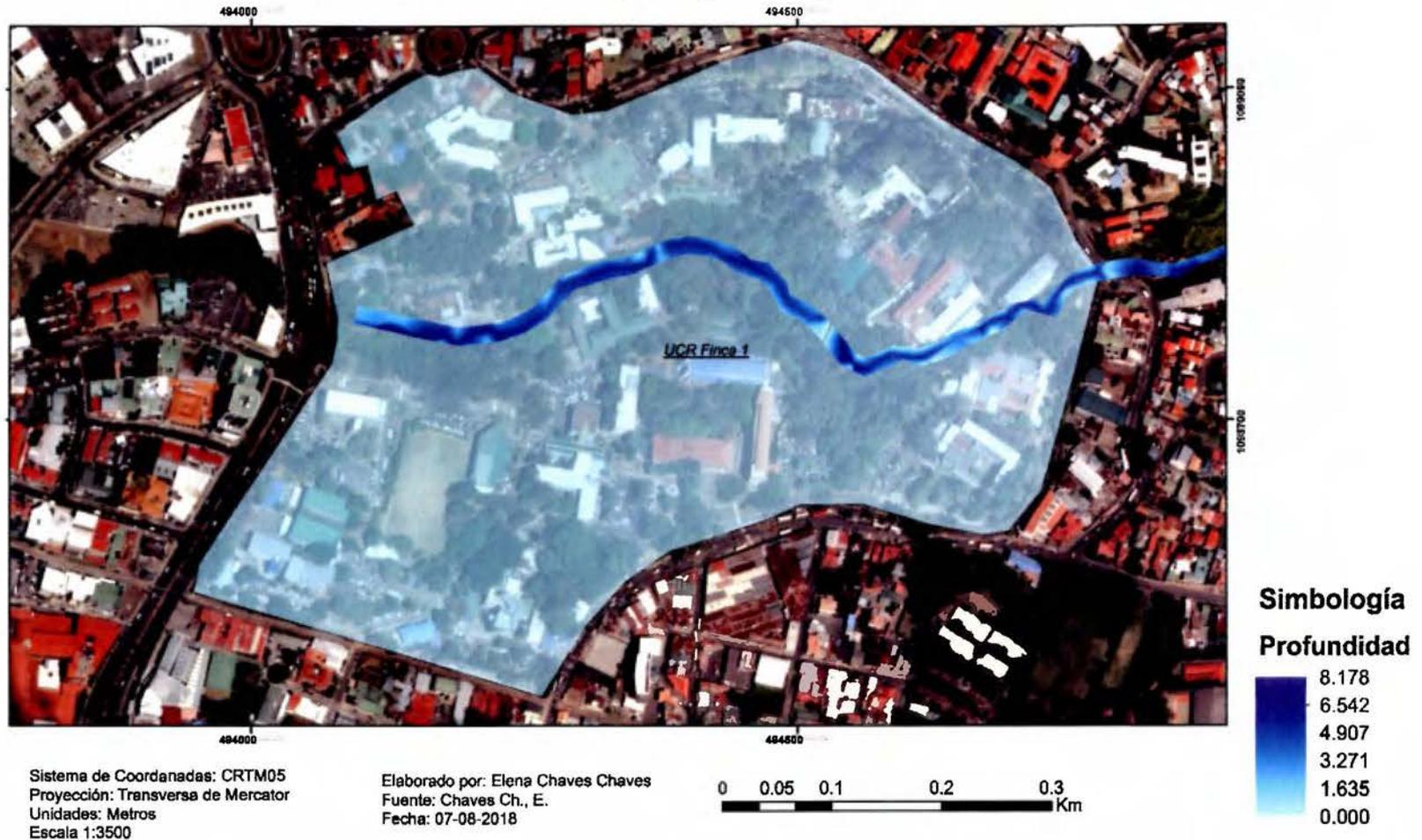


Figura 25: Mapa de profundidad a partir de la simulación en HEC-RAS finca 1, para un periodo de retorno de 100 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

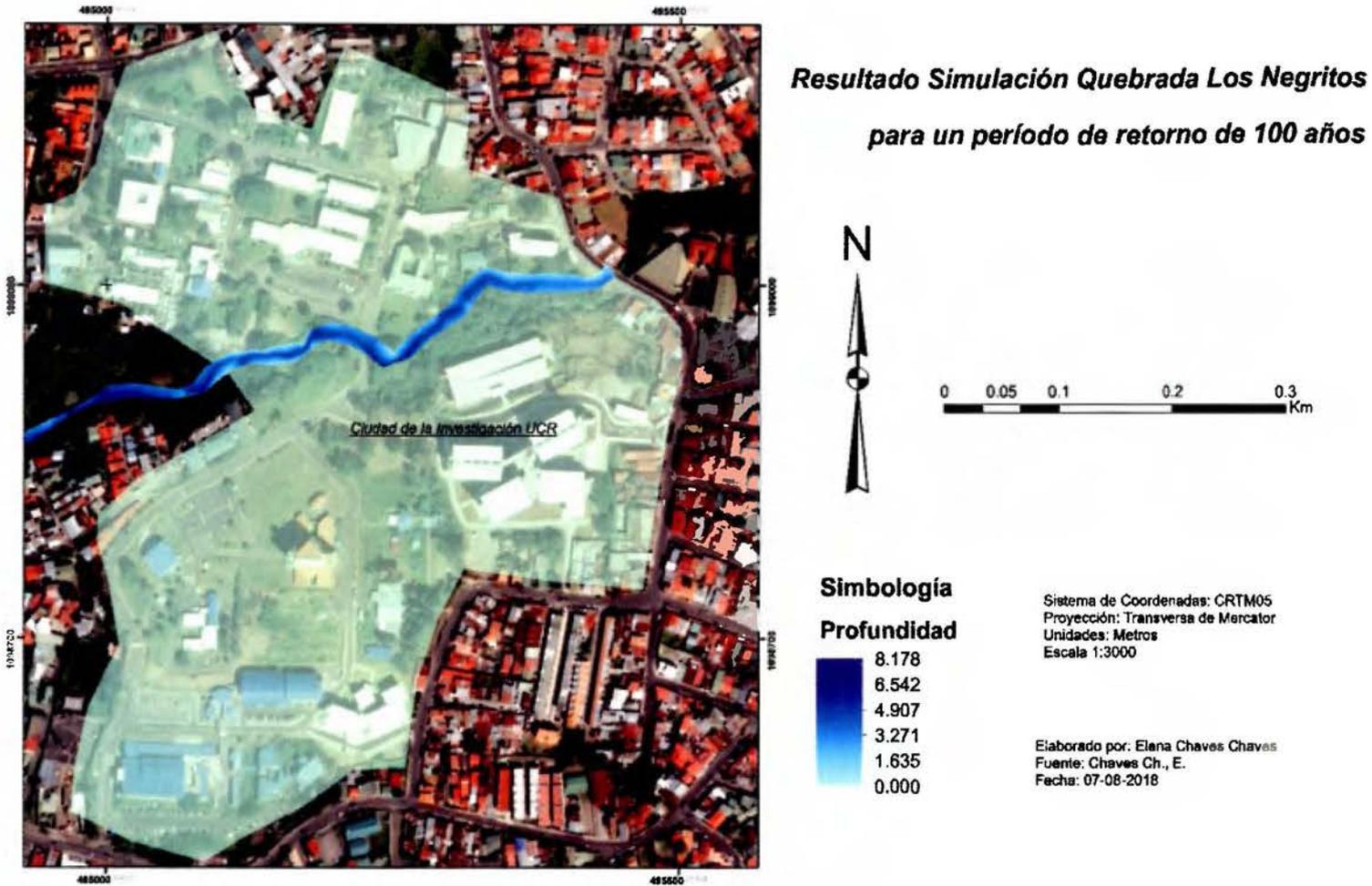


Figura 26: Mapa de profundidad a partir de la simulación en HEC-RAS finca 2 (Ciudad de la Investigación), para un periodo de retorno de 100 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

En las imágenes anteriores, se puede observar la profundidad producto de proceso de simulación en el programa HEC-RAS para la Quebrada Los Negritos.

Conforme el período de retorno aumenta, la profundidad también crece. En el siguiente cuadro se muestran las profundidades máximas según período de retorno, mismas que se aprecian en los mapas anteriores.

Cuadro 18: Profundidades máximas producto de la simulación de la Quebrada Los Negritos en el programa HEC-RAS según período de retorno

Periodo de retorno en años	Profundidad Máxima (m)
25	7,358
50	7,731
100	8,178

Fuente: Elaboración propia, 2018

Por otro lado, a partir de la simulación en el programa HEC-RAS se obtuvieron valores de velocidad del flujo, los cuales se representan en los mapas que a continuación se muestra: (Ver figuras 27,28,29,30,31, y 32)



Resultado Simulación Quebrada Los Negritos para un período de retorno de 25 años

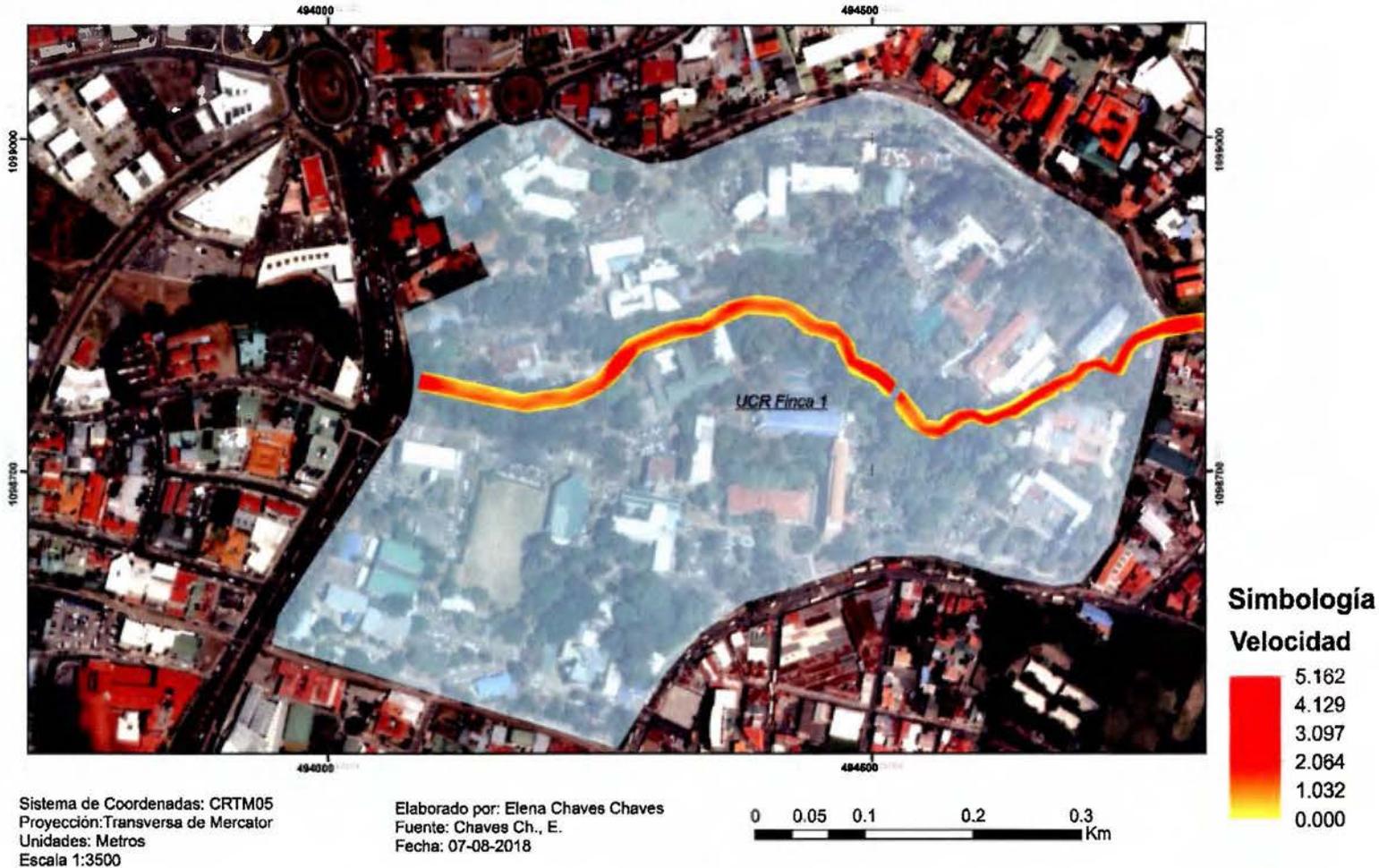
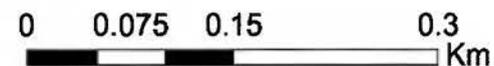


Figura 27: Mapa de velocidad a partir de la simulación en HEC-RAS finca 1, para un periodo de retorno de 25 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

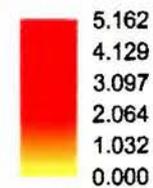


**Resultado Simulación Quebrada Los Negritos
para un período de retorno de 25 años**



Simbología

Velocidad



Sistema de Coordenadas: CRTM05
Proyección: Transversa de Mercator
Unidades: Metros
Escala 1:3000

Elaborado por: Elena Chaves Chaves
Fuente: Chaves Ch., E.
Fecha: 07-08-2018

Figura 28: Mapa de velocidad a partir de la simulación en HEC-RAS finca 2 (Ciudad de la Investigación), para un período de retorno de 25 años

Fuente: Elaboración propia, 2018



Resultados Simulación Quebrada Los Negritos para un período de retorno de 50 años

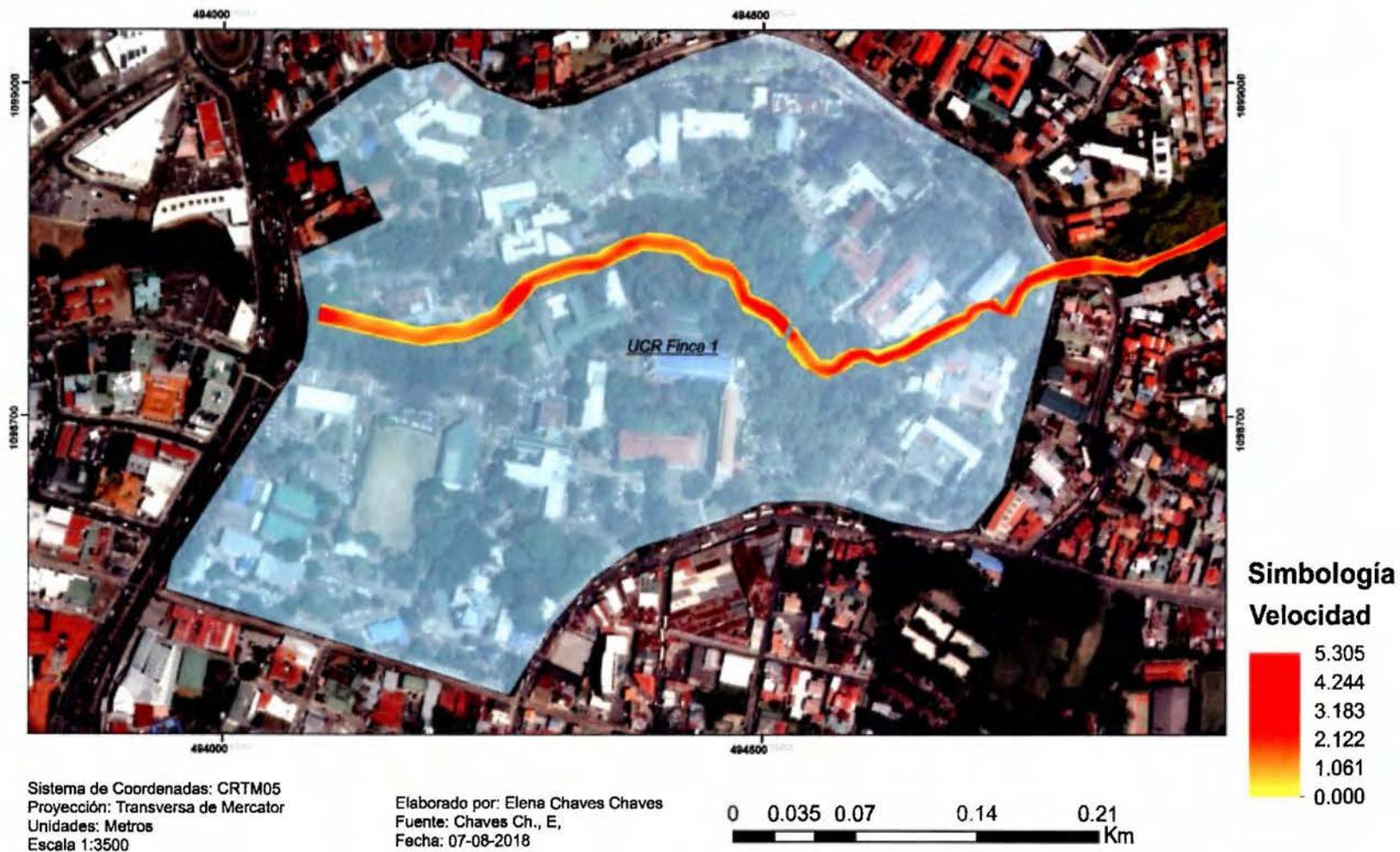


Figura 29: Mapa de velocidad a partir de la simulación en HEC-RAS finca 1, para un periodo de retorno de 50 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

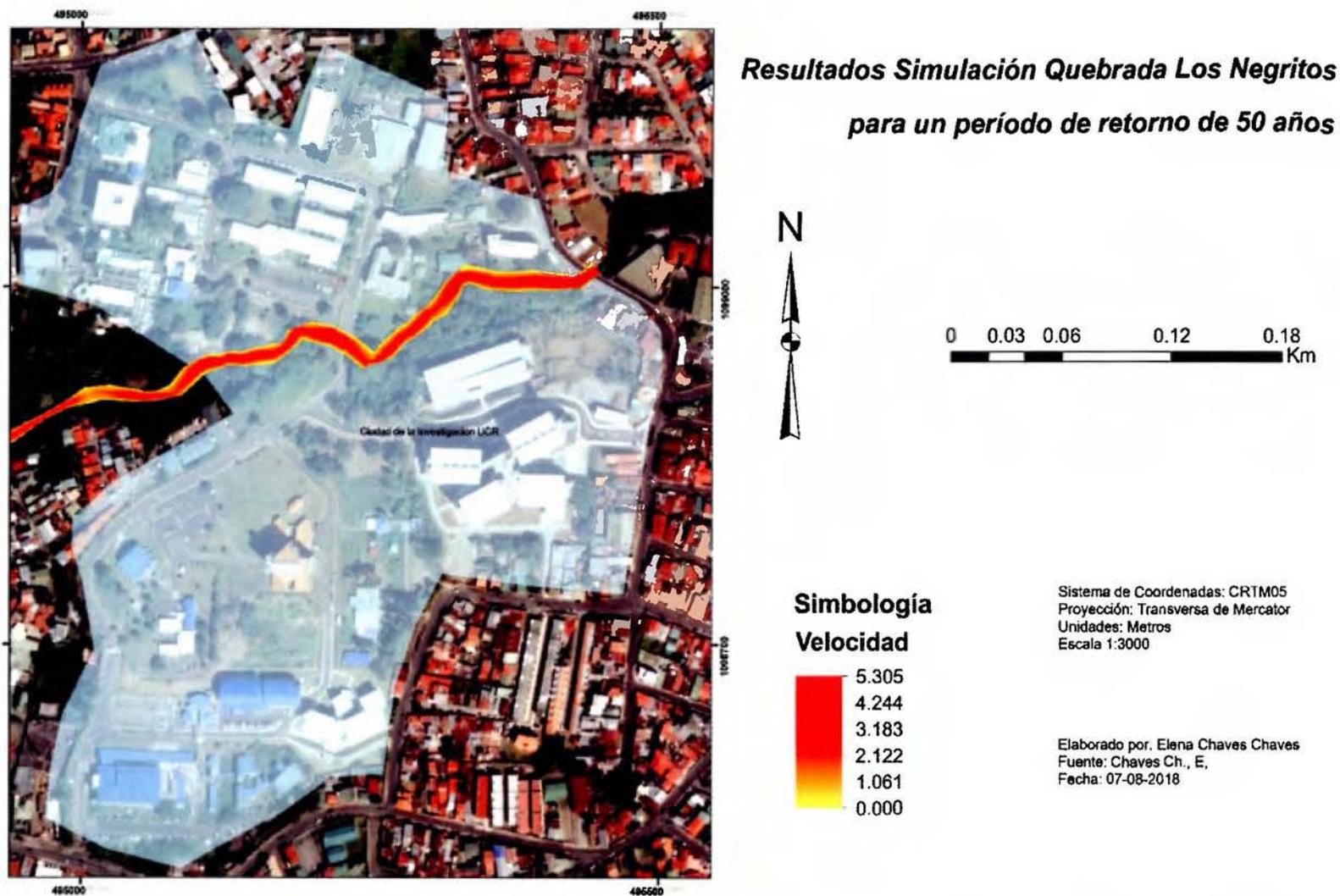


Figura 30: Mapa de velocidad a partir de la simulación en HEC-RAS finca 2 (Ciudad de la Investigación), para un periodo de retorno de 50 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

Resultado Simulación Quebrada Los Negritos para un período de retorno de 100 años

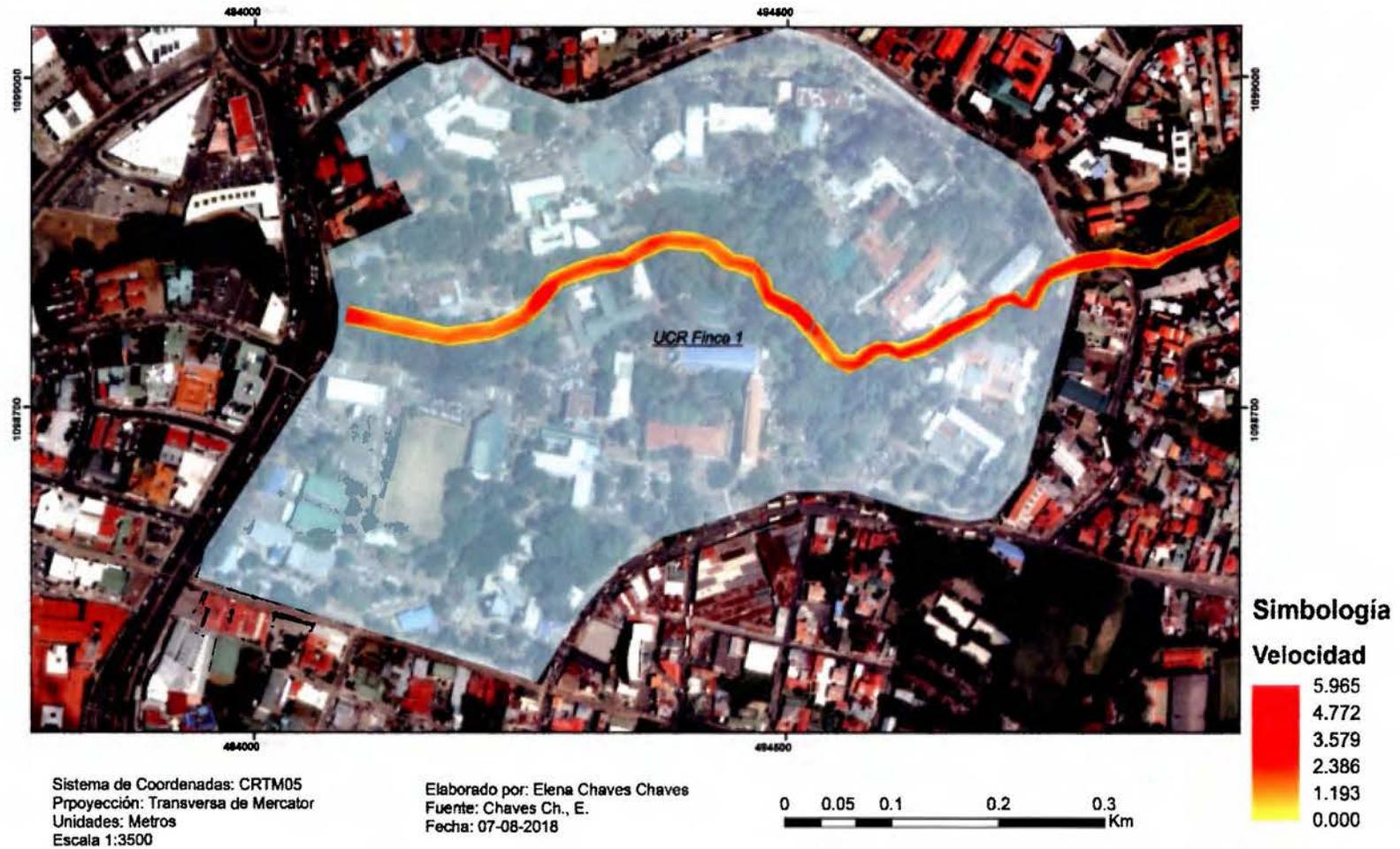


Figura 31: Mapa de velocidad a partir de la simulación en HEC-RAS finca 1, para un periodo de retorno de 100 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

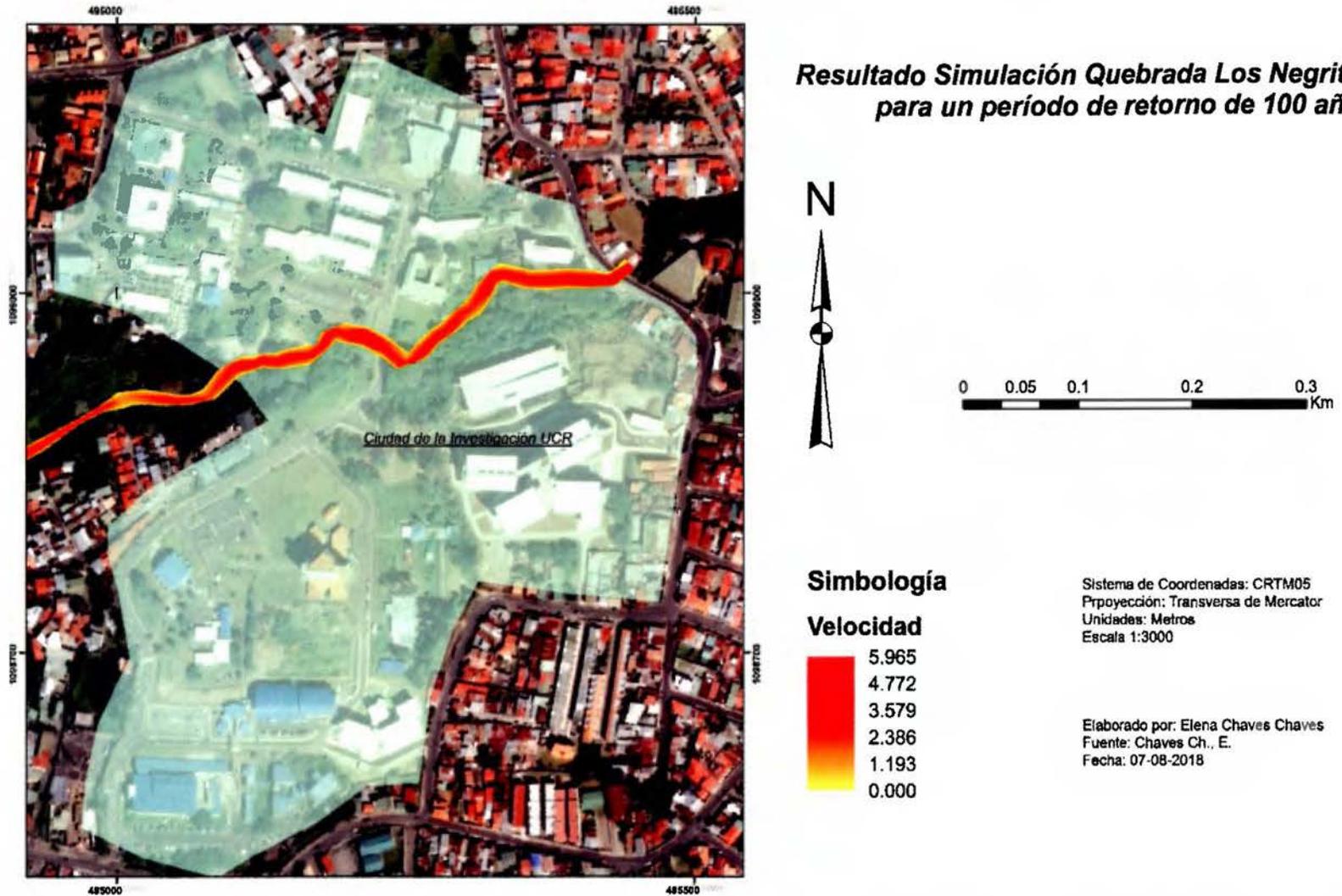


Figura 32: Mapa de velocidad a partir de la simulación en HEC-RAS finca 2 (Ciudad de la Investigación), para un periodo de retorno de 100 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

De acuerdo con la información suministrada por los mapas de velocidades para la Quebrada Los Negritos, se obtiene el siguiente cuadro:

Cuadro 19: Velocidades máximas producto de la simulación de la Quebrada Los Negritos en el programa HEC-RAS según período de retorno

Periodo de retorno en años	Velocidad Máxima (m/s)
25	5,162
50	5,305
100	5.965

Fuente: Elaboración propia, 2018

Ahora bien, para los tres periodos de retorno sujetos a investigación se cuenta con zonas susceptibles a inundación. En el cuadro 20, se muestran las velocidades de flujo del sector 1 ubicado frente a la Facultad de Derecho hasta la parte trasera del edificio de Aulas Universitarias y el sector 2 desde frente a la Escuela de Música hasta aproximadamente frente a la Facultad de Ingeniería en la Ciudad de la Investigación según período de retorno.

Cuadro 20: Velocidades de flujo según periodo de retorno para el sector 1 y 2 de la Quebrada Los Negritos

Periodo de retorno	Parámetro	Sector 1 Velocidad (m/s)	Sector 2 Velocidad (m/s)
25 años	Velocidad Máxima	3,72	3,69
	Velocidad Mínima	1,01	1,20
	Velocidad Promedio	1,77	2,56
50 años	Velocidad Máxima	4,08	4,04
	Velocidad Mínima	1,22	1,38
	Velocidad Promedio	1,97	2,89
100 años	Velocidad Máxima	4,48	4,64
	Velocidad Mínima	1,48	1,59
	Velocidad Promedio	2,27	3,27

Fuente: Elaboración propia, 2018

Tal y como se puede notar en el cuadro 20, las velocidades más altas se registran en el periodo de retorno de 100 años. Además, en el denominado Sector 2, es donde se encuentra la mayor velocidad de 4,64 m/s.

El valor de velocidad se torna de mayor importancia cuando se realiza un contraste entre la pendiente del lugar (3,6%) y el mapa de profundidad respectivo. Específicamente, en el Sector 2 donde como ya se mencionó se registra una velocidad de hasta 4,64 m/s, para un periodo de retorno de 100 años. La distribución de profundidades es bastante variada, es decir oscila entre 1,63 m y los 8,17 m (Ver figura 28), lo que influye en la generación de inundaciones.

Otro aspecto importante, es que dentro de ambos sectores existe infraestructura que eventualmente puede resultar afectada. En el caso del Sector 1, se localiza el puente entre el

edificio de la Facultad de Ciencias Económicas y la Escuela de Computación, el cual conforma la vía principal de tránsito automovilístico y peatonal de la denominada *Milla Universitaria*.

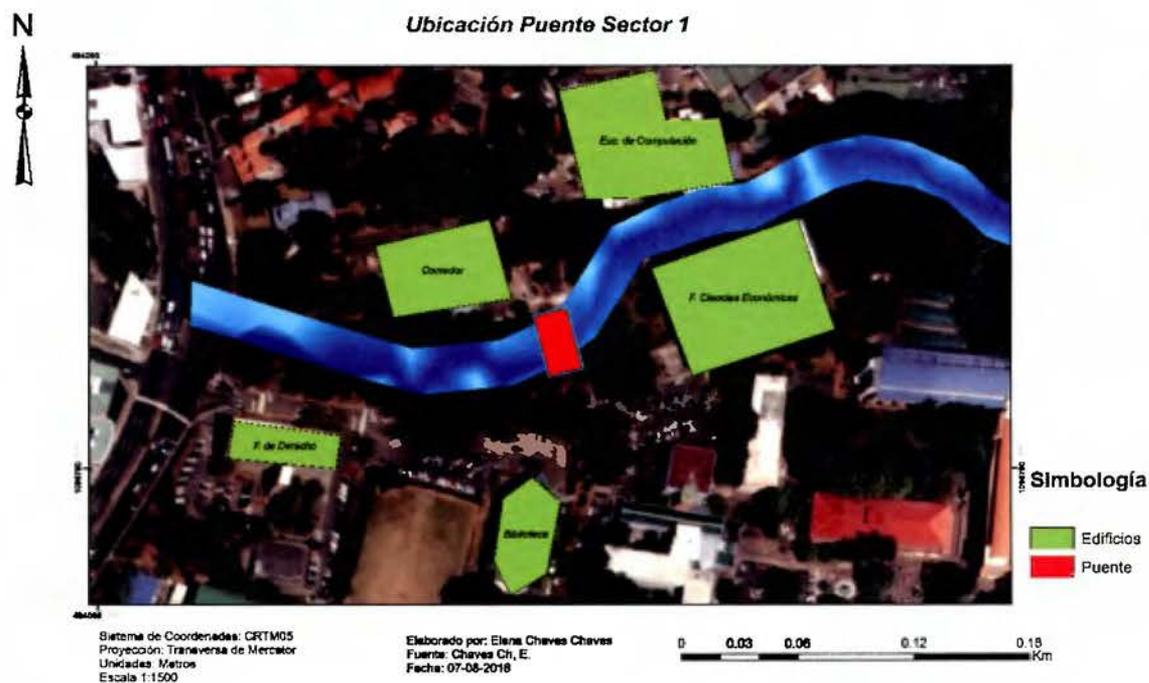


Figura 33: Mapa de ubicación puente en Sector 1

Fuente: Elaboración propia, 2018

Situación similar se presenta en el Sector 2 pero sobre calle pública, en el puente ubicado al costado norte Recicladora Capri, sobre Calle Masis, frente a la Escuela de Música.

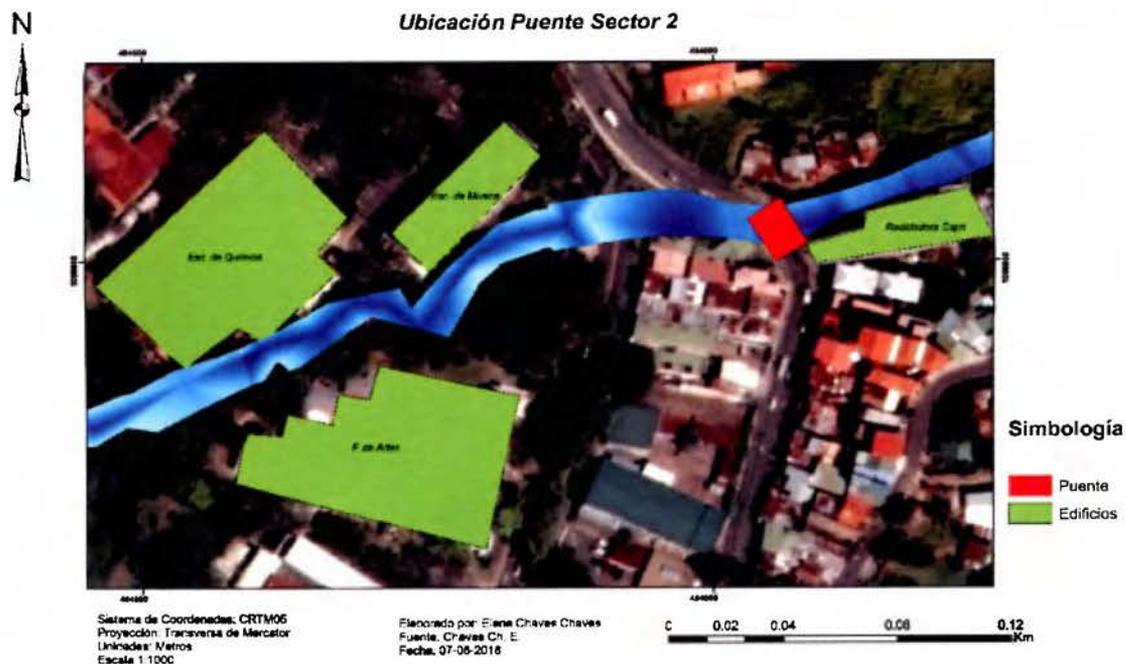


Figura 34: Mapa de ubicación puente en Sector 2

Fuente: Elaboración propia, 2018

También existen edificios que se encuentran muy cercanos al cauce de la Quebrada Los Negritos como es el caso del comedor estudiantil, la Facultad de Ciencias Económicas, las Escuelas de Computación, Química y Música, las cuales ante un eventual proceso de inundación podrían resultar afectadas en alguna medida.

Capítulo XIII: Conclusiones y Recomendaciones

La cuenca de la Quebrada Los Negritos posee una forma alargada con una pendiente de la cuenca es 3,6%, mientras que la pendiente promedio del cauce es de 2,44% aproximadamente, lo cual implica una zona con baja pendiente, lo que implica de la velocidad de flujo deberían ser bajas.

El modelo digital de terreno de la cuenca ratifica que la elevación máxima es de 1308,23m.s.n.m. y una mínima de 1168,00 m.s.n.m, siendo que la mayor porción de área de la cuenca se encuentra entre las elevaciones 1190 a 1200 m.s.n.m.

Por otro lado, se obtuvieron datos de precipitación cada cinco minutos por un periodo de diez años (2005-2015), a los cuales fueron sometidos a un análisis estadístico a fin de determinar los eventos extremos y además se confeccionan las curvas de intensidad, duración y frecuencia que describen la lluvia en la zona de estudio, mediante las cuales se derivan las intensidades para cada periodo de retorno:

- 121,6 mm/hr para un periodo de retorno de 25 años.
- 146,8 mm/hr en el caso de un periodo de retorno de 50 años.
- 177,1 mm/hr para un periodo de retorno de 100 años.

Se confeccionó un mapa de uso de suelo para la cuenca de la quebrada Los Negritos utilizando como insumo las ortofotos escala 1:50000, del año 2016, facilitadas por el Registro Nacional. Se efectúan cinco grandes categorías a saber: calles y aceras, cementerio, parqueos, zona urbana, zona boscosa y zona verde, a partir de las cuales se determina que aproximadamente un 75% del área en estudio, se encuentra impermeabilizada, lo cual afecta directamente el volumen de escorrentía superficial que descargará eventualmente en la Quebrada Los Negritos.

Se realizó el cálculo de caudales máximos mediante tres métodos a saber: racional, número de curva de escorrentía e isocrónas. Como parte del proceso comparativo, se obtuvo que los valores producidos por el método SCS son bajos en comparación con los obtenidos con

isócronas o racional, siendo que con el hidrograma triangular SCS fueron los resultados más bajos.

A pesar de que los datos generados por el método racional fueron los mayores, se decide utilizar los valores generados por el método racional para la elaboración de la simulación hidráulica por varias razones. Primeramente, es el procedimiento más utilizado para el diseño de estructuras hidráulicas. Por otro lado, debido al tamaño de la cuenca, es válida su aplicación. Además, para la obtención del caudal por los otros métodos es necesaria la consulta a tablas con valores teóricos generados para condiciones climáticas diferentes a las existentes en la zona de estudio, a pesar de que se procuró elegir los valores que más se ajusten al lugar puede que exista alguna afectación en el resultado final. Por otro lado, el hecho de que los valores de caudales calculados por el método racional sean mayores en comparación con los demás, constituye en alguna manera un beneficio si se analiza desde el punto de vista del uso de suelo en la cuenca, esto por cuanto el mapa generado para tal efecto con la información más reciente disponible en el Registro Nacional, indica que un 75% de área en estudio se encuentra impermeabilizada al año 2016 porcentaje que debe haber variado significativamente al presente año 2018, produciendo un aumento en el volumen de escorrentía. De lo anterior, es que se considera apropiado utilizar los valores de caudal más altos con el fin de mitigar en alguna medida el impacto que pudiese tener la situación antes mencionada.

En resumen, los caudales utilizados para la definición de las zonas de inundación fueron los generados por el método racional: 72,7, 92,2, 118,0 m³/s, para los periodos de retorno de 25, 50 y 100 años respectivamente.

Ahora bien, con ayuda del software HEC-RAS se realizó una simulación hidráulica de la Quebrada Los Negritos para los periodos de retorno de 25, 50 y 100 años, para lo cual fue necesaria la inclusión de la información topográfica de la zona de estudio.

Con respecto a la topografía de la zona, inicialmente se contó con el levantamiento topográfico de la Oficina Ejecutora del Programa de Inversiones de la Universidad de Costa

Rica (OEPI), considerado como oficial para la Institución. Sin embargo, al momento de realizar el montaje de estos datos con las ortofotos 2016 se encuentran desplazamientos del orden m en las coordenadas X, Y , (en ocasiones de hasta 80m) por lo que se decidió descartarlos.

De la información suministrada con la OEPI, únicamente se utilizó la elevación para la confección de una cuadrícula (*raster*), el cual se importó al programa ArcGIS, donde se subsanó el error de desplazamiento por medio de las coordenadas X, Y extraídas de las ortofotos 2016.

Una vez solucionado el problema de las coordenadas X, Y se confeccionaron las secciones transversales y demás insumos topográficos necesarios en el programa ArcGIS con ayuda de la herramienta HEC-GeoRAS, los cuales posteriormente se importaron al HEC-RAS para efectuar la simulación hidráulica.

Luego de haberse realizado la simulación hidráulica, se exportaron los datos al programa ArcGIS, nuevamente por medio de la herramienta GeoRAS, para la confección de los mapas de inundación. Fue así como se determinó la existencia de dos zonas en donde eventualmente pueden generarse problemas de desborde del cauce denominados en esta investigación como sector 1 y 2.

Se denominó Sector 1 al tramo comprendido entre las coordenadas (494070,864, 1098780,930) a (494452,526, 1098835,831), en el cual existe riesgo de inundación. Pueden tomarse para su localización los puntos de referencia físicos aproximados, frente a la Facultad de Derecho hasta la parte trasera del edificio de Aulas Universitarias.

Dentro del Sector 1 se encuentra el puente entre la Facultad de Ciencias Económicas y la Escuela de Computación el cual se puede ver afectado por inundación, constituyendo esto una situación de especial atención ya que esta estructura forma parte de la calle principal de campus universitario, por lo que posee abundante flujo vehicular y peatonal.

Adicionalmente, se determinó otra zona de riesgo de inundación llamada Sector 2 entre los puntos coordenados (494777,303, 1098822, 602) y (495090,835 y 1098916,530), es decir, desde frente a la Escuela de Música hasta aproximadamente frente a la Facultad de Ingeniería en la Ciudad de la Investigación.

De igual manera dentro del Sector 2 se ubica un puente contiguo a la Recicladora Capri, frente a la Escuela de Música, con la particularidad que esta estructura se encuentra sobre la Calle Masis que se encuentra alrededor de la Universidad, y por la que transita gran cantidad de vehículos y peatones, siendo la principal ruta que utilizan los buses para estudiantes universitarios que se trasladan hacia el centro de estudios desde diferentes partes del país.

Con respecto a las zonas de inundación es importante realizar una aclaración en cuanto a los valores obtenidos de profundidad. De acuerdo con el análisis efectuado se determina que la ubicación de los sectores 1 y 2 que eventualmente podrían generar problemas de inundación es correcta, sin embargo, debe indicarse que los valores de profundidad podrían encontrarse sobreestimados, lo cual se encuentra estrictamente ligado a las limitaciones del levantamiento topográfico suministrado por la OEPI y utilizado para este proyecto.

Finalmente, se recomienda revisar el levantamiento topográfico disponible en la OEPI, para subsanar el error de desplazamiento en las coordenadas X , Y en el sistema CRTM05. Además, se sugiere ampliar la cantidad de información topográfica en cuanto a la longitud de las secciones transversales de forma se genere una mayor representación del área de la cuenca, lo cual sin duda ayudará a obtener una delimitación de las zonas con riesgo de inundación con un grado de precisión superior.

Bibliografía

- (PRUGAM), P. P. (2007). Mapa de Amenaza por Inundación para el Cantón de Montes de Oca, Escala 1:25000. San José.
- (PRUGAM), P. P. (2007). Mapa Geológico para el Cantón de Montes de Oca, Escala 1:25000. San José.
- AFP. (24 de Julio de 2014). Quebrada Los Negritos: El hedor de la descoordinación burocrática. *Semanario Universidad*.
- Arcement, G., & Scheneider, V. (1989). *Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains*. Estados Unidos: U.S. Geological Survey.
- Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. (S.f.). *PRINCIPALES SUELOS DE COSTA RICA*. Obtenido de PRINCIPALES SUELOS DE COSTA RICA: <http://www.infoagro.go.cr/Inforegiones/RegionCentralOriental/Documents/Suelos/ti pos%20de%20suelos%20CR.pdf>
- Astorga Espeleta, Y. (1994). *Diagnóstico físico-químico y biológico de la Quebrada Los Negritos*. Montes de Oca: Universidad de Costa Rica.
- Balairón Pérez, L. (2002). *Gestión de Recursos Hídricos*. Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Brenes, Á., & Saborio, V. F. (1995). *Elementos de Climatología: Su aplicación didáctica a Costa Rica*. San José: EUNED.
- Brierley, G., & Fryirs, K. (2006). *Geomorphology and River Management: Applications of the River Styles Framework*. Oxford: Blackwell Publishing.
- Camacho Lizano, D., Chaves Gamboa, J., & Murilli Montoya, D. (2004). *Diagnóstico de la susceptibilidad al deslizamiento e inundación, Análisis del contexto sísmico y reconocimiento de peligros volcánicos para el cantón de Montes de Oca: Una contribución al Plan Regulador del Municipio*. San José: UCR.
- Castillo, V. M., MARTÍNEZ-MENA, M., & ALBALADEJO, J. (s.f.). Validez del método del número de curva. *Validez del método del número de curva*. Murcia: Departamento de conservación de suelo y agua. Centro de edafología y biología aplicada del segura.
- Centro de Estudios Hidrológicos del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos. (2015). *Hydrologic Engineering Center*. Recuperado el 29 de Octubre de 2015, de Hydrologic Engineering Center: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/features.aspx>
- Centro de Investigaciones Geofísicas. (2012). *Estaciones Meteorológicas*. Recuperado el 8 de Mayo de 2014, de Estaciones Meteorológicas: http://www.cigefi.ucr.ac.cr/index.php?option=com_content&view=article&id=8&Itemid=17
- Chaparro Avila, E., & Renard Reese, M. (2005). *Elementos conceptuales para la prevención y reducción de daños originados por amenazas siconaturales*. Santiago de Chile: United Nations Publications.
- Chaves, A. (02 de Junio de 2015). Quebrada Los Negritos mejora su calidad ambiental. *Semanario Universidad*. Obtenido de <http://semanariouniversidad.ucr.cr/universitarias/quebrada-los-negritos-mejora-su-calidad-ambiental/>

- Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (C.N.E.). (s.f.). *Folleto Deslizamientos, Inundaciones y Sismos*. Recuperado el 10 de Mayo de 2014, de Folleto Deslizamientos, Inundaciones y Sismos: http://www.cne.go.cr/educacion_asesoria/7/Folleto_Deslizamientos.pdf
- crhoy.com. (12 de Febrero de 2014). *Nueva torre de parqueo en la UCR funcionará para inicio de semestre*. Obtenido de Nueva torre de parqueo en la UCR funcionará para inicio de semestre: <http://www.crhoy.com/900-p-m-nueva-io-de-semestre-u417x/>
- De la Lanza, G., Cáceres, C., Adame, S., & Hernández, S. (1999). *Diccionario de Hidrología y Ciencias Afines*. Plaza y Valdes Editores.
- De Melo Porto, R. (2006). *Hidráulica Básica*. São Paulo: EESC-São Carlos-SP.
- Decreto 29415-MP-MIVAH-MINAE (28 de Marzo de 2001).
- Decreto Ejecutivo 13583 INVU (Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo 18 de Mayo de 1982).
- El Financiero. (29 de Octubre de 2014). *Nuevo edificio de la UCR le da vida a los fideicomisos para levantar obra pública*. Obtenido de Nuevo edificio de la UCR le da vida a los fideicomisos para levantar obra pública: http://www.elfinancierocr.com/finanzas/Nuevo-edificio-UCR-fideicomisos-levantar_0_619138086.html
- Flores Silva, E. (1999). *Geografía de Costa Rica*. San José, Costa Rica: EUNED.
- Garbanzo León, J., & Vargas Vargas, E. (2011). *Diagnóstico sobre la afectación urbana de las nacientes del distrito San Rafael de Montes de Oca, 2011*. San José.
- García Marín, A., Rosique Campoy, M., & Segado Vázquez, F. (1994). *Topografía Básica para Ingenieros*. Murcia, España: EDITUM.
- Gisbert Gallego, J. M. (2005). *Caracterización hidrológica y de los procesos erosivos en la cabecera del río Mochanil (Granada)*. Granada: Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada.
- González, C. R. (1998). *Geografía Física de Costa Rica*. San José: EUNED.
- Instituto Meteorológico Nacional. (31 de Agosto de 2015). *Clima en Costa Rica*. Obtenido de Clima en Costa Rica: <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/31165/ValleCentral.pdf/49aba14d-e4c1-427f-a382-25d090a9081e>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2010). *Censo 2000*. Obtenido de Censo 2000: <http://www.inec.go.cr/Web/Home/GeneradorPagina.aspx>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2010). *Censo 2011*. (INEC, Editor) Obtenido de Censo 2011: <http://www.inec.go.cr/Web/Home/GeneradorPagina.aspx>
- Kite, G. (1977). *Frequency and Risk Analysis in Hydrology*. Fort Collins: Water Resources Publications.
- La Nación. (08 de Marzo de 2012). *Fideicomiso de UCR invertirá \$95 millones en ocho edificios*. Obtenido de Fideicomiso de UCR invertirá \$95 millones en ocho edificios: http://www.nacion.com/economia/Fideicomiso-UCR-invertira-millones-edificios_0_1255074621.html
- Linkimer, L., Aguilar, T., & Kussmaul, S. (2000). *Geología de Costa Rica*. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Linkimer, L., Aguilar, T., & Kussmaul, S. (2000). *Geología de Costa Rica*. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Linsley, R., Kohler, M., & Paulhus, J. (1977). *Hidrología para Ingenieros*. México: McGraw-Hill.

- Losilla, M., Rodríguez, H., Schosinsky, G., Stimson, J., & Bethune, D. (2001). *Los Acuíferos Volcánicos y Desarrollo Sostenible en América Central*. San José: Editoria de la Universidad de Costa Rica .
- Maderey Rascón, L.E.; Jiménez Román, A. (2005). *Principios de Hidrogeografía. Estudio Del Ciclo Hidrológico* (Vols. I-2005). (UNAM, Ed.) México.
- Maidment, D. R. (1993). *Handbook of Hydrology*. United States of America: McGraw-Hill, Inc.
- Martínez Álvarez, V. (1999). *Simulación y Comprobación Experimental de la Escorrentía Superficial en Pequeñas Cuencas no Aforadas Mediante Modelos Distribuidos Implementados sobre SIG*. Madrid: DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y VÍAS RURALES: Escuela de Ingenieros Agrónomos.
- Microsoft Office. (2014). *Especificaciones y límites de Excel*. Recuperado el 4 de Mayo de 2014, de Especificaciones y límites de Excel: <http://office.microsoft.com/es-mx/excel-help/especificaciones-y-limites-de-excel-HP010342495.aspx#BMcalculation>
- Montiel, M. (1991). *Introducción a la Flora de Costa Rica*. San José: Editorial Universidad de Costa Rica.
- Mora Navarro, J. G. (2006). *AutoCAD Aplicado a la Topografía*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Mora Ramírez, J. R. (2003). *Análisis del Crecimiento Urbano de la Gran Área Metropolitana de Costa Rica Período 1983 al 2000*. Montes de Oca.
- Mora, R. (1998). Propiedades físicas, hidráulicas y mecánicas de suelos de origen volcánico, en sitios seleccionados del Valle Central, Costa Rica. *REVISTA GEOLÓGICA DE AMÉRICA CENTRAL*(19), 81-98.
- Moreno, A. (S.f.). Generación de hidrogramas sintéticos método de C.O. Clark. Los Andes, Universidad de Los Andes, Escuela de Civil. Departamento de Hidráulica y Sanitaria.
- Murillo Muñoz, R. (1994). *Estudio de intensidades de lluvia en la cuenca del río Virilla*. Nacional, I. G. (s.f.). *Hoja Topográfica Abra Escala 1:5000*. Instituto Geográfico Nacional, San José.
- Nanía, L. S. (2007). *Manual Básico HEC-HMS 3.0.0 y HEC-GeoHMS 1.1*. Granada: Universidad de Granada.
- Ochoa Rubio, T. (2011). *Hidrología hidráulica y socavación en puentes*. Colombia: ECOE Ediciones.
- Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible (ProDUS). (2016). *Observatorio Urbano del Gran área Metropolitana de Costa Rica*. Recuperado el 22 de Marzo de 2016, de Observatorio Urbano del Gran área Metropolitana de Costa Rica: <http://ougam.ucr.ac.cr/>
- Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible. (2016). *Observatorio Urbano del Gran Área Metropolitana (OUGAM)*. Recuperado el 22 de Marzo de 2016, de Observatorio Urbano del Gran Área Metropolitana (OUGAM): <http://ougam.ucr.ac.cr/>
- Programa de Regularización y Catastro. (2012). *Sistema Nacional de Información Territorial*. Recuperado el 10 de mayo de 2014, de <http://snitcr.org/>
- Ramos, C. (2013). Perigos Naturais Devidos a Causas Meteorológicas: O Caso das Cheias e Inundações. *e-LP Engineering and Technology Journal*, 11-16.

- Ray E, L., B, J., & Franzini. (1974). *Ingeniería de los recursos hidráulicos*. México: Editorial Continental.
- Rodredo Sánchez, J. C. (s.f.). *Cálculo de caudales en avenida máxima*.
- Rojas Morales, N. (2012). *Curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia de Algunas Estaciones Automáticas*. Recuperado el 10 de mayo de 2014, de http://cglobal.imn.ac.cr/sites/default/files/documentos/cidf_automaticas_final_0.pdf
- Sánchez, J. (s.f.). Hidrograma Unitario de Clark. Universidad Salamanca, España.
- Serrano Pacheco, A. (2011). *Notas del curso IC-0808 Hidrología*. San Pedro .
- Shelton, M. L. (2009). *Hydroclimatology Perspectives and Applications*. Cambridge: Cambridge University.
- Solano , J., & Villalobos, R. (s.f.). Regiones y Subregiones Climatológicas de Costa Rica. *Regiones y Subregiones Climatológicas de Costa Rica*. San José: Instituto Meteorológico Nacional.
- Tomaz, P. (2002). *Cálculos hidrológicos e hidráulicos para obras municipais*. São Paulo, Brasil. doi:ISBN 85-87678-07
- Torres Abello, A. E. (2004). *Apuntes de clase sobre hidrología urbana*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Tucci, C. (2000). Coeficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 61-68.
- Tucci, C., Porto, La Laina e Barros, R., & T. De., M. (1995). *Drenagem Urbana*. Porto Alegre: Universidad de Porto Alegre. doi:ISBN 85-7025-364-8
- Unidad de Planificación Territorial, INVU. (2011). *Plan de Ordenamiento Territorial de la Gran Área Metropolitana 2011-2030*. Costa Rica: INVU.
- Ven Te Chow, Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. Santafé, Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Interamericana S.A.
- Villalobos Herrera, R. (2014). *Análisis de recarga artificial en la cuenca del río Quebrada Seca*. San Pedro.
- Villón Béjar, M. (2004). *Hidrología*. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Villón Bejar, M. (2006). *Hidrología Estadística*. Cartago: Tecnológica de Costa Rica.
- Vivas González, C. J., & Matomoros Campusano, D. (2004). *Aplicación del Modelo HEC-RAS para el cálculo de los perfiles hidráulicos del sistema hídrico del Río CHAGUANA*. Quito, Ecuador.

Anexos

Anexo 1: Cálculos análisis de frecuencia

Cuadro 21: Parámetros estadísticos para datos de intensidad de lluvia en intervalos de 5 minutos para el periodo 2005-2015

Parámetro	Valor
Media	110,029
Desviación Estándar	23,603
α	18,403
μ	99,407
CV=	0,214
d	0,0543

Fuente: Elaboración propia, 2018

Cuadro 22: Resultados aplicación de distribución Gumbel o Extrema Tipo I datos de intensidad de lluvia en intervalos de 5 minutos para el periodo 2005-2015

n	Intensidad			
	máxima a mm/hra	F(X)	P(X)	F(x)-P(x)
1	66	0,002	0,056	0,053
2	73,2	0,016	0,111	0,095
3	94,44	0,270	0,167	0,103
4	106,68	0,510	0,222	0,288
5	109,68	0,564	0,278	0,286
6	118,92	0,707	0,333	0,374
7	121,92	0,745	0,389	0,356
8	121,92	0,745	0,444	0,301
9	124,92	0,779	0,500	0,279
10	131,04	0,836	0,556	0,280
11	141,6	0,904	0,611	0,293

Fuente: Elaboración propia, 2018

Cuadro 23: Parámetros estadísticos para datos de intensidad de lluvia en intervalos de 10 minutos para el período 2005-2015

Parámetro	Valor
Media	99,321
Desviación Estándar	20,054
α	15,636
μ	90,297
CV	0,202
d	0,064

Fuente: Elaboración propia, 2018

Cuadro 24: Resultados aplicación de distribución Gumbel o Extrema Tipo I datos de intensidad de lluvia en intervalos de 10 minutos para el período 2005-2015

n	Intensidad			
	máxima a mm/hra	F(X)	P(X)	F(x)-P(x)
1	63,6	0,004	0,056	0,052
2	65,58	0,008	0,111	0,103
3	91,44	0,395	0,167	0,228
4	92,94	0,430	0,222	0,208
5	100,56	0,595	0,278	0,317
6	102,12	0,625	0,333	0,292
7	108,18	0,727	0,389	0,338
8	112,74	0,788	0,444	0,344
9	112,8	0,789	0,500	0,289
10	114,6	0,809	0,556	0,254
11	127,98	0,914	0,611	0,303

Fuente: Elaboración propia, 2018

Cuadro 25: Parámetros estadísticos para datos de intensidad de lluvia en intervalos de 15 minutos para el período 2005-2015

Parámetro	Valor
Media	89,196
Desviación Estándar	18,408
α	14,353
μ	80,913
CV	0,206
d	0,070

Fuente: Elaboración propia, 2018

Cuadro 26: Resultados aplicación de distribución Gumbel o Extrema Tipo I datos de intensidad de lluvia en intervalos de 15 minutos para el período 2005-2015

n	Intensidad			
	máxima a mm/hra	F(X)	P(X)	F(x)-P(x)
1	52,8	0,001	0,056	0,055
2	59,96	0,013	0,111	0,098
3	87,36	0,528	0,167	0,362
4	88,4	0,552	0,222	0,330
5	89,4	0,575	0,278	0,297
6	92,44	0,639	0,333	0,306
7	92,48	0,640	0,389	0,251
8	95,52	0,697	0,444	0,252
9	102,4	0,799	0,500	0,299
10	103,6	0,814	0,556	0,258
11	116,8	0,921	0,611	0,310

Fuente: Elaboración propia, 2018

Cuadro 27: Parámetros estadísticos para datos de intensidad de lluvia en intervalos de 20 minutos para el período 2005-2015

Parámetro	Valor
Media	82,276
Desviación Estándar	17,555
α	13,688
μ	74,3764
CV	0,213
d	0,073

Fuente: Elaboración propia, 2018

Cuadro 28: Resultados aplicación de distribución Gumbel o Extrema Tipo I datos de intensidad de lluvia en intervalos de 20 minutos para el período 2005-2015

n	Intensidad			
	máxima a mm/hra	F(X)	P(X)	F(x)-P(x)
1	45	0,000	0,056	0,055
2	56,4	0,024	0,111	0,087
3	80,01	0,516	0,167	0,349
4	80,76	0,534	0,222	0,312
5	82,8	0,583	0,278	0,305
6	86,1	0,654	0,333	0,321
7	87,63	0,684	0,389	0,295
8	89,94	0,726	0,444	0,281
9	92,22	0,762	0,500	0,262
10	98,28	0,840	0,556	0,284
11	105,9	0,905	0,611	0,294

Fuente: Elaboración propia, 2018

Cuadro 29: Parámetros estadísticos para datos de intensidad de lluvia en intervalos de 25 minutos para el período 2005-2015

Parámetro	Valor
Media	76,743
Desviación Estándar	18,150
α	14,152
μ	68,576
CV	0,237
d	0,072

Fuente: Elaboración propia, 2018

Cuadro 30: Resultados aplicación de distribución Gumbel o Extrema Tipo I datos de intensidad de lluvia en intervalos de 25 minutos para el período 2005-2015

n	Intensidad			
	máxima a mm/hra	F(X)	P(X)	F(x)-P(x)
1	39,6	0,000	0,056	0,055
2	52,44	0,044	0,111	0,067
3	68,16	0,357	0,167	0,190
4	72,552	0,470	0,222	0,248
5	76,2	0,558	0,278	0,280
6	80,472	0,650	0,333	0,316
7	82,296	0,684	0,389	0,295
8	87,792	0,773	0,444	0,329
9	89,616	0,798	0,500	0,298
10	93,264	0,840	0,556	0,284
11	101,784	0,909	0,611	0,298

Fuente: Elaboración propia, 2018

Cuadro 31: Parámetros estadísticos para datos de intensidad de lluvia en intervalos de 30 minutos para el periodo 2005-2015

Parámetro	Valor
Media	70,216
Desviación Estándar	18,406
α	14,351
μ	61,934
CV	0,262
d	0,070

Fuente: Elaboración propia, 2018

Cuadro 32: Resultados aplicación de distribución Gumbel o Extrema Tipo I datos de intensidad de lluvia en intervalos de 30 minutos para el periodo 2005-2015

n	Intensidad			
	máxima a mm/hra	F(X)	P(X)	F(x)-P(x)
1	37	0,003	0,056	0,052
2	46,24	0,051	0,111	0,061
3	59,2	0,298	0,167	0,132
4	64,02	0,421	0,222	0,199
5	67,06	0,497	0,278	0,219
6	69,08	0,545	0,333	0,211
7	73,16	0,633	0,389	0,244
8	85,36	0,822	0,444	0,378
9	86,36	0,833	0,500	0,333
10	87,38	0,844	0,556	0,288
11	97,52	0,920	0,611	0,309

Fuente: Elaboración propia, 2018

Anexo 2: Cálculos curvas Intensidad – Duración -Frecuencia (IDF)*Cuadro 33: Datos iniciales para el cálculo de Curvas IDF*

Año	Intensidades de lluvia (mm/Hrs)					
	5	10	15	20	25	30
2005	73.2	65.58	59.96	56.4	52.44	46.24
2006	66	63.6	52.8	45	39.6	37
2007	141.6	114.6	102.4	82.8	68.16	59.2
2008	106.68	100.56	92.44	87.63	80.472	67.06
2009	94.44	91.44	88.4	80.01	72.552	64.02
2010	121.92	112.8	95.52	89.94	87.792	85.36
2011	118.92	112.74	103.6	98.28	101.784	97.52
2012	109.68	92.94	89.4	86.1	82.296	73.16
2013	131.04	127.98	116.8	105.9	93.264	86.36
2014	121.92	102.12	87.36	80.76	76.2	69.08
2015	124.92	108.18	92.48	92.22	89.616	87.38

Fuente: Elaboración propia, 2018

Cuadro 34: Cálculo de variables para el sistema de ecuaciones por Regresión Lineal

Multivariable

<i>Intervalo</i>	<i>N</i>	<i>X₁</i>	<i>X₂</i>	<i>Y</i>	<i>X₁Y</i>	<i>X₂Y</i>	<i>X₁²</i>	<i>X₂²</i>	<i>X₁*X₂</i>
5 min	1	1,079	0,903	2,151	2,321	1,943	1,165	0,816	0,975
	2	0,778	0,903	2,117	1,648	1,912	0,606	0,816	0,703
	3	0,602	0,903	2,097	1,262	1,893	0,362	0,816	0,544
	4	0,477	0,903	2,086	0,995	1,884	0,228	0,816	0,431
	5	0,380	0,903	2,086	0,793	1,884	0,145	0,816	0,343
	6	0,301	0,903	2,075	0,625	1,874	0,091	0,816	0,272
	7	0,234	0,903	2,040	0,478	1,842	0,055	0,816	0,211
	8	0,176	0,903	2,028	0,357	1,832	0,031	0,816	0,159
	9	0,125	0,903	1,975	0,247	1,784	0,016	0,816	0,113
	10	0,079	0,903	1,865	0,148	1,684	0,006	0,816	0,072
	11	0,038	0,903	1,820	0,069	1,643	0,001	0,816	0,034
10 min	12	1,079	1,114	2,107	2,274	2,347	1,165	1,241	1,202
	13	0,778	1,114	2,059	1,602	2,294	0,606	1,241	0,867
	14	0,602	1,114	2,052	1,236	2,286	0,362	1,241	0,671
	15	0,477	1,114	2,052	0,979	2,286	0,228	1,241	0,531
	16	0,380	1,114	2,034	0,773	2,266	0,145	1,241	0,424
	17	0,301	1,114	2,009	0,605	2,238	0,091	1,241	0,335
	18	0,234	1,114	2,002	0,469	2,231	0,055	1,241	0,261
	19	0,176	1,114	1,968	0,347	2,192	0,031	1,241	0,196
	20	0,125	1,114	1,961	0,245	2,185	0,016	1,241	0,139
	21	0,079	1,114	1,817	0,144	2,024	0,006	1,241	0,088
	22	0,038	1,114	1,803	0,068	2,009	0,001	1,241	0,042

Continuación cuadro: Cálculo de variables para el sistema de ecuaciones por Regresión
Lineal Multivariable

<i>Intervalo</i>	<i>N</i>	<i>X₁</i>	<i>X₂</i>	<i>Y</i>	<i>X₁Y</i>	<i>X₂Y</i>	<i>X₁²</i>	<i>X₂²</i>	<i>X₁*X₂</i>
15 min	23	1,079	1,255	2,067	2,231	2,595	1,165	1,576	1,355
	24	0,778	1,255	2,015	1,568	2,530	0,606	1,576	0,977
	25	0,602	1,255	2,010	1,210	2,523	0,362	1,576	0,756
	26	0,477	1,255	1,980	0,945	2,486	0,228	1,576	0,599
	27	0,380	1,255	1,966	0,748	2,468	0,145	1,576	0,477
	28	0,301	1,255	1,966	0,592	2,468	0,091	1,576	0,378
	29	0,234	1,255	1,951	0,457	2,449	0,055	1,576	0,294
	30	0,176	1,255	1,946	0,343	2,443	0,031	1,576	0,221
	31	0,125	1,255	1,941	0,243	2,437	0,016	1,576	0,157
	32	0,079	1,255	1,778	0,141	2,232	0,006	1,576	0,099
	33	0,038	1,255	1,723	0,065	2,162	0,001	1,576	0,047
20 min	34	1,079	1,362	2,025	2,185	2,757	1,165	1,854	1,470
	35	0,778	1,362	1,992	1,550	2,713	0,606	1,854	1,060
	36	0,602	1,362	1,965	1,183	2,676	0,362	1,854	0,820
	37	0,477	1,362	1,954	0,932	2,661	0,228	1,854	0,650
	38	0,380	1,362	1,943	0,739	2,645	0,145	1,854	0,518
	39	0,301	1,362	1,935	0,582	2,635	0,091	1,854	0,410
	40	0,234	1,362	1,918	0,449	2,612	0,055	1,854	0,319
	41	0,176	1,362	1,907	0,336	2,597	0,031	1,854	0,240
	42	0,125	1,362	1,903	0,238	2,592	0,016	1,854	0,170
	43	0,079	1,362	1,751	0,139	2,385	0,006	1,854	0,108
	44	0,038	1,362	1,653	0,062	2,251	0,001	1,854	0,051

Continuación cuadro: Cálculo de variables para el sistema de ecuaciones por Regresión
Lineal Multivariable

Intervalo	N	X ₁	X ₂	Y	X ₁ Y	X ₂ Y	X ₁ ²	X ₂ ²	X ₁ *X ₂
25 min	45	1,079	1,447	2,008	2,167	2,905	1,165	2,094	1,562
	46	0,778	1,447	1,970	1,533	2,850	0,606	2,094	1,126
	47	0,602	1,447	1,952	1,175	2,825	0,362	2,094	0,871
	48	0,477	1,447	1,943	0,927	2,812	0,228	2,094	0,690
	49	0,380	1,447	1,915	0,728	2,772	0,145	2,094	0,550
	50	0,301	1,447	1,906	0,574	2,758	0,091	2,094	0,436
	51	0,234	1,447	1,882	0,441	2,723	0,055	2,094	0,339
	52	0,176	1,447	1,861	0,328	2,693	0,031	2,094	0,255
	53	0,125	1,447	1,834	0,229	2,653	0,016	2,094	0,181
	54	0,079	1,447	1,720	0,136	2,489	0,006	2,094	0,115
55	0,038	1,447	1,598	0,060	2,312	0,001	2,094	0,055	
30 min	56	1,079	1,519	1,989	2,147	3,020	1,165	2,306	1,639
	57	0,778	1,519	1,941	1,511	2,948	0,606	2,306	1,182
	58	0,602	1,519	1,936	1,166	2,940	0,362	2,306	0,914
	59	0,477	1,519	1,931	0,921	2,933	0,228	2,306	0,725
	60	0,380	1,519	1,864	0,709	2,831	0,145	2,306	0,577
	61	0,301	1,519	1,839	0,554	2,793	0,091	2,306	0,457
	62	0,234	1,519	1,826	0,428	2,774	0,055	2,306	0,355
	63	0,176	1,519	1,806	0,318	2,743	0,031	2,306	0,267
	64	0,125	1,519	1,772	0,221	2,691	0,016	2,306	0,190
	65	0,079	1,519	1,665	0,132	2,528	0,006	2,306	0,120
66	0,038	1,519	1,568	0,059	2,381	0,001	2,306	0,057	
	Σ	25,619	83,597	127,225	51,084	160,226	16,227	108,753	32,450

Fuente: Elaboración propia, 2017

Sistema de Ecuaciones Regresión Lineal

$$\begin{aligned}\sum y &= Na_0 + a_1 \sum X_1 + a_2 \sum X_2 \\ \sum X_1 y &= a_0 \sum X_1 + a_1 \sum X_1^2 + a_2 \sum X_1 X_2 \\ \sum X_2 y &= a_0 \sum X_2 + a_1 \sum X_1 X_2 + a_2 \sum X_2^2\end{aligned}$$

Remplazando valores

$$\begin{aligned}127,225 &= 66a_0 + 25,619a_1 + 83,567a_2 \\ 51,084 &= 25,619a_0 + 16,227a_1 + 32,450a_2 \\ 160,226 &= 83,597a_0 + 32,450a_1 + 108,752a_2\end{aligned}$$

Solucionando el Sistema de Ecuaciones

$$\begin{aligned}a_0 &= 2,2235 \\ a_1 &= 0,2711 \\ a_2 &= -0,3168\end{aligned}$$

Despejando el cambio de variable

$$\begin{aligned}K &= 167,301564 \\ m &= 0,2711 \\ n &= 0,3168\end{aligned}$$

Cuadro 35: Cálculo de intensidad para curvas IDF, según intervalo de tiempo.

Periodo de			
Retorno	100 años	50 años	25 años
Tiempo	Intensidad	Intensidad	Intensidad
(minutos)	(mm/ Hrs)	(mm/ Hrs)	(mm/ Hrs)
10	258,7	214,4	177,7
20	215,9	178,9	148,3
30	192,6	159,6	132,3
40	177,1	146,8	121,6
50	165,7	137,4	113,8
60	156,9	130,0	107,7
70	149,8	124,1	102,8
80	143,8	119,2	98,7
90	138,7	114,9	95,2
100	134,3	111,3	92,2
110	130,4	108,1	89,6
120	126,9	105,2	87,2

Fuente: Elaboración propia, 2018

Anexo 3: Número de curva según grupo hidrológico de suelo para el método SCS.

*Cuadro 36: Número de curva según grupo hidrológico de suelo. **

Áreas Urbanas				
Cobertura				
Tipo de cobertura y condición hidrológica	Número de curva por grupo hidrológico de suelo			
	A	B	C	D
Área urbana completamente desarrollada (vegetación establecida)				
Espacio abierto (jardines, parques, campos de golf, cementerios, etc.)				
Condición pobre (cobertura vegetal < 50%)	68	79	86	89
Condición media (cobertura vegetal entre 50-75%)	49	69	79	84
Condición buena (cobertura vegetal > 75%)	39	61	74	80
Área impermeable				
Parqueos pavimentados, techos, entradas a parqueo (excluyendo el derecho de paso)	98	98	98	98
Carreteras y caminos pavimentados, caños y alcantarillas (excluyendo el derecho de paso)	98	98	98	98
Cunetas abiertas y pavimentadas (incluyendo el derecho de paso)	83	89	92	93
Grava (incluyendo el derecho de paso)	76	85	89	91
Tierra (incluyendo el derecho de paso)	72	82	87	89

*Cuadro adaptado y traducido por Elaboración propia

Fuente: Maidment, 1993

Anexo 4: Clasificación hidrológica de los suelos

Cuadro 37: Clasificación hidrológica de suelos

Grupo de suelos	Descripción
<p>A</p> <p>Infiltración entre 7,62-11,43 mm/hr</p>	<p>Son suelos que tienen altas tasas de infiltración (bajo potencial de escurrimiento) aunque están enteramente mojados y constituidos mayormente por arenas o gravas profundas, bien y hasta excesivamente drenadas. Estos suelos tienen una alta tasa de transmisión de agua</p>
<p>B</p> <p>Infiltración entre 3,81-7,62 mm/hr</p>	<p>Son suelos que tienen tasas de infiltración moderadas cuando están cuidadosamente mojados y están constituidos mayormente por suelos profundos de texturas moderadamente finas o moderadamente gruesas. Estos suelos tienen una tasa moderada de transmisión de agua.</p>
<p>C</p> <p>Infiltración entre 1,27-3,81 mm/hr</p>	<p>Son suelos que tienen bajas tasas de infiltración cuando están completamente mojados y están constituidos mayormente por suelos con un estrato que impide el movimiento del agua hacia abajo, o suelos con una textura que va de moderadamente fina a fina. Estos suelos tienen una baja tasa de transmisión del agua.</p>
<p>D</p> <p>Infiltración entre 0-1,27 mm/hr</p>	<p>Son suelos de alto potencial de escurrimiento, de tasas de infiltración muy bajas cuando están completamente mojados y están formados mayormente por suelos arcillosos con un alto potencial de esponjamiento, suelos con índice de agua permanente alto, suelos con arcilla o capa de arcilla en la superficie o cerca de ella y suelos superficiales sobre material casi impermeable. Estos suelos tienen una tasa muy baja de transmisión del agua.</p>

Fuente: Villón Béjar, 2004

Anexo 5: Cálculos hidrogramas

Cuadro 38: Hidrograma Unitario para la Quebrada Los Negritos

Tiempo (hras)	Q (m³/s/mm)
0,0	0,00
0,1	0,01
0,2	0,04
0,4	0,08
0,5	0,14
0,6	0,21
0,7	0,30
0,9	0,38
1,0	0,44
1,1	0,48
1,2	0,50
1,3	0,49
1,5	0,46
1,6	0,42
1,7	0,37
1,8	0,32
1,9	0,28
2,2	0,21
2,4	0,16
2,7	0,12
2,9	0,09
3,2	0,06
3,4	0,05
3,6	0,04
4,3	0,02
4,9	0,01
5,5	0,00
6,1	0,00

Fuente: Elaboración propia, 2018

Para obtener el hidrograma unitario de la cuenca se multiplica el valor de Q_p y T_p por las coordenadas del hidrograma adimensional del SCS.

Posteriormente se multiplica el Q del hidrograma unitario por la precipitación efectiva según periodo de retorno.

Cuadro 39: Hidrograma de creciente de la Quebrada Los Negritos para T=25 años

Tiempo (Hrs)	Q (m³/s)
0,0	0,0
0,1	0,5
0,2	2,3
0,4	4,9
0,5	8,6
0,6	13,2
0,7	18,4
0,9	23,6
1,0	27,3
1,1	29,8
1,2	30,7
1,3	30,1
1,5	28,2
1,6	25,8
1,7	23,0
1,8	20,0
1,9	17,5
2,2	13,2
2,4	9,8
2,7	7,4
2,9	5,5
3,2	4,0
3,4	3,0
3,6	2,3
4,3	1,1
4,9	0,6
5,5	0,3
6,1	0,1

Fuente: Elaboración propia, 2018

Cuadro 40: Hidrograma de creciente de la Quebrada Los Negritos para T=50 años

Tiempo (Hrs)	Q (m ³ /s)
0,0	0,0
0,1	0,6
0,2	2,9
0,4	6,2
0,5	10,8
0,6	16,6
0,7	23,2
0,9	29,8
1,0	34,4
1,1	37,5
1,2	38,7
1,3	37,9
1,5	35,6
1,6	32,5
1,7	29,0
1,8	25,1
1,9	22,0
2,2	16,6
2,4	12,4
2,7	9,3
2,9	7,0
3,2	5,0
3,4	3,8
3,6	2,9
4,3	1,4
4,9	0,7
5,5	0,3
6,1	0,2

Fuente: Elaboración propia, 2018

Cuadro 41: Hidrograma de creciente de la Quebrada Los Negritos para T=100 años

Tiempo (Hrs)	Q (m³/s)
0,0	0,0
0,1	0,7
0,2	3,6
0,4	7,7
0,5	13,5
0,6	20,8
0,7	29,0
0,9	37,3
1,0	43,1
1,1	46,9
1,2	48,4
1,3	47,4
1,5	44,5
1,6	40,6
1,7	36,3
1,8	31,4
1,9	27,6
2,2	20,8
2,4	15,5
2,7	11,6
2,9	8,7
3,2	6,3
3,4	4,7
3,6	3,6
4,3	1,7
4,9	0,9
5,5	0,4
6,1	0,2

Fuente: Elaboración propia, 2018

Anexo 6: Coeficiente de Escorrentía

Cuadro 42: Coeficientes de escorrentía para ser usados en el método racional

Característica de la superficie	Periodo de retorno (años)						
	2	5	10	25	50	100	500
<u>Áreas desarrolladas</u>							
Asfáltico	0,73	0,77	0,81	0,86	0,90	0,95	1,00
Concreto/techo							
Zonas verdes (jardines, parques, etc, <i>Condición pobre (Cubierta de pasto menor del 50% del área)</i>							
Plano 0-2%	0,32	0,34	0,37	0,40	0,37	0,41	0,53
Promedio 2-7%	0,37	0,40	0,43	0,46	0,45	0,49	0,58
Pendiente superior a 7%	0,40	0,43	0,45	0,49	0,49	0,53	0,60
<i>Condición promedio (Cubierta de pasto menor del 50 al 75% del área)</i>							
Plano 0-2%	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41	0,53
Promedio 2-7%	0,33	0,36	0,38	0,42	0,45	0,49	0,58
Pendiente superior a 7%	0,37	0,40	0,42	0,46	0,49	0,53	0,60
<i>Condición buena (Cubierta de pasto mayor del 75% del área)</i>							
Plano 0-2%	0,21	0,23	0,25	0,29	0,32	0,36	0,49
Promedio 2-7%	0,29	0,32	0,35	0,39	0,42	0,46	0,56
Pendiente superior a 7%	0,34	0,37	0,40	0,44	0,47	0,51	0,58
<u>Áreas no desarrolladas</u>							
Áreas de cultivos							
Plano 0-2%	0,31	0,34	0,36	0,40	0,43	0,47	0,57
Promedio 2-7%	0,35	0,38	0,41	0,44	0,48	0,51	0,60
Pendiente superior a 7%	0,39	0,42	0,44	0,48	0,51	0,54	0,61
Pastizales							
Plano 0-2%	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41	0,53
Promedio 2-7%	0,33	0,36	0,38	0,42	0,45	0,49	0,58
Pendiente superior a 7%	0,37	0,40	0,42	0,46	0,49	0,53	0,60
Bosques							
Plano 0-2%	0,22	0,25	0,28	0,31	0,35	0,39	0,48
Promedio 2-7%	0,31	0,34	0,36	0,40	0,43	0,47	0,56
Pendiente superior a 7%	0,35	0,39	0,41	0,45	0,48	0,52	0,58

Fuente: Ven Te Chow, 1994

Cuadro 43: Obtención coeficientes de escorrentía para un periodo de retorno de 25 años en cuenca de la Quebrada Los Negritos

Uso	Area (m ²)	C tabla	C*A(m ²)
Calles y aceras	510831,3	0,86	439314,9
Cementerio	25226,0	0,46	11604,0
Parqueos	124814,7	0,86	107340,6
Zona Boscosa	297114,6	0,39	115874,7
Zona Urbana	1516899,9	0,86	1304533,9
Zona verde	443639,2	0,39	173019,3
Total	2918525,6	-	2151687,3

Fuente: Elaboración propia, 2018

$$C_{25} = \frac{2918525.6m^2}{2151687.3 m^2} = 0,737$$

Cuadro 44: Obtención coeficientes de escorrentía para un periodo de retorno de 50 años en cuenca de la Quebrada Los Negritos

Uso	Area (m ²)	C tabla	C*A(m ²)
Calles y aceras	510831,3	0,90	459748,1
Cementerio	25226,0	0,49	12360,7
Parqueos	124814,7	0,90	112333,2
Zona Boscosa	297114,6	0,42	124788,1
Zona Urbana	1516899,9	0,90	1365209,9
Zona verde	443639,2	0,42	186328,5
Total	2918525,6	-	2260768,6

Fuente: Elaboración propia, 2018

$$C_{50} = \frac{2918525.6m^2}{2260768.6 m^2} = 0,775$$

Cuadro 45: Obtención coeficientes de escorrentía para un periodo de retorno de 100 años en cuenca de la Quebrada Los Negritos

Uso	Area (m²)	C tabla	C*A(m²)
Calles y aceras	510831,3	0,95	485289,7
Cementerio	25226,0	0,53	13369,8
Parqueos	124814,7	0,95	118573,9
Zona Boscosa	297114,6	0,46	136672,7
Zona Urbana	1516899,9	0,95	1441054,9
Zona verde	443639,2	0,46	204074,0
Total	2918525,6	-	2399035,0

Fuente: Elaboración propia, 2018

$$C_{100} = \frac{2918525,6 m^2}{2399035,0 m^2} = 0,822$$

Anexo 7: Método Isocrónas

Para el cálculo de área comprendida entre cada isócrona se emplean las siguientes fórmulas:

$$A_t = A * 1,414 * \left(\frac{t}{t_c}\right)^{1,5} \text{ para } t < 0,5 * t_c \quad (49)$$

$$A_t = A * \left(1 - 1,414 \left(1 - \left(\frac{t}{t_c}\right)^{1,5}\right)\right) \text{ para } t \geq 0,5 * t_c \quad (50)$$

Es necesario determinar cuál fórmula se debe aplicar dependiendo de la condición $t < 0,5 * t_c$ o $t \geq 0,5 * t_c$, por lo que primeramente se realiza una prueba para cada t .

La prueba para determinar que fórmula utilizar para el cálculo del área entre isócronas se utilizó la condición $t < 0,5 * t_c$, si esta condición es verdadera entonces se debe aplicar la ecuación 47, en caso contrario deberá utilizarse la 48, tal y como aparece en el cuadro siguiente.

Cuadro 46: Prueba para cada Tiempo de Isocrónas.

Tiempo (t) min	0,5*TC	Prueba para fórmula	Fórmula
5	20,0000	VERDADERO	47
10	20,0000	VERDADERO	47
15	20,0000	VERDADERO	47
20	20,0000	FALSO	48
25	20,0000	FALSO	48
30	20,0000	FALSO	48
35	20,0000	FALSO	48
40	20,0000	FALSO	48

Fuente: Elaboración propia, 2018

Cuadro 47: Aplicación método Isocrónas

Tiempo min	Sup Acumulada Km²	Sup entre isocronas Km²	Q₁₀	Q₂₅	Q₅₀	Q₁₀₀
5	0,14	0,14	3,90	4,39	4,75	6,04
10	0,41	0,26	6,36	7,11	7,67	9,73
15	0,75	0,34	7,43	8,32	8,99	11,41
20	1,46	0,71	14,46	16,25	17,57	22,35
25	1,97	0,51	9,91	11,23	12,21	15,61
30	2,40	0,43	7,85	8,98	9,82	12,61
35	2,74	0,33	11,85	10,42	9,07	7,51
40	2,92	0,18	3,34	4,28	5,16	7,37

Fuente: Elaboración propia, 2018

Para la generación de los valores de caudal del cuadro anterior se multiplica el área entre isocróna, por la intensidad de lluvia, por el coeficiente de escorrentía, y finalmente se divide entre 3,6 que es el factor de conversión de unidades.

Anexo 8: Coeficiente de Rugosidad

Cuadro 48: Coeficientes de n básica de Manning, según material en m/s^{1/3}

Material	Tamaño grano (mm)	Valor n básica	
		Canal recto y uniforme	Canal liso
Concreto	-	0,012 – 0,018	0,011
Roca	-	-	0,025
Suelo firme	-	0,025 – 0,032	0,020
Arena gruesa	1-2	0,026 – 0,035	-
Gravas finas	-	-	0,024
Gravas	2-64	0,028 – 0,035	-
Gravas gruesas	-	-	0,026
Pequeños cantos rodados	64-256	0,030 – 0,050	-
Cantos rodados	>256	0,040 – 0,070	-

Arcement & Schneider, 1989

Cuadro 49: Coeficientes de ajuste para el cálculo de la n de Manning, según variante en $m/s^{1/3}$

		Irregularidad	Valor de ajuste
Grado de irregularidad (n₁)	Liso		0,000
	Menor		0,001 – 0,005
	Moderada		0,006 – 0,010
	Severa		0,011 – 0,02
Variación en la sección transversal del cauce (n₂)	Variación en la sección transversal del cauce		Valor de ajuste
	Gradual		0,000
	Alternan ocasionalmente		0,001 – 0,005
	Alternan frecuentemente		0,010 – 0,015
Efecto de obstrucciones (n₃)	Efecto de obstrucciones		Valor de ajuste
	Despreciable (ocupa menos del 5% del área de la sección transversal)		0,000 – 0,004
	Menor (ocupa menos del 15% del área de la sección transversal)		0,005 – 0,015
	Apreciable (ocupa entre el 15% y el 50% del área de la sección transversal)		0,020 – 0,030
	Severo (ocupa más del 50% del área de la sección transversal)		0,040 – 0,050
Cantidad de vegetación (n₄)	Cantidad de vegetación		Valor de ajuste
	Pequeña		0,002 – 0,010
	Mediana		0,010 – 0,025
	Grande		0,025 – 0,050
	Muy grande		0,050 – 0,100
Grado de sinuosidad (m)	Sinuosidad		Valor de ajuste
	Menor (Relación entre longitud real del cauce y longitud en línea recta entre 1 y 1,2)		1
	Apreciable (Relación entre longitud real del cauce y longitud en línea recta entre 1,2 y 1,5)		1,15
	Severo (Relación entre longitud real del cauce y longitud en línea recta mayor a 1,5)		1,3

Cuadro 50: Cálculo n de Manning, según variante en $m/s^{1/3}$

Factores modificantes	Valores de "c" seleccionados		
	Canal principal	Margen Derecha	Margen Izquierda
"n" básica	0,040	0,025	0,025
n ₁	0,002	0,005	0,006
n ₂	0,003	0,003	0,003
n ₃	0,020	0,010	0,0150
n ₄	0,002	0,030	0,030
Sub- total "n"	0,067	0,073	0,079
m	1,000	1,000	1,000
Valor total del coeficiente "n"	0,067	0,073	0,079

Fuente: Elaboración propia, 2018

Anexo 9: Principales resultados HEC-RAS

Secciones transversales sector 1

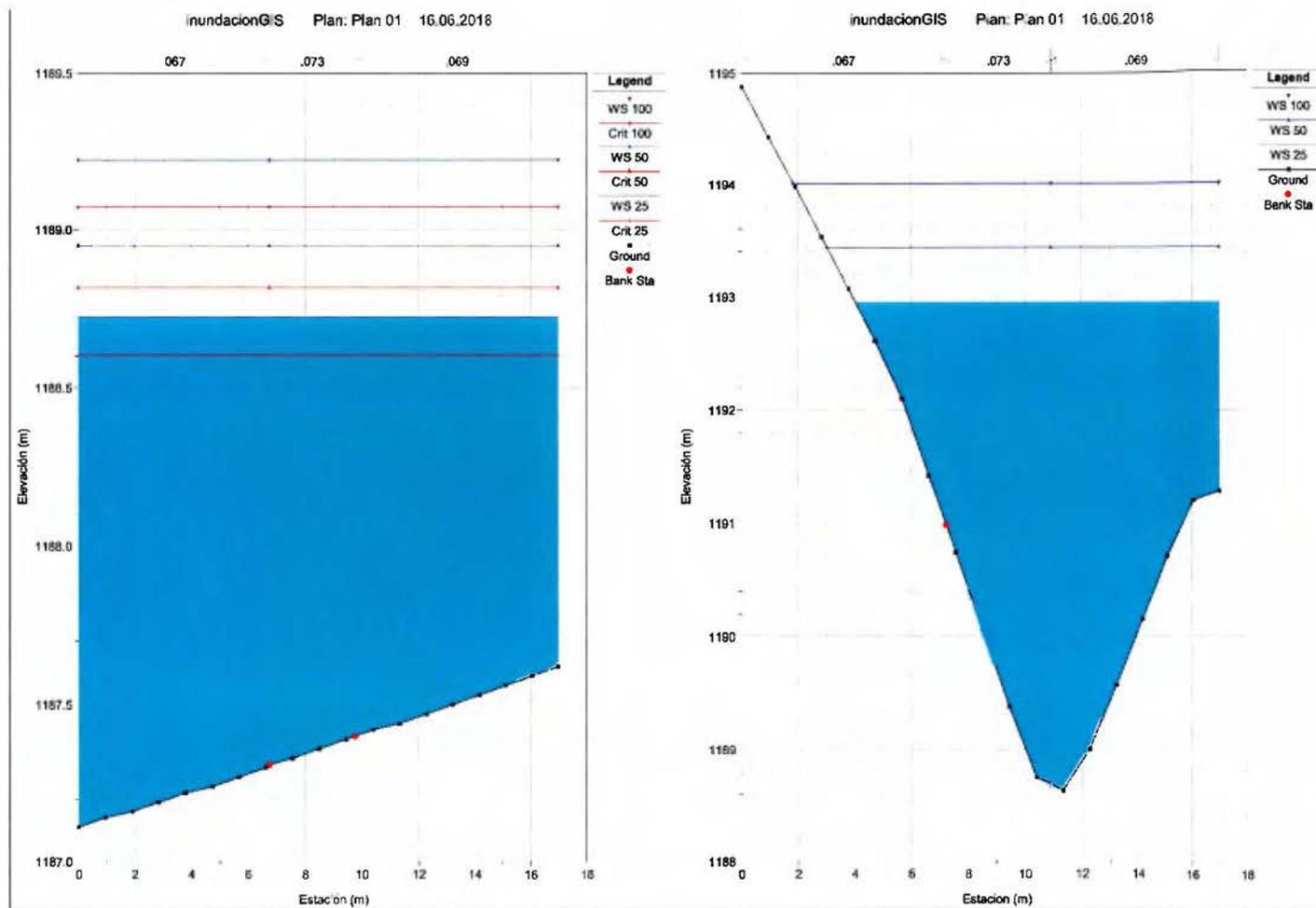


Figura 35: Secciones trasversales $T=25, 50$ y 100 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

Secciones transversales sector 1

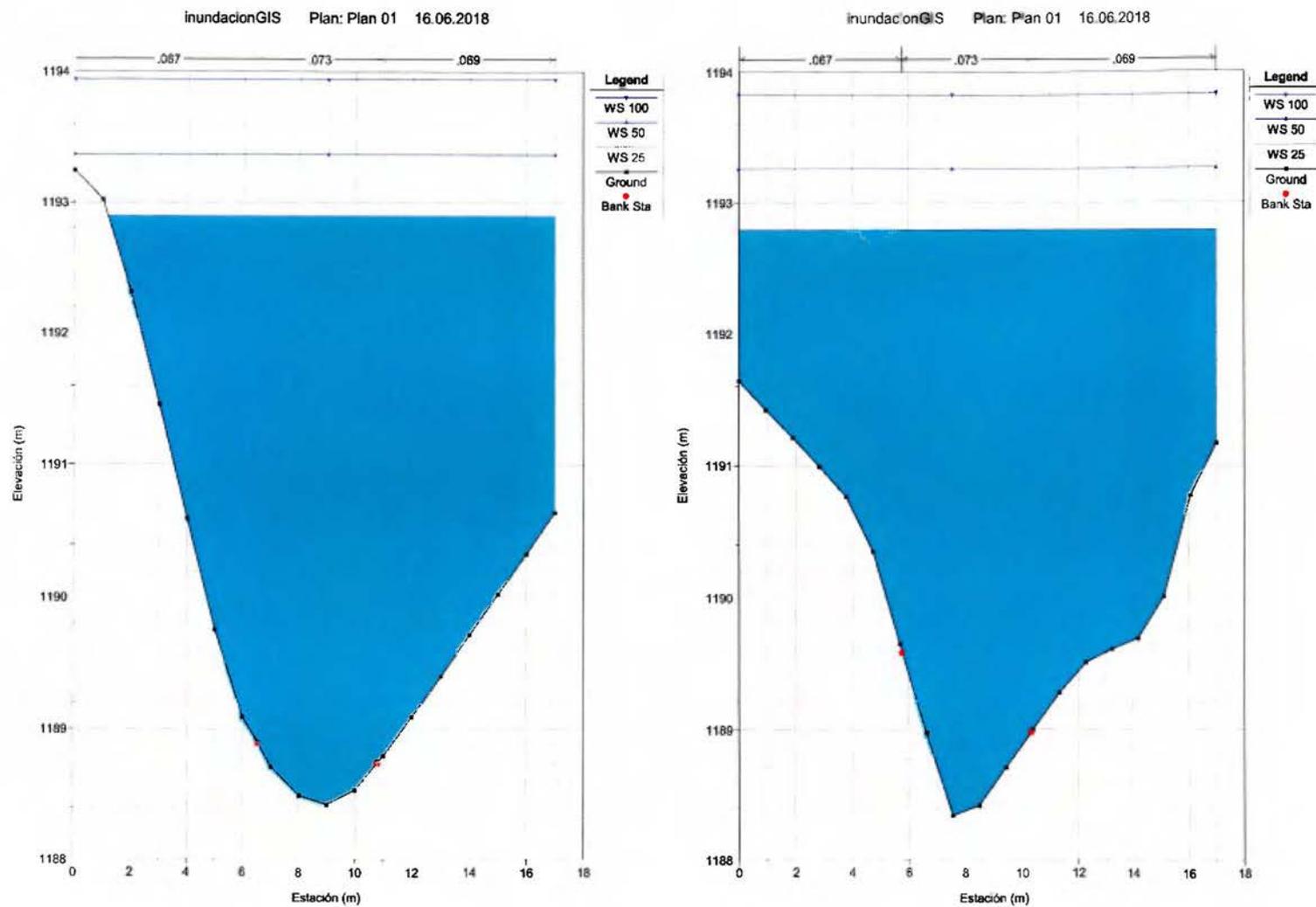


Figura 36: Secciones transversales $T=25, 50$ y 100 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

Secciones transversales sector 1

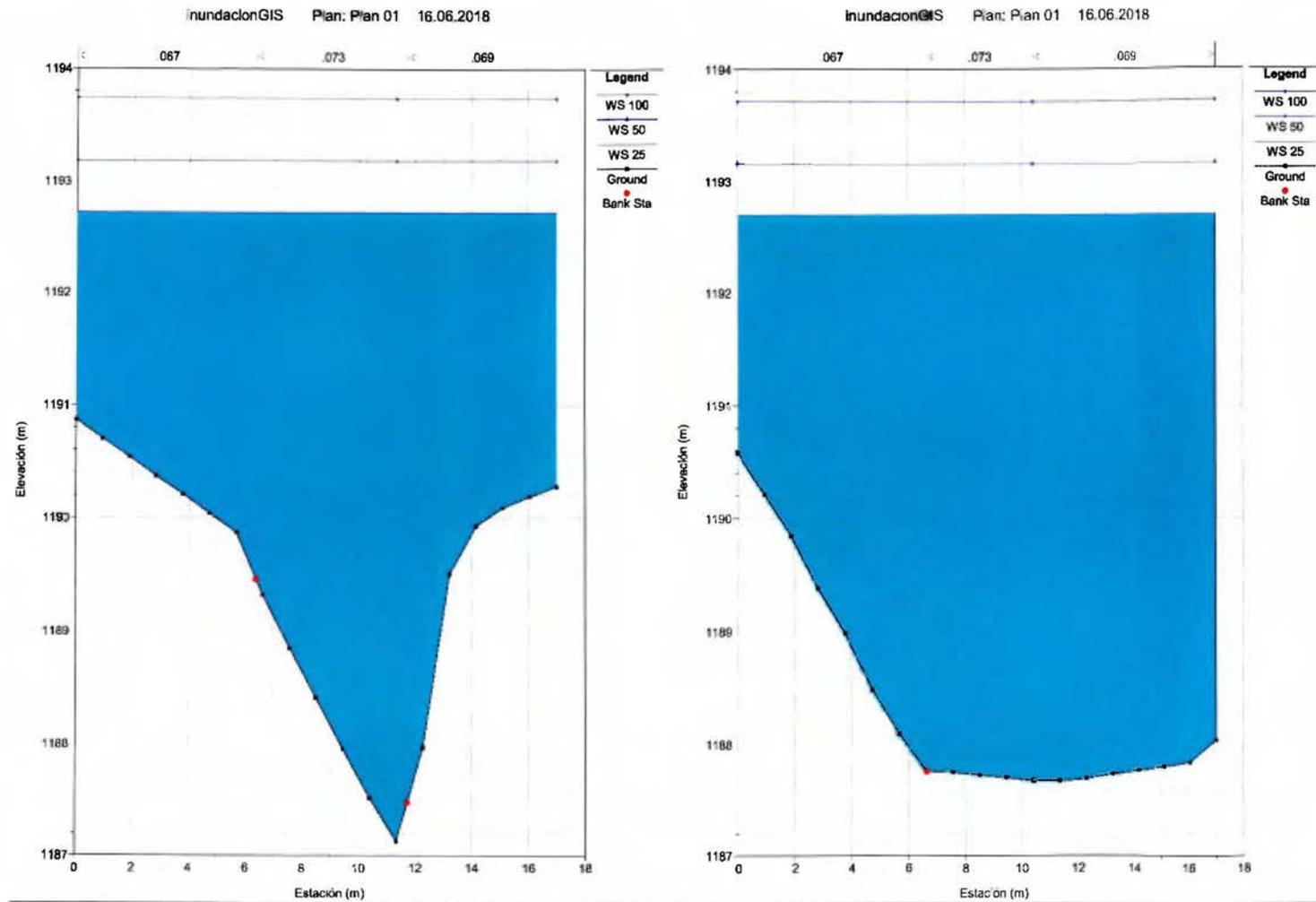


Figura 37: Secciones trasversales $T=25, 50$ y 100 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

Secciones transversales sector 1

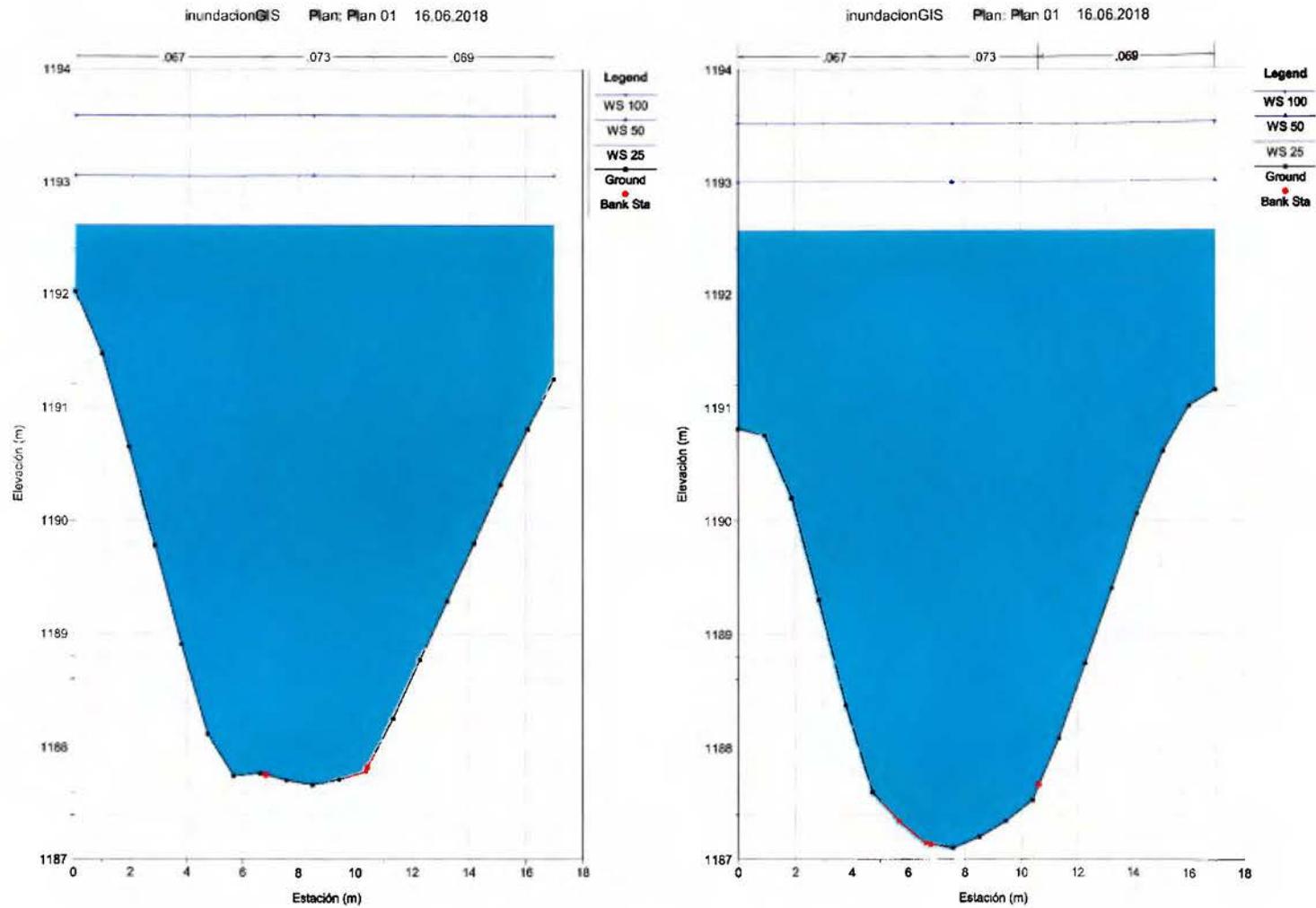


Figura 38: Secciones trasversales T=25, 50 y 100 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

Secciones transversales sector 1

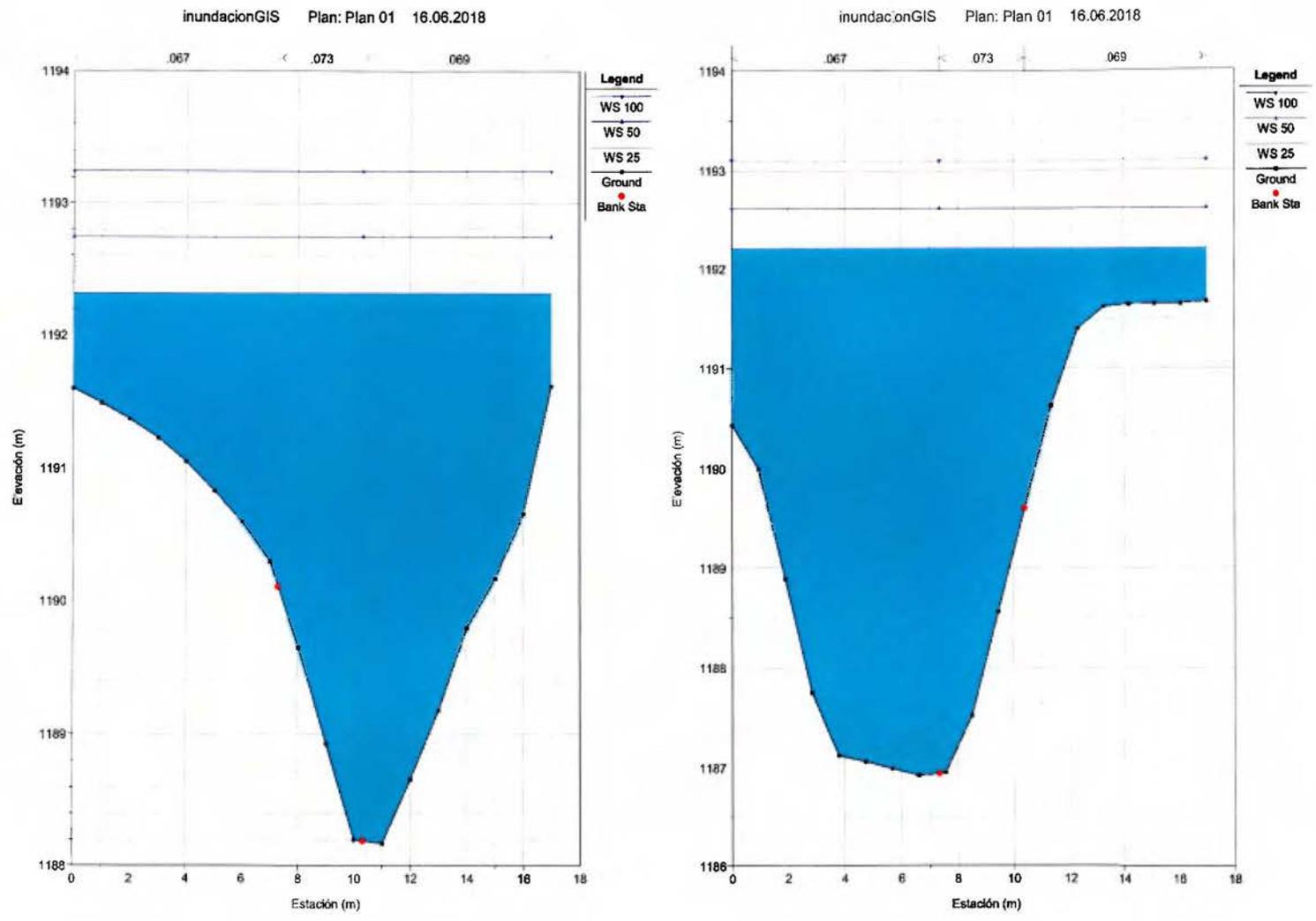


Figura 39: Secciones trasversales T=25, 50 y 100 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

Secciones transversales sector 1

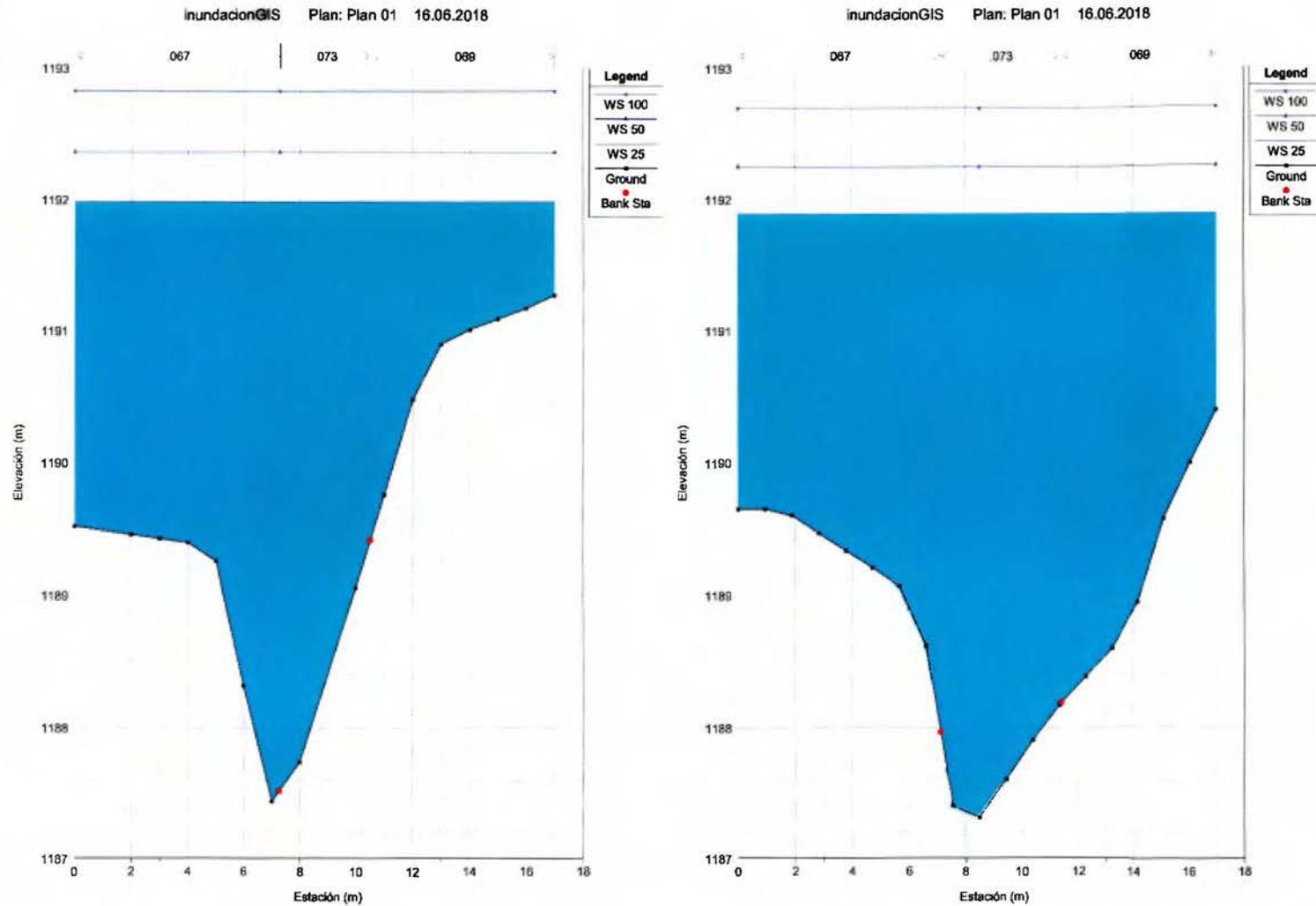


Figura 40: Secciones trasversales T=25, 50 y 100 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

Secciones transversales sector 1

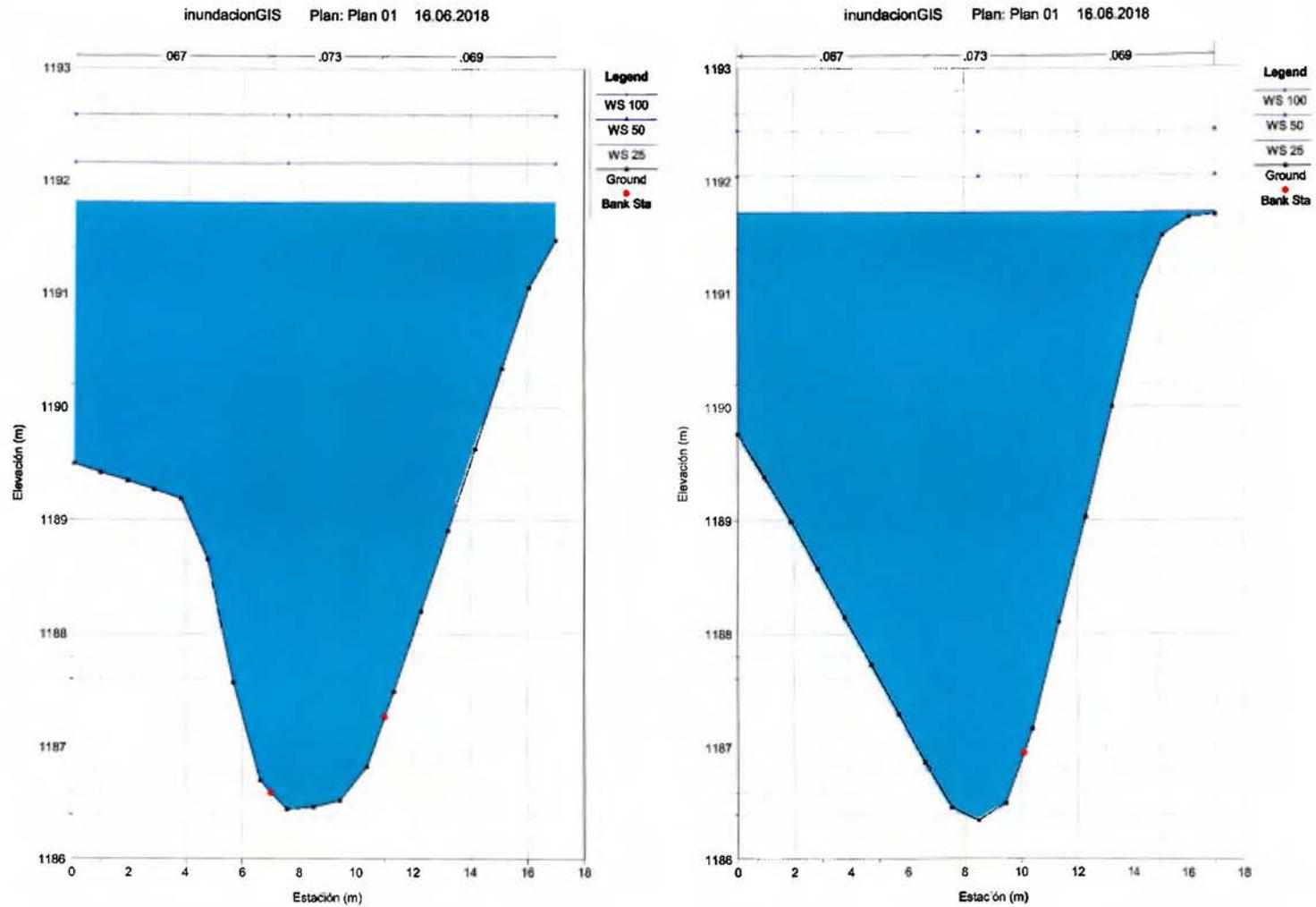


Figura 41: Secciones trasversales T=25, 50 y 100 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

Secciones transversales sector 1

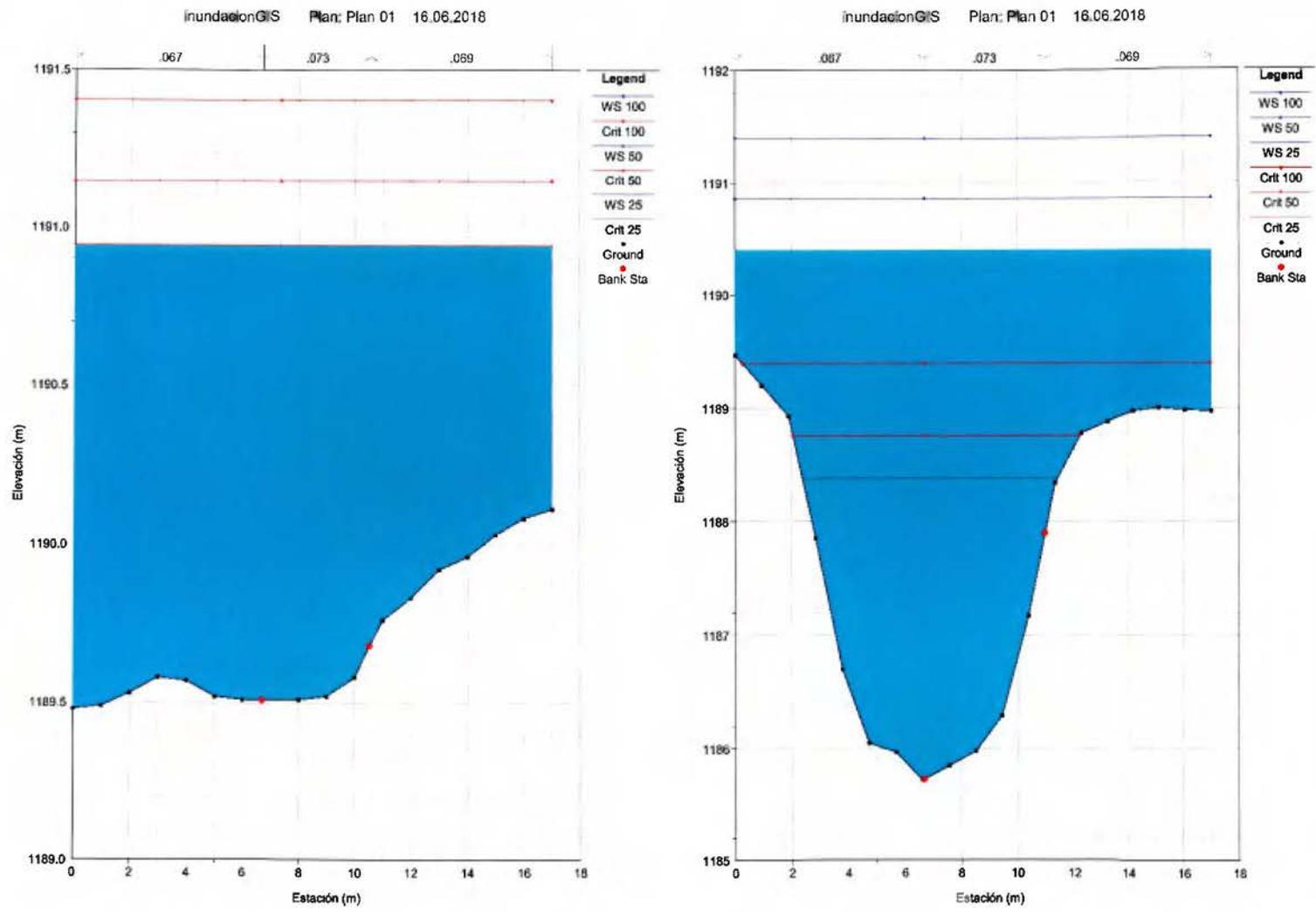


Figura 42: Secciones transversales T=25, 50 y 100 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

Secciones transversales sector 1

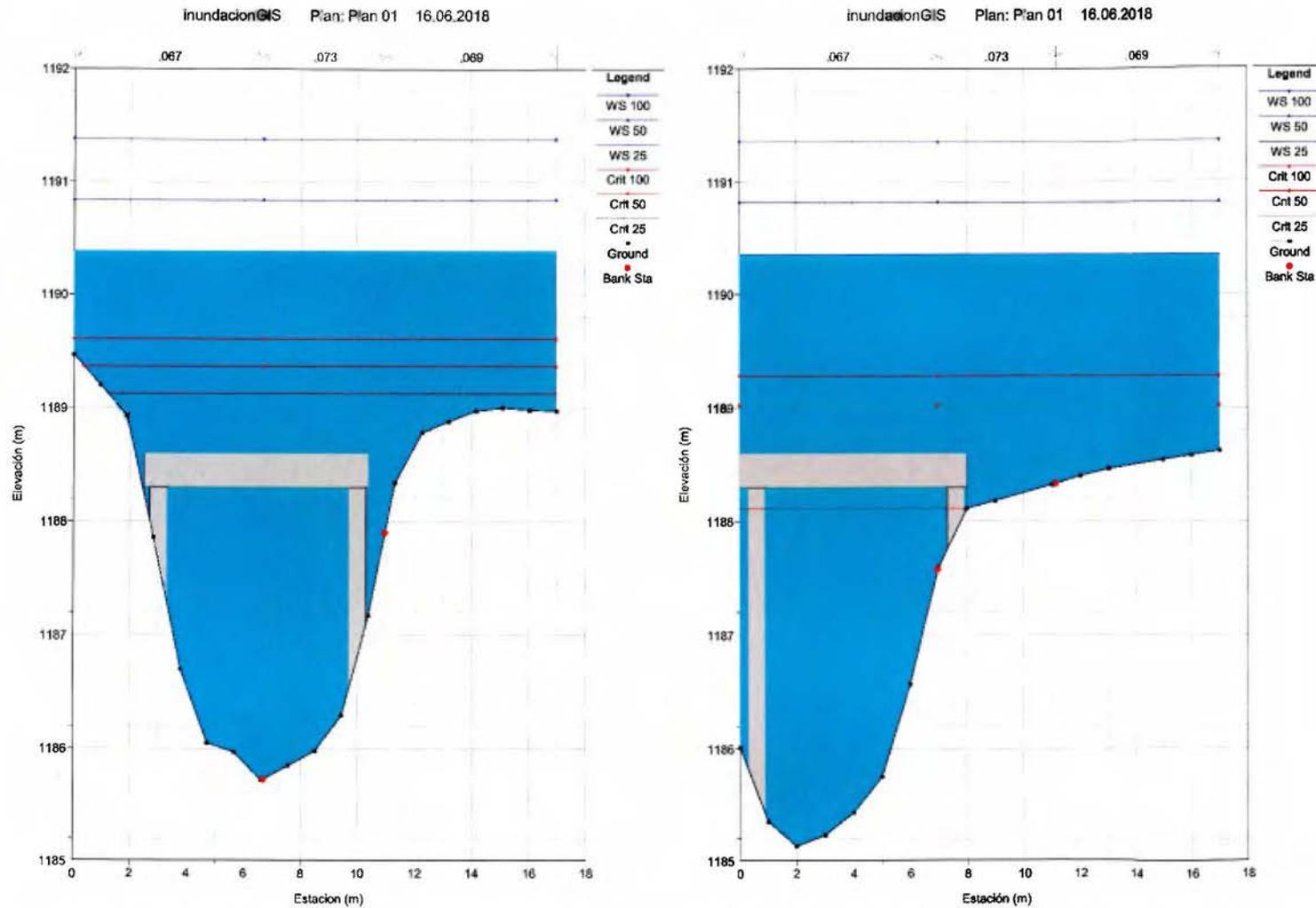


Figura 43: Secciones transversales $T=25, 50$ y 100 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

Secciones transversales sector 1

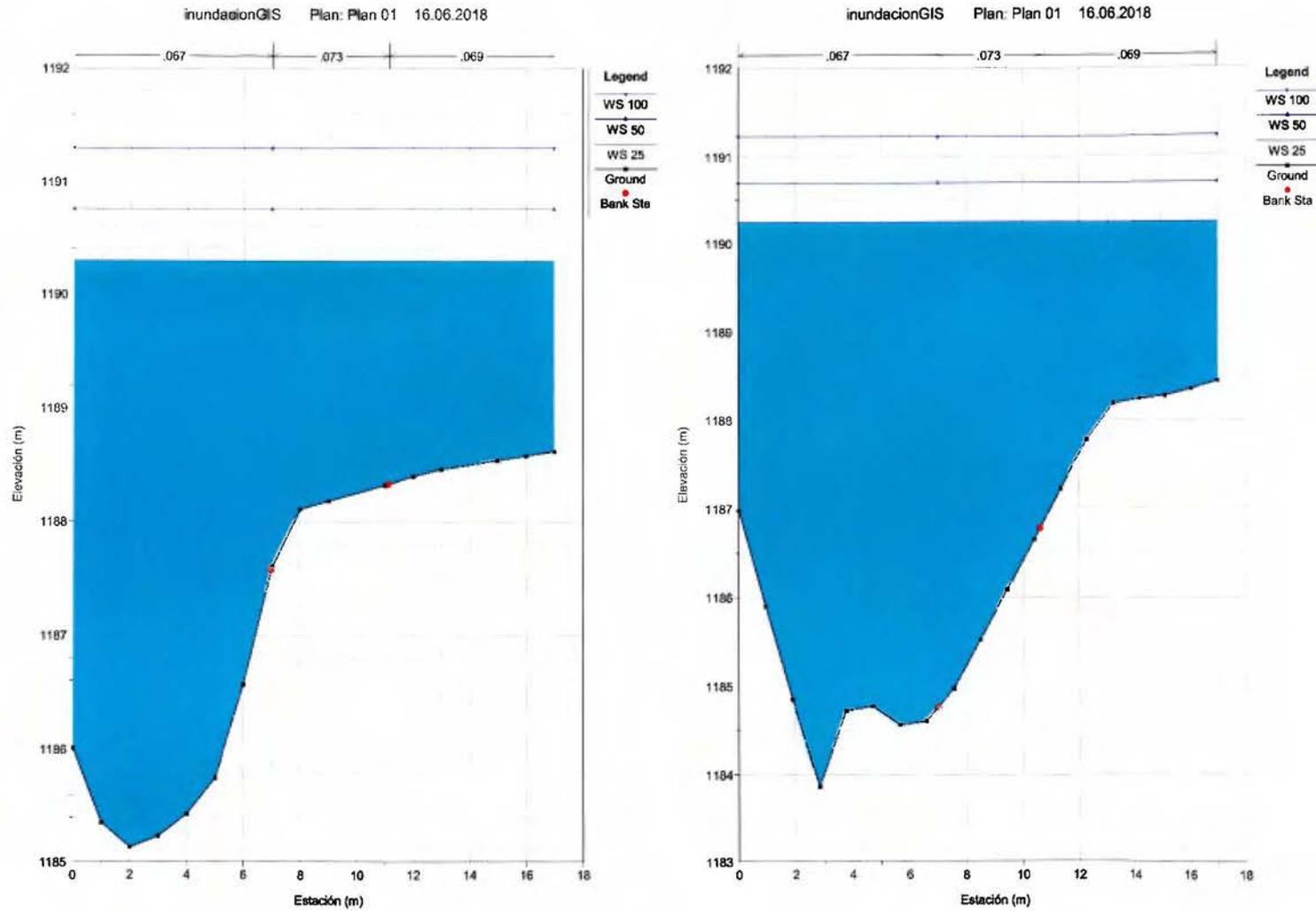


Figura 44: Secciones trasversales T=25, 50 y 100 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

Secciones transversales sector 1

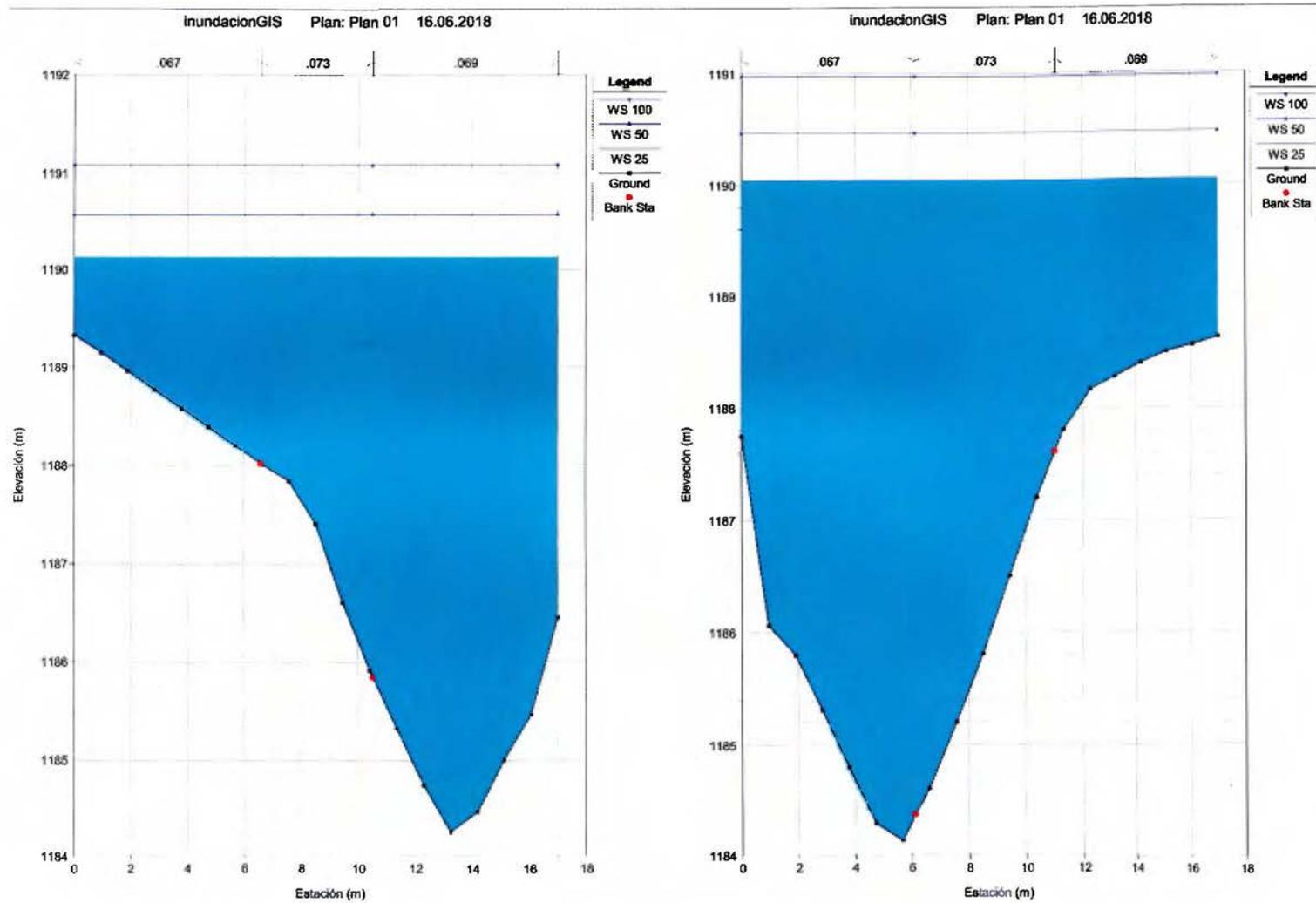


Figura 45: Secciones trasversales T=25, 50 y 100 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

Secciones transversales sector 1

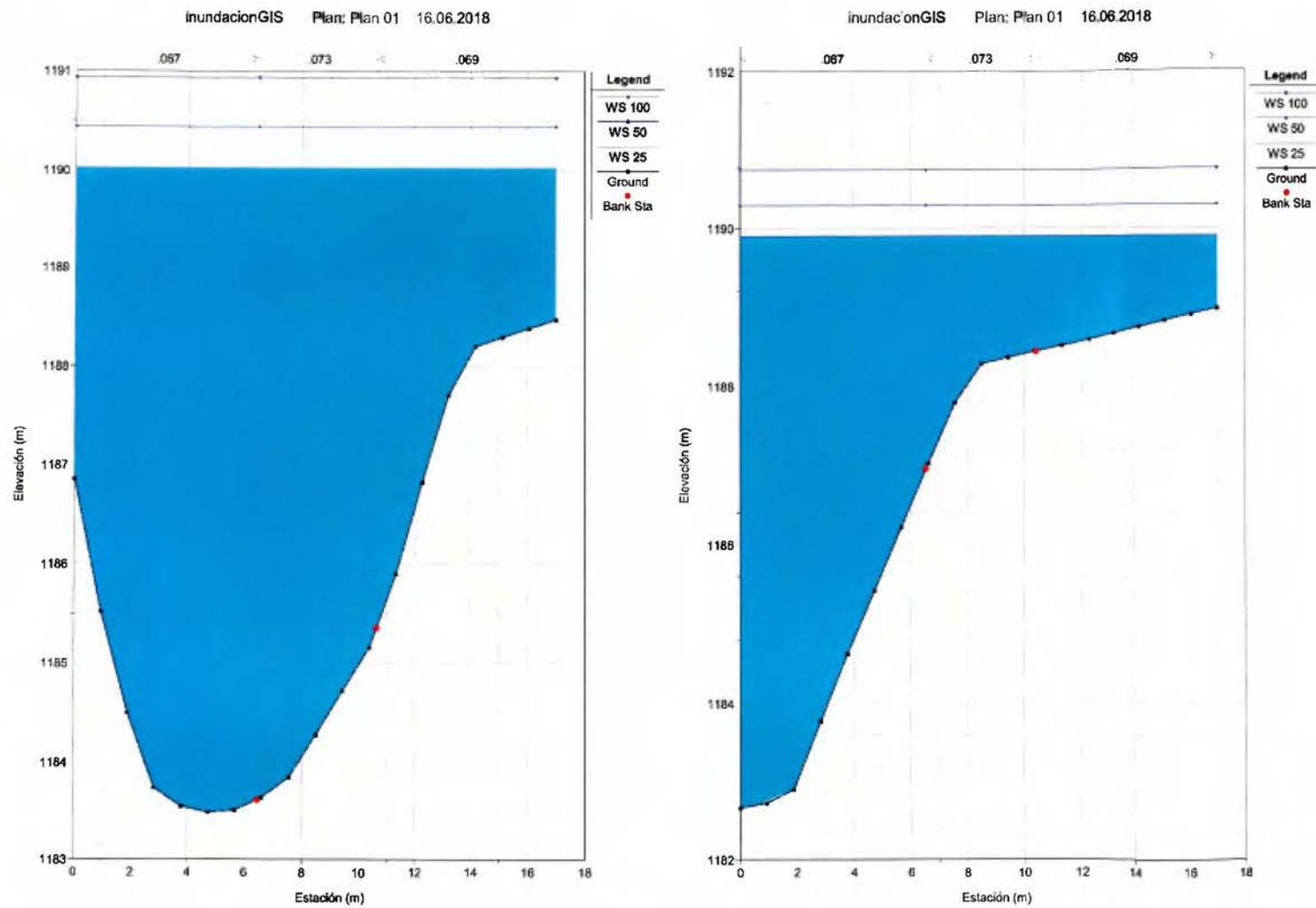


Figura 46: Secciones trasversales T=25, 50 y 100 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

Secciones transversales sector 1

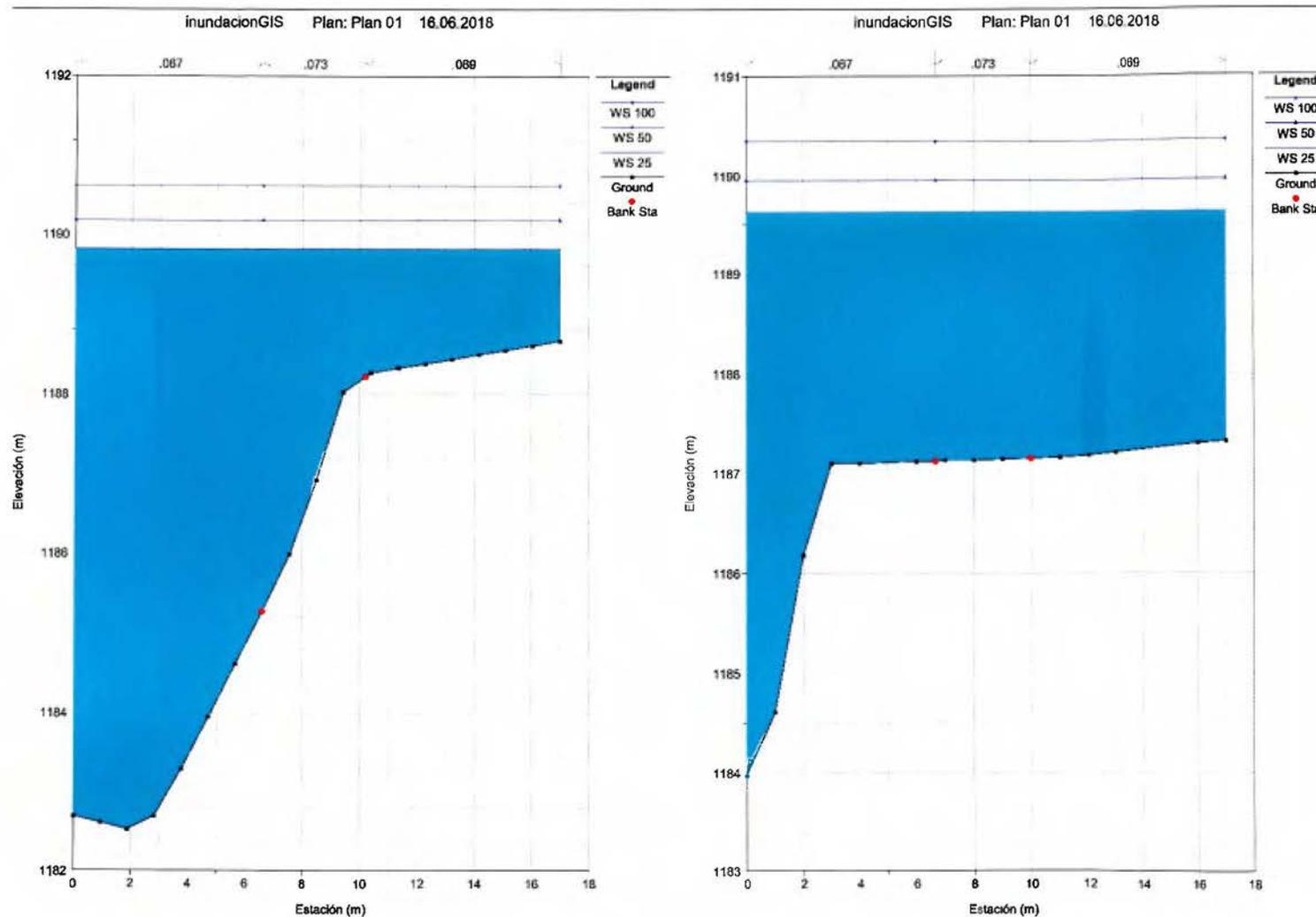


Figura 47: Secciones trasversales T=25, 50 y 100 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

Secciones transversales sector 2

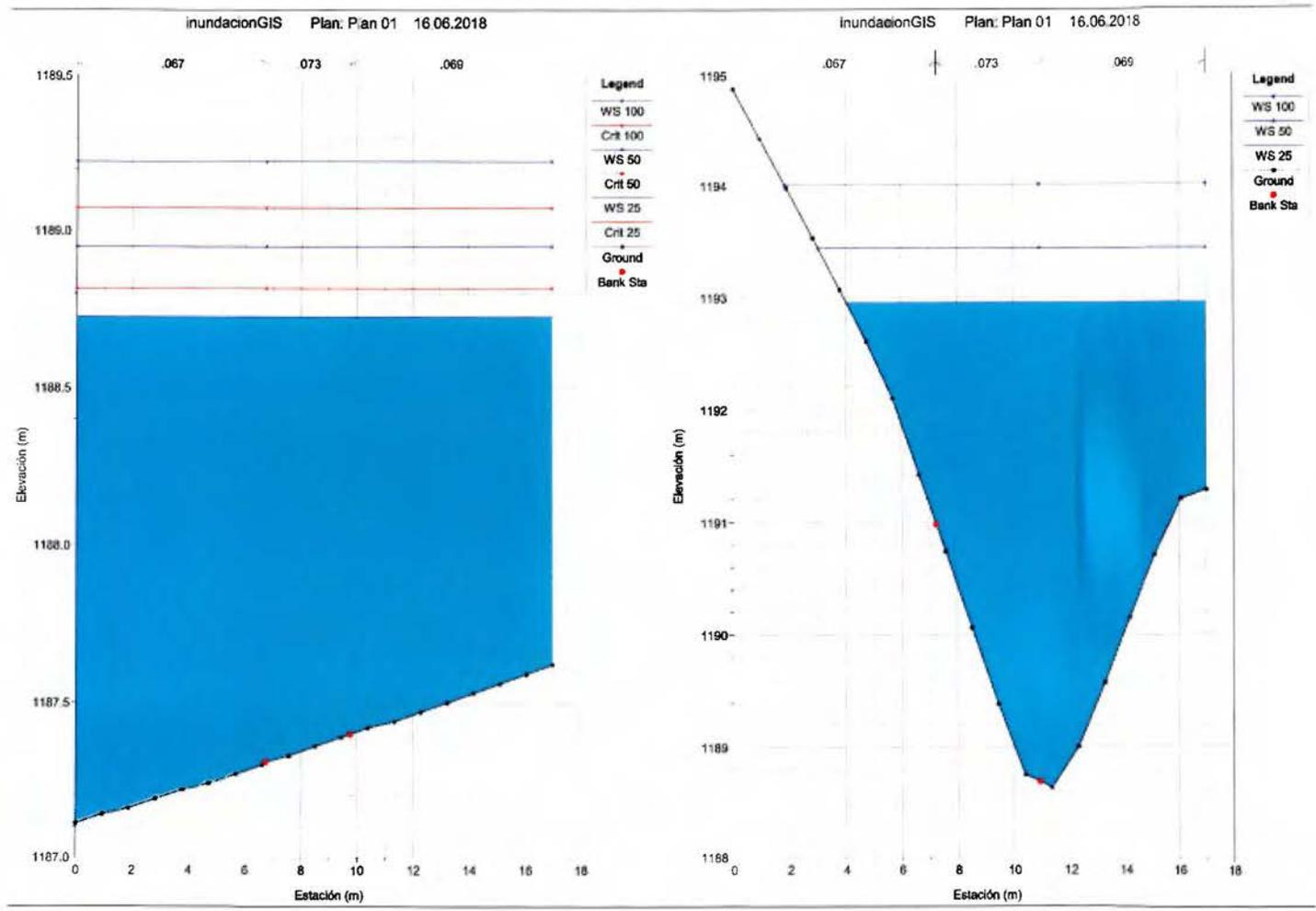


Figura 48: Secciones transversales T=25, 50 y 100 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

Secciones transversales sector 2

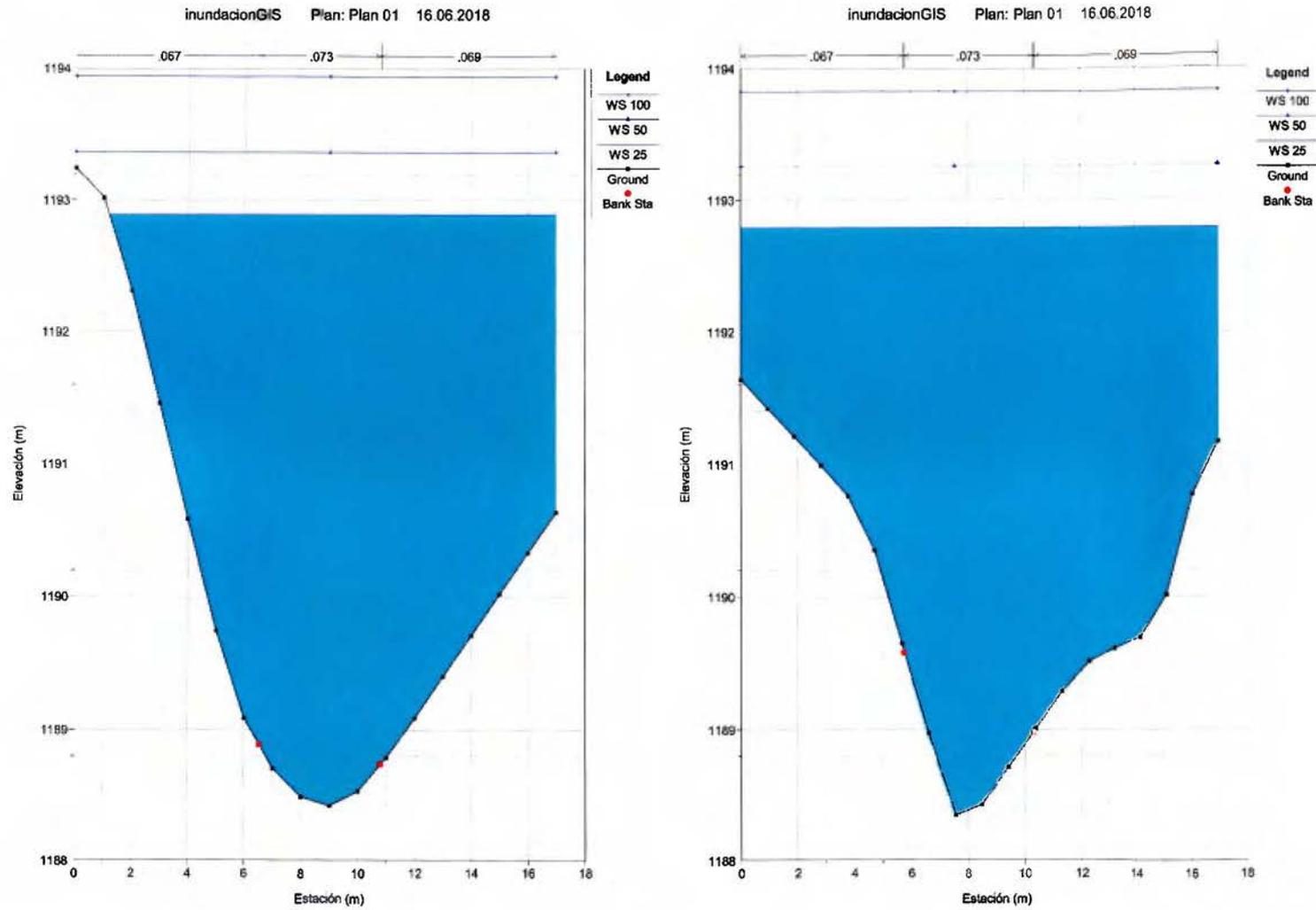


Figura 49: Secciones transversales T=25, 50 y 100 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

Secciones transversales sector 2

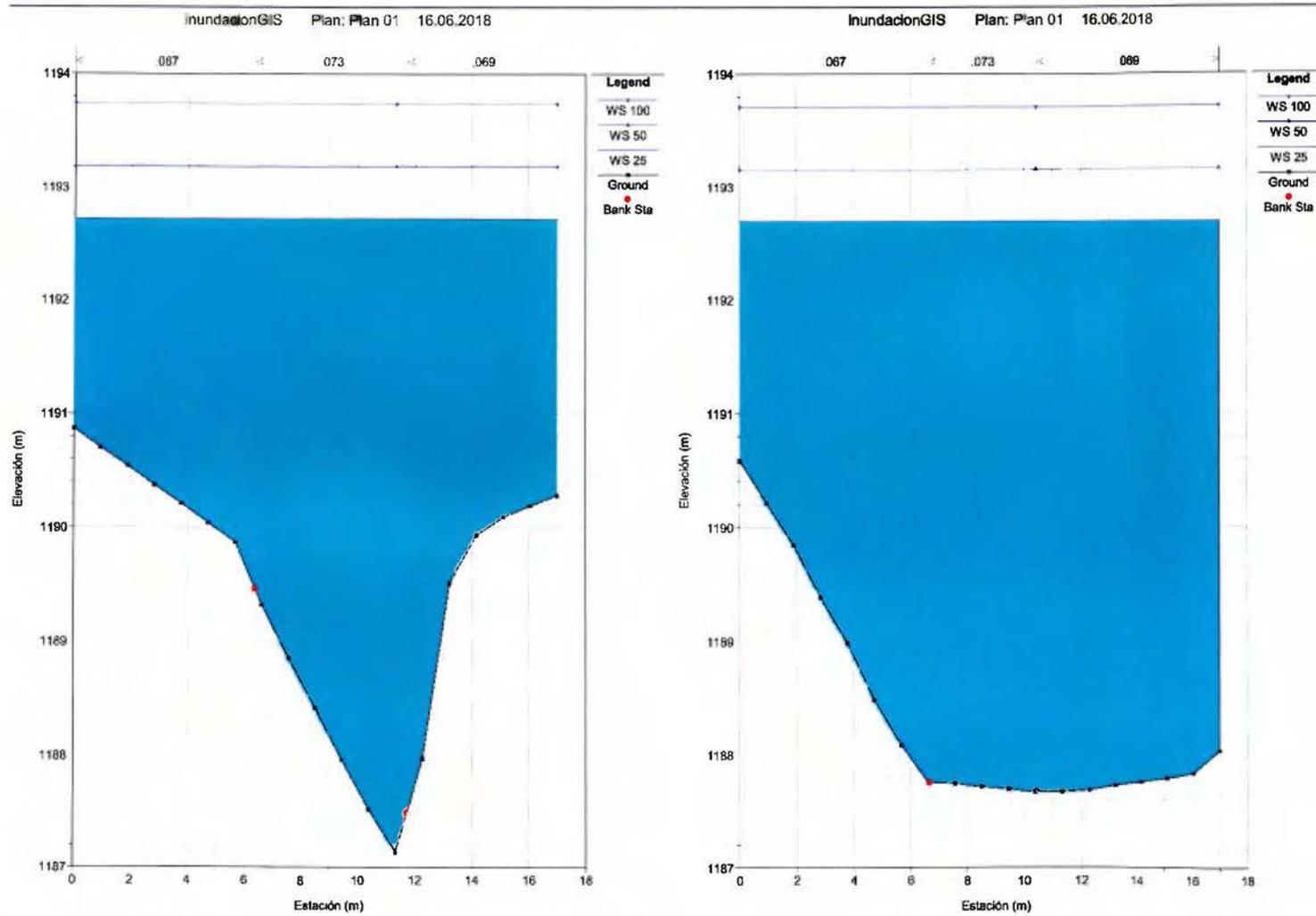


Figura 50: Secciones trasversales T=25, 50 y 100 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

Secciones transversales sector 2

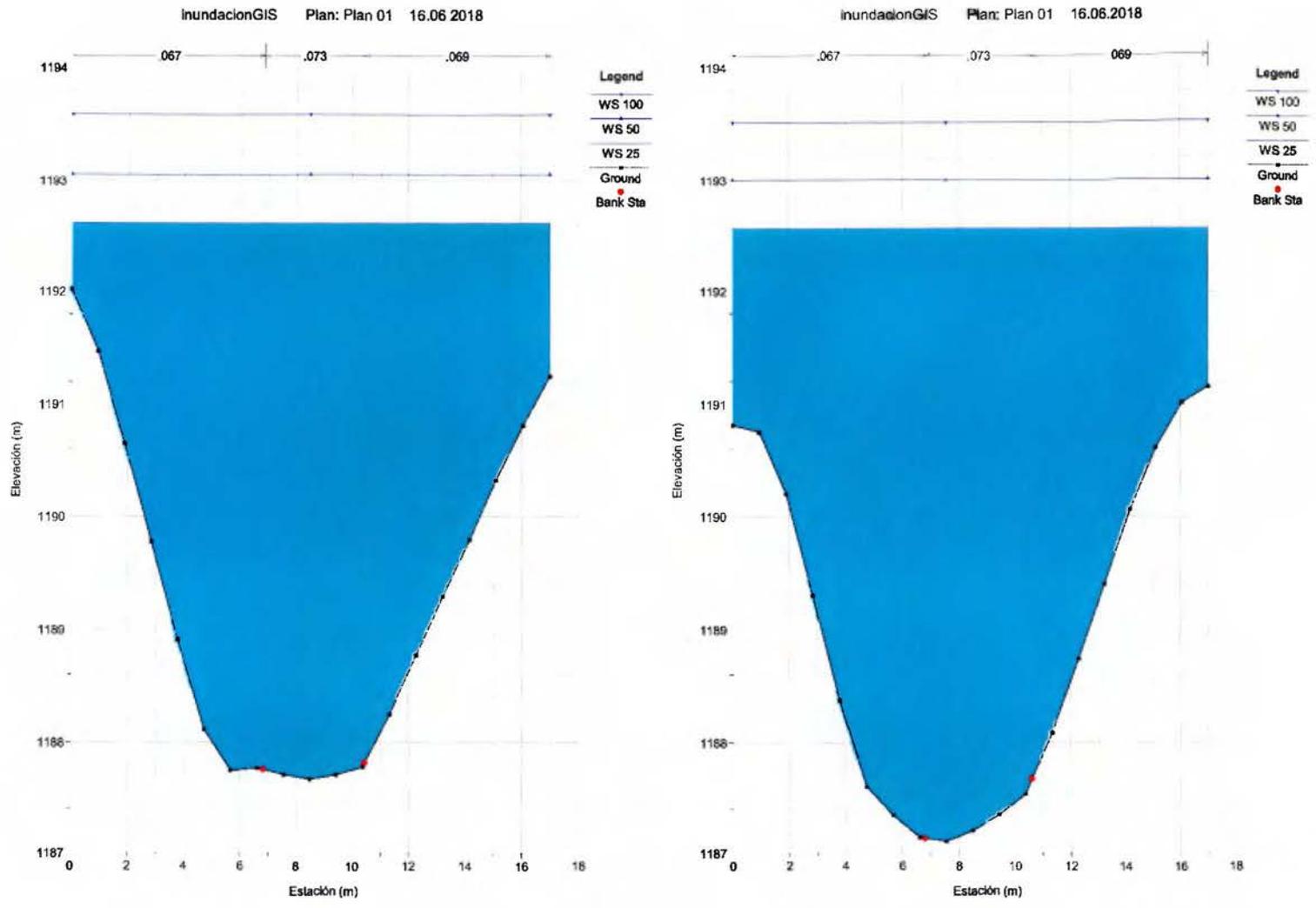


Figura 51: Secciones trasversales T=25, 50 y 100 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

Secciones transversales sector 2

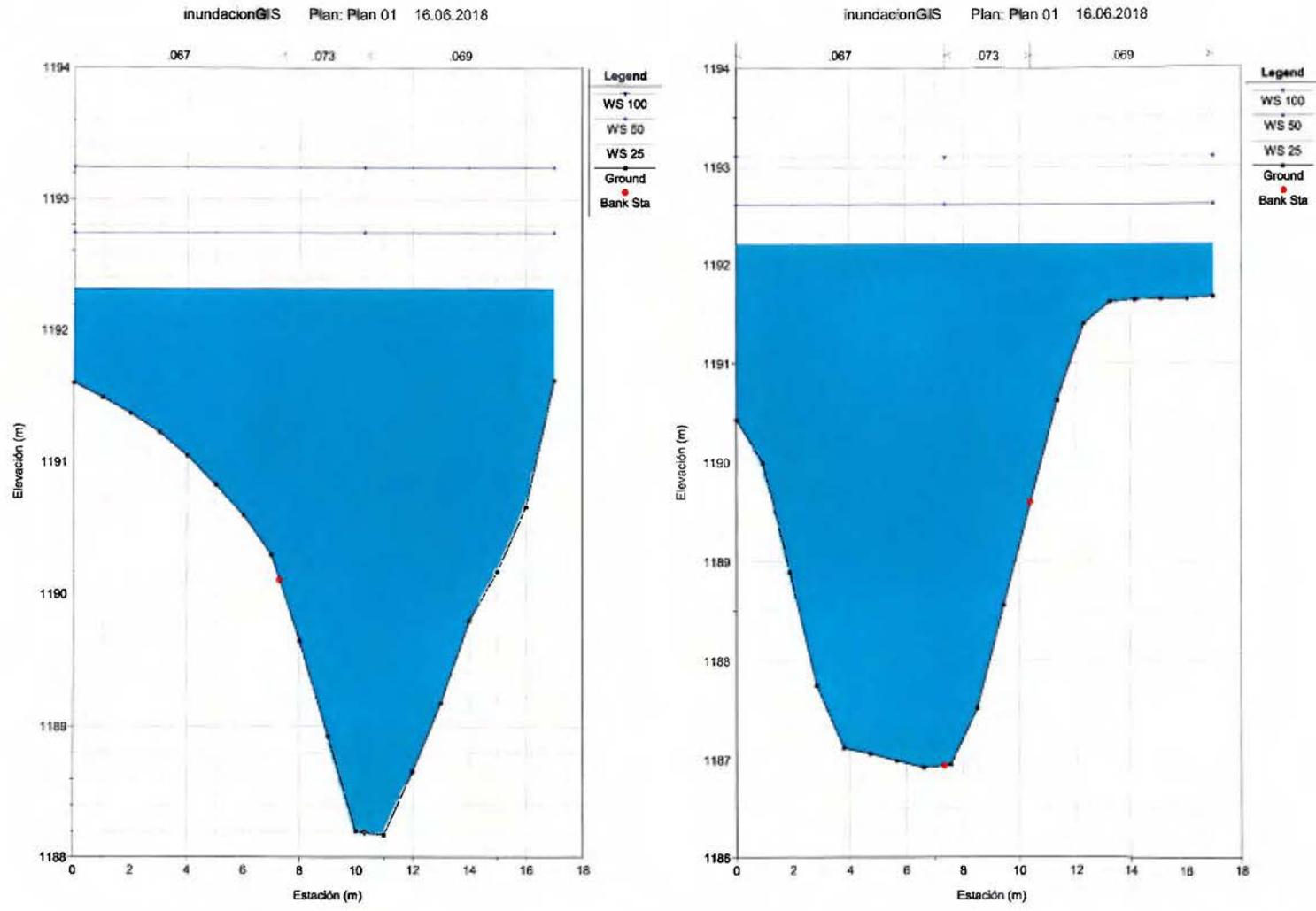


Figura 52: Secciones trasversales T=25, 50 y 100 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

Secciones transversales sector 2

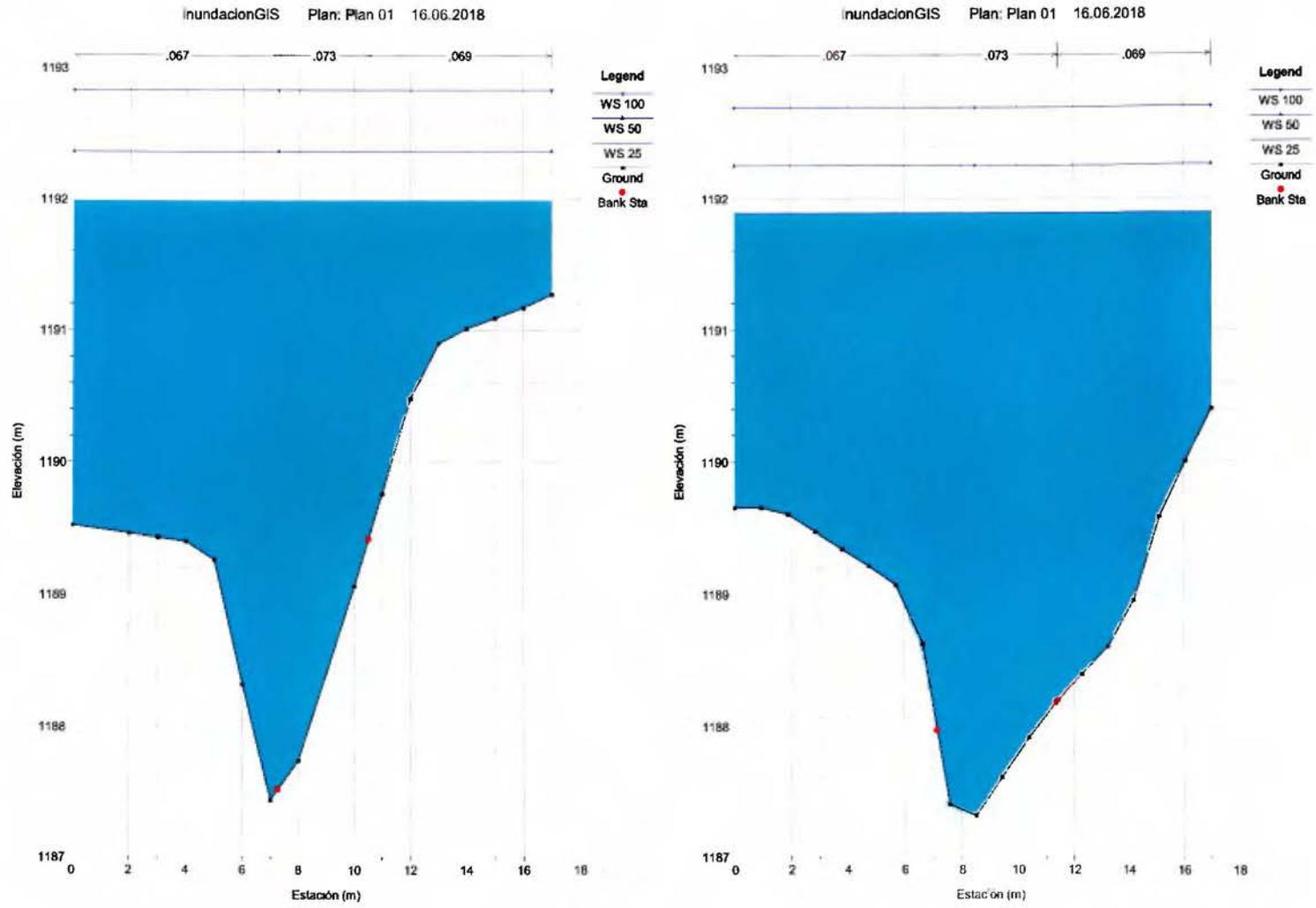


Figura 53: Secciones trasversales T=25, 50 y 100 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

Secciones transversales sector 2

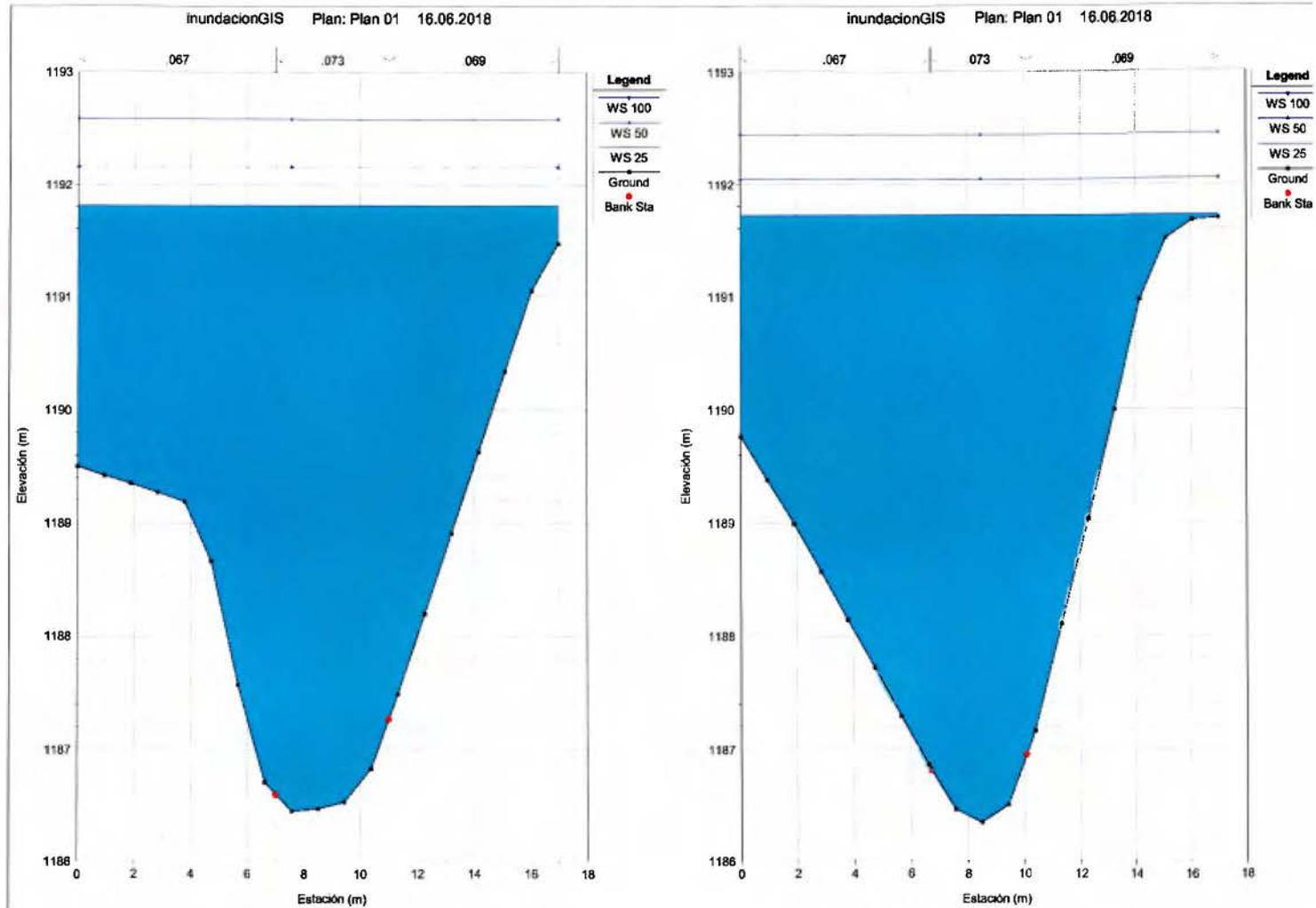


Figura 54: Secciones trasversales T=25, 50 y 100 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

Secciones transversales sector 2

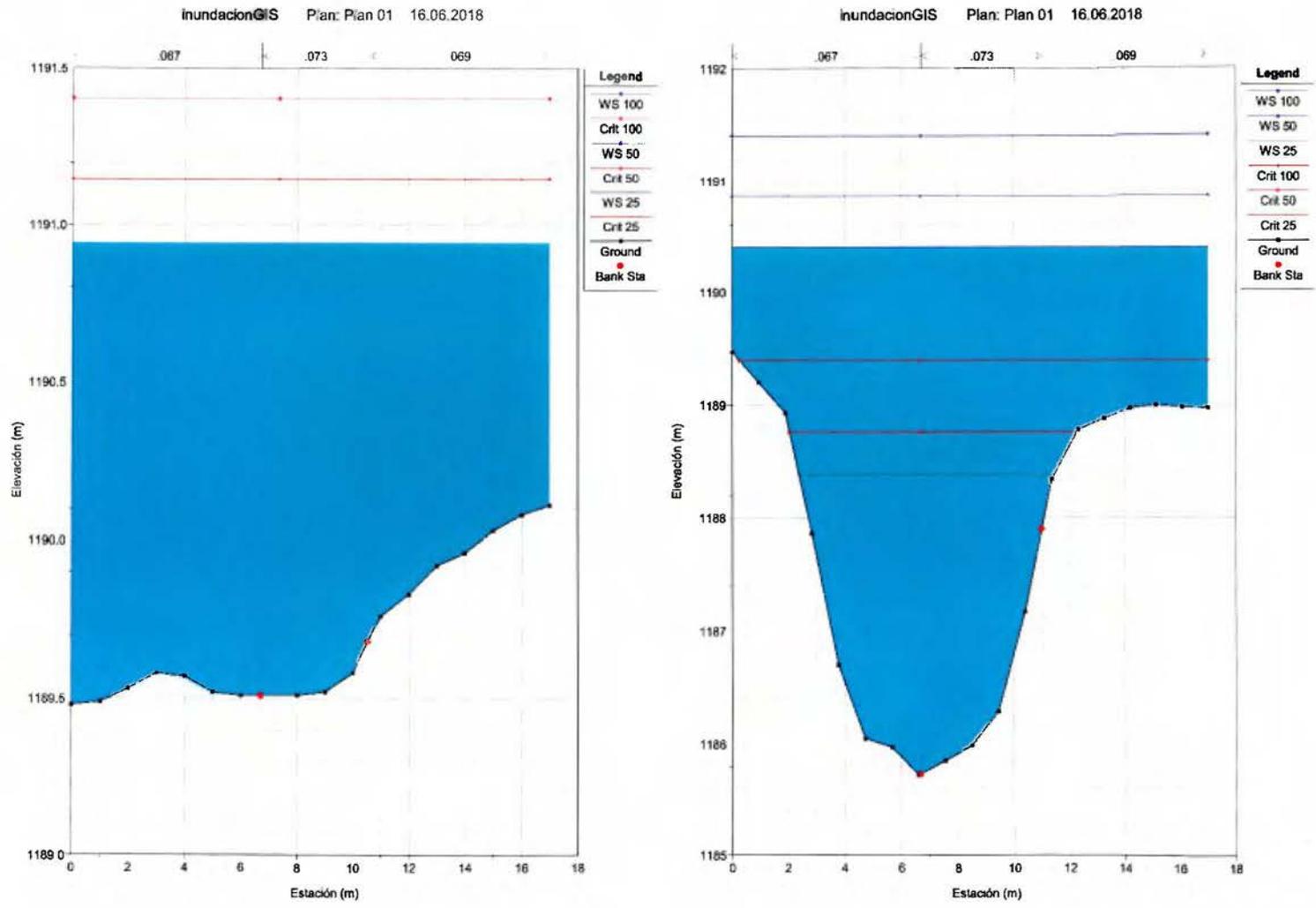


Figura 55: Secciones trasversales T=25, 50 y 100 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

Secciones transversales sector 2

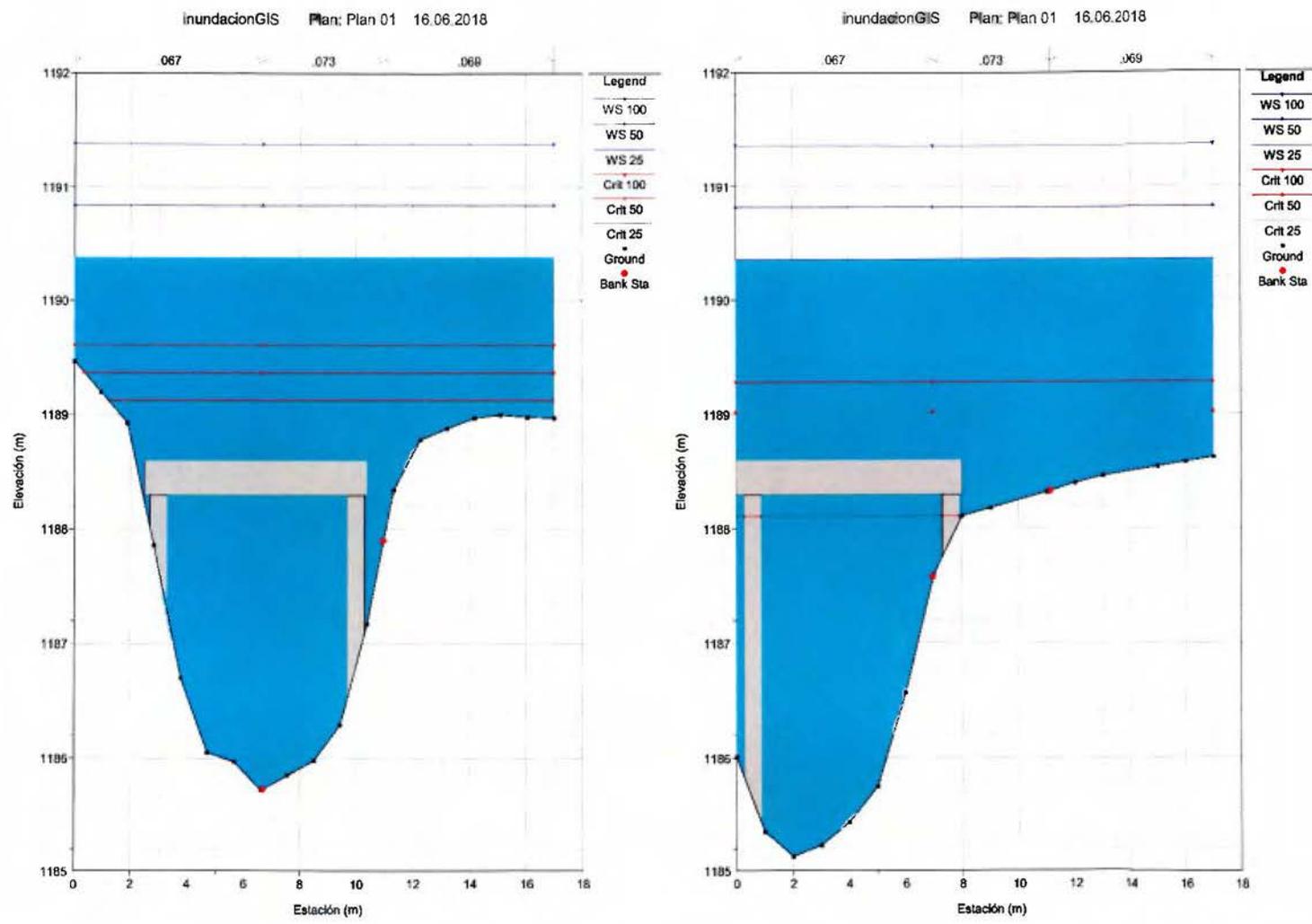


Figura 56: Secciones trasversales T=25, 50 y 100 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

Secciones transversales sector 2

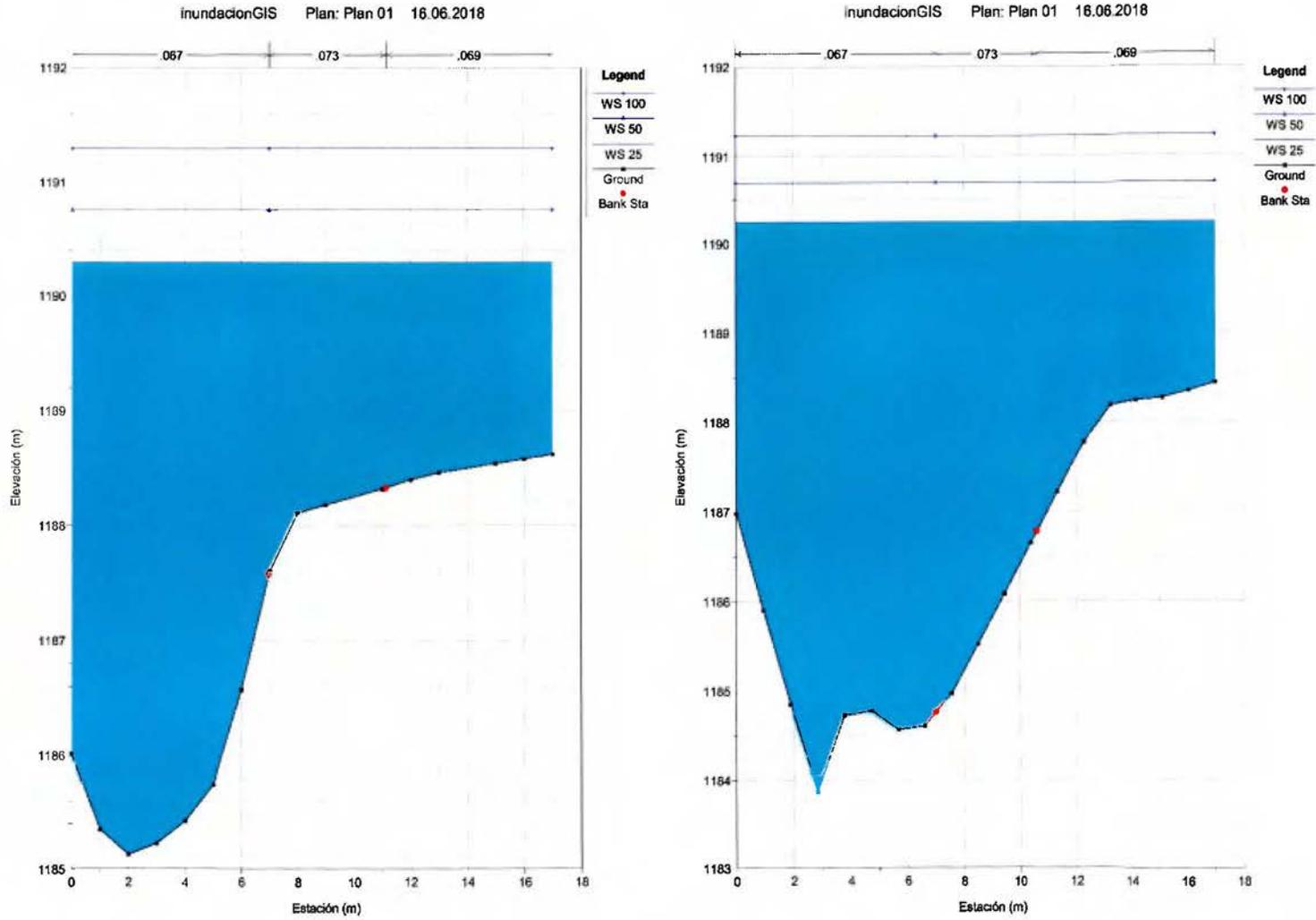


Figura 57: Secciones trasversales T=25, 50 y 100 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

Secciones transversales sector 2

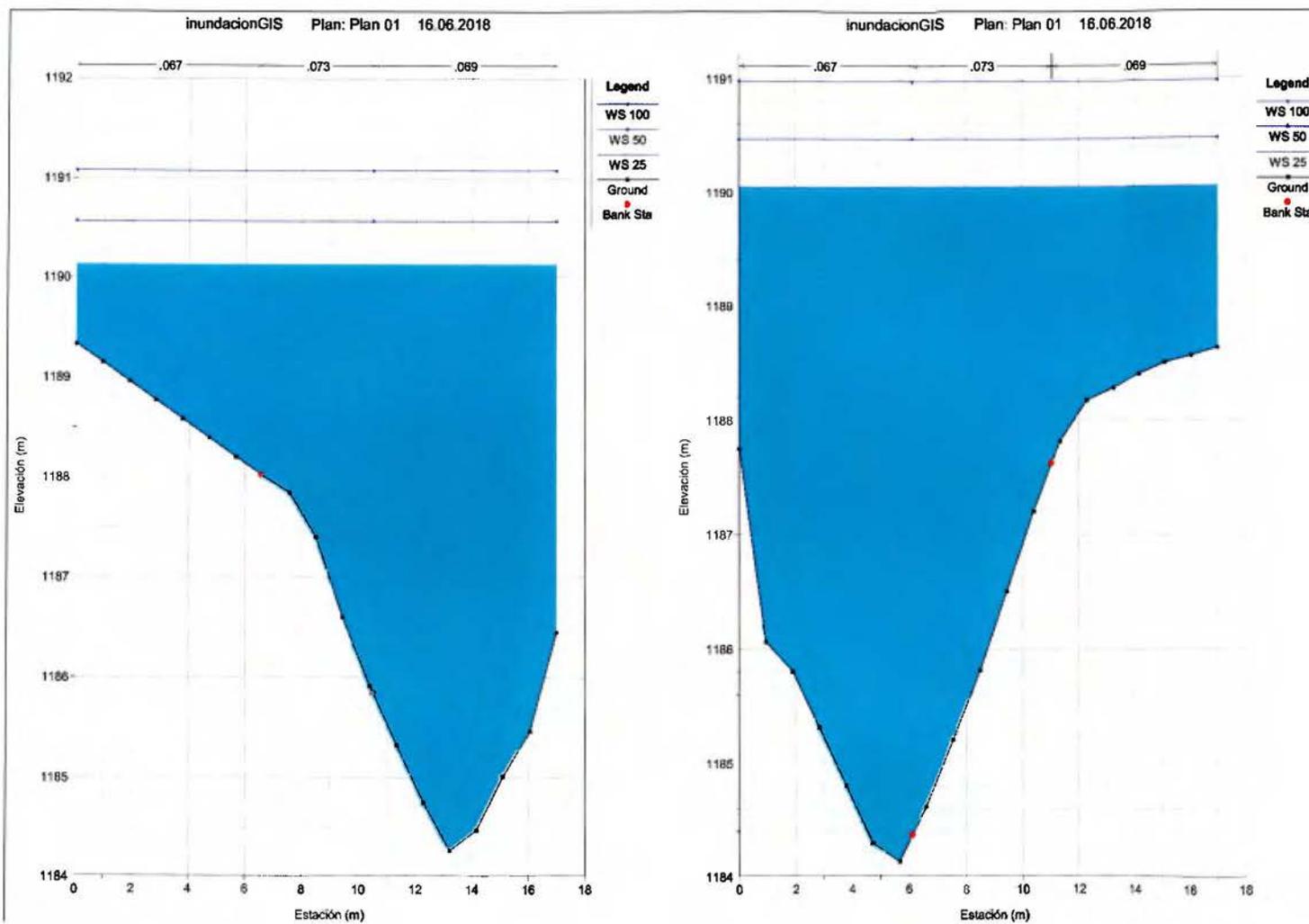


Figura 58: Secciones trasversales T=25, 50 y 100 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

Secciones transversales sector 2

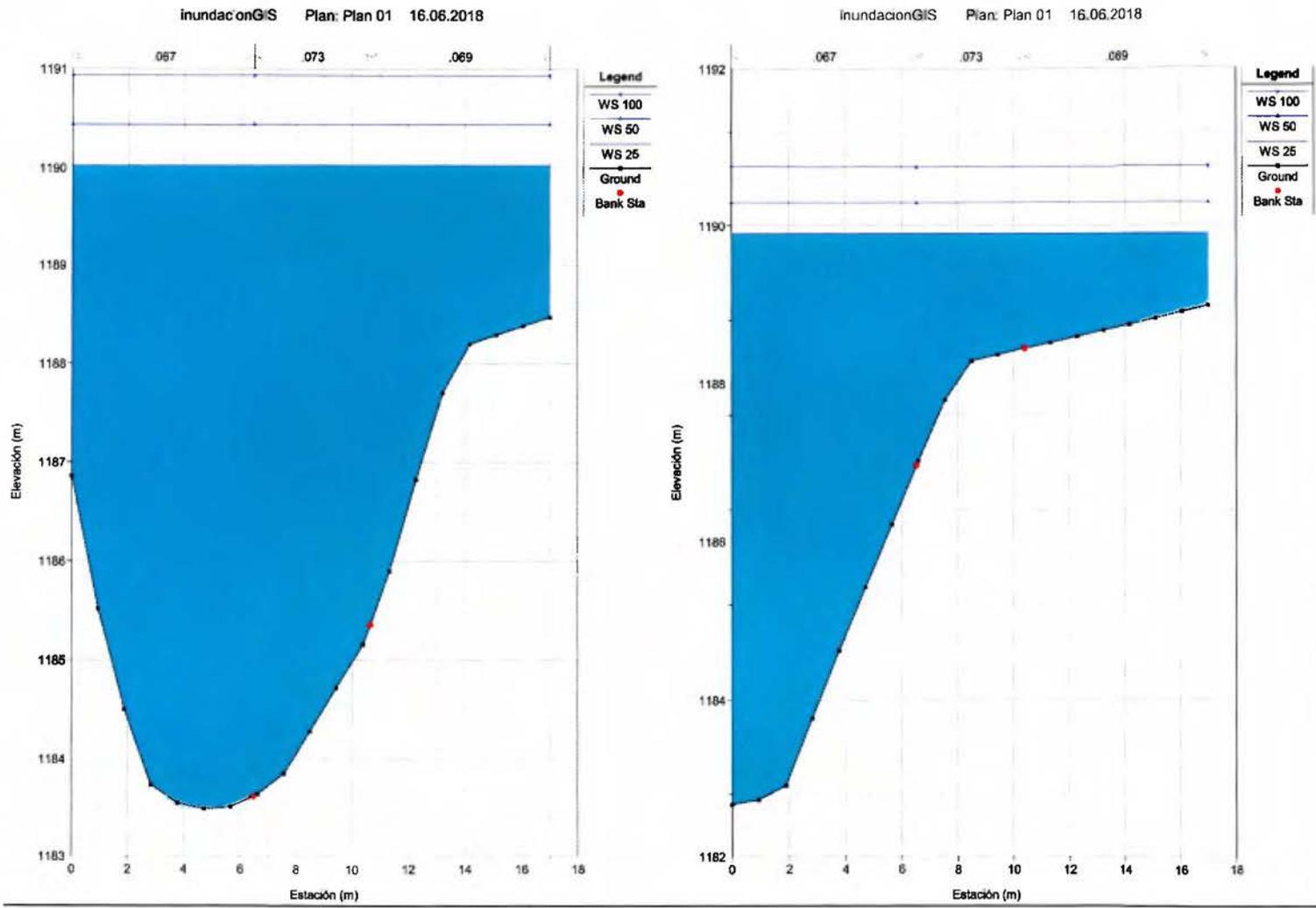


Figura 59: Secciones trasversales T=25, 50 y 100 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

Secciones transversales sector 2

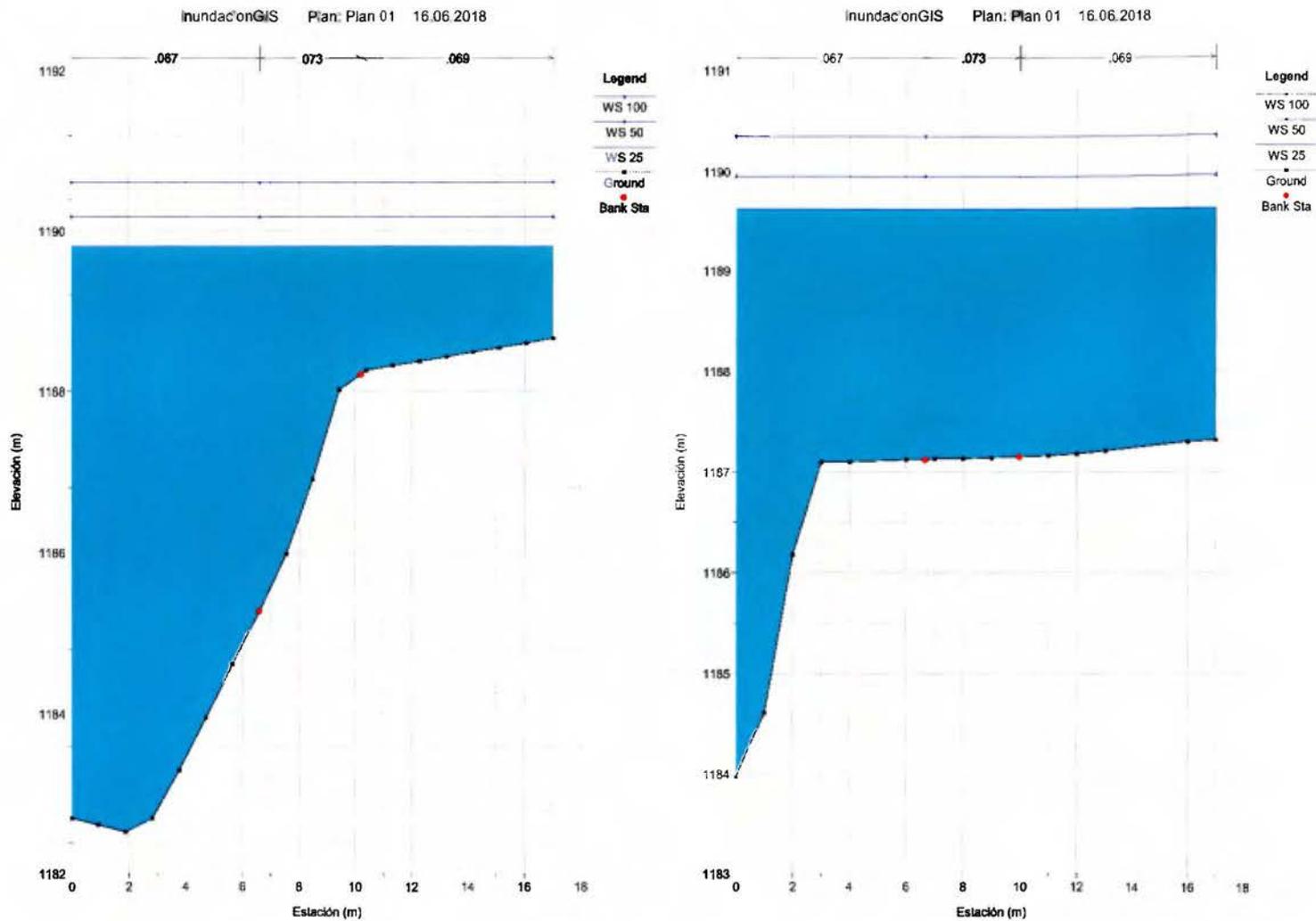


Figura 60: Secciones transversales T=25, 50 y 100 años

Fuente: Elaboración propia, 2018

Cuadro 51: Resultados obtenidos en HEC-RAS para T= 25 años

River Sta	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
1617,697	1215,6	1218,49	1219,59	4,73	16,09	7,63	1,05
1597,485	1214,52	1217,18	1217,86	4,13	21,22	11,44	0,84
1577,462	1214,16	1216,34	1216,89	3,67	22,77	13,01	0,8
1557,402	1213,17	1215,95	1216,23	2,69	32,18	15,8	0,53
1537,402	1212,41	1215,63	1215,88	2,56	34,38	17	0,48
1517,402	1211,73	1215,27	1215,58	2,95	33,28	16,64	0,5
1497,402	1211,25	1214,99	1215,26	2,55	32,98	13,4	0,45
1477,402	1211,8	1214,27	1214,73	3,32	25	16,73	0,75
1457,402	1210,03	1214,2	1214,37	2,12	44,31	17	0,34
1437,195	1210,37	1213,96	1214,19	2,44	35,79	14,84	0,43
1417,542	1209,43	1213,68	1213,94	2,72	34,74	13,28	0,44
1397,402	1209,22	1213,31	1213,62	2,72	30,66	14,37	0,5
1377,402	1210,7	1213,11	1213,28	1,76	41,15	14,81	0,37
1357,402	1210,06	1212,78	1212,98	2,15	37,27	17	0,45
1337,402	1207,96	1212,08	1212,41	2,7	28,77	17	0,5
1333,37							
1317,402	1206,57	1210,63	1210,92	2,78	34,83	17	0,45
1297,402	1206,16	1210,32	1210,61	2,54	31,06	12,75	0,44
1277,402	1205,97	1210,1	1210,3	2,25	37,92	15,46	0,39
1257,402	1205,71	1209,47	1209,96	3,7	25,75	13,06	0,64
1237,139	1205,23	1209,06	1209,41	2,79	28,48	11,22	0,49
1217,271	1205,42	1208,48	1208,86	3,35	27,49	14,42	0,64
1197,402	1204,62	1207,55	1208,15	3,77	22,65	14,28	0,75
1177,452	1203,18	1207,65	1207,78	1,91	48,78	13,95	0,3
1157,798	1202,78	1207,32	1207,61	2,75	33,63	8,27	0,43
1137,347	1203,92	1206,93	1207,27	2,96	28,72	10,86	0,6
1117,377	1201,89	1206,87	1207	1,94	49,03	12,84	0,29
1097,388	1201,19	1206,88	1206,92	1,19	78,14	14,78	0,16
1077,424	1201,7	1206,38	1206,81	3,34	27,22	6,57	0,57
1057,346	1199,45	1206,11	1206,56	3,19	30,05	5,04	0,4
1037,626	1201,11	1205,91	1206,35	3,4	28,01	7,56	0,55
1017,558	1202,03	1205,75	1205,95	2,09	37,76	10,65	0,4
997,3035	1202,74	1205,18	1205,52	2,91	28,65	10,83	0,62
997,3							
977,3354	1199,96	1204,21	1204,39	1,87	40,33	11,51	0,34
957,5568	1197,97	1203,84	1204,15	2,91	34,02	7,81	0,41
937,3122	1197,64	1203,64	1203,92	2,7	34,03	8,68	0,4

River Sta	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
917,3948	1197,58	1202,83	1202,95	1,73	50,07	15,13	0,27
897,3876	1199,33	1202,61	1202,78	2,2	40,93	12,87	0,39
877,4021	1199,44	1202,48	1202,58	1,53	52,3	17	0,3
857,4021	1200,21	1201,54	1202,15	3,62	21,14	17	1,02
837,4021	1196,2	1200,22	1200,56	2,88	31,83	15,22	0,47
824,23							
817,3877	1195,37	1199,71	1200,07	3,16	30,38	13,11	0,5
797,468	1195,03	1199,52	1199,78	2,62	34,9	12,06	0,42
777,402	1194,83	1199,36	1199,54	2,21	40,71	15,74	0,37
757,3766	1194,21	1199,06	1199,33	2,56	34,76	14,15	0,41
737,2263	1193,89	1199	1199,16	2,04	45,69	12,96	0,3
717,2668	1193,54	1198,93	1199,07	1,97	49,13	15,81	0,27
697,262	1194,31	1198,53	1198,88	2,97	29,27	14,09	0,54
697,26							
677,402	1193,42	1196,51	1197,57	5,19	17,65	9,87	1,01
657,402	1191,82	1196,72	1196,92	2,26	40,37	13,84	0,34
637,4022	1191,15	1196,49	1196,75	2,66	34,88	12,3	0,39
617,2933	1191,79	1196,39	1196,56	2,08	42,88	13,79	0,32
597,4021	1191,07	1196,28	1196,44	2,19	46,64	17	0,31
577,402	1190,56	1196,24	1196,34	1,65	56,43	17	0,23
557,402	1188,78	1196,25	1196,29	1,13	88,62	17	0,13
537,4022	1191,47	1196,19	1196,25	1,2	65,4	17	0,19
528,16							
517,402	1192,12	1194,5	1195,26	4,03	19,4	13,27	0,96
497,402	1190,02	1193,25	1193,93	4,41	22,72	15,6	0,82
477,4021	1188,69	1192,96	1193,22	2,46	32,95	12,98	0,43
457,4021	1188,42	1192,89	1193,02	1,86	49,76	15,82	0,29
437,4021	1188,34	1192,79	1192,91	1,81	49,21	17	0,29
417,402	1187,13	1192,72	1192,82	1,62	56,41	17	0,24
397,402	1187,67	1192,7	1192,75	1,23	74,81	17	0,18
377,4021	1187,67	1192,61	1192,7	1,61	59,32	17	0,23
357,402	1187,1	1192,56	1192,64	1,52	63,6	17	0,21
337,402	1188,19	1192,31	1192,52	2,24	37,42	17	0,4
317,402	1186,94	1192,2	1192,32	1,5	49,73	17	0,23
297,402	1187,52	1191,98	1192,17	2,19	40,93	17	0,37
277,4021	1187,31	1191,89	1192	1,76	52,02	17	0,27
257,4021	1186,45	1191,81	1191,92	1,73	56,74	17	0,24
237,4021	1186,34	1191,72	1191,84	1,87	52,44	17	0,26
217,4021	1189,51	1190,94	1191,55	3,72	21,33	17	1
197,4021	1185,73	1190,4	1190,54	1,9	46,58	17	0,3

River Sta	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
195,27							
177,402	1187,58	1190,29	1190,4	1,27	51,24	17	0,28
157,4021	1184,76	1190,24	1190,3	1,22	68,11	17	0,18
137,4021	1185,84	1190,13	1190,23	1,28	54,17	17	0,24
117,4021	1184,37	1190,05	1190,13	1,32	59,78	17	0,21
97,40205	1183,62	1190,03	1190,08	1,16	77,04	17	0,16
77,40202	1186,96	1189,9	1190,01	1,15	51,53	17	0,27
57,40205	1185,27	1189,81	1189,89	1,01	62,32	17	0,19
37,40202	1187,12	1189,63	1189,75	1,81	46,88	17	0,37
17,40205	1187,31	1188,73	1189,23	3,25	23,21	17	0,89

Fuente: Elaboración propia, 2018

Cuadro 52: Resultados obtenidos en HEC-RAS para T= 50 años

River Sta	Min Ch El	W.S. Elev	E.G. Elev	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
	(m)	(m)	(m)	(m/s)	(m2)	(m)	
1617,697	1215,6	1218,9	1220,14	5,31	19,35	8,25	1,08
1597,485	1214,52	1217,49	1218,29	4,52	24,84	11,85	0,86
1577,462	1214,16	1216,67	1217,31	3,99	27,24	13,97	0,81
1557,402	1213,17	1216,32	1216,64	2,91	38,1	16,41	0,54
1537,402	1212,41	1216	1216,29	2,74	40,79	17	0,48
1517,402	1211,73	1215,65	1215,99	3,13	39,62	17	0,51
1497,402	1211,25	1215,32	1215,65	2,88	37,43	13,84	0,49
1477,402	1211,8	1214,75	1215,17	3,2	33,06	17	0,65
1457,402	1210,03	1214,65	1214,84	2,31	51,88	17	0,35
1437,195	1210,37	1214,39	1214,66	2,65	42,14	14,84	0,44
1417,542	1209,43	1214,07	1214,39	3,03	40,17	14,06	0,47
1397,402	1209,22	1213,69	1214,05	2,98	36,34	15,29	0,52
1377,402	1210,7	1213,46	1213,67	2,09	46,53	16,04	0,41
1357,402	1210,06	1213,1	1213,34	2,42	42,64	17	0,47
1337,402	1207,96	1212,34	1212,73	2,91	33,2	17	0,52
1333,37							
1317,402	1206,57	1211,09	1211,39	2,89	42,61	17	0,44
1297,402	1206,16	1210,74	1211,08	2,76	36,48	13,13	0,45
1277,402	1205,97	1210,52	1210,76	2,47	44,62	16,42	0,4
1257,402	1205,71	1209,87	1210,4	3,91	31,26	14,36	0,64
1237,139	1205,23	1209,4	1209,84	3,16	32,31	11,46	0,53
1217,271	1205,42	1208,82	1209,26	3,6	32,35	14,44	0,65
1197,402	1204,62	1208,32	1208,73	3,22	34,88	16,69	0,56
1177,452	1203,18	1208,32	1208,46	2,08	58,02	13,95	0,3
1157,798	1202,78	1207,92	1208,28	3,12	38,55	8,27	0,46
1137,347	1203,92	1207,61	1207,97	3,13	36,12	10,86	0,56
1117,377	1201,89	1207,57	1207,72	2,13	57,92	12,84	0,3
1097,388	1201,19	1207,57	1207,63	1,37	88,38	14,78	0,18
1077,424	1201,7	1206,94	1207,49	3,86	30,87	6,57	0,61
1057,346	1199,45	1206,56	1207,2	3,79	32,31	5,04	0,46
1037,626	1201,11	1206,34	1206,92	3,92	31,26	7,56	0,61
1017,558	1202,03	1206,2	1206,45	2,47	42,55	10,65	0,44
997,3035	1202,74	1205,55	1205,98	3,37	32,67	10,83	0,67
997,3							
977,3354	1199,96	1204,82	1205,02	2,15	47,28	11,51	0,36
957,5568	1197,97	1204,35	1204,76	3,35	37,98	7,81	0,45
937,3122	1197,64	1204,12	1204,48	3,1	38,2	8,68	0,43
917,3948	1197,58	1203,24	1203,39	1,97	56,2	15,13	0,29
897,3876	1199,33	1202,97	1203,19	2,55	45,5	12,87	0,43

River Sta	Min Ch El	W,S, Elev	E,G, Elev	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
	(m)	(m)	(m)	(m/s)	(m ²)	(m)	
877,4021	1199,44	1202,82	1202,95	1,79	58,1	17	0,33
857,4021	1200,21	1201,75	1202,46	3,97	24,7	17	1,04
837,4021	1196,2	1200,63	1201	3,1	38,48	17	0,48
824,23							
817,3877	1195,37	1200,17	1200,56	3,38	36,66	14,31	0,51
797,468	1195,03	1199,94	1200,26	2,95	40,21	13,08	0,45
777,402	1194,83	1199,78	1199,99	2,45	47,58	17	0,39
757,3766	1194,21	1199,44	1199,76	2,82	40,25	14,34	0,43
737,2263	1193,89	1199,36	1199,58	2,36	50,34	12,96	0,34
717,2668	1193,54	1199,27	1199,46	2,27	54,59	15,81	0,31
697,262	1194,31	1198,79	1199,23	3,39	32,86	14,09	0,59
697,26							
677,402	1193,42	1197,07	1198,03	5,11	24,44	13,83	0,91
657,402	1191,82	1197,15	1197,4	2,52	46,66	15	0,36
637,4022	1191,15	1196,88	1197,21	3,02	39,98	14,05	0,42
617,2933	1191,79	1196,77	1196,98	2,38	48,11	14,31	0,35
597,4021	1191,07	1196,63	1196,84	2,46	52,71	17	0,34
577,402	1190,56	1196,59	1196,72	1,9	62,29	17	0,26
557,402	1188,78	1196,6	1196,65	1,36	94,48	17	0,16
537,4022	1191,47	1196,51	1196,6	1,44	70,94	17	0,22
528,16							
517,402	1192,12	1194,8	1195,64	4,35	23,43	14,29	0,96
497,402	1190,02	1193,69	1194,29	4,23	29,82	16,43	0,73
477,4021	1188,69	1193,44	1193,74	2,68	39,45	13,98	0,44
457,4021	1188,42	1193,37	1193,52	2,08	57,65	17	0,3
437,4021	1188,34	1193,27	1193,41	1,98	57,3	17	0,3
417,402	1187,13	1193,19	1193,31	1,81	64,37	17	0,26
397,402	1187,67	1193,16	1193,23	1,43	82,7	17	0,2
377,4021	1187,67	1193,06	1193,17	1,81	66,95	17	0,25
357,402	1187,1	1193	1193,1	1,73	71,08	17	0,23
337,402	1188,19	1192,74	1192,97	2,4	44,7	17	0,4
317,402	1186,94	1192,61	1192,76	1,72	56,68	17	0,26
297,402	1187,52	1192,37	1192,58	2,4	47,48	17	0,38
277,4021	1187,31	1192,26	1192,4	2	58,3	17	0,3
257,4021	1186,45	1192,17	1192,3	1,98	62,74	17	0,27
237,4021	1186,34	1192,05	1192,21	2,15	58,07	17	0,29
217,4021	1189,51	1191,15	1191,87	4,08	24,83	17	1,03
197,4021	1185,73	1190,86	1191,02	2,07	54,39	17	0,31
195,27							
177,402	1187,58	1190,75	1190,88	1,5	59,08	17	0,3

River Sta	Min Ch El	W,S, Elev	E,G, Elev	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
	(m)	(m)	(m)	(m/s)	(m ²)	(m)	
157,4021	1184,76	1190,69	1190,77	1,42	75,78	17	0,2
137,4021	1185,84	1190,56	1190,68	1,5	61,56	17	0,26
117,4021	1184,37	1190,47	1190,58	1,53	66,95	17	0,23
97,40205	1183,62	1190,44	1190,51	1,37	84,08	17	0,18
77,40202	1186,96	1190,29	1190,43	1,41	58,2	17	0,3
57,40205	1185,27	1190,18	1190,28	1,22	68,62	17	0,21
37,40202	1187,12	1189,96	1190,12	2,09	52,49	17	0,4
17,40205	1187,31	1188,95	1189,55	3,6	27,01	17	0,91

Fuente: Elaboración propia, 2018

Cuadro 53: Resultados obtenidos en HEC-RAS para T= 100 años

River Sta	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
1617,697	1215,6	1219,36	1220,79	5,97	23,33	9,18	1,11
1597,485	1214,52	1217,84	1218,81	5	29,08	12,3	0,9
1577,462	1214,16	1217,09	1217,79	4,28	33,59	15,53	0,8
1557,402	1213,17	1216,78	1217,15	3,14	45,81	17	0,54
1537,402	1212,41	1216,48	1216,8	2,95	48,79	17	0,48
1517,402	1211,73	1216,13	1216,5	3,31	47,82	17	0,51
1497,402	1211,25	1215,75	1216,16	3,23	43,48	14,4	0,52
1477,402	1211,8	1215,28	1215,7	3,25	42,09	17	0,6
1457,402	1210,03	1215,16	1215,4	2,55	60,63	17	0,36
1437,195	1210,37	1214,87	1215,2	2,93	49,35	14,84	0,46
1417,542	1209,43	1214,52	1214,91	3,37	46,5	14,06	0,5
1397,402	1209,22	1214,13	1214,55	3,25	43,13	15,29	0,53
1377,402	1210,7	1213,88	1214,14	2,45	53,65	17	0,45
1357,402	1210,06	1213,48	1213,78	2,74	49,12	17	0,5
1337,402	1207,96	1212,66	1213,14	3,14	38,67	17	0,54
1333,37							
1317,402	1206,57	1211,63	1211,95	3,05	51,8	17	0,44
1297,402	1206,16	1211,24	1211,64	3,02	43,18	13,56	0,46
1277,402	1205,97	1211,03	1211,31	2,69	53,25	17	0,41
1257,402	1205,71	1210,43	1210,96	3,99	39,81	16,16	0,61
1237,139	1205,23	1209,94	1210,45	3,44	38,62	11,86	0,54
1217,271	1205,42	1209,49	1209,92	3,56	42,11	14,44	0,59
1197,402	1204,62	1209,22	1209,54	2,88	50,15	17	0,45
1177,452	1203,18	1209,17	1209,33	2,27	69,91	13,95	0,3
1157,798	1202,78	1208,69	1209,15	3,53	44,92	8,27	0,48
1137,347	1203,92	1208,44	1208,84	3,36	45,2	10,86	0,53
1117,377	1201,89	1208,42	1208,6	2,37	68,85	12,84	0,3
1097,388	1201,19	1208,42	1208,5	1,58	101,02	14,78	0,19
1077,424	1201,7	1207,6	1208,34	4,46	35,24	6,57	0,66
1057,346	1199,45	1207,06	1207,98	4,53	34,86	5,04	0,53
1037,626	1201,11	1206,84	1207,62	4,56	35,02	7,56	0,67
1017,558	1202,03	1206,74	1207,07	2,92	48,28	10,65	0,48
997,3035	1202,74	1205,99	1206,54	3,9	37,49	10,83	0,71
997,3							
977,3354	1199,96	1205,54	1205,78	2,47	55,59	11,51	0,38
957,5568	1197,97	1204,94	1205,48	3,9	42,59	7,81	0,5
937,3122	1197,64	1204,68	1205,16	3,58	43,08	8,68	0,47
917,3948	1197,58	1203,73	1203,91	2,26	63,54	15,13	0,32
897,3876	1199,33	1203,39	1203,69	2,98	50,89	12,87	0,48

River Sta	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
877,4021	1199,44	1203,23	1203,4	2,11	65,03	17	0,37
857,4021	1200,21	1202	1202,85	4,38	29,09	17	1,05
837,4021	1196,2	1201,14	1201,53	3,24	47,23	17	0,48
824,23							
817,3877	1195,37	1200,7	1201,13	3,58	44,28	14,31	0,51
797,468	1195,03	1200,44	1200,83	3,26	46,75	13,08	0,47
777,402	1194,83	1200,29	1200,54	2,67	56,27	17	0,4
757,3766	1194,21	1199,9	1200,29	3,12	46,93	14,34	0,45
737,2263	1193,89	1199,8	1200,08	2,74	55,99	12,96	0,37
717,2668	1193,54	1199,7	1199,94	2,61	61,27	15,81	0,34
697,262	1194,31	1199,1	1199,66	3,86	37,3	14,09	0,64
697,26							
677,402	1193,42	1197,61	1198,48	5	33,3	17	0,82
657,402	1191,82	1197,67	1197,97	2,79	54,8	16,29	0,38
637,4022	1191,15	1197,35	1197,75	3,41	47,2	16,62	0,46
617,2933	1191,79	1197,21	1197,49	2,74	54,82	15,46	0,39
597,4021	1191,07	1197,06	1197,32	2,77	60,02	17	0,36
577,402	1190,56	1197	1197,18	2,19	69,35	17	0,29
557,402	1188,78	1197,01	1197,09	1,63	101,53	17	0,18
537,4022	1191,47	1196,9	1197,03	1,72	77,57	17	0,26
528,16							
517,402	1192,12	1195,14	1196,08	4,71	28,55	15,51	0,97
497,402	1190,02	1194,3	1194,82	3,98	39,96	17	0,64
477,4021	1188,69	1194,01	1194,35	2,93	47,76	15,17	0,45
457,4021	1188,42	1193,94	1194,13	2,3	67,37	17	0,32
437,4021	1188,34	1193,83	1194,01	2,2	66,9	17	0,31
417,402	1187,13	1193,74	1193,89	2,04	73,82	17	0,28
397,402	1187,67	1193,71	1193,81	1,68	92,07	17	0,22
377,4021	1187,67	1193,59	1193,73	2,06	76,01	17	0,27
357,402	1187,1	1193,52	1193,65	1,99	79,96	17	0,25
337,402	1188,19	1193,25	1193,51	2,59	53,31	17	0,41
317,402	1186,94	1193,1	1193,29	1,97	64,99	17	0,28
297,402	1187,52	1192,83	1193,09	2,66	55,34	17	0,4
277,4021	1187,31	1192,7	1192,88	2,27	65,84	17	0,32
257,4021	1186,45	1192,59	1192,77	2,29	69,95	17	0,3
237,4021	1186,34	1192,45	1192,65	2,48	64,82	17	0,33
217,4021	1189,51	1191,41	1192,26	4,48	29,2	17	1,05
197,4021	1185,73	1191,41	1191,6	2,28	63,68	17	0,32
195,27							
177,402	1187,58	1191,3	1191,46	1,77	68,39	17	0,32

River Sta	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m²)	Top Width (m)	Froude # Chl
157,4021	1184,76	1191,23	1191,34	1,66	84,89	17	0,23
137,4021	1185,84	1191,08	1191,23	1,76	70,37	17	0,28
117,4021	1184,37	1190,98	1191,11	1,78	75,49	17	0,25
97,40205	1183,62	1190,94	1191,03	1,62	92,47	17	0,2
77,40202	1186,96	1190,76	1190,93	1,71	66,17	17	0,33
57,40205	1185,27	1190,62	1190,75	1,48	76,17	17	0,24
37,40202	1187,12	1190,35	1190,56	2,43	59,2	17	0,43
17,40205	1187,31	1189,22	1189,94	4	31,67	17	0,93

Fuente: Elaboración propia, 2018

Cuadro 54: Resultados de estructuras hidráulicas, obtenidos en HEC-RAS, para todos los periodos de retorno

Estación	Perfil	E.G. US.	Min El Prs	BR Open Area	Min El Weir Flow	Delta EG
		(m)	(m)	(m2)	(m)	(m)
1333,37	25	1212,41	1210,19	4,04	1210,59	1,49
1333,37	50	1212,73	1210,19	4,04	1210,59	1,34
1333,37	100	1213,14	1210,19	4,04	1210,59	1,18
997,3	25	1205,52	1202,66	2,75	1203,07	1,13
997,3	50	1205,98	1202,66	2,75	1203,07	0,95
997,3	100	1206,54	1202,66	2,75	1203,07	0,75
824,23	25	1200,56	1198,74	14,05	1199,04	0,49
824,23	50	1201	1198,74	14,05	1199,04	0,43
824,23	100	1201,53	1198,74	14,05	1199,04	0,4
697,26	25	1198,88	1196,88	10,26	1197,18	1,31
697,26	50	1199,23	1196,88	10,26	1197,18	1,2
697,26	100	1199,66	1196,88	10,26	1197,18	1,18
528,16	25	1196,25	1194,25	14,98	1193,99	0,99
528,16	50	1196,6	1194,25	14,98	1193,99	0,96
528,16	100	1197,03	1194,25	14,98	1193,99	0,94
195,27	25	1190,54	1188,3	14,21	1188,11	0,14
195,27	50	1191,02	1188,3	14,21	1188,11	0,14
195,27	100	1191,6	1188,3	14,21	1188,11	0,14

Fuente: Elaboración propia, 2018