



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**PROPUESTA DE OBRAS DE PROTECCIÓN PARA INUNDACIONES
PROVOCADAS POR EL RÍO GUACALATE EN MASAGUA, ESCUINTLA**

Victoria Yasmina Raquel Carrillo Muñoz

Asesorado por el Ing. Claudio César Castañón Contreras

Guatemala, octubre de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA DE OBRAS DE PROTECCIÓN PARA INUNDACIONES
PROVOCADAS POR EL RÍO GUACALATE EN MASAGUA, ESCUINTLA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

VICTORIA YASMINA RAQUEL CARRILLO MUÑOZ
ASESORADO POR EL ING. CLAUDIO CÉSAR CASTAÑÓN CONTRERAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA CIVIL

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
EXAMINADOR	Ing. Armando Fuentes Roca
EXAMINADOR	Ing. Wuilliam Ricardo Yon Chavarría
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

PROPUESTA DE OBRAS DE PROTECCIÓN PARA INUNDACIONES PROVOCADAS POR EL RÍO GUACALATE EN MASAGUA, ESCUINTLA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 12 de octubre de 2010.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and lines, enclosed within a blue oval border.

Victoria Yasmína Raquel Carrillo Muñoz

Guatemala Enero de 2014

Ingeniero
Pedro Antonio Aguilar Polanco
Jefe del Departamento de Hidráulica
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería, USAC

Estimado Ingeniero Aguilar.

Me permito dar aprobación al trabajo de graduación titulado: **"PROPUESTA DE OBRAS DE PROTECCIÓN PARA INUNDACIONES PROVOCADAS POR EL RIO GUACALATE EN MASAGUA, ESCUINTLA"**, elaborado por la estudiante de ingeniería civil Victoria Yasmina Raquel Carrillo Muñoz, por considerar que cumple con los requisitos establecidos.

Sin otro particular, me es grato saludarle.

Atentamente,



Claudio César Castañón Contreras
Ingeniero Civil
Col. No. 5629

Ing. Claudio César Castañón Contreras
Ingeniero Civil, Colegiado No. 5629
Asesor



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala,
22 de enero de 2014

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

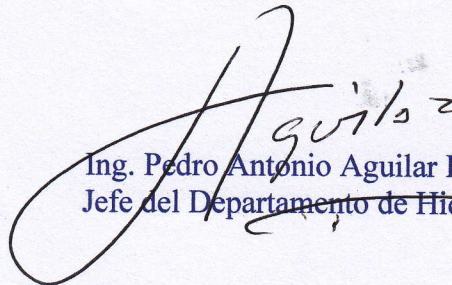
Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **PROPUESTA DE OBRAS DE PROTECCIÓN PARA INUNDACIONES PROVOCADAS POR EL RÍO GUACALATE EN MASAGUA, ESCUINTLA**, desarrollado por la estudiante de Ingeniería Civil Victoria Yasmina Raquel Carrillo Muñoz, quien contó con la asesoría del Ing. Claudio César Castañón Contreras.

Considero que este trabajo está bien desarrollado y representa un aporte para el departamento y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Jefe del Departamento de Hidráulica



FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRAULICA
USAC

Más de **134** años de Trabajo Académico y Mejora Continua





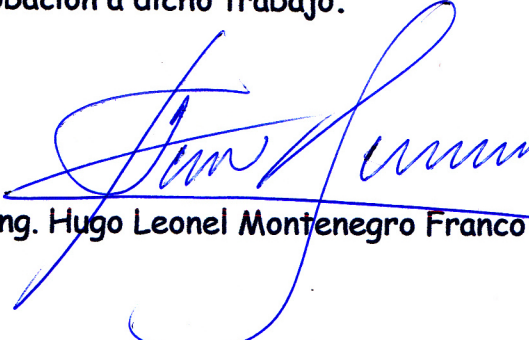
USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Claudio César Castañón Contreras y del Jefe del Departamento de Hidráulica Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco, al trabajo de graduación de la estudiante Victoria Yasmina Raquel Carrillo Muñoz, titulado PROPUESTA DE OBRAS DE PROTECCIÓN PARA INUNDACIONES PROVOCADAS POR EL RÍO GUACALATE EN MASAGUA, ESCUINTLA, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, octubre 2014.

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **PROPUESTA DE OBRAS DE PROTECCIÓN PARA INUNDACIONES PROVOCADAS POR EL RÍO GUACALATE EN MASAGUA, ESCUINTLA**, presentado por la estudiante universitaria: **Victoria Yasmina Raquel Carrillo Muñoz** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, octubre de 2014

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por permitirme la vida.
Mis padres	Salvador Carrillo y Yasmina Muñoz de Carrillo. Por su amor y apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida.
Mis hermanas	Virginia y Vanessa Carrillo Muñoz, por ser mis mejores amigas, compañeras de alegría y llanto.
Mis abuelos	Raquel Gramajo, César Muñoz y Dora Velásquez, por compartir conmigo sus experiencias y amor.
Mis tíos	Zully y Augusto Muñoz Velásquez, Susy y Ricky Samayoa Gramajo y Lorena Sandoval Gramajo, por su cariño.
Mi novio	Héctor Galeros, por todo su amor y apoyo.
Mis amigos	Por todos los momentos compartidos.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser fuente de valiosa enseñanza, consejos
y saberes.

Facultad de Ingeniería

Por formar mi capacidad crítica y guiar mi
camino profesional.

**Ingeniero Claudio
César Castañón**

Por darme generosamente, herramientas para
desempeñarme en el campo laboral

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. CONCEPTOS GENERALES.....	1
1.1. Ciclo hidrológico	1
1.2. Fases del ciclo hidrológico.....	2
1.2.1. Precipitación	2
1.2.1.1. Formas de precipitación	2
1.2.1.2. Tipos de precipitación	3
1.2.2. Evaporación y transpiración.....	4
1.2.2.1. Evaporación.....	5
1.2.2.2. Superficies de evaporación.....	5
1.2.2.3. Transpiración	6
1.2.2.4. Evapotranspiración	6
1.2.3. Escorrentía superficial	6
1.2.4. Infiltración	7
1.3. Hidrografía de Guatemala	7
1.4. Componentes básicos del riesgo.....	8
1.4.1. Riesgo	8
1.4.2. Amenaza.....	8
1.4.3. Vulnerabilidad	9

1.4.4.	Desastre	9
1.4.5.	Inundación.....	9
1.4.5.1.	Desbordamiento de un cauce.....	10
1.4.5.2.	Elevación del nivel del mar en las costas.....	10
1.4.5.3.	Insuficiencia o imposibilidad de drenaje del agua precipitada	10
1.4.5.4.	Elevación del nivel freático.....	10
1.4.5.5.	Inundación en el área de confluencia de dos sistemas fluviales.....	11
1.4.5.6.	Consecuencias de las inundaciones	11
1.5.	Potenciales amenazas hidrometeorológicas que afectan a Guatemala.....	12
2.	CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO GUACALATE	15
2.1.	Ubicación geográfica.....	15
2.2.	Ubicación político territorial	15
2.3.	Determinación de los parámetros morfométricos de la cuenca.....	19
2.3.1.	Área y perímetro de la cuenca de estudio	19
2.3.2.	Forma de la cuenca.....	20
2.3.2.1.	Índice de Gravelius o coeficiente de compacidad.....	20
2.3.2.2.	Factor de forma	21
2.3.3.	Características de relieve	23
2.3.3.1.	Pendiente media de la cuenca	23
2.3.3.2.	Histograma de frecuencias altimétricas	24
2.3.3.3.	Curva hipsométrica	25

	2.3.3.4.	Pendiente del cauce principal	25
	2.3.4.	Características de la red de drenaje	26
	2.3.4.1.	Orden de la cuenca	26
	2.3.4.2.	Densidad de drenaje.....	28
	2.3.4.3.	Frecuencia de cauces.....	28
3.	APLICACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN HEC-RAS EN EL TRAMO DEL RÍO GUACALATE UBICADO AL COSTADO DEL MUNICIPIO DE MASAGUA, ESCUINTLA.....		31
3.1.	Conceptos básicos de hidráulica de canales abiertos		31
	3.1.1.	Caudal	32
	3.1.2.	Caudal en una crecida	32
	3.1.3.	Régimen de flujo de una corriente	33
	3.1.4.	Coeficiente de rugosidad	34
	3.1.5.	Energía específica	35
3.2.	Introducción al programa HEC-RAS.....		35
	3.2.1.	Creación de un proyecto.....	36
	3.2.2.	Geometría del cauce	37
	3.2.3.	Introducción de datos de secciones transversales	37
	3.2.4.	Datos del flujo o datos hidráulicos	38
	3.2.5.	Presentación de resultados del programa HEC-RAS.....	38
	3.2.6.	Características técnicas y sus aplicaciones.....	40
3.3.	Procesamiento y análisis de la información.....		41
	3.3.1.	Geometría del cauce del río Guacalate	41
	3.3.2.	Caudales del río Guacalate	41
	3.3.3.	Tipo de flujo del río Guacalate	44
	3.3.4.	Régimen del flujo del río Guacalate.....	44

3.4.	Realización de simulaciones, aplicado al tramo del río Guacalate ubicado al costado del municipio de Masagua.....	47
3.4.1.	Resultado de la simulación en las secciones transversales del río Guacalate para caudales con períodos de retorno de 2, 10, 25, 50, 100 y 500 años.....	47
3.4.2.	Resultado de las características hidráulicas del cauce, simulación para caudales con períodos de retorno de 2, 10, 25, 50, 100 y 500 años.....	54
4.	PROPUESTA DE LA OBRA DE PROTECCIÓN.....	61
4.1.	Descripción de las obras de protección.....	61
4.1.1.	Bordas.....	61
4.1.2.	Bordas revestidas de roca.....	62
4.1.3.	Espigones.....	62
4.1.4.	Análisis del caso.....	63
4.2.	Propuesta.....	63
4.3.	Diseño de las obras hidráulicas	64
4.3.1.	Período de duración de la obra	64
4.3.2.	Tipos de flujo	64
4.3.3.	Geometría de la sección transversal original.....	65
4.3.4.	Extensión de la protección	65
4.3.5.	Altura de la borda	68
4.3.6.	Tamaño de la roca	69
4.3.7.	Ecuación de diseño	69
4.3.8.	Diseño de filtro	71
4.3.9.	Profundidad del pie	72
4.3.10.	Sección típica.....	73

4.3.11.	Especificaciones técnicas de la roca	74
4.4.	Conservación de la obra	75
5.	RECTIFICACIÓN HIDRÁULICA DE LAS OBRAS DE PROTECCIÓN PROPUESTAS.....	77
5.1.	Realización de simulaciones del modelo HEC-RAS con las estructuras propuestas	77
5.1.1.	Resultado gráfico de las secciones transversales del río Guacalate, en los estacionamientos 0+100 al 2+200.....	77
5.2.	Conclusiones de la modelación hidráulica con el software HEC-RAS.	84
	CONCLUSIONES	85
	RECOMENDACIONES.....	87
	BIBLIOGRAFÍA.....	89
	ANEXOS.....	91

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Vertientes de Guatemala.....	7
2.	Mapa de riesgo a inundaciones.	12
3.	División político territorial de la cuenca del río Guacalate	17
4.	Hidrografía de la cuenca del río Guacalate	18
5.	Histograma de frecuencias altimétricas, cuenca del río Guacalate....	24
6.	Curva hipsométrica, cuenca del río Guacalate.....	25
7.	Orden de los cauces de la cuenca del río Guacalate desde el punto de estudio.....	27
8.	Ventana de inicio HEC-RAS.....	36
9.	Ventana <i>geometric data</i> del programa HEC-RAS	37
10.	Ventana <i>cross section</i> data del programa HEC-RAS	38
11.	Ventana tabla de resultados.....	39
12.	Resultado gráfico de secciones transversales	39
13.	Resultado gráfico del perfil del cauce.....	40
14.	Simulación hidráulica en la sección 0+100	48
15.	Simulación hidráulica en la sección 0+200	48
16.	Simulación hidráulica en la sección 0+300	48
17.	Simulación hidráulica en la sección 0+400	48
18.	Simulación hidráulica en la sección 0+500	49
19.	Simulación hidráulica en la sección 0+600	49
20.	Simulación hidráulica en la sección 0+700	49
21.	Simulación hidráulica en la sección 0+800	49
22.	Simulación hidráulica en la sección 0+900	50

23.	Simulación hidráulica en la sección 0+1000	50
24.	Simulación hidráulica en la sección 0+1100	50
25.	Simulación hidráulica en la sección 0+1200	50
26.	Simulación hidráulica en la sección 0+1300	51
27.	Simulación hidráulica en la sección 0+1400	51
28.	Simulación hidráulica en la sección 0+1500	51
29.	Simulación hidráulica en la sección 0+1600	51
30.	Simulación hidráulica en la sección 0+1700	52
31.	Simulación hidráulica en la sección 0+1800	52
32.	Simulación hidráulica en la sección 0+1900	52
33.	Simulación hidráulica en la sección 0+2000	52
34.	Simulación hidráulica en la sección 0+2100	53
35.	Simulación hidráulica en la sección 0+2200	53
36.	Simulación hidráulica del perfil del cauce del río Guacalate para caudales con períodos de retorno de 2, 10, 25, 50, 100 y 500 años.....	53
37.	Extensión longitudinal de la protección en un cauce.	66
38.	Base o pie de características típicas.....	72
39.	Sección típica del tramo TR1	73
40.	Sección típica del tramo TR2.....	73
41.	Sección típica del tramo TR3.....	74
42.	Simulación con las obras propuestas en la sección 0+100.....	78
43.	Simulación con las obras propuestas en la sección 0+200.....	78
44.	Simulación con las obras propuestas en la sección 0+300.....	78
45.	Simulación con las obras propuestas en la sección 0+400.....	78
46.	Simulación con las obras propuestas en la sección 0+500.....	79
47.	Simulación con las obras propuestas en la sección 0+600.....	79
48.	Simulación con las obras propuestas en la sección 0+700.....	79
49.	Simulación con las obras propuestas en la sección 0+800.....	79

50.	Simulación con las obras propuestas en la sección 0+900	80
51.	Simulación con las obras propuestas en la sección 1+000	80
52.	Simulación con las obras propuestas en la sección 1+100	80
53.	Simulación con las obras propuestas en la sección 1+200	80
54.	Simulación con las obras propuestas en la sección 1+300	81
55.	Simulación con las obras propuestas en la sección 1+400	81
56.	Simulación con las obras propuestas en la sección 1+500	81
57.	Simulación con las obras propuestas en la sección 1+600	81
58.	Simulación con las obras propuestas en la sección 1+700	82
59.	Simulación con las obras propuestas en la sección 1+800	82
60.	Simulación con las obras propuestas en la sección 1+900	82
61.	Simulación con las obras propuestas en la sección 2+000	82
62.	Simulación con las obras propuestas en la sección 2+100	83
63.	Simulación con las obras propuestas en la sección 2+200	83
64.	Resultado gráfico del perfil del cauce del río Guacalate, de la simulación con las obras propuestas en las secciones transversales 0+100 a 2+200.....	83

TABLAS

I.	Departamentos y municipios que abarca la cuenca del río Guacalate	16
II.	Regiones hidrológicas para el análisis regional de crecidas	43
III.	Cuantiles de caudales modulares regionales, de acuerdo con las distribuciones de Gumbel y log-normal.	43
IV.	Caudales resultantes de utilizar la distribución de Gumbel para diferentes períodos de retorno	44
V.	Régimen del flujo para cada estacionamiento del tramo de estudio del río Guacalate, para períodos de retorno de 2, 10 y 25 años.	45

VI.	Régimen del flujo para cada estacionamiento del tramo de estudio del río Guacalate para períodos de retorno de 50 y 100 años.....	46
VII.	Características hidráulicas del cauce del estacionamiento 0+100 a 0+200	54
VIII.	Características hidráulicas del cauce del estacionamiento 0+300 a 0+600	55
IX.	Características hidráulicas del cauce del estacionamiento 0+700 a 1+000	56
X.	Características hidráulicas del cauce del estacionamiento 1+100 a 1+400	57
XI.	Características hidráulicas del cauce del estacionamiento 1+500 a 1+800	58
XII.	Características hidráulicas del cauce del estacionamiento 1+900 a 2+200	59

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
g	Aceleración de la gravedad
B	Ancho medio de una cuenca
Φ	Ángulo de reposo de un material
A	Área
Q	Caudal
Kc	Coefficiente de compacidad
n	Coefficiente de rugosidad de Manning
Y	Energía cinética
H	Energía específica
Z	Energía potencial
D	Equidistancia entre curvas de nivel de un mapa topográfico
E	Este
Kf	Factor de forma
F	Frecuencia de los cauces de una cuenca
°	Grados
°C	Grados Celsius
Ha	Hectárea
Km	Kilómetro
Km²	Kilómetro cuadrado
Km³	Kilómetro cúbico
L	Longitud del cauce principal de una cuenca

Li	Longitud total de las curvas de nivel comprendidas en una cuenca
m³/s	Metros cúbicos por segundo
msnm	Metros sobre el nivel del mar
mm	Milímetro
mm/año	Milímetro por año
mm/h	Milímetro por hora
'	Minutos
WS	Nivel de superficie del agua
N	Norte
F	Número de Froude
W	Oeste
S	Pendiente media de una cuenca
P	Perímetro
davg	Profundidad promedio de flujo en un canal principal
"	Segundos
S	Sur
D50	Tamaño promedio de roca
y	Tirante de agua
V	Velocidad

GLOSARIO

AASHTO	Asociación Americana de Autoridades Estatales de Carreteras y Transporte (American Association of State Highway and Transportation).
Afluente	Es un curso de agua, también llamado tributario, que no desemboca en el mar sino en otro río más importante con el cual se une en un lugar llamado confluencia.
Atmósfera	Es la capa de gas que rodea a un cuerpo celeste.
Área	Es una medida de la extensión de una superficie, expresada en unidades de medida denominadas unidades de superficie.
Borda	Son estructuras de tierra que se construyen a lo largo de ríos con objeto de confinar el escurrimiento que sobresale de las márgenes durante crecidas, protegiendo la llanura de inundación contra el desbordamiento del río.
Caudal	Es la cantidad de fluido que avanza en una unidad de tiempo.

Cuenca	Es un territorio drenado por un sistema de drenaje natural.
HEC-RAS	Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center).
Hidrografía	Es una rama de las ciencias de la Tierra que consiste en la descripción y estudio sistemático de los cuerpos de agua planetarios, especialmente de los recursos hídricos continentales.
Inundación	Es la ocupación por parte del agua de zonas que habitualmente están libres de esta, bien por desbordamiento de ríos o mares.
Meridiano	Son los semicírculos máximos del geoide terrestre que pasan por los polos, líneas imaginarias que sirven para determinar la hora, el año y otros datos.
Nivel freático	Corresponde al lugar en el que se encuentra el agua subterránea. En este nivel la presión de agua del acuífero es igual a la presión atmosférica.
Paralelo	Círculo formado por la intersección de la esfera terrestre con un plano imaginario perpendicular al eje de rotación de la Tierra.
Precipitación	Es la caída de agua sólida o líquida, por la condensación del vapor, sobre la superficie terrestre.

Radiación solar

Es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el sol. No toda la radiación alcanza la superficie de la Tierra, porque las ondas ultravioletas más cortas son absorbidas por los gases de la atmósfera, fundamentalmente por el ozono.

Vertiente

Es una superficie topográfica inclinada, situada entre los puntos altos y los bajos.

RESUMEN

El crecimiento poblacional en Guatemala ha creado situaciones de vulnerabilidad ante eventos de la naturaleza; la ciudad de Masagua en Escuintla no ha sido la excepción, los pobladores de la ciudad se han ubicado en las riberas del río Guacalate, poniendo en riesgo sus vidas y la infraestructura de sus viviendas, que son amenazadas por las crecientes del río.

Masagua, Escuintla se encuentra a un costado del río Guacalate, en la parte baja de la cuenca. La cuenca del río Guacalate presenta pendientes fuertes en la parte alta y cambia bruscamente a una pendiente mínima en la parte media y baja, lo que hace de Masagua susceptible a inundaciones.

Para proponer y diseñar una adecuada obra de protección deben considerarse parámetros hidrológicos de la cuenca del río Guacalate y una simulación hidráulica del área de estudio. La simulación hidráulica se realizó utilizando datos topográficos y características del caudal para determinar las velocidades alcanzadas por el río, la llanura de inundación y el nivel máximo de crecida para caudales calculados con varios períodos de retorno.

Por las altas velocidades alcanzadas en el río, se descartaron las bordas como obras de protección; sin embargo, la solución a este problema son las bordas revestidas de roca que pueden soportar grandes velocidades sin que los taludes se erosionen.

Determinando la llanura de inundación y el área de población amenazada, se propuso la ubicación de tres tramos de borda revestida.

Con los resultados hidráulicos y los niveles de las crecidas se diseñó la geometría de las bordas, se calcularon los diámetros de la roca y filtro de la estructura de cada tramo.

Finalmente, se realizó una simulación hidráulica ubicando las bordas propuestas con los mismos caudales utilizados en la simulación inicial, teniendo resultados positivos, evitando la inundación de las áreas que se eligieron para proteger.

OBJETIVOS

General

Analizar la situación de vulnerabilidad ante inundaciones del municipio de Masagua, Escuintla, causada por el río Guacalate y proponer obras de protección contra inundaciones en el área.

Específicos

1. Determinar las bases teóricas del ciclo hidrológico y las amenazas hidrometeorológicas que afectan a Guatemala.
2. Realizar el estudio hidrológico de la cuenca del río Guacalate y relacionar los resultados con posibles amenazas en el área de Masagua.
3. Determinar a través de un estudio, las crecidas del río Guacalate en el área de Masagua, y realizar una simulación hidráulica utilizando las secciones representativas del cauce.
4. Proponer una solución eficiente para minimizar o eliminar los daños provocados por las inundaciones, analizando las posibles obras de protección para inundaciones.
5. Realizar una simulación hidráulica del área para corroborar la efectividad de la obra propuesta.

INTRODUCCIÓN

La necesidad de contar con el recurso vital del agua, tanto para usos domésticos como para la agricultura, dio lugar a que el municipio de Masagua, Escuintla se estableciera al margen del río Guacalate. Con el paso del tiempo y debido al aumento de la población y al desarrollo industrial y agropecuario, Masagua ha crecido hasta el punto en que la estructura habitacional, industrial y agropecuaria es tal, que en el caso de un evento de origen fluvial (tormentas o inundaciones) sufre daños significativos.

Para prevenir estos daños se deben realizar obras de protección de inundaciones y control de cauces fluviales que los encaucen o deriven los escurrimientos de manera controlada; también se requiere de acciones como el pronóstico, la planeación de estrategias y el diseño de sistemas que prevengan y reduzcan los efectos productivos de los fenómenos fluviales en regiones donde coinciden los cauces con la población de Masagua.

Previo a determinar las obras de protección, deberán evaluarse diferentes factores técnicos; dentro de estos se debe realizar un análisis hidrológico e hidráulico del río para determinar el nivel de inundación a esperarse en determinado período de retorno.

1. CONCEPTOS GENERALES

1.1. Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico, también conocido como ciclo del agua, describe el movimiento continuo y cíclico del agua en el planeta Tierra. El agua puede cambiar su estado entre líquido, vapor y hielo en varias etapas del ciclo, y los procesos pueden ocurrir en cuestión de segundos o en millones de años. Aunque el equilibrio del agua en la Tierra permanece relativamente constante con el tiempo, las moléculas de agua individuales pueden circular muy rápido.

Como todo ciclo, el ciclo hidrológico no tiene ni principio ni fin; su descripción puede comenzar en cualquier punto. El agua que se encuentra sobre la superficie terrestre, ríos, lagos y mares, se evapora bajo el efecto de la radiación solar y el viento; el vapor resultante es transportado por las masas de aire en movimiento.

En determinadas condiciones, el vapor se condensa y forma las nubes que, a su vez, pueden ocasionar precipitaciones que caen a la tierra; la precipitación que cae sobre la tierra se dispersa de diversas maneras. La mayor parte de esta es retenida temporalmente por el suelo, en las cercanías del lugar donde cae, y regresa eventualmente a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas.

Otra opción de agua que se precipita viaja sobre la superficie del suelo o a través de este hasta alcanzar los canales de las corrientes.

La porción restante penetra más profundamente en el suelo para hacer parte del suministro de agua subterránea.

1.2. Fases del ciclo hidrológico

Se deben destacar del ciclo hidrológico, cuatro fases básicas: precipitación, evaporación y transpiración, escorrentía superficial y agua subterránea.

1.2.1. Precipitación

Es el vapor de agua condensado que cae a la superficie de la Tierra. La mayor parte de la precipitación se produce como lluvia, aunque también incluye la nieve, el granizo, el goteo de la niebla, los copos de nieve y el aguanieve.

1.2.1.1. Formas de precipitación

- Llovizna: consiste de pequeñas gotas de agua, cuyo diámetro varía entre 0.1 y 0.5 mm. Por lo general, la llovizna cae de estratos bajos y muy rara vez sobrepasa un valor de intensidad de 1 mm/hr.
- Lluvia: consiste de gotas de agua líquida, en su mayoría, con un diámetro mayor de 0.5 mm.

Escarcha: es una capa de hielo, por lo general transparente y suave, pero que usualmente contiene bolsas de aire, que se forma en superficies expuestas por el congelamiento de agua superenfriada que se ha depositado en forma de lluvia o llovizna. Existe otro tipo de escarcha que es opaca, y que consiste en depósitos granulares de hielo

separados por aire atrapado y formado por el rápido congelamiento de las gotas de agua que, superenfriadas, caen en los objetos expuestos.

- Nieve: está compuesta de cristales de hielo blancos o traslúcidos, principalmente de forma compleja, combinados hexagonalmente y a menudo mezclados con cristales simples; algunas veces los conglomerados forman los copos de nieve, que pueden llegar a tener varios centímetros de diámetro.
- Granizo: es precipitación en forma de bolas o formas irregulares de hielo, que se produce por nubes convectivas, la mayoría de ellas del tipo cumulonimbos. Los granizos pueden ser esféricos, cónicos o de forma irregular y su diámetro varía entre 5 mm a más de 125 mm. Por lo general están compuestos de capas alternadas de escarcha.

1.2.1.2. Tipos de precipitación

La precipitación lleva a menudo el nombre del factor responsable del levantamiento del aire que produce el enfriamiento en gran escala y necesario para que se produzcan cantidades significativas de precipitación.

La precipitación ciclónica resulta del levantamiento del aire, que converge en un área de baja presión o ciclón. La precipitación ciclónica puede subdividirse como frontal o no frontal. La precipitación frontal resulta del levantamiento de aire cálido a un lado de una superficie frontal sobre aire más denso y frío.

La precipitación de frentes cálidos se forma cuando el aire avanza hacia arriba sobre una masa de aire más frío.

La precipitación de frentes fríos es de naturaleza corta y se forma cuando el aire cálido es obligado a subir por una masa de aire frío que está avanzando, y cuya cara delantera es un frente frío. Los frentes fríos se mueven más rápidamente que los frentes cálidos.

La precipitación convectiva es causada por el ascenso de aire cálido más liviano que el aire frío de los alrededores. Las diferencias en temperatura pueden ser el resultado de calentamientos diferenciales en la superficie, de enfriamientos diferenciales en la parte superior de la capa de aire o de ascensos mecánicos, cuando el aire es forzado a pasar sobre una masa de aire frío y más denso, o sobre una barrera montañosa.

La precipitación convectiva es puntual, y su intensidad puede variar entre aquella correspondiente a lloviznas ligeras y aguaceros. La precipitación orográfica resulta del ascenso mecánico sobre una cadena de montañas. La influencia orográfica es tan marcada en terreno quebrado, que los patrones de las tormentas tienden a parecerse a aquellos de la precipitación media anual.

En la naturaleza, los efectos de estos varios tipos de enfriamiento a menudo están interrelacionados, y la precipitación resultante no puede identificarse como de un solo tipo.

1.2.2. Evaporación y transpiración

Esta fase del ciclo hidrológico es en la cual la precipitación que llega a la superficie de la tierra retorna a la atmósfera en forma de vapor.

De la precipitación que cae en dirección a la superficie de la Tierra, una parte se evapora antes de llegar al suelo.

1.2.2.1. Evaporación

Es la transformación del agua líquida en gas cuando se mueve desde la tierra o las fuentes de agua hacia la atmósfera. La fuente de energía para la evaporación es principalmente la radiación solar. La evaporación a menudo incluye la transpiración de las plantas, y en conjunto se le llama evapotranspiración.

1.2.2.2. Superficies de evaporación

Todas las superficies expuestas a la precipitación, tales como vegetales, edificios, calles pavimentadas, son superficies potenciales de evaporación.

Como la tasa de evaporación durante los períodos de lluvia es pequeña, la cantidad de agua precipitada que se evapora está limitada esencialmente a la cantidad necesaria para saturar la superficie.

La tasa de evaporación desde una superficie de suelo saturado es aproximadamente igual a la evaporación desde una superficie de agua cercana, a la misma temperatura.

Al comenzar a secarse el suelo, la evaporación disminuye y su temperatura aumenta para mantener el balance de energía.

Eventualmente, la evaporación cesará pues no existe un mecanismo efectivo para transportar el agua desde una profundidad apreciable. Por lo tanto, la tasa de evaporación desde la superficie del suelo, está limitada por la disponibilidad de agua, o por la oportunidad de evaporación.

1.2.2.3. Transpiración

El proceso de transpiración constituye una fase importante del ciclo hidrológico, debido a que es el mecanismo principal por medio del cual el agua precipitada sobre la superficie del suelo regresa a la atmósfera. Del agua absorbida por el sistema de raíces de una planta, solo una porción minúscula permanece en los tejidos de la misma; virtualmente, toda el agua retorna a la atmósfera en forma de vapor, debido a la transpiración.

Es difícil, generalmente, separar la evaporación y la transpiración en el balance hídrico de una cuenca hidrográfica. Por esta razón, ambos factores se tratan usualmente como uno solo; sin embargo, es necesario tener un conocimiento de cada proceso, para asegurar que las técnicas empleadas concuerdan con la realidad física.

1.2.2.4. Evapotranspiración

Es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración vegetal. La evapotranspiración se aproxima a la evaporación de agua libre, siempre y cuando haya una cobertura vegetal completa y que los efectos de los factores meteorológicos en las dos superficies sean lo suficientemente parecidos.

1.2.3. Escorrentía superficial

Es la variedad de rutas por las cuales se mueve el agua a través del suelo. Incluye tanto la escorrentía superficial como la escorrentía a través de canales.

Cuando fluye, el agua puede infiltrarse en la tierra, evaporarse en el aire, almacenarse en lagos o embalses, o ser extraída para usos humanos, agrícolas u otros.

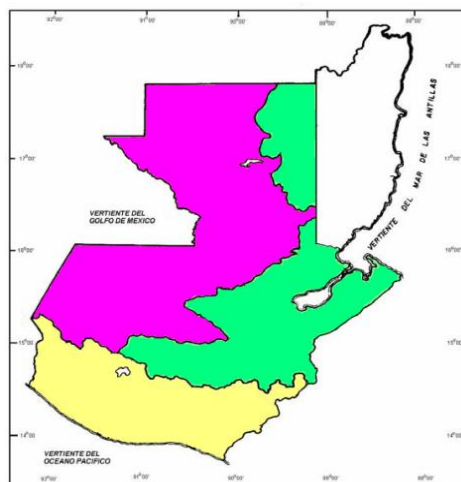
1.2.4. Infiltración

Es el agua de la superficie que penetra en el suelo. Una vez infiltrada, el agua pasa a formar parte de la humedad del suelo o del agua subterránea.

1.3. Hidrografía de Guatemala

Desde el punto de vista hidrográfico, Guatemala está dividida en tres vertientes: la que drena hacia el Océano Pacífico, hacia el mar Caribe y hacia el golfo de México. El área que drena hacia el Océano Pacífico es el 22 % de área total del país, mientras que el área que drena hacia el mar Caribe es el 31 % y hacia el golfo de México es el 47 %.

Figura 1. Vertientes de Guatemala



Fuente: elaboración propia.

Las cuencas que drenan hacia el Océano Pacífico son pequeñas y los ríos recorren un tramo corto (aproximadamente 100 km) desde su nacimiento hasta su desembocadura, con fuerte pendiente en su cabecera y perfil suave en la planicie costera. Las cuencas que drenan en dirección al mar Caribe son más extensas e incluyen la cuenca más larga del país que es la del río Motagua. Las cuencas que drenan en dirección al golfo de México forman la parte alta de la cuenca del río Usumacinta, que drena en dirección de la República de México.

1.4. Componentes básicos del riesgo

El riesgo es la probabilidad de que una amenaza se convierta en un desastre. La vulnerabilidad o las amenazas, por separado, no representan un peligro. Pero si se juntan, se convierten en un riesgo, o sea, en la probabilidad de que ocurra un desastre.

1.4.1. Riesgo

Una situación de riesgo es la acción de poner en situación de peligro a bienes o personas que son vulnerables al mismo. Puede cuantificarse como las pérdidas esperadas debido a un tipo de riesgo potencial en una situación dada y en un período de referencia.

1.4.2. Amenaza

Las amenazas son un peligro que afronta una comunidad que resulta de la ocurrencia de un fenómeno natural (inundación, terremoto, etc.). Se determina mediante su probabilidad de ocurrencia y la severidad con la cual se manifiesta en ciertos lugares.

La ocurrencia refleja la historia de un evento y la probabilidad de un evento amenazante sobre el cual una comunidad o población no tenga conocimiento, porque no se tiene un antecedente histórico o porque ha ocurrido hace más de una generación y por lo tanto no es recordado.

La severidad de las amenazas naturales se mide usualmente para un lugar específico, aplicando escalas específicas, por ejemplo nivel de inundación para un período de retorno de 100 años.

1.4.3. Vulnerabilidad

La vulnerabilidad es el riesgo de sufrir pérdidas como resultado de un fenómeno potencialmente perjudicial. Es una medida agregada del bienestar humano que integra la exposición medioambiental, social, económica y política a un abanico de perturbaciones dañinas.

1.4.4. Desastre

Un desastre es una situación de daño grave que altera la estabilidad y condiciones de vida en una comunidad o población dada, ante la presencia de una energía o fuerza potencialmente peligrosa.

1.4.5. Inundación

Es la sumersión bajo el agua de una zona terrestre que normalmente no está cubierta por la misma, debido a un cambio relativamente rápido del nivel de una masa de agua.

A continuación se describen las causas más frecuentes de inundación:

1.4.5.1. Desbordamiento de un cauce

Se da como consecuencia de una crecida. Consiste en la ampliación temporal del lecho fluvial, el río ocupa su llanura de inundación o cauce mayor.

1.4.5.2. Elevación del nivel del mar en las costas

Se eleva el nivel del mar por situaciones de temporal, huracanes, olas de tsunami, etc. Estas elevaciones reducen la capacidad de desagüe de los ríos en crecida, agravándose el proceso.

1.4.5.3. Insuficiencia o imposibilidad de drenaje del agua precipitada

El agua permanece varios días hasta que se evapora o se infiltra. Se da sobre todo en determinadas superficies como terrenos impermeables, zonas urbanas, áreas endorreicas, etc.

1.4.5.4. Elevación del nivel freático

Al elevarse el nivel freático se produce encharcamiento superficial.

1.4.5.5. Inundación en el área de confluencia de dos sistemas fluviales

Un río crecido no puede recibir los caudales de sus afluentes, de manera que su propia crecida penetra en sus afluentes y provoca inundaciones al remansar sus descargas.

También pueden coincidir las crecidas de los afluentes, produciendo efectos graves y complejos.

1.4.5.6. Consecuencias de las inundaciones

Las inundaciones constituyen fenómenos físicos y socioeconómicos que afectan las actividades humanas.

Hay que destacar que la existencia de inundaciones puede ser beneficiosa para el hombre, incrementa la fertilidad del suelo, limpia cauces, renueva aguas estancadas y acuíferos aprovechables o riego con aguas de avenida en zonas deficitarias.

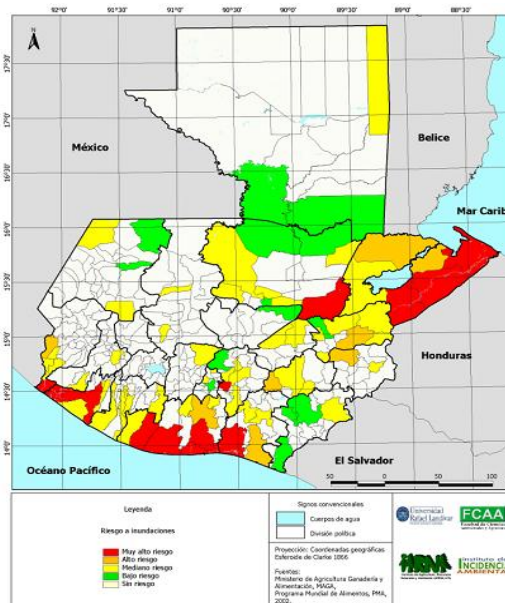
Sin embargo, las consecuencias son, en su mayor parte negativas, y puede ocasionar daños en infraestructuras como vías de comunicación, viviendas, edificaciones agrícolas, puentes, etc., repercusiones en actividades humanas como la paralización de actividades, pérdidas económicas, gastos económicos en reparaciones, limpieza general, epidemias y problemas de salud pública por expansión de contaminantes, corte del agua potable, falta de abastecimiento y la pérdida de vidas humanas, tanto directa como indirectamente.

1.5. Potenciales amenazas hidrometeorológicas que afectan a Guatemala

Guatemala es afectada de manera recurrente por eventos de tipo hidrometeorológico, como huracanes, lluvias intensas, temporales y su influencia en las inundaciones y deslizamientos. Según el Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente, IARNA (2004), existen en Guatemala zonas de “extremadamente alta” y “muy alta” amenaza, debido al rango anual de precipitaciones que reciben.

Se estima que en el país existen 3,055 poblados en riesgo de inundación, donde habitan más de dos millones de personas, según el documento citado en el párrafo anterior. En la figura 2 se muestra el mapa de riesgo a inundaciones.

Figura 2. Mapa de riesgo a inundaciones



Fuente: Perfil Ambiental de Guatemala (IARNA 2004), p.125.

En un análisis realizado sobre los puntos de inundación registrados por la Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres (CONRED) durante los años 1996 al 2000 se obtuvieron los siguientes resultados:

- Existe una consistencia en la ocurrencia de eventos basados en la pendiente del área; un 82.4 % de los eventos ocurrieron en áreas con pendientes menores al 8 %.
- La vertiente del Pacífico presenta la mayor ocurrencia de eventos con un 60 %, seguida por la vertiente del mar Caribe con un 36 % y el 4 % restante ocurrió en la vertiente del golfo de México.
- La mayor cantidad de eventos ocurrieron en la segunda mitad del invierno; el 65.6 % entre los meses de agosto y septiembre.
- Las cuencas más afectadas fueron las de los ríos María Linda, Motagua, Achiguate y Coyolate.

2. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO GUACALATE

Se denomina cuenca a la superficie de terreno limitada por la divisoria de aguas, una línea imaginaria que pasa por los puntos de mayor nivel topográfico y que separa la cuenca de estudio de otras cuencas; a partir de esta la precipitación caída drena por un mismo punto de salida.

2.1. Ubicación geográfica

La cuenca del río Guacalate es parte de la cuenca del río Achiguate, en la vertiente del Océano Pacífico. El cauce principal corre con dirección norte a sur, recibiendo los aportes de 15 afluentes, caracterizados por tener drenaje con pendientes pronunciadas, que van disminuyendo inmediatamente al caer a la zona costera.

La cuenca se encuentra comprendida entre los meridianos 90°39' y 90°53' longitud oeste y los paralelos 14°11' y 14°39' latitud norte. Tiene como límites geográficos: al norte la cuenca del río Motagua, al este la cuenca del río María Linda, al sur la parte media y baja del río Achiguate y al oeste la cuenca del río Coyolate.

2.2. Ubicación político territorial

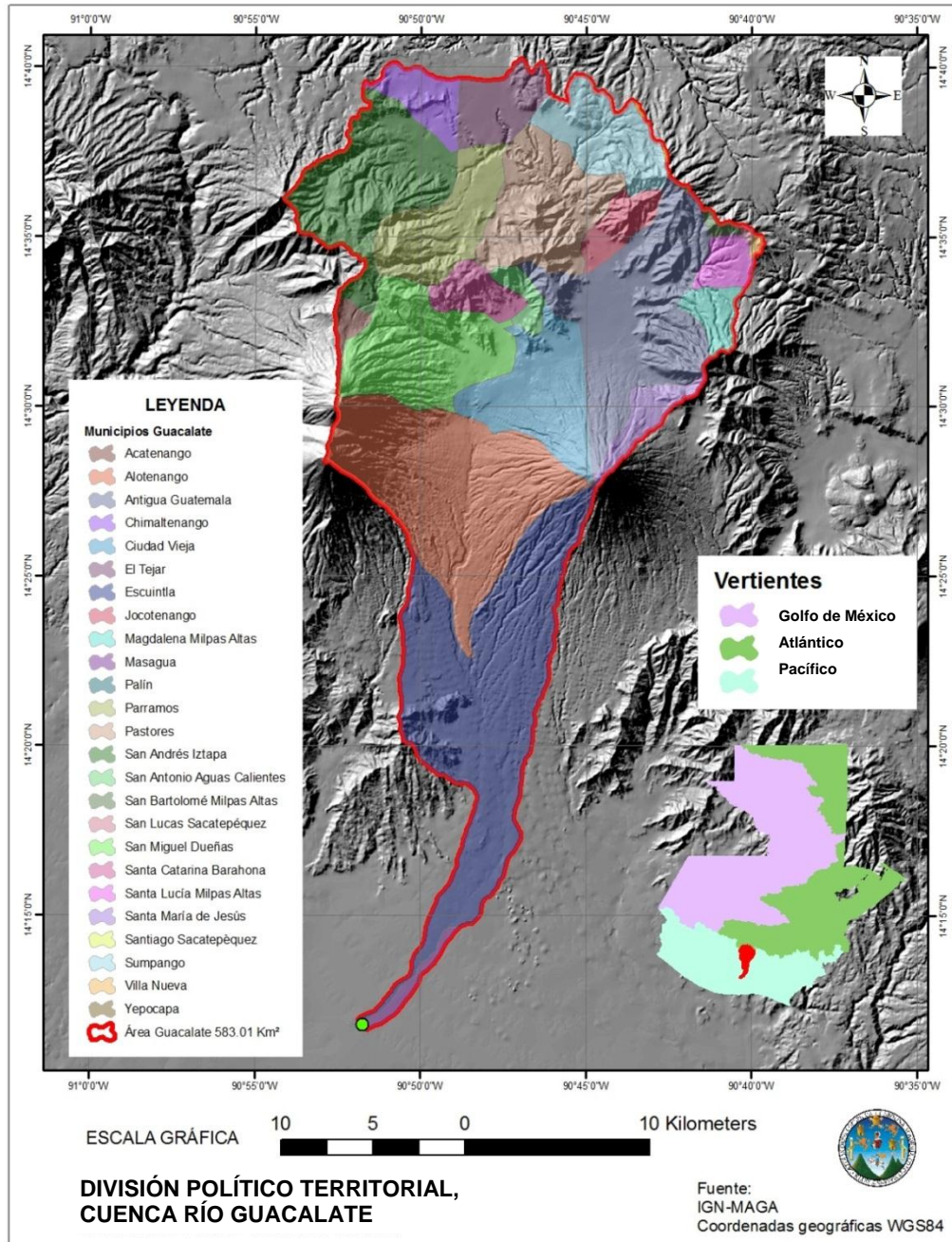
La cuenca del río Guacalate está ubicada dentro de los departamentos de Chimaltenango, Sacatepéquez, Guatemala y Escuintla, que corresponden a la región V del país y comprende los siguientes municipios.

Tabla I. **Departamentos y municipios que abarca la cuenca del río Guacalate**

Departamento	Municipio
Chimaltenango	Chimaltenango
	Acatenango
	Yepocapa
	San Andrés Iztapa
	Parramos
	El Tejar
Escuintla	Escuintla
	Palín
	Masagua
Guatemala	Villa Nueva
Sacatepéquez	Antigua Guatemala
	Jocotenango
	Pastores
	Sumpango
	Santiago Sacatepéquez
	San Bartolomé Milpas Altas
	San Lucas Sacatepéquez
	Santa Lucía Milpas Altas
	Santa María de Jesús
	Ciudad Vieja
	San Miguel Dueñas
	Alotenango
	San Antonio Aguas Calientes
	Magdalena Milpas Altas
Santa Catarina Barahona	

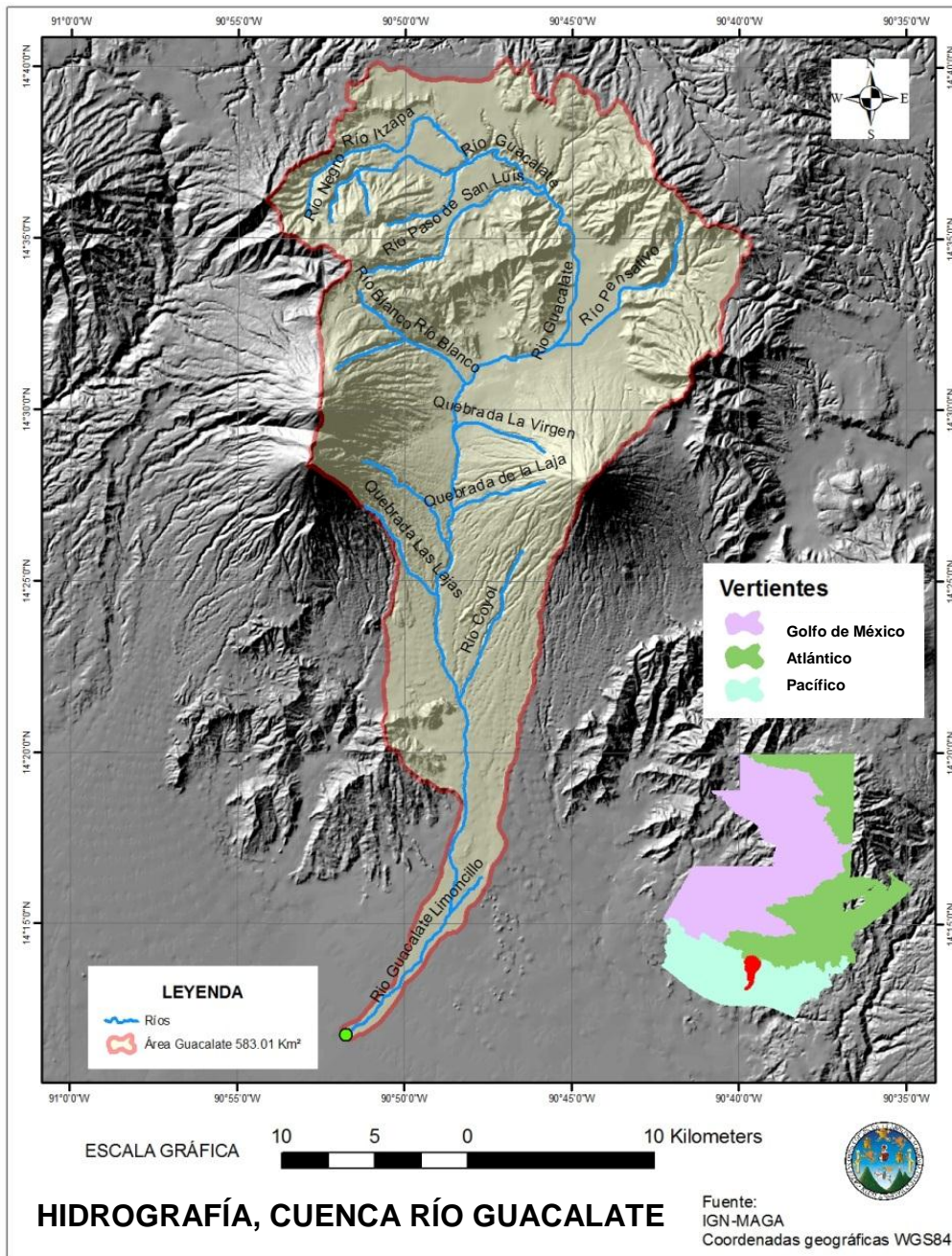
Fuente: elaboración propia.

Figura 3. División político territorial de la cuenca del río Guacalate



Fuente: elaboración propia, con base en información del Instituto Geográfico Nacional y el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación.

Figura 4. Hidrografía de la cuenca del río Guacalate



Fuente: elaboración propia, con base en información del Instituto Geográfico Nacional y el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación.

2.3. Determinación de los parámetros morfométricos de la cuenca

Los parámetros morfométricos de una cuenca son resultantes de la interacción de la geografía, clima y el movimiento del agua superficial. Estos influyen profundamente en el comportamiento hidrológico de la zona de estudio. Pueden ser de tres tipos: de forma, de relieve y relativos a la red hidrográfica.

Para el estudio y determinación de los parámetros geomorfológicos se precisa de información cartográfica de la topografía de la zona de estudio. Los planos para estos análisis son en escalas desde 1:25,000 hasta 1:100,000, dependiendo de los objetivos del estudio y tamaño de la cuenca en cuestión. En este caso se utilizaron mapas a escala 1:50,000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

2.3.1. Área y perímetro de la cuenca de estudio

El área de la cuenca de estudio (A), se determinó mediante el software AutoCAD; sus dimensiones se expresan en kilómetros cuadrados (km²) o en hectáreas (Ha):

$$A = 583.0136 \text{ km}^2$$

$$A = 58301.36 \text{ Ha}$$

El perímetro de la cuenca de estudio (P), se determinó mediante el software AutoCAD; sus dimensiones se expresan en kilómetros (km):

$$P = 153,166.00 \text{ km}$$

2.3.2. Forma de la cuenca

Dada la importancia de la configuración de la cuenca, es conveniente cuantificar estas características por medio de índices o coeficientes, los cuales relacionan el movimiento del agua superficial y las respuestas de la cuenca a tal movimiento.

2.3.2.1. Índice de Gravelius o coeficiente de compacidad

Es la relación que existe entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de la circunferencia de área igual a la cuenca. El coeficiente de compacidad se encuentra mediante la siguiente fórmula:

$$Kc = \frac{P_{\text{cuenca}}}{P_{\text{círculo}}} \quad (\text{Ec. 1})$$

En donde:

Kc = Coeficiente de compacidad

P_{cuenca} = Perímetro de la cuenca medido en kilómetros (km)

$P_{\text{círculo}}$ = Perímetro del círculo medido

La fórmula (2.1) puede expresarse mediante la fórmula del perímetro del círculo de esta manera:

$$Kc = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (\text{Ec. 2})$$

En donde:

K_c = Coeficiente de compacidad que es adimensional

P = Perímetro de la cuenca medido en kilómetros (km)

A = Área de la cuenca medida en kilómetros cuadrados (km²)

Cuanto más irregular sea la cuenca mayor será su coeficiente de compacidad. Para una cuenca perfectamente circular el coeficiente de compacidad es igual a uno ($K_c=1$) y cuanto más se aleje de uno, más alargada será la cuenca.

El coeficiente de compacidad de la cuenca de estudio, obtenido mediante la fórmula (2.2) es $K_c = 1.7884$.

2.3.2.2. Factor de forma

Es la relación entre el ancho medio y la longitud del cauce principal de la cuenca. El factor de forma se encuentra mediante la siguiente ecuación:

$$K_f = \frac{B}{L} \quad (\text{Ec. 3})$$

En donde:

K_f = Factor de forma que es adimensional

B = Ancho medio de la cuenca medido en kilómetros (km)

L = Longitud del cauce principal de la cuenca medido en kilómetros (km)

El ancho medio se obtiene dividiendo el área de la cuenca por la longitud del cauce principal:

$$B = \frac{A}{L} \quad (\text{Ec. 4})$$

En donde:

B = Ancho medio de la cuenca medido en kilómetros (km)

A = Área de la cuenca medida en kilómetros cuadrados (km²)

L = Longitud del cauce principal de la cuenca medido en kilómetros (km)

Sustituyendo la ecuación (4) en la ecuación (3) se obtiene la siguiente ecuación de factor de forma:

$$Kf = \frac{A}{L^2} \quad (\text{Ec. 5})$$

En donde:

Kf = Factor de forma que es adimensional

A = Área de la cuenca medida en kilómetros cuadrados (km²)

L = Longitud del cauce principal de la cuenca medido en kilómetros (km)

Una cuenca tenderá a ser alargada si el factor de forma se aproxima a cero; mientras que su forma es redonda, en la medida que el factor de forma tiende a uno. Este factor es un referente para establecer la dinámica esperada de la escorrentía superficial en una cuenca. El factor de forma de la cuenca de estudio, obtenido mediante la fórmula (Ec. 5) es 0.0995.

2.3.3. Características de relieve

Los parámetros relativos al relieve en una cuenca tienen mayor influencia sobre la respuesta hidrológica que los parámetros de forma. Mediante sus características de relieve se puede conocer si un río es joven, maduro o viejo y si pueden aparecer nuevos cauces del mismo, se puede también conocer la variación de su caudal en el tiempo y otros datos importantes en un estudio hidrológico.

2.3.3.1. Pendiente media de la cuenca

La pendiente media está referida al nivel del mar; puede estimarse con la siguiente fórmula:

$$S = \frac{DL_i}{A} \quad (\text{Ec. 6})$$

En donde:

S = Pendiente media de la cuenca que es adimensional

L_i = Longitud total de todas las curvas de nivel comprendidas dentro de la cuenca en kilómetros (Km)

D = Equidistancia entre curvas de nivel del mapa topográfico en kilómetros (Km)

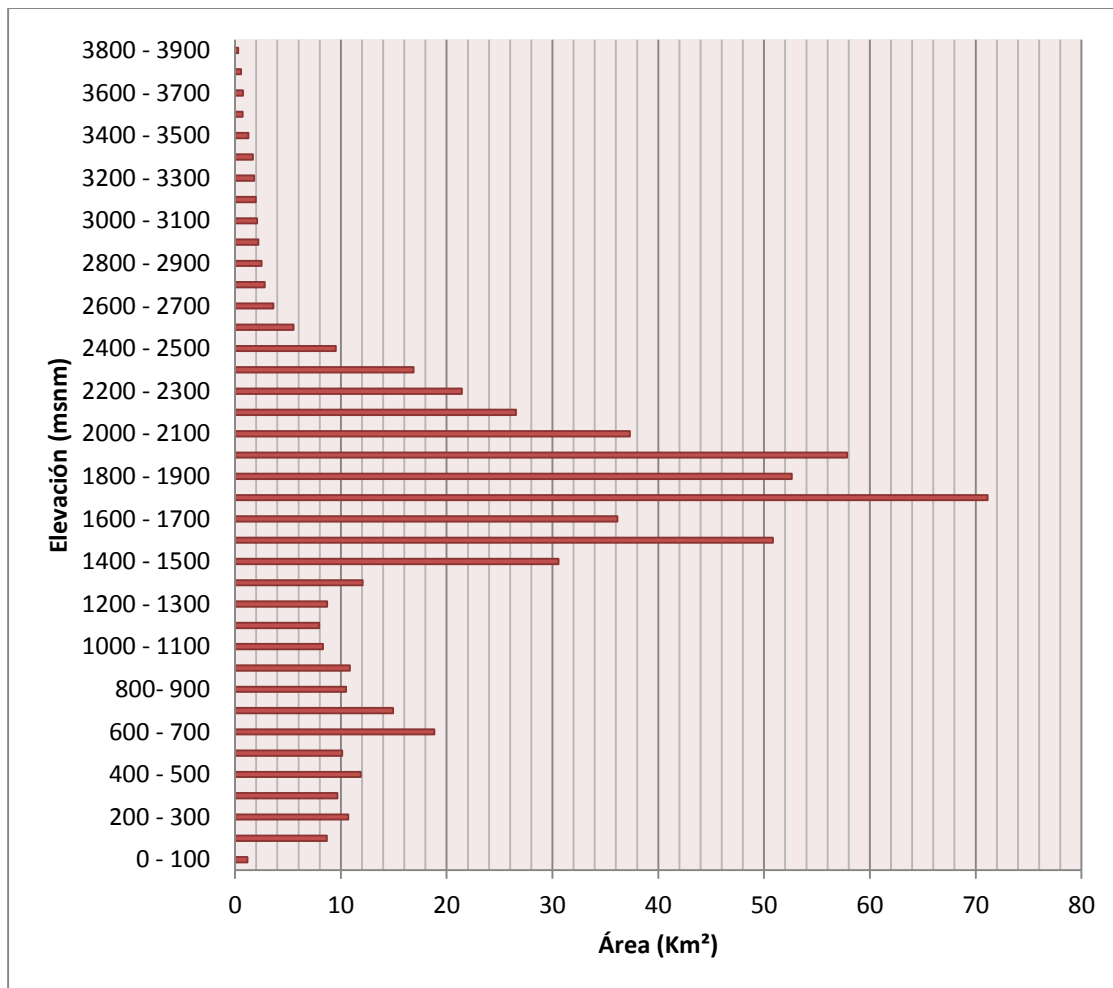
A = Área de la cuenca en kilómetros cuadrados (Km²)

El resultado de utilizar la fórmula (6) con los datos de la cuenca es una pendiente media de 0.2524 Km/Km.

2.3.3.2. Histograma de frecuencias altimétricas

Indica el porcentaje de área comprendida entre dos alturas determinadas. En la figura 5 se muestra el histograma de frecuencias altimétricas de la cuenca del río Guacalate.

Figura 5. **Histograma de frecuencias altimétricas, cuenca del río Guacalate**

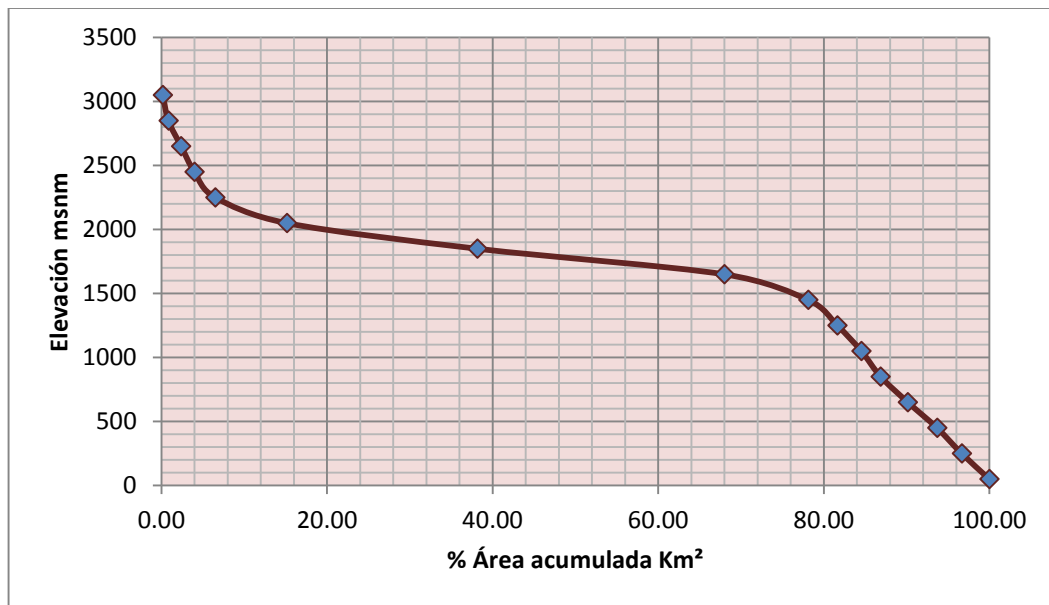


Fuente: elaboración propia.

2.3.3.3. Curva hipsométrica

Es la representación gráfica del relieve de la cuenca. Es una curva que indica el porcentaje de área de la cuenca, en kilómetros cuadrados (km²), que existe por encima de una cota determinada.

Figura 6. Curva hipsométrica, cuenca del río Guacalate



Fuente: elaboración propia.

2.3.3.4. Pendiente del cauce principal

Es un indicador del grado de respuesta hidrológica de una cuenca a una tormenta. Asimismo, este parámetro permite evaluar el potencial erosivo a partir de la velocidad del flujo, lo que permite conocer las características adecuadas para la estabilización del cauce.

La pendiente del cauce principal está referida al nivel del mar, puede estimarse con la siguiente fórmula:

$$S = \frac{H}{L} * 100 \quad (\text{Ec. 7})$$

En donde:

S = Pendiente del cauce principal que es adimensional

H = Desnivel entre los extremos del cauce

L = Longitud del cauce principal de la cuenca medido en kilómetros (km)

La pendiente del cauce principal es de 2.74 %.

2.3.4. Características de la red de drenaje

Las características de la red de drenaje permiten deducir la interacción entre el sistema fluvial y las demás características ambientales del territorio de la cuenca.

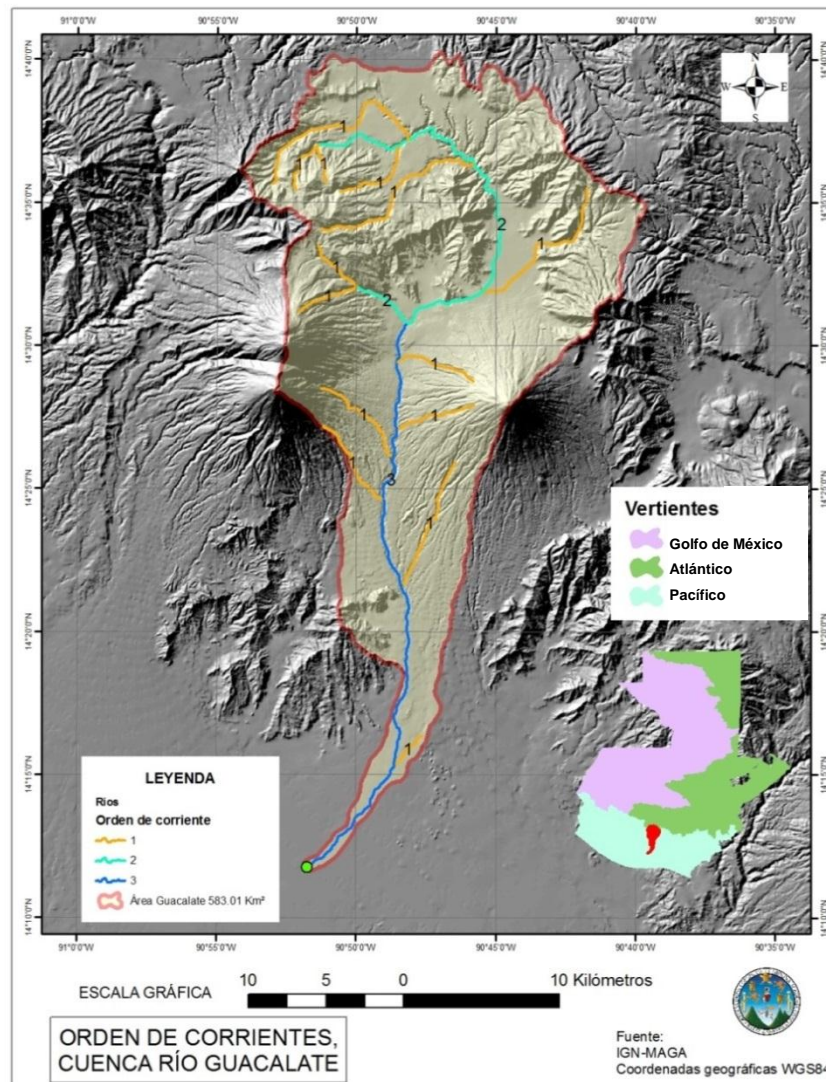
2.3.4.1. Orden de la cuenca

Es el nivel de importancia de un drenaje que aumenta a medida que tiene más afluentes con orden menor, hasta llegar a un drenaje mayor.

Este indicador también permite definir la disponibilidad de agua combinado con el indicador de régimen; a medida que un drenaje aumenta su orden, expresa un aumento en el número de sus tributarios, hasta llegar al nivel de base a un drenaje de orden mayor.

El orden de la cuenca es el mismo del cauce principal a la salida, por lo que se puede concluir que la cuenca es de orden tres.

Figura 7. **Orden de los cauces de la cuenca del río Guacalate desde el punto de estudio.**



Fuente: elaboración propia, con base en información del Instituto Geográfico Nacional y el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación.

2.3.4.2. Densidad de drenaje

Se expresa como la longitud de los cauces por unidad de área y provee una indicación de la eficiencia de drenaje de la cuenca. Puede calcularse la densidad de drenaje con la siguiente fórmula:

$$D = \frac{\sum L_i}{A} \quad (\text{Ec. 10})$$

En donde:

D = Densidad de drenaje medido en km/km²

L_i = Longitud de los cauces de todos los cauces y tributarios de la cuenca medido en kilómetros (km)

A = Área total de la cuenca medido en kilómetros cuadrados (km²)

Utilizando la fórmula (10) con los datos de la cuenca de estudio, se obtiene como resultado una densidad de drenaje de 0.2828 km/km². Este resultado significa que la cuenca tiene un drenaje muy pobre y evacúa el agua de manera lenta.

2.3.4.3. Frecuencia de cauces

La frecuencia de cauces se define como el número de cauces entre la superficie de la cuenca. La frecuencia de cauces se puede obtener mediante la siguiente fórmula:

$$F = \frac{\sum N_i}{A} \quad (\text{Ec. 11})$$

En donde:

F = Frecuencia de los cauces o número de cauces por kilómetro cuadrado

N_i = Número de cauces de orden i

A = Área total de la cuenca medido en kilómetros cuadrados (km^2)

Utilizando la fórmula (Ec. 11) con los datos de la cuenca de estudio, se obtiene como resultado una frecuencia de cauces de 0.03 cauces por kilómetro cuadrado.

Según los resultados obtenidos en la evaluación de los parámetros morfométricos de la cuenca del río Guacalate, se puede decir que esta es de forma rectangular oblonga, principalmente alargada, lo que incide en la forma en la que se evacúan los volúmenes de agua, facilitando por su forma la reducción del efecto de una creciente a lo largo del río.

La pendiente media de la cuenca permite determinar que el tipo de relieve de la misma es fuertemente accidentado; sin embargo en la parte baja de la cuenca el tipo de relieve es plano, la elevación media de la cuenca es de 1750 msnm y se puede concluir que en la parte alta de la misma se generan crecientes en tiempos relativamente cortos y puede presentar problemas de erosión; mientras que en la parte baja se presentan principalmente problemas de drenaje y sedimentación.

3. APLICACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN HEC-RAS EN EL TRAMO DEL RÍO GUACALATE UBICADO AL COSTADO DEL MUNICIPIO DE MASAGUA, ESCUINTLA

3.1. Conceptos básicos de hidráulica de canales abiertos

El flujo en canales abiertos puede clasificarse en muchos tipos y describirse de varias maneras; la siguiente clasificación se hace de acuerdo con el cambio en la profundidad de flujo respecto del tiempo y el espacio.

Se dice que el flujo en un canal abierto es permanente si la profundidad del mismo no cambia o puede suponerse constante durante el intervalo de tiempo en consideración. En la mayor parte de los problemas de canales abiertos es necesario estudiar el comportamiento del flujo solo bajo condiciones permanentes.

En la mayor parte de los problemas de flujo permanente el caudal es constante a través del tramo del canal en consideración; en otras palabras, el flujo es continuo.

Existe otro tipo de flujo, el no permanente, y ocurre si la profundidad cambia con el tiempo.

3.1.1. Caudal

Es la cantidad de fluido que pasa en una unidad de tiempo. Normalmente se identifica con el flujo volumétrico o volumen que pasa por un área dada en la unidad de tiempo.

Para cualquier flujo, el caudal (Q) en una sección del canal atravesado por un fluido en una unidad de tiempo, se expresa por:

$$Q = V \cdot A \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde:

V= velocidad media (m/s)

A= área de la sección transversal (m²)

3.1.2. Caudal en una crecida

Consiste en el caudal máximo registrado o esperado, en un cuerpo de agua. Los estudios de las crecidas de un río se basan en los registros disponibles, pero muchas veces la cantidad, precisión y representatividad de los registros no es suficiente para lograr una adecuada confiabilidad en los resultados.

Las crecidas que son de interés desde el punto de vista de un ingeniero proyectista, son justamente aquellas que tienen una pequeña probabilidad de excedencia, o un gran período de retorno. Por consiguiente, se tiene una apreciable incertidumbre en la estimación, tanto por la dificultad de medir valores extremos como por la falta de precisión de dichas magnitudes.

Con el fin de aumentar la confiabilidad de las estimaciones, se han propuesto los métodos regionales de frecuencia de crecidas, los cuales hacen uso de toda la información geográfica e hidrológica disponible en la región de interés. Estos métodos regionales, además, permiten la estimación de cuantiles de gastos máximos en sitios sin registros, apoyándose en la información regional.

En esta investigación se utilizó para el cálculo de caudales de simulación el estudio de “Análisis regional de crecidas en la República de Guatemala” del Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH, 2004), en el que se definen ocho regiones del país; este estudio contempla varios tipos de distribuciones (siete), pero el INSIVUMEH recomienda dos que se ajustan a los datos de crecida de cada región: la distribución log-normal y la de Gumbel.

3.1.3. Régimen de flujo de una corriente

El régimen de flujo de una corriente se clasifica en función del número de Froude, el cual es la relación adimensional entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales; está dada por la ecuación (3.2):

$$F = \frac{v}{\sqrt{gL}} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Donde:

F = número de Froude

V = velocidad media del flujo (m/s)

g = aceleración de la gravedad (m/s²)

L = longitud característica (m)

Cuando F es igual a la unidad ($F=1$), se dice que el flujo está en estado crítico. Si F es menor que la unidad ($F<1$) el flujo es subcrítico. En este caso el papel jugado por las fuerzas gravitacionales es más pronunciado; por lo tanto el flujo tiene una velocidad baja. Si es mayor que la unidad ($F>1$) el flujo es supercrítico. En este estado las fuerzas inerciales se vuelven dominantes; el flujo tiene una alta velocidad.

Debido a que el flujo en la mayor parte de los canales está controlado por efectos gravitacionales, un modelo utilizado para simular un canal prototipo con propósitos de prueba debe ser diseñado teniendo en cuenta este efecto; es decir el número de Froude del flujo en el canal modelo debe ser igual al número de Froude del flujo en el canal prototipo.

3.1.4. Coeficiente de rugosidad

Es el valor que representa la resistencia al flujo por fricción, llamado coeficiente de rugosidad de Manning, se representa como (n) . Es importante para determinar de manera correcta el coeficiente de rugosidad de Manning, y entender los factores que lo afectan, con el fin de disminuir el rango de incertidumbre. Estos factores pueden ser: rugosidad superficial, vegetación, irregularidad y alineamiento del canal, sedimentación y socavación, obstrucción, tamaño y forma del canal, nivel y caudal, cambio estacional, material en suspensión y carga del lecho.

Puede obtenerse el valor del coeficiente de rugosidad de Manning (n) en la guía, para la selección de coeficientes de rugosidad de Manning, para los canales naturales y llanuras de inundación, documento 2339 del Servicio Geológico y de Abastecimiento de Agua de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés).

3.1.5. Energía específica

La energía específica en una sección de canal se define como la energía de agua en cualquier sección de un canal medida, respecto del fondo de este. La energía específica de una sección de canal abierto se da de acuerdo con la ecuación:

$$H = Z + Y + \frac{\alpha v^2}{2g} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

La cual establece que la energía específica es (H) en cualquier lugar a lo largo del canal es la suma de la energía potencial (Z+Y) y la energía cinética ($\alpha V^2 / 2g$).

3.2. Introducción al programa HEC-RAS

El programa HEC-RAS fue desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center) del cuerpo de ingenieros de la armada de los EE.UU. (US Army Corps of Engineers).

HEC-RAS es un modelo hidráulico diseñado para ayudar en el análisis de canales de flujo y determinación de llanura de inundación. Los resultados del modelo se pueden aplicar en el manejo de llanuras de inundación, estudios de sistemas de alertas tempranas y diseño de obras de protección contra inundaciones.

El procedimiento principal utilizado por HEC-RAS para calcular perfiles de agua superficial, parte del supuesto que el flujo varía gradualmente y este es llamado el método de paso directo. El procedimiento de cálculo básico se basa en una solución iterativa de la ecuación de energía (3.3).

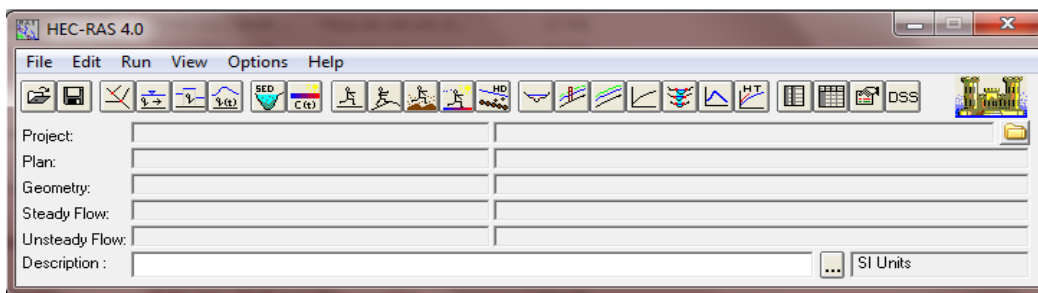
Teniendo en cuenta el flujo y la elevación de la superficie del agua en una sección, el objetivo del método de paso directo consiste en calcular la elevación de la superficie del agua en la sección adyacente. Si los cálculos proceden de arriba hacia abajo o viceversa, depende del régimen de caudales. El número de Froude se utiliza para caracterizar el régimen del flujo.

Para un flujo subcrítico, lo cual es muy común en canales naturales, los cálculos iniciales comenzarían en el extremo inferior del tramo, aguas arriba y el progreso entre las secciones adyacentes. Para flujo supercrítico los cálculos se iniciarían en el tramo aguas arriba y procediendo aguas abajo.

3.2.1. Creación de un proyecto

Para cada proyecto de HEC-RAS hay dos componentes necesarios: los datos de geometría y de flujo. Los datos de la geometría consisten en una descripción del tamaño, forma y conectividad de la corriente de las secciones transversales. Del mismo modo, los datos de flujo consisten de la tasa de descarga. Todos los nombres de los archivos de proyectos para HEC-RAS se asignan la extensión .prj.

Figura 8. Ventana de inicio HEC-RAS

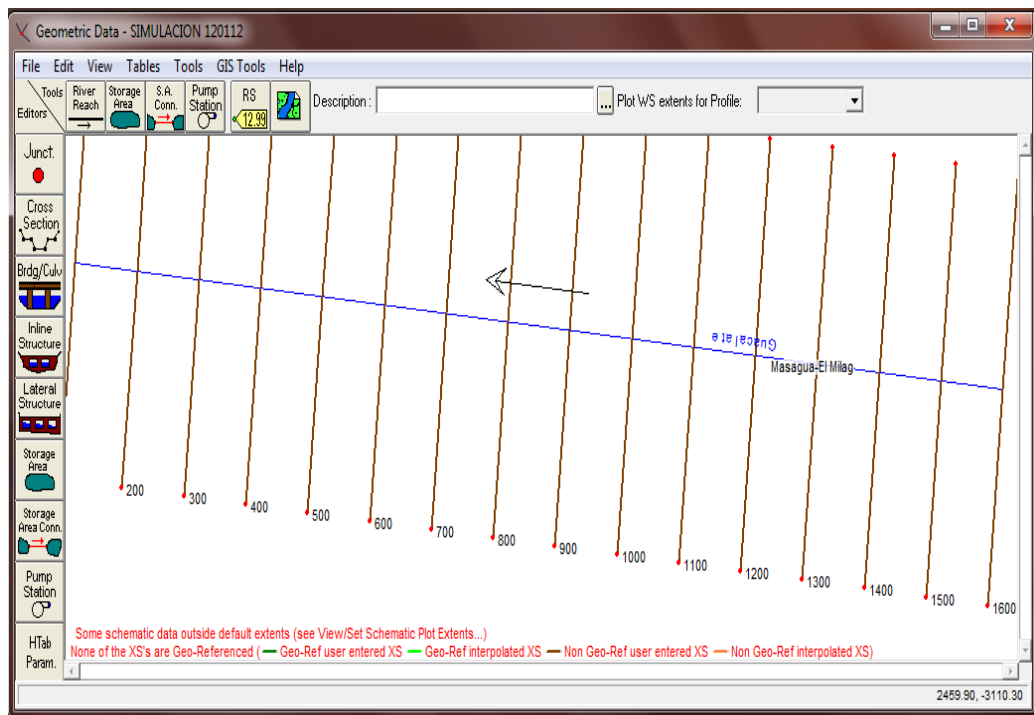


Fuente: elaboración propia.

3.2.2. Geometría del cauce

Para analizar el flujo de la corriente, HEC-RAS representa un cauce y llanura de inundación como una serie de secciones transversales a lo largo del canal. Debe definirse la geometría del cauce como se muestra en la figura 9.

Figura 9. Ventana *geometric data* del programa HEC-RAS

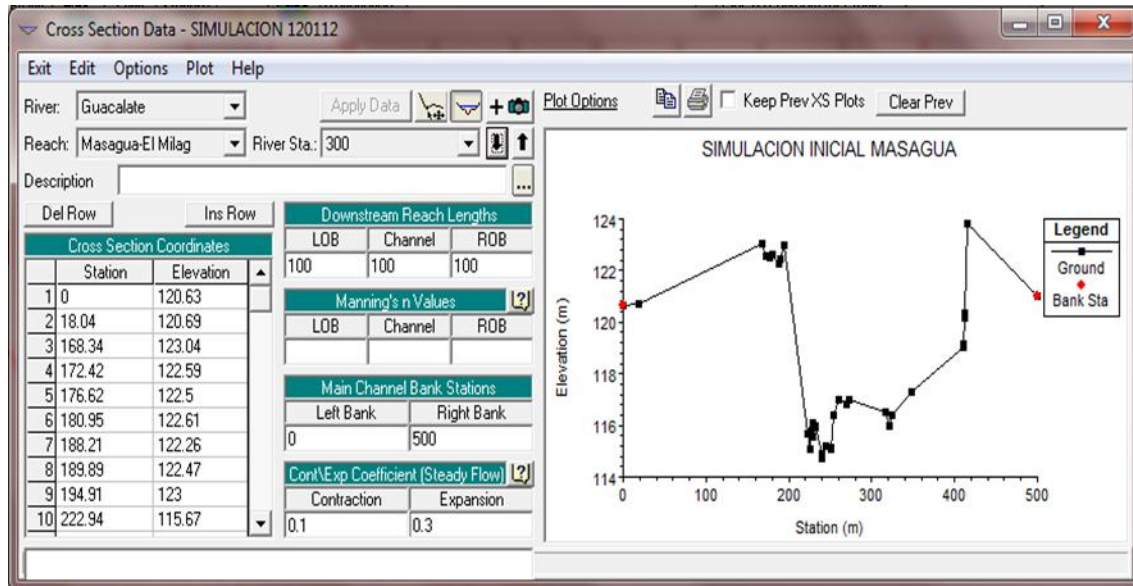


Fuente: elaboración propia.

3.2.3. Introducción de datos de secciones transversales

El segundo paso para definir la geometría del cauce es dibujar las secciones transversales a lo largo de este, como se muestra en la figura 10.

Figura 10. **Ventana *cross section* data del programa HEC-RAS**



Fuente: elaboración propia.

3.2.4. **Datos del flujo o datos hidráulicos**

Para introducir datos hidráulicos, deberá seleccionarse entre las opciones, flujo permanente o flujo no permanente, esto dependerá de las características del flujo. Luego se introducirá el régimen al que pertenece el flujo, las opciones que presenta el programa son régimen subcrítico, supercrítico o mixto.

3.2.5. **Presentación de resultados del programa HEC-RAS**

HEC-RAS presenta en varias formas los resultados, en la figura 11 se muestran los resultados, donde se presentan varias características hidráulicas del flujo.

Figura 11. Ventana tabla de resultados

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
MASAGUA - EL MIL	22	PF 1	460.38	128.90	130.22	130.22	130.57	0.007822	3.48	244.73	329.29	1.09
MASAGUA - EL MIL	21	PF 1	460.38	125.19	127.03	127.80	129.27	0.016769	6.93	90.24	110.38	1.72
MASAGUA - EL MIL	20	PF 1	460.38	123.66	124.92	125.73	127.15	0.027702	6.80	72.18	74.40	2.07
MASAGUA - EL MIL	19	PF 1	460.38	123.03	124.37	124.54	125.05	0.010705	3.68	133.85	192.97	1.25
MASAGUA - EL MIL	18	PF 1	460.38	120.47	121.58	122.05	123.17	0.035564	5.59	82.31	121.49	2.17
MASAGUA - EL MIL	17	PF 1	460.38	119.58	121.42	121.42	121.96	0.006235	3.27	149.24	149.79	0.99
MASAGUA - EL MIL	16	PF 1	460.38	118.69	120.00	120.27	120.98	0.015602	4.37	105.61	122.08	1.50
MASAGUA - EL MIL	15	PF 1	460.38	117.41	119.32	119.32	120.21	0.005505	4.19	111.94	66.80	1.00
MASAGUA - EL MIL	14	PF 1	460.38	114.81	116.76	117.50	119.18	0.016496	6.93	71.15	50.54	1.70
MASAGUA - EL MIL	13	PF 1	460.38	114.00	115.87	116.33	117.55	0.012145	5.77	83.12	58.24	1.46
MASAGUA - EL MIL	12	PF 1	460.38	113.04	114.84	115.23	116.42	0.009883	5.60	85.36	50.78	1.34
MASAGUA - EL MIL	11	PF 1	460.38	112.00	113.46	113.96	115.21	0.014905	5.86	80.14	60.78	1.58
MASAGUA - EL MIL	10	PF 1	460.38	110.81	112.42	112.78	113.84	0.010928	5.28	88.02	60.06	1.37
MASAGUA - EL MIL	9	PF 1	460.38	109.78	111.23	111.61	112.65	0.012871	5.30	87.60	66.81	1.46
MASAGUA - EL MIL	8	PF 1	460.38	108.81	110.36	110.60	111.40	0.010146	4.57	103.61	86.20	1.29
MASAGUA - EL MIL	7	PF 1	460.38	108.10	110.01	110.01	110.70	0.005772	3.71	128.45	97.04	0.99
MASAGUA - EL MIL	6	PF 1	460.38	108.00	108.87	109.12	109.75	0.017124	4.17	110.49	147.14	1.53
MASAGUA - EL MIL	5	PF 1	460.38	106.97	108.15	108.15	108.62	0.006667	3.05	153.26	167.93	0.99
MASAGUA - EL MIL	4	PF 1	460.38	106.95	108.30	108.30	108.92	0.005841	3.51	140.34	130.29	0.98
MASAGUA - EL MIL	3	PF 1	460.38	105.94	106.90	107.21	107.94	0.017155	4.54	104.53	140.03	1.57
MASAGUA - EL MIL	2	PF 1	460.38	105.66	106.72	106.72	107.15	0.006920	2.98	174.67	211.98	1.00
MASAGUA - EL MIL	1	PF 1	460.38	105.19	106.19	106.19	106.61	0.006994	2.89	164.19	203.83	1.00

Total flow in cross section.

Fuente: elaboración propia.

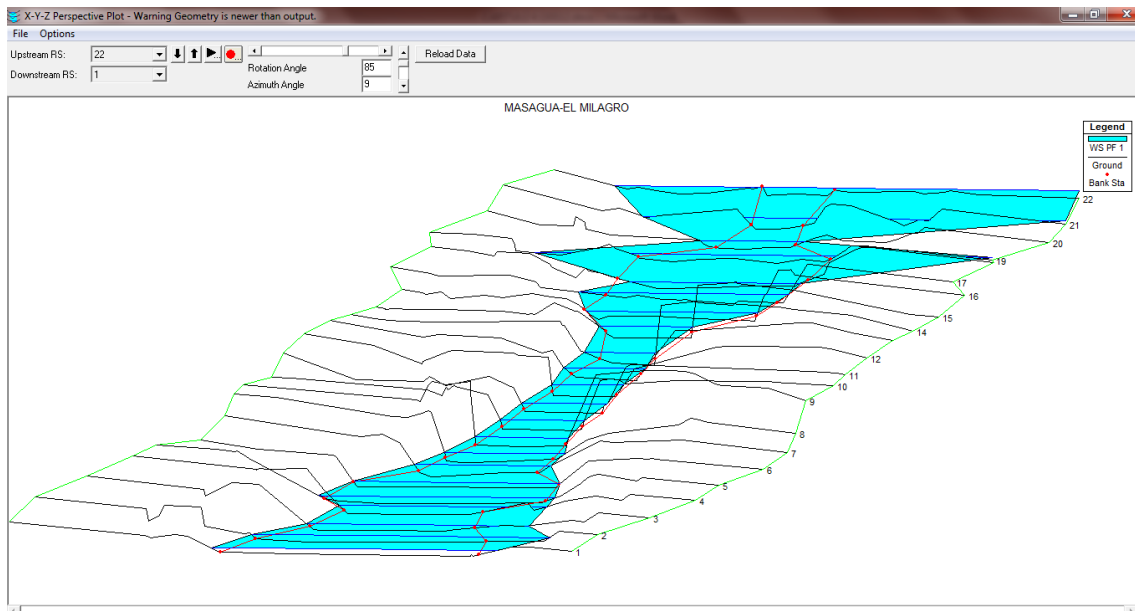
HEC-RAS cuenta con dos salidas gráficas: una salida presenta el nivel del agua en cada una de las secciones transversales introducidas (figura 12), conjuntamente con el nivel de la línea de energía y el nivel crítico, y en otra salida muestra el perfil longitudinal del río (figura 13) con una línea de energía.

Figura 12. Resultado gráfico de secciones transversales



Fuente: elaboración propia.

Figura 13. Resultado gráfico del perfil del cauce



Fuente: elaboración propia.

3.2.6. Características técnicas y sus aplicaciones

El programa HEC-RAS es ejecutable en entorno Microsoft Windows y presenta las siguientes características técnicas:

- Cálculo hidráulico de estructuras (puentes, aliviaderos, alcantarillas, etc.)
- Visualización gráfica de datos y resultados
- Edición gráfica de secciones

Algunas de las aplicaciones del programa HEC-RAS son la modelación hidráulica en régimen permanente de cauces abiertos, ríos y canales artificiales.

3.3. Procesamiento y análisis de la información

Con el procesamiento de la información recolectada se pretende determinar el comportamiento del río Guacalate en el área de influencia de Masagua, con caudales máximos para varios períodos de retorno propios del tramo de estudio; con el fin de reducir el riesgo a inundaciones a través del diseño de obras de protección.

3.3.1. Geometría del cauce del río Guacalate

La geometría del cauce del río Guacalate se obtuvo realizando un levantamiento topográfico del área de estudio, utilizando una estación total.

La geometría del cauce del río Guacalate, planta, perfil y secciones transversales se presentan en los planos topográficos 1, 2 y 3.

3.3.2. Caudales del río Guacalate

Los caudales utilizados en la simulación hidráulica en el programa HEC-RAS fueron calculados utilizando el documento Análisis regional de crecidas para la República de Guatemala para el departamento de Investigación y Servicios Hídricos del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH).

El cálculo se realizó definiendo las regiones hidrológicas de la cuenca del río Guacalate, la cual ocupa la Región I: altiplano occidental, en un 85.66 % y la Región III: Pacífico sur-oriental, en un 14.34 %.

Para la estimación de los caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno, en cualquier sitio de interés, en cualquier región del país, se usa la ecuación (3.4) obtenida del documento Análisis Regional de Crecidas para la República de Guatemala para el departamento de Investigación y Servicios Hídricos del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), así como la ecuación (3.5) y la tabla II que se encuentra en la siguiente página.

$$Q_{tr} = Q_{mm} * K_{tr} \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Donde:

Q_{tr} = Caudal para el período de retorno t_r

Q_{mm} = Crecida índice

K_{tr} = Crecida modular (o estandarizada)

La crecida índice se obtiene a partir de la ecuación (3.5) y de la tabla II, válida para la región a la que pertenece la cuenca de interés, la crecida modular se obtiene de acuerdo con la región y la curva de frecuencia que se estime conveniente (tabla III).

$$Q_{MM} = B A_n \quad (\text{Ec. 3.5})$$

En la tabla II, N es el número de estaciones utilizadas, B y n son parámetros de ajuste de la ecuación (3.5).

En el caso de este cálculo se ha seleccionado la distribución de Gumbel para períodos de retorno de dos (2), diez (10), veinticinco (25), cincuenta (50), cien (100) y quinientos (500) años; los resultados se presentan en la tabla II.

Tabla II. **Regiones hidrológicas para el análisis regional de crecidas**

REGIONES	N	B	N
REGIÓN I: ALTIPLANO OCCIDENTAL	11	0,08	1,03
REGIÓN II: PACÍFICO SUROCCIDENTAL	10	84	0,24
REGIÓN III: PACÍFICO SURORIENTAL	10	0,26	1,04
REGIÓN IV: ALTIPLANO ORIENTAL	4	0,15	1,21
REGIÓN V: MOTAGUA	12	3,62	0,64
REGIÓN VI: POLOCHIC-CAHABÓN Y BAJO MOTAGUA	17	0,75	0,91
REGIÓN VII: PLANICIE DEL PETÉN	5	0,22	0,9
REGIÓN VIII: NOROCCIDENTAL	17	2,99	0,65

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el INSIVUMEH.

Tabla III. **Cuantiles de caudales modulares regionales, de acuerdo a las distribuciones de Gumbel y log-normal**

Tr	REGIÓN								REGIÓN							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
	GUMBEL								LOG-NORMAL							
1000	5,78	5,37	6,45	7,35	4,6	4,16	3,91	4,76	5,69	5,79	14,5	11,2	4,45	7,18	6,28	6,1
500	5,26	4,9	5,86	6,66	4,21	3,82	3,6	4,36	5,01	5,09	11,1	9,26	3,99	5,9	5,25	5,25
100	4,05	3,79	4,48	5,06	3,3	3,02	2,86	3,4	3,59	3,62	5,62	5,66	3,01	3,61	3,35	3,56
50	3,53	3,32	3,89	4,37	2,91	2,67	2,54	2,99	3,04	3,05	4,06	4,43	2,61	2,87	2,71	2,95
30	3,14	2,96	3,44	3,86	2,62	2,42	2,3	2,69	2,66	2,66	3,15	3,63	2,33	2,4	2,3	2,54
25	3,01	2,84	3,29	3,67	2,51	2,32	2,22	2,58	2,53	2,53	2,87	3,37	2,23	2,25	2,17	2,4
20	2,84	2,68	3,09	3,44	2,38	2,21	2,12	2,44	2,37	2,37	2,55	3,06	2,11	2,07	2,01	2,24
10	2,3	2,19	2,48	2,73	1,98	1,85	1,79	2,02	1,89	1,88	1,75	2,2	1,74	1,59	1,58	1,76
5	1,74	1,68	1,84	1,99	1,55	1,48	1,44	1,57	1,43	1,42	1,16	1,46	1,38	1,2	1,21	1,33
2	0,89	0,9	0,87	0,86	0,91	0,92	0,93	0,91	0,82	0,82	0,66	0,65	0,87	0,8	0,82	0,81

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el INSIVUMEH.

Tabla IV. **Caudales resultantes de utilizar la distribución de Gumbel para diferentes períodos de retorno**

Período de retorno Tr	CAUDAL Q (m³/s)
500,00	418,69
100,00	321,48
50,00	279,79
25,00	237,82
10,00	180,77
2,00	67,44

Fuente: elaboración propia.

3.3.3. Tipo de flujo del río Guacalate

El flujo en el río Guacalate, para este caso, es permanente; la profundidad de flujo no cambia o puede suponerse constante durante un intervalo de tiempo determinado.

3.3.4. Régimen del flujo del río Guacalate

El régimen de flujo del río Guacalate se determina de acuerdo con el número de Froude, el que se calcula utilizando la fórmula (3.2). Se encuentra el régimen de flujo del río Guacalate para cada sección del tramo de estudio en planos topográficos 2 y 3, teniendo como resultado los datos de las tablas II, III y IV.

Tabla V. Régimen del flujo para cada estacionamiento del tramo de estudio del río Guacalate, para períodos de retorno de 2, 10 y 25 años

TIEMPO DE RETORNO	2 AÑOS			10 AÑOS			25 AÑOS		
UNIDADES	Q (m³/s)			Q (m³/s)			Q (m³/s)		
CAUDAL	67,44			180,77			237,82		
ESTACIONAMIENTO	V (m/s)	FR	RÉGIMEN	V (m/s)	FR	RÉGIMEN	V (m/s)	FR	RÉGIMEN
0+100	1,28	0,41	SUBCRÍTICO	3,42	1,10	SUPERCRÍTICO	4,50	1,45	SUPERCRÍTICO
0+200	3,80	2,05	SUPERCRÍTICO	10,20	5,49	SUPERCRÍTICO	13,41	7,22	SUPERCRÍTICO
0+300	2,13	0,97	SUBCRÍTICO	5,71	2,59	SUPERCRÍTICO	7,51	3,41	SUPERCRÍTICO
0+400	1,45	0,80	SUBCRÍTICO	3,88	2,14	SUPERCRÍTICO	5,11	2,81	SUPERCRÍTICO
0+500	0,50	0,16	SUBCRÍTICO	1,35	0,43	SUBCRÍTICO	1,78	0,57	SUBCRÍTICO
0+600	0,82	0,33	SUBCRÍTICO	2,20	0,88	SUBCRÍTICO	2,90	1,16	SUPERCRÍTICO
0+700	0,67	0,23	SUBCRÍTICO	1,81	0,63	SUBCRÍTICO	2,38	0,83	SUBCRÍTICO
0+800	1,20	0,40	SUBCRÍTICO	3,21	1,06	SUPERCRÍTICO	4,23	1,40	SUPERCRÍTICO
0+900	2,33	0,82	SUBCRÍTICO	6,25	2,20	SUPERCRÍTICO	8,22	2,89	SUPERCRÍTICO
1+000	1,62	0,55	SUBCRÍTICO	4,35	1,46	SUPERCRÍTICO	5,72	1,93	SUPERCRÍTICO
1+100	1,77	0,62	SUBCRÍTICO	4,75	1,67	SUPERCRÍTICO	6,24	2,20	SUPERCRÍTICO
1+200	2,37	1,06	SUPERCRÍTICO	6,35	2,85	SUPERCRÍTICO	8,35	3,75	SUPERCRÍTICO
1+300	2,27	1,01	SUPERCRÍTICO	6,09	2,70	SUPERCRÍTICO	8,02	3,56	SUPERCRÍTICO
1+400	2,29	1,09	SUPERCRÍTICO	6,14	2,91	SUPERCRÍTICO	8,08	3,83	SUPERCRÍTICO
1+500	2,52	1,36	SUPERCRÍTICO	6,77	3,65	SUPERCRÍTICO	8,90	4,80	SUPERCRÍTICO
1+600	2,30	1,24	SUPERCRÍTICO	6,17	3,33	SUPERCRÍTICO	8,11	4,39	SUPERCRÍTICO
1+700	0,70	0,28	SUBCRÍTICO	1,88	0,74	SUBCRÍTICO	2,48	0,98	SUBCRÍTICO
1+800	0,97	0,46	SUBCRÍTICO	2,59	1,24	SUPERCRÍTICO	3,41	1,63	SUPERCRÍTICO
1+900	1,42	0,63	SUBCRÍTICO	3,82	1,68	SUPERCRÍTICO	5,02	2,21	SUPERCRÍTICO
2+000	1,21	0,51	SUBCRÍTICO	3,23	1,37	SUPERCRÍTICO	4,25	1,81	SUPERCRÍTICO
2+100	2,25	1,67	SUPERCRÍTICO	6,02	4,48	SUPERCRÍTICO	7,92	5,90	SUPERCRÍTICO
2+200	2,69	2,32	SUPERCRÍTICO	7,22	6,23	SUPERCRÍTICO	9,50	8,19	SUPERCRÍTICO

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. Régimen del flujo para cada estacionamiento del tramo de estudio del río Guacalate para períodos de retorno de 50 y 100 años

TIEMPO DE RETORNO	50 AÑOS			100 AÑOS			500 AÑOS		
UNIDADES	Q (m³/s)			Q (m³/s)			Q (m³/s)		
CAUDAL	279,79			321,48			418,69		
ESTACIONAMIENTO	V (m/s)	FR	RÉGIMEN	V (m/s)	FR	RÉGIMEN	V (m/s)	FR	RÉGIMEN
0+100	5,30	1,71	SUPERCRÍTICO	6,09	1,96	SUPERCRÍTICO	327,91	105,62	SUPERCRÍTICO
0+200	15,78	8,49	SUPERCRÍTICO	18,13	9,76	SUPERCRÍTICO	110,07	59,23	SUPERCRÍTICO
0+300	8,83	4,01	SUPERCRÍTICO	10,15	4,61	SUPERCRÍTICO	196,68	89,33	SUPERCRÍTICO
0+400	6,01	3,31	SUPERCRÍTICO	6,91	3,80	SUPERCRÍTICO	289,01	159,20	SUPERCRÍTICO
0+500	2,09	0,67	SUBCRÍTICO	2,40	0,77	SUBCRÍTICO	831,78	266,87	SUPERCRÍTICO
0+600	3,41	1,36	SUPERCRÍTICO	3,92	1,57	SUPERCRÍTICO	509,18	203,60	SUPERCRÍTICO
0+700	2,80	0,97	SUBCRÍTICO	3,22	1,12	SUPERCRÍTICO	620,37	215,77	SUPERCRÍTICO
0+800	4,97	1,65	SUPERCRÍTICO	5,72	1,89	SUPERCRÍTICO	349,23	115,53	SUPERCRÍTICO
0+900	9,67	3,40	SUPERCRÍTICO	11,12	3,91	SUPERCRÍTICO	179,57	63,16	SUPERCRÍTICO
1+000	6,73	2,27	SUPERCRÍTICO	7,73	2,60	SUPERCRÍTICO	258,25	87,03	SUPERCRÍTICO
1+100	7,35	2,59	SUPERCRÍTICO	8,44	2,97	SUPERCRÍTICO	236,46	83,25	SUPERCRÍTICO
1+200	9,82	4,41	SUPERCRÍTICO	11,29	5,06	SUPERCRÍTICO	176,82	79,33	SUPERCRÍTICO
1+300	9,43	4,18	SUPERCRÍTICO	10,84	4,81	SUPERCRÍTICO	184,17	81,72	SUPERCRÍTICO
1+400	9,51	4,50	SUPERCRÍTICO	10,93	5,17	SUPERCRÍTICO	182,65	86,49	SUPERCRÍTICO
1+500	10,47	5,65	SUPERCRÍTICO	12,03	6,49	SUPERCRÍTICO	165,90	89,46	SUPERCRÍTICO
1+600	9,54	5,16	SUPERCRÍTICO	10,97	5,93	SUPERCRÍTICO	182,01	98,42	SUPERCRÍTICO
1+700	2,92	1,15	SUPERCRÍTICO	3,35	1,32	SUPERCRÍTICO	595,65	234,77	SUPERCRÍTICO
1+800	4,02	1,91	SUPERCRÍTICO	4,61	2,20	SUPERCRÍTICO	432,60	206,28	SUPERCRÍTICO
1+900	5,91	2,60	SUPERCRÍTICO	6,79	2,99	SUPERCRÍTICO	293,84	129,20	SUPERCRÍTICO
2+000	5,00	2,13	SUPERCRÍTICO	5,75	2,44	SUPERCRÍTICO	347,24	147,55	SUPERCRÍTICO
2+100	9,32	6,94	SUPERCRÍTICO	10,71	7,97	SUPERCRÍTICO	186,37	138,69	SUPERCRÍTICO
2+200	11,17	9,64	SUPERCRÍTICO	12,84	11,07	SUPERCRÍTICO	155,49	134,13	SUPERCRÍTICO

Fuente: elaboración propia.

El programa HEC-RAS permite únicamente el ingreso de tres tipos de régimen: subcrítico, supercrítico y mixto. Por lo que para el período de retorno de dos años, el régimen es subcrítico; para los períodos de retorno de diez, veinticinco, cincuenta y cien años, el régimen es mixto y finalmente, para el período de retorno de quinientos años, el régimen es supercrítico.

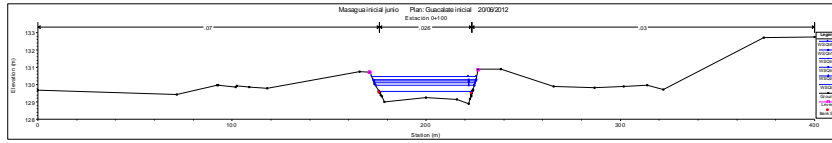
3.4. Realización de simulaciones, aplicado al tramo del río Guacalate ubicado al costado del municipio de Masagua

A continuación se presenta la simulación realizada con el programa HEC-RAS, donde se puede observar los niveles de agua para las crecidas máximas del tramo en estudio; en los períodos de retorno establecidos. Con este ejercicio se determinó las áreas, que por su topografía, son vulnerables a inundación.

3.4.1. Resultado de la simulación en las secciones transversales del río Guacalate para caudales con períodos de retorno de 2, 10, 25, 50, 100 y 500 años

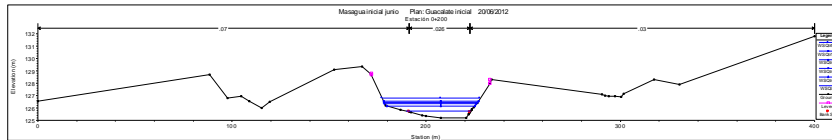
Con base en la simulación realizada, se observó que el río sale de su cauce natural a partir de la sección 0+300 hasta la sección 0+600 y de la sección 1+900 a la sección 2+050, en el margen izquierdo del río y de la sección 0+400 a la sección 0+700, en el margen derecho del río, para los períodos de retorno de 100 y 500 años. Para los periodos de retorno de 2,10, 25 y 50 años, el cauce es suficientemente grande para que no existan desbordes. A continuación se presentan las gráficas de la simulación hidráulica del tramo, a través de secciones transversales a cada 100 metros.

Figura 14. Simulación hidráulica en la sección 0+100



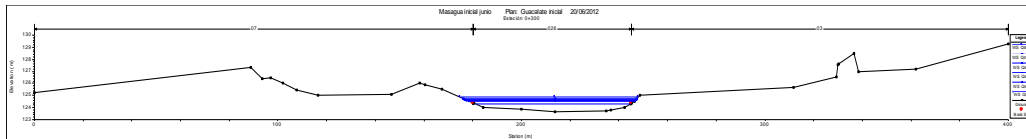
Fuente: elaboración propia.

Figura 15. Simulación hidráulica en la sección 0+200



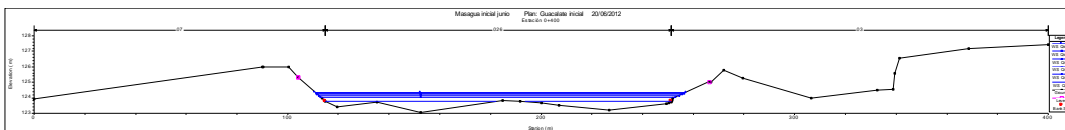
Fuente: elaboración propia.

Figura 16. Simulación hidráulica en la sección 0+300



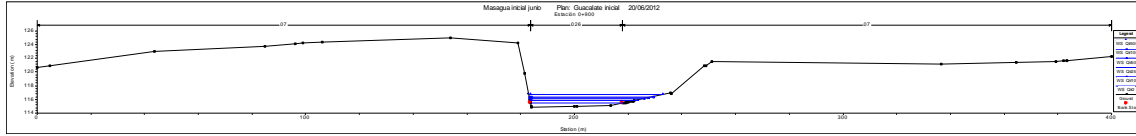
Fuente: elaboración propia.

Figura 17. Simulación hidráulica en la sección 0+400



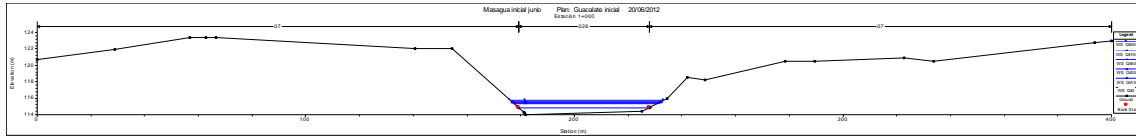
Fuente: elaboración propia.

Figura 22. Simulación hidráulica en la sección 0+900



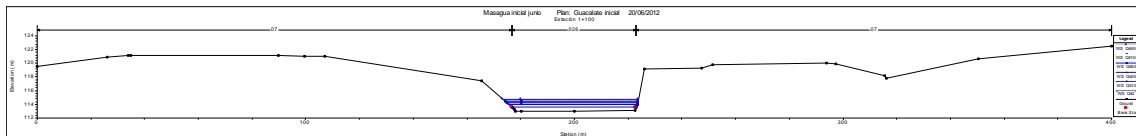
Fuente: elaboración propia.

Figura 23. Simulación hidráulica en la sección 0+1000



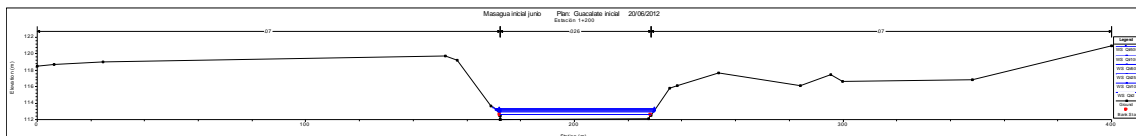
Fuente: elaboración propia.

Figura 24. Simulación hidráulica en la sección 0+1100



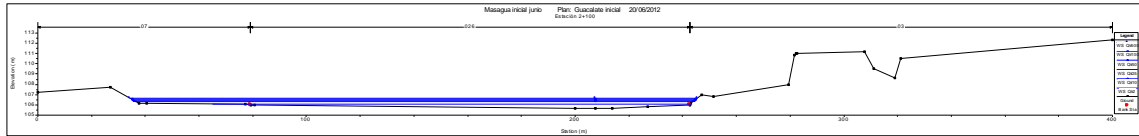
Fuente: elaboración propia.

Figura 25. Simulación hidráulica en la sección 0+1200



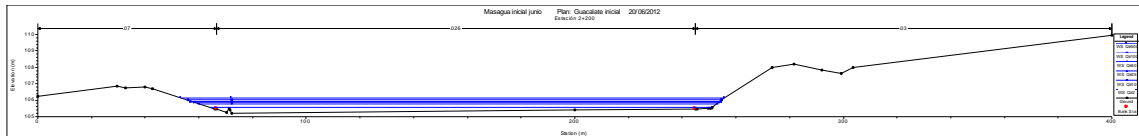
Fuente: elaboración propia.

Figura 34. Simulación hidráulica en la sección 0+2100



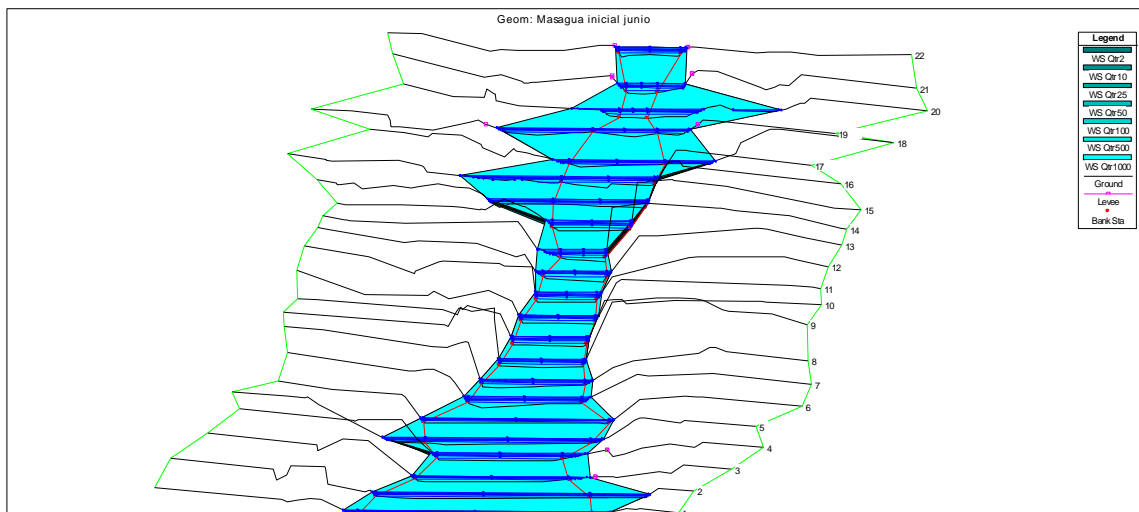
Fuente: elaboración propia.

Figura 35. Simulación hidráulica en la sección 0+2200



Fuente: elaboración propia.

Figura 36. Simulación hidráulica del perfil del cauce del río Guacalate para caudales con períodos de retorno de 2, 10, 25, 50, 100 y 500 años



Fuente: elaboración propia.

3.4.2. Resultado de las características hidráulicas del cauce, simulación para caudales con períodos de retorno de 2, 10, 25, 50, 100 y 500 años

De la simulación realizada con el programa HEC-RAS se generaron también las características hidráulicas en el cauce: caudal, elevación de la superficie del agua, velocidad, área de la sección, ancho de la superficie del agua y el número de Froude; para los períodos de retorno: 2, 10, 25, 50, 100 y 500 años. Estas características son la base para el diseño de las obras de protección del cauce del río en áreas de riesgo a inundación.

Tabla VII. Características hidráulicas del cauce del estacionamiento 0+100 a 0+200

ESTACIONAMIENTO	PERFIL	CAUDAL TOTAL (m³/s)	ELEVACIÓN SUPERFICIE DE AGUA (m)	VELOCIDAD DEL CANAL (m/s)	ÁREA DEL CANAL (m²)	ANCHO SUPERFICIE DE AGUA (m)	NÚMERO DE FROUDE
0+100	Qtr2	67,44	129,60	3,18	21,25	47,98	1,52
0+100	Qtr10	180,77	129,96	4,70	38,99	50,83	1,67
0+100	Qtr25	237,82	130,10	5,24	46,33	51,82	1,72
0+100	Qtr50	279,79	130,20	5,59	51,33	52,40	1,75
0+100	Qtr100	321,48	130,29	5,91	56,03	52,93	1,77
0+100	Qtr500	418,69	130,48	6,55	66,26	53,91	1,82
0+200	Qtr2	67,44	125,75	4,97	13,62	33,30	2,42
0+200	Qtr10	180,77	126,17	6,59	30,07	45,13	2,28
0+200	Qtr25	237,82	126,33	7,13	37,83	47,23	2,26
0+200	Qtr50	279,79	126,45	7,48	43,17	48,11	2,24
0+200	Qtr100	321,48	126,55	7,78	48,25	48,85	2,24
0+200	Qtr500	418,69	126,78	8,41	59,43	50,44	2,22

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Características hidráulicas del cauce del estacionamiento
0+300 a 0+600**

ESTACIONAMIENTO	PERFIL	CAUDAL TOTAL (m³/s)	ELEVACIÓN SUPERFICIE DE AGUA (m)	VELOCIDAD DEL CANAL (m/s)	ÁREA DEL CANAL (m²)	ANCHO SUPERFICIE DE AGUA (m)	NÚMERO DE FROUDE
0+300	Qtr2	67,44	124,28	2,41	27,97	63,33	1,16
0+300	Qtr10	180,77	124,53	4,09	44,42	68,10	1,58
0+300	Qtr25	237,82	124,62	4,74	50,63	69,56	1,73
0+300	Qtr50	279,79	124,68	5,17	54,78	70,52	1,81
0+300	Qtr100	321,48	124,73	5,57	58,67	71,40	1,89
0+300	Qtr500	418,69	124,85	6,39	67,08	73,28	2,04
0+400	Qtr2	67,44	123,76	1,74	38,74	124,92	1,00
0+400	Qtr10	180,77	124,04	2,36	76,99	139,86	1,00
0+400	Qtr25	237,82	124,16	2,56	93,58	142,23	0,99
0+400	Qtr50	279,79	124,23	2,70	104,55	143,78	0,99
0+400	Qtr100	321,48	124,29	2,89	112,66	144,91	1,02
0+400	Qtr500	418,69	124,36	3,45	123,27	146,38	1,17
0+500	Qtr2	67,44	120,96	4,00	16,87	68,60	2,57
0+500	Qtr10	180,77	121,20	5,21	37,96	111,33	2,44
0+500	Qtr25	237,82	121,29	5,63	48,16	113,66	2,41
0+500	Qtr50	279,79	121,35	5,85	55,61	115,33	2,37
0+500	Qtr100	321,48	121,42	5,97	63,74	117,13	2,29
0+500	Qtr500	418,69	121,60	6,03	84,79	122,09	2,07
0+600	Qtr2	67,44	120,48	2,04	34,39	89,77	0,96
0+600	Qtr10	180,77	120,88	2,67	75,30	118,94	0,92
0+600	Qtr25	237,82	121,05	2,85	96,54	132,82	0,90
0+600	Qtr50	279,79	121,14	3,00	109,15	137,07	0,90
0+600	Qtr100	321,48	121,20	3,22	117,31	139,75	0,95
0+600	Qtr500	418,69	121,40	3,43	145,98	148,79	0,93

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Características hidráulicas del cauce del estacionamiento
0+700 a 1+000**

ESTACIONAMIENTO	PERFIL	CAUDAL TOTAL (m³/s)	ELEVACIÓN SUPERFICIE DE AGUA (m)	VELOCIDAD DEL CANAL (m/s)	ÁREA DEL CANAL (m²)	ANCHO SUPERFICIE DE AGUA (m)	NÚMERO DE FROUDE
0+700	Qtr2	67,44	119,40	2,03	33,21	118,06	1,22
0+700	Qtr10	180,77	119,57	3,40	53,24	119,33	1,62
0+700	Qtr25	237,82	119,64	3,86	61,69	119,77	1,71
0+700	Qtr50	279,79	119,70	4,07	68,94	120,16	1,71
0+700	Qtr100	321,48	119,77	4,15	77,68	120,62	1,64
0+700	Qtr500	418,69	119,90	4,55	92,51	121,40	1,65
0+800	Qtr2	67,44	117,98	2,46	27,47	59,93	1,16
0+800	Qtr10	180,77	118,48	3,12	58,23	61,24	1,01
0+800	Qtr25	237,82	118,68	3,40	70,48	61,86	1,01
0+800	Qtr50	279,79	118,82	3,57	79,33	63,41	1,00
0+800	Qtr100	321,48	118,95	3,75	87,15	64,24	1,00
0+800	Qtr500	418,69	119,22	4,08	105,10	66,10	1,00
0+900	Qtr2	67,44	115,47	4,23	15,96	34,55	1,98
0+900	Qtr10	180,77	115,90	5,86	31,98	39,86	1,97
0+900	Qtr25	237,82	116,11	6,20	40,70	42,47	1,88
0+900	Qtr50	279,79	116,26	6,40	47,12	44,30	1,82
0+900	Qtr100	321,48	116,40	6,55	53,77	46,11	1,77
0+900	Qtr500	418,69	116,73	6,86	69,37	50,10	1,66
1+000	Qtr2	67,44	114,84	2,41	28,04	48,43	1,01
1+000	Qtr10	180,77	115,30	3,56	51,61	52,89	1,11
1+000	Qtr25	237,82	115,43	4,17	58,35	54,08	1,23
1+000	Qtr50	279,79	115,51	4,58	62,78	54,84	1,31
1+000	Qtr100	321,48	115,58	4,96	66,85	55,54	1,38
1+000	Qtr500	418,69	115,74	5,76	75,72	57,03	1,51

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Características hidráulicas del cauce del estacionamiento
1+100 a 1+400**

ESTACIONAMIENTO	PERFIL	CAUDAL TOTAL (m ³ /s)	ELEVACIÓN SUPERFICIE DE AGUA (m)	VELOCIDAD DEL CANAL (m/s)	ÁREA DEL CANAL (m ²)	ANCHO SUPERFICIE DE AGUA (m)	NÚMERO DE FROUDE
1+100	Qtr2	67,44	113,55	3,00	22,51	46,18	1,37
1+100	Qtr10	180,77	113,99	4,21	43,26	47,82	1,39
1+100	Qtr25	237,82	114,20	4,51	53,35	48,55	1,35
1+100	Qtr50	279,79	114,33	4,74	59,99	49,02	1,34
1+100	Qtr100	321,48	114,45	4,97	65,91	49,44	1,34
1+100	Qtr500	418,69	114,73	5,39	79,83	50,40	1,33
1+200	Qtr2	67,44	112,59	2,28	29,53	56,42	1,01
1+200	Qtr10	180,77	112,94	3,66	49,64	57,27	1,24
1+200	Qtr25	237,82	113,05	4,28	55,89	57,83	1,37
1+200	Qtr50	279,79	113,13	4,66	60,40	58,39	1,44
1+200	Qtr100	321,48	113,21	4,99	65,05	58,97	1,49
1+200	Qtr500	418,69	113,39	5,61	75,75	60,26	1,56
1+300	Qtr2	67,44	111,34	2,75	24,57	57,07	1,33
1+300	Qtr10	180,77	111,75	3,78	48,15	58,10	1,31
1+300	Qtr25	237,82	111,93	4,09	58,61	58,56	1,29
1+300	Qtr50	279,79	112,04	4,32	65,43	58,86	1,29
1+300	Qtr100	321,48	112,14	4,55	71,42	59,12	1,30
1+300	Qtr500	418,69	112,35	5,07	83,69	59,78	1,35
1+400	Qtr2	67,44	110,37	2,18	30,90	64,76	1,01
1+400	Qtr10	180,77	110,70	3,44	52,71	65,54	1,22
1+400	Qtr25	237,82	110,81	3,98	60,03	65,81	1,32
1+400	Qtr50	279,79	110,89	4,31	65,19	66,00	1,37
1+400	Qtr100	321,48	110,97	4,57	70,69	66,20	1,40
1+400	Qtr500	418,69	111,15	5,11	82,58	66,63	1,45

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Características hidráulicas del cauce del estacionamiento
1+500 a 1+800**

ESTACIONAMIENTO	PERFIL	CAUDAL TOTAL (m³/s)	ELEVACIÓN SUPERFICIE DE AGUA (m)	VELOCIDAD DEL CANAL (m/s)	ÁREA DEL CANAL (m²)	ANCHO SUPERFICIE DE AGUA (m)	NÚMERO DE FROUDE
1+500	Qtr2	67,44	109,50	2,08	32,36	79,10	1,04
1+500	Qtr10	180,77	109,85	2,99	60,91	81,94	1,09
1+500	Qtr25	237,82	109,99	3,30	72,69	83,11	1,11
1+500	Qtr50	279,79	110,08	3,54	80,00	83,85	1,13
1+500	Qtr100	321,48	110,15	3,79	86,07	84,46	1,17
1+500	Qtr500	418,69	110,30	4,32	98,60	85,71	1,25
1+600	Qtr2	67,44	108,98	1,96	34,45	86,68	0,99
1+600	Qtr10	180,77	109,34	2,74	66,29	90,09	1,01
1+600	Qtr25	237,82	109,50	2,98	80,70	91,59	0,99
1+600	Qtr50	279,79	109,61	3,14	90,23	92,57	0,99
1+600	Qtr100	321,48	109,70	3,28	99,40	93,50	0,99
1+600	Qtr500	418,69	109,92	3,59	119,29	95,90	0,99
1+700	Qtr2	67,44	108,39	1,68	40,35	143,24	1,00
1+700	Qtr10	180,77	108,64	2,36	77,09	145,18	1,03
1+700	Qtr25	237,82	108,69	2,82	85,02	145,59	1,17
1+700	Qtr50	279,79	108,73	3,13	90,14	145,88	1,26
1+700	Qtr100	321,48	108,77	3,40	95,45	146,23	1,33
1+700	Qtr500	418,69	108,85	3,95	107,35	146,95	1,46
1+800	Qtr2	67,44	107,45	1,73	41,38	148,31	1,00
1+800	Qtr10	180,77	107,69	2,53	78,82	158,51	1,09
1+800	Qtr25	237,82	107,83	2,63	101,00	161,37	1,02
1+800	Qtr50	279,79	107,89	2,86	109,74	162,49	1,06
1+800	Qtr100	321,48	107,98	2,89	125,98	164,54	1,01
1+800	Qtr500	418,69	108,14	3,15	152,00	167,77	1,01

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Características hidráulicas del cauce del estacionamiento
1+900 a 2+200**

ESTACIONAMIENTO	PERFIL	CAUDAL TOTAL (m³/s)	ELEVACIÓN SUPERFICIE DE AGUA (m)	VELOCIDAD DEL CANAL (m/s)	ÁREA DEL CANAL (m²)	ANCHO SUPERFICIE DE AGUA (m)	NÚMERO DE FROUDE
1+900	Qtr2	67,44	107,35	1,91	35,35	95,56	1,00
1+900	Qtr10	180,77	107,69	2,64	69,69	104,09	1,00
1+900	Qtr25	237,82	107,83	2,88	84,91	107,70	0,99
1+900	Qtr50	279,79	107,94	3,02	96,01	110,25	0,99
1+900	Qtr100	321,48	108,03	3,17	106,03	112,51	0,99
1+900	Qtr500	418,69	108,23	3,45	129,05	117,53	0,98
2+000	Qtr2	67,44	106,33	1,91	35,28	108,77	1,07
2+000	Qtr10	180,77	106,55	3,01	60,11	119,36	1,34
2+000	Qtr25	237,82	106,63	3,43	69,64	123,23	1,42
2+000	Qtr50	279,79	106,68	3,71	76,03	125,75	1,48
2+000	Qtr100	321,48	106,73	3,94	82,81	128,37	1,51
2+000	Qtr500	418,69	106,85	4,41	97,53	133,89	1,56
2+100	Qtr2	67,44	106,08	1,60	42,31	177,93	1,01
2+100	Qtr10	180,77	106,32	2,18	90,54	207,14	0,99
2+100	Qtr25	237,82	106,41	2,38	110,23	208,30	0,99
2+100	Qtr50	279,79	106,47	2,52	123,43	209,07	0,99
2+100	Qtr100	321,48	106,53	2,64	136,06	209,79	1,00
2+100	Qtr500	418,69	106,67	2,87	164,45	211,40	0,99
2+200	Qtr2	67,44	105,57	1,55	43,99	187,15	1,00
2+200	Qtr10	180,77	105,79	2,14	86,18	193,07	1,00
2+200	Qtr25	237,82	105,88	2,34	104,18	195,54	1,00
2+200	Qtr50	279,79	105,95	2,47	116,63	197,23	1,00
2+200	Qtr100	321,48	106,01	2,59	128,08	198,78	1,00
2+200	Qtr500	418,69	106,14	2,82	154,02	202,42	1,00

Fuente: elaboración propia.

4. PROPUESTA DE LA OBRA DE PROTECCIÓN

4.1. Descripción de las obras de protección

La obra de protección del cauce de un río, consiste en estructuras, ya sean transversales al cauce: represas, o longitudinales, ubicadas en las márgenes del río, con el fin de reducir el riesgo de inundación, erosión y/o socavación de la infraestructura y áreas de trabajo cercanas. Estas pueden ser revestimientos naturales o artificiales en los taludes del cauce, bordas de roca, bordas revestidas con morteros, espigones, diques de concreto armado y gaviones, etcétera.

La obra de protección del río Guacalate, en el tramo cercano a Masagua, es necesaria para reducir el riesgo de pérdidas económicas y humanas al momento de una crecida mayor a la que el cauce actual puede transportar.

4.1.1. Bordas

Las bordas son estructuras que se construyen a lo largo de los ríos, con el fin de confinar el escurrimiento que sobresale de las márgenes durante las crecidas, protegiendo la llanura de inundación contra su desbordamiento.

La ubicación de una borda se determina a partir de las llanuras de inundación; el diseño de bordas tiene que tomar en cuenta la mecánica de ríos, pero al mismo tiempo la construcción de bordas afecta el régimen del flujo del río.

Cuando un río no está protegido por bordas, la velocidad del caudal de descarga se reduce a medida que el agua se extiende sobre un área más extendida y los sedimentos en suspensión acarreados tienden a depositarse en el fondo de estos cauces; si el río está protegido por bordas, tiene la tendencia a elevar el nivel del agua y a aumentar la velocidad del flujo. Estos efectos aumentan su capacidad erosiva, por lo que el diseño debe considerar tales efectos y para ello es importante conocer los mecanismos de interacción entre ríos y bordos.

4.1.2. Bordas revestidas de roca

Este tipo de bordas se conocen como enrocados o “rip rap”, y se puede describir como una borda con una capa de roca, depositada para evitar la erosión de la misma. Este tipo de estructura es flexible debido a que las partículas individuales actúan independientemente de la masa.

Al igual que en el caso de las bordas tradicionales, la ubicación de una borda revestida de roca se determina a partir de las llanuras de inundación, teniendo menor importancia las condiciones de terreno de cimentación; sin embargo, en algunos casos es importante que se coloque al pie de la borda un cimiento conformado de la misma roca, para evitar el asentamiento de esta en este punto.

4.1.3. Espigones

Son estructuras colocadas perpendicularmente al sentido de la corriente, con un extremo unido al margen del río. El propósito de estas estructuras consiste en alejar de la orilla las líneas de corriente con alta velocidad, y evitar así que el material del margen se erosione.

4.1.4. Análisis del caso

La problemática que surge debido a las crecidas del río Guacalate en Masagua, Escuintla, radica en la morfología y regímenes de lluvia de su cuenca. Debido a la morfología de la cuenca, en la parte alta de la misma, se generan crecientes en tiempos relativamente cortos; con base en los estudios realizados en el capítulo 2 de este documento, lo que repercute en la parte baja de la cuenca, donde se encuentra Masagua, ya que cuenta con un relieve plano y que genera llanuras de inundación con áreas extensas.

En el caso de Masagua, Escuintla, los niveles de inundación han repercutido en la pérdida de infraestructura y vivienda en años anteriores, por lo que se hacen necesarias las obras de protección en los márgenes del río Guacalate.

4.2. Propuesta

La población de la ciudad de Masagua, debido al crecimiento poblacional y a la falta de ordenamiento territorial, ha ubicado sus viviendas cercanas a las riberas del río Guacalate, lo que ha provocado que en ocasiones los niveles de inundación causados por crecidas del río dañen estas viviendas y pongan en riesgo las vidas de los habitantes de las mismas.

Debido a esto, la selección de obras de protección que se ubiquen en las márgenes del río son necesarias, en vez de optar por obras de protección transversales al río.

Por las altas velocidades alcanzadas en el río debido a los grandes caudales de crecidas, pueden descartarse las bordas como obra de protección

en el caso del río Guacalate, sin embargo la solución a este problema puede ser las bordas revestidas de roca, que pueden soportar grandes velocidades sin que los taludes de la borda se erosionen.

4.3. Diseño de las obras hidráulicas

Para realizar el diseño de bordas revestidas fue necesario determinar el período de duración de la obra, tipo de flujo en las áreas a proteger, la geometría de la sección transversal original, la extensión de la protección, la altura de la borda, las especificaciones técnicas de la roca a utilizarse, y la profundidad del pie de la borda en el cauce.

4.3.1. Período de duración de la obra

“El período de duración de las obras estructurales contiguas a cualquier río y cuerpos de agua, por lo general, tienen un intervalo de duración entre 10 a 20 años. En la mayoría de casos, estos períodos de duración se aplican también al revestimiento de roca y otros tipos de revestimientos” (Maza Álvarez, 2012).

4.3.2. Tipos de flujo

Los flujos en canales abiertos pueden ser clasificados desde tres puntos de vista. Estos tres puntos de vista que son: el flujo uniforme, que varía de manera gradual y flujo no uniforme que varía rápidamente; el flujo permanente y no permanente y los regímenes de flujo discutidos en el capítulo 3 de este documento: subcrítico, crítico y supercrítico.

El diseño está basado en el caso que presenta el río Guacalate y que ha sido determinado en el capítulo 3 de este documento.

Se determinó que este río tiene un flujo uniforme, permanente y con un régimen que varía para diversos períodos de retorno, en su mayoría, entre régimen subcrítico y supercrítico.

4.3.3. Geometría de la sección transversal original

El diseño de este tipo de obra de protección requiere del análisis de la geometría de las secciones transversales del río. Las secciones transversales del río son necesarias para establecer los parámetros hidráulicos como el tirante del flujo, el ancho de la lámina de agua, velocidad, radio hidráulico, etc.

La selección de una sección transversal en el río para el análisis es muy subjetiva. Debe intentarse seleccionarla con condiciones originales que simulen razonablemente la peor condición respecto de la estabilidad de la borda y el revestimiento de roca. Un problema que puede surgir en el intento de la selección de una sección transversal para el análisis de la sección típica es el de intentar establecer el lecho del río para el diseño. Una superficie de un canal en un lugar de interés puede proveer la geometría necesaria.

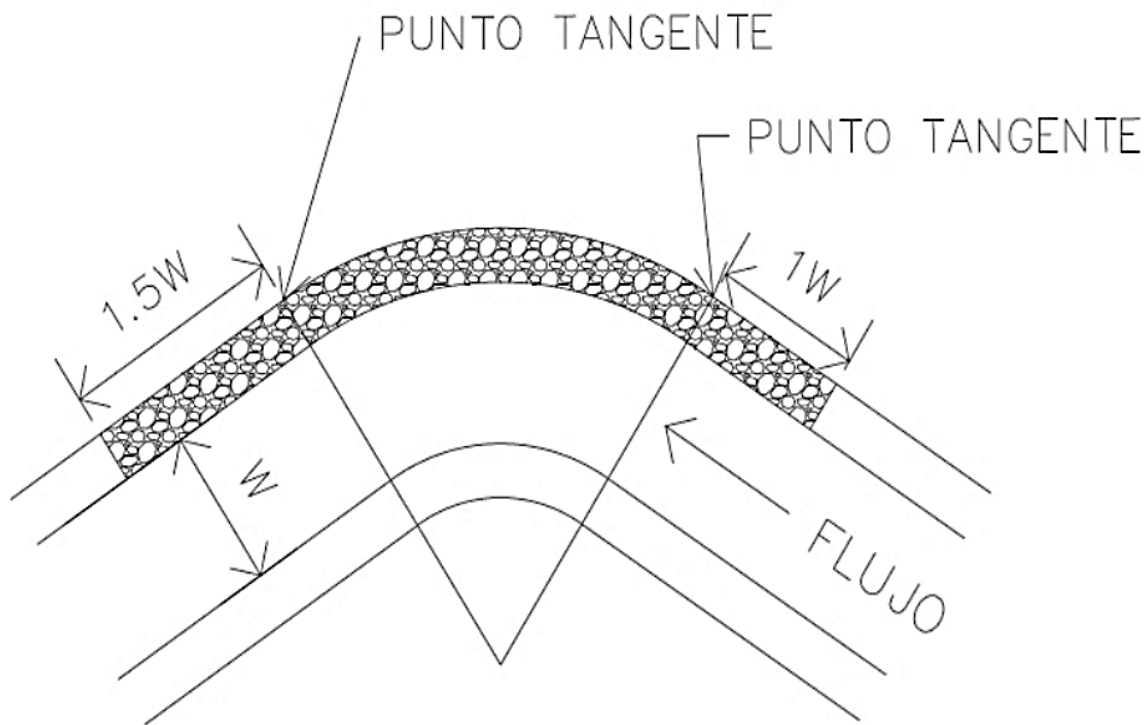
4.3.4. Extensión de la protección

La longitud de protección requerida por un banco de protección en particular, depende mucho de las condiciones del lugar. En general, un revestimiento debería ser continuo para una distancia mayor que la longitud que se ve afectada por la fuerza del flujo del canal que puede causar un desprendimiento. Uno de los criterios para establecer los límites longitudinales de protección en una curva es el que se ilustra en la figura 37; esta muestra las

distancias mínimas recomendadas para una protección, tomando en consideración el ancho del río.

Todas las líneas de referencia pasan a través de las tangentes a la curva en la entrada o salida de una curvatura.

Figura 37. **Extensión longitudinal de la protección en un cauce**



Fuente: Hydraulic Engineering. Design of rip rap revetment, circular No. 11, 1989.

Este criterio se basa en el análisis de las condiciones de flujo en curvas de los canales simétricos bajo condiciones ideales de laboratorio. Condiciones reales rara vez son tan simples. Un diseñador puede encontrar el criterio anterior, difícil de aplicar en longitudes ligeramente curvas o en canales que tienen longitudes muy irregulares, o que no tienen curvas simétricas. Por lo tanto los criterios anteriores solo deben ser utilizados como un punto de partida.

En este caso existen tres tramos de protección, indicados en el plano número 3, el río tiende a salir de su cauce natural en los puntos indicados anteriormente.

El tramo TR1 tiene una longitud de 299,51 m y según las recomendaciones de la extensión longitudinal, TR1 tiene una longitud de un ancho promedio aguas abajo de 50,13 m y aguas arriba de 75,20 m. Por lo que al tramo TR1 se le consideró una longitud total de 424,84 m.

El tramo TR2 tiene una longitud de 316,59 m y según las recomendaciones de la extensión longitudinal, TR2 tiene una longitud de un ancho promedio de 50,13 m y aguas arriba de 75,20 m. Por lo que al tramo TR2 se le consideró una longitud total de 441,92 m.

El tramo TR3 tiene una longitud de 250,13 m y según las recomendaciones de la extensión longitudinal, TR3 tiene una longitud de un ancho promedio 112,80 m y aguas arriba de 169,20 m. Por lo que al tramo TR3 se le consideró una longitud total de 532,13m.

La ubicación de los tramos TR1, TR2 y TR3 se indican en el plano No. 4.

4.3.5. Altura de la borda

La altura de la borda se determinó por la altura de la lámina de agua de la crecida, la que se estimó mediante la simulación hidráulica con el programa HEC-RAS más una altura de borda libre. La borda libre se provee para asegurar un grado de protección por la acción de las olas (por el viento), saltos hidráulicos, irregularidades del flujo debido a transiciones o intersecciones de flujo.

La altura de la borda libre no puede fijarse por una simple fórmula. El impacto de cada uno de los factores listados anteriormente deben ser considerados individualmente y su impacto en conjunto, para determinar una altura determinada de borda libre. Sin embargo, estos factores son difíciles de medir; por lo que pueden considerarse valores mínimos de 0,30 m a 0,60 m en tramos libres de restricciones y de 0,61 m a 0,90 m, para tramos con restricciones (transiciones o intersecciones de flujo).

En el tramo TR1 la borda típica tiene una altura de 2,40 m, tomando en consideración todas las secciones transversales, en las que la crecida dé un caudal de período de retorno de 100 años, el cual representa una altura del espejo de agua respecto del fondo de 1,80 m, más una altura de borda libre de 0,60 m.

En el tramo TR2 la borda típica tiene una altura de 1,95 m, tomando en consideración todas las secciones transversales, en las que la crecida dé un caudal de período de retorno de 100 años, el cual representa una altura del espejo de agua respecto del fondo de 1,35 m, más una altura de borda libre de 0,60 m.

En el tramo TR3 la borda típica tiene una altura de 1,75 m, tomando en consideración todas las secciones transversales, en las que la crecida dé un caudal de período de retorno de 100 años, el cual representa una altura del espejo de agua respecto del fondo de 0,65 m, más una altura de borda libre de 0,90 m.

4.3.6. Tamaño de la roca

La estabilidad de una partícula en una borda en particular está en función de su tamaño, ya sea expresado en términos de su peso o diámetro equivalente. La efectividad de la roca de la protección depende del tamaño adecuado para el sitio donde ha sido instalada.

4.3.7. Ecuación de diseño

Una ecuación de diseño para la protección se basa en la teoría de la fuerza de tracción; sin embargo, utiliza la velocidad como parámetro de diseño primario, como se demuestra en la ecuación 4.1, recomendada en *Design of riprap revetment*, capítulo 4, por la *US Army Corps of Engineers*, 1989.

$$D_{50} = \frac{0.00594 V_a^3}{d_{avg}^{0.5} * k_1^{1.5}} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Donde:

D_{50} = tamaño promedio de la roca (m)

V_a = velocidad promedio en el canal principal (m/s)

d_{avg} = profundidad promedio de flujo en el canal principal (m)

K_1 = constante adimensional que está dada por la fórmula 4.2

$$K1 = [1 - (\sin_2 \theta / \sin_2 \Phi)]^{0.5} \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Donde:

Θ = ángulo de la borda con la horizontal

Φ = ángulo de reposo de la roca

El diámetro promedio de la roca en el tramo TR1 es de un metro (1 m), obtenido a través de las fórmulas 4.1 y 4.2, tramo que tiene las siguientes características: velocidad promedio en el canal principal de 4,27 m/s; profundidad promedio del flujo en el canal principal de 0,8461 m; ángulo de la borda con la horizontal de treinta grados (30°) y un ángulo de reposo de la roca de cuarenta grados (40°) (Sotelo Ávila, 1994)

El diámetro promedio de la roca en el tramo TR2 es de 1,20 m, obtenido a través de las fórmulas 4.1 y 4.2, tramo que tiene las siguientes características: velocidad promedio en el canal principal de 4,41 m/s; profundidad promedio del flujo en el canal principal de 0,7457 m; ángulo de la borda con la horizontal de treinta grados (30°) y un ángulo de reposo de la roca de cuarenta grados (40°). (Sotelo Ávila, 1994)

El diámetro promedio de la roca en el tramo TR3 es de 0,50 m; obtenido a través de las fórmulas 4.1 y 4.2, tramo que tiene las siguientes características: velocidad promedio en el canal principal de 3,34 m/s; profundidad promedio del flujo en el canal principal de 0,8138 m; ángulo de la borda con la horizontal de treinta grados (30°) y un ángulo de reposo de la roca de cuarenta grados (40°) (Sotelo Ávila, 1994).

4.3.8. Diseño de filtro

Un filtro es una capa de transición de grava, rocas pequeñas o tejido situado entre el suelo subyacente y la estructura. El filtro evita la ascensión de las partículas finas del suelo a través de huecos en la estructura, distribuye el peso de estructura de enrocado para proporcionar un asentamiento uniforme y permite el alivio de presiones hidrostáticas dentro de los suelos.

El diseño apropiado de un filtro de tipo granular es crítico para la estabilidad de la capa de roca en un canal.

Si las aberturas en el filtro son demasiado grandes, el flujo excesivo que atraviesa el filtro puede provocar erosión y fallo del material de la borda debajo del filtro.

Por otro lado, si las aberturas en el filtro son demasiado pequeñas, la acumulación de presiones hidrostáticas tras el filtro, pueden provocar un deslizamiento plano a lo largo del filtro que resulta en un fallo de tipo deslizamiento transversal.

Según el manual *Design rip rap revetment HEC 11*, de *US Army Corps of Engineers* (1989), el diámetro promedio de la roca de filtro deberá ser equivalente al 15 % del diámetro promedio de la roca de revestimiento de la borda.

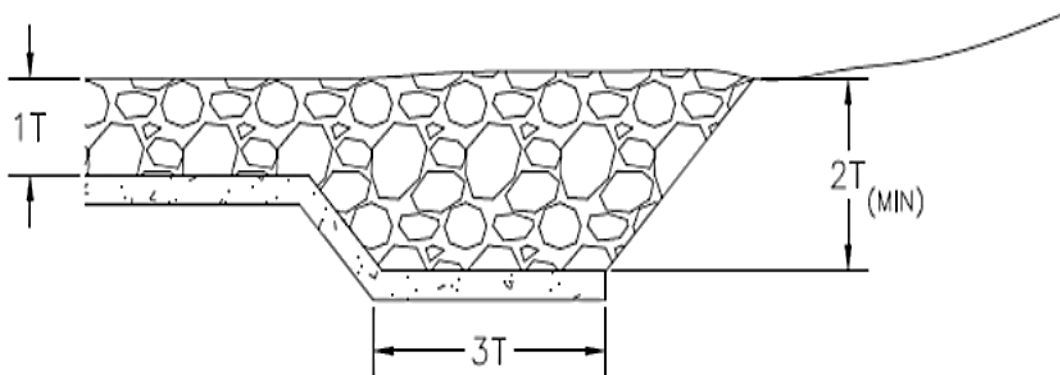
Lo que significa que para el tramo TR1 el diámetro promedio de la roca de filtro es de 0,15 m, para el tramo TR2 el diámetro promedio es de 0,18 m y para el tramo TR3 el diámetro promedio es de 0,07 m.

4.3.9. Profundidad del pie

El debilitamiento de la protección de revestimiento de los pies ha sido identificado como uno de los mecanismos principales de insuficiencia de las bordas revestidas. En el diseño de la protección de las orillas, las estimaciones de la profundidad de socavación son necesarias para que la capa de protección se coloque suficientemente profunda en el lecho del río para evitar socavación. La profundidad máxima de socavación debe tener en cuenta la degradación del canal, así como la erosión natural y la deposición de sedimentos.

Según el manual *Design rip rap revetment HEC 11*, de *US Army Corps of Engineers* (1989), una base o pie típico debe tener las dimensiones que se ilustran en la figura 38, en donde T representa el espesor de la capa de roca de la borda.

Figura 38. Base o pie de características típicas

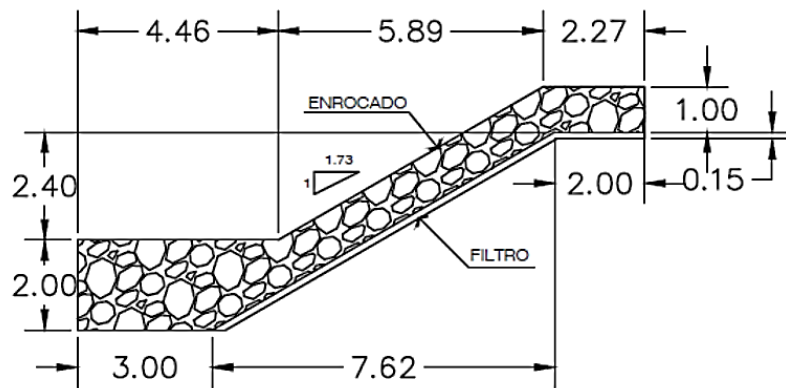


Fuente: U.S. Army Corps of Engineers. Design of rip rap revetment. circular No. 11, 1989.

4.3.10. Sección típica

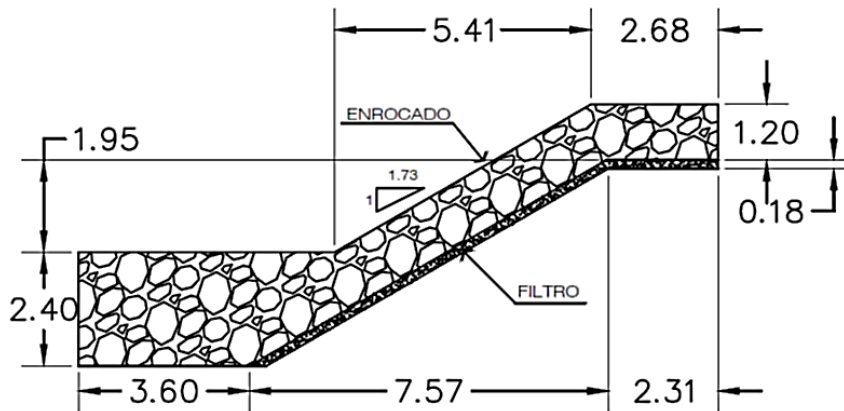
Los detalles de la sección típica del tramo TR1, TR2 y TR3 se representan en las figuras 40, 41 y 42, respectivamente, y en el plano No. 4.

Figura 39. **Sección típica del tramo TR1**



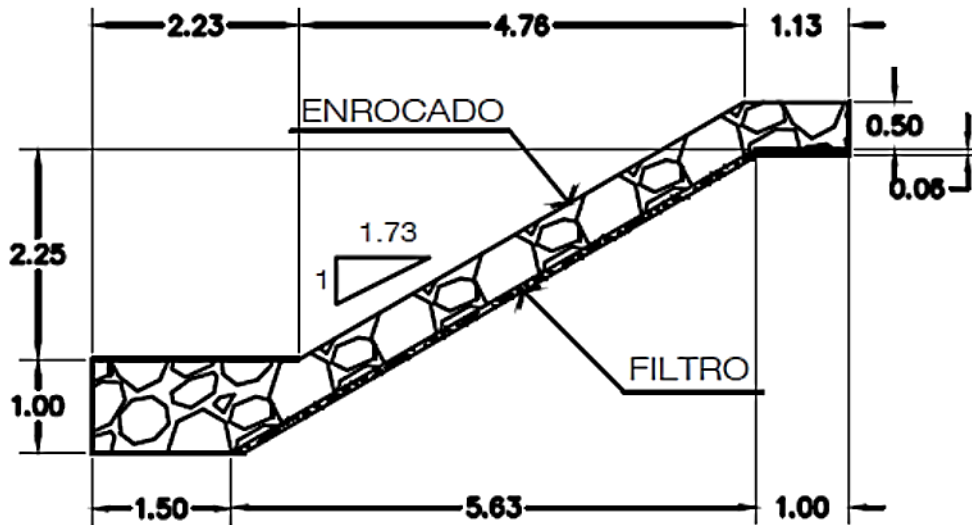
Fuente: elaboración propia.

Figura 40. **Sección típica del tramo TR2**



Fuente: elaboración propia.

Figura 41. Sección típica del tramo TR3



Fuente: elaboración propia.

4.3.11. Especificaciones técnicas de la roca

Antes de colocar la roca se deben efectuar los trabajos de excavación y colocación del filtro indicado en los planos. La roca se debe colocar con una orientación estable, con un mínimo de vacíos, de tal forma que se produzca un patrón aleatorio en la colocación.

Se deben utilizar fragmentos de roca con un tamaño menor que el tamaño mínimo de la roca, para acuñar las rocas más grandes fijamente en su posición y para llenar los vacíos existentes entre las rocas grandes. El rostro expuesto de la masa de roca debe quedar razonablemente uniforme, sin proyecciones, extendiéndose fuera de la alineación de la pendiente.

La fuente de la roca debe ser seleccionada anticipadamente al momento que la roca sea requerida en la obra. Algunas otras especificaciones técnicas que debería cumplir son:

- **Peso específico de la roca:** se denomina peso específico de un mineral al cociente entre su peso y el peso de un volumen equivalente de agua a 4C (condiciones de máxima densidad del agua), siendo un valor adimensional. Cada mineral tiene un peso definido por centímetro cúbico; este peso característico se describe generalmente comparándolo con el peso de un volumen igual en agua; el número resultante es lo que se llama peso específico del mineral. El peso específico mínimo de la roca debe ser 2,48 (adimensional)
- **Ensayo de abrasión:** para las rocas será requerido el ensayo de abrasión con la máquina de Los Ángeles (AASHTO T96), como resultado de dicho ensayo el porcentaje de pérdida de la roca no debe ser mayor de 40 % después de 500 revoluciones.
- **Ensayo de resistencia a sulfatos:** en localizaciones donde la roca estará expuesta a aguas salitrosas, debe usarse el ensayo de resistencia a sulfatos (AASHTO T 104 para roca expuesta, usando sulfato de sodio).

4.4. Conservación de la obra

La obra de protección propuesta está propensa a desgaste, asentamiento, y a ser arrastrada por el río Guacalate; este tipo de obra hidráulica, a pesar de tener teóricamente un período de vida de hasta 20 años.

En la realidad puede tener un período de vida mucho más corto, debido a causas muy diversas como el robo del material de recubrimiento, el arrastre de basura de gran tamaño del río, etc.

La conservación de esta obra en particular deberá consistir primeramente de la colocación de una capa de material para siembra de gramínea; debe asegurarse que esta crezca hasta que exista cobertura sobre toda la superficie de la obra. Adicionalmente, deben realizarse inspecciones trimestrales para verificar que la roca esté en su sitio; de lo contrario deberá reponerse con roca de iguales dimensiones.

5. RECTIFICACIÓN HIDRÁULICA DE LAS OBRAS DE PROTECCIÓN PROPUESTAS

5.1. Realización de simulaciones del modelo HEC-RAS con las estructuras propuestas

Utilizando las obras propuestas en el cauce del río Guacalate y ubicándolas en los tramos mencionados en el capítulo anterior y como se muestra en los planos Nos. 4, 5 y 6, se procedió nuevamente a realizar la simulación hidráulica.

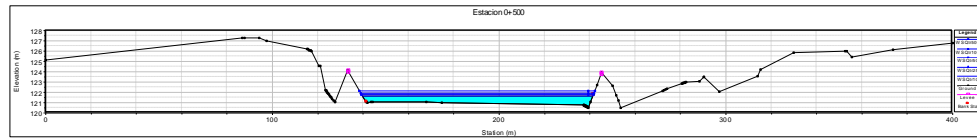
La simulación del río Guacalate ubicado al costado de Masagua, para caudales se realizó para los períodos de retorno de: 2, 10, 25, 50, 100 y 500 años.

5.1.1. Resultado gráfico de las secciones transversales del río Guacalate, en los estacionamientos 0+100 al 2+200

A continuación se presentan la simulación hidráulica con el programa HEC-RAS, del tramo del río Guacalate en estudio, con la implementación de las bordas revestidas de roca diseñadas como obra de protección, en las márgenes del mismo.

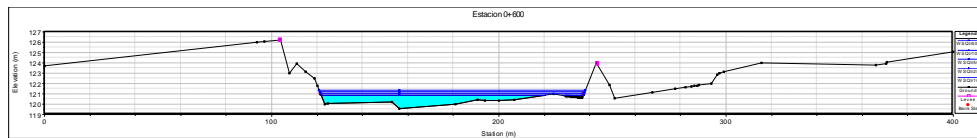
Se observa que el río mantiene su desplazamiento dentro del cauce, desde la estación 0+100 a la 2+200, y no se desborda para ninguno de los períodos de retorno definidos anteriormente; como se observó en la simulación descrita anteriormente, donde no existe la obra de protección.

Figura 46. **Simulación con las obras propuestas en la sección 0+500**



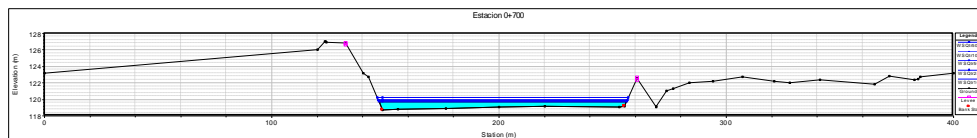
Fuente: elaboración propia.

Figura 47. **Simulación con las obras propuestas en la sección 0+600**



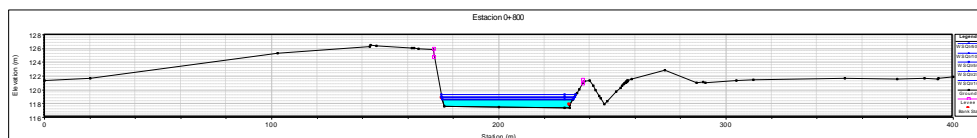
Fuente: elaboración propia.

Figura 48. **Simulación con las obras propuestas en la sección 0+700**



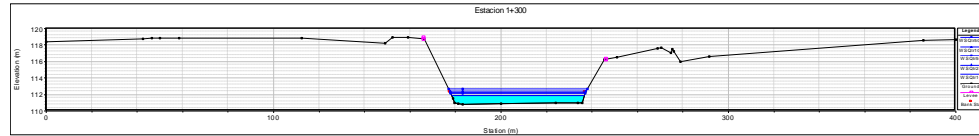
Fuente: elaboración propia.

Figura 49. **Simulación con las obras propuestas en la sección 0+800**



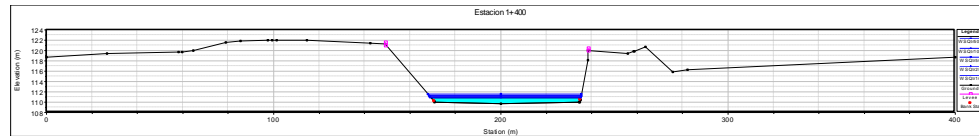
Fuente: elaboración propia.

Figura 54. **Simulación con las obras propuestas en la sección 1+300**



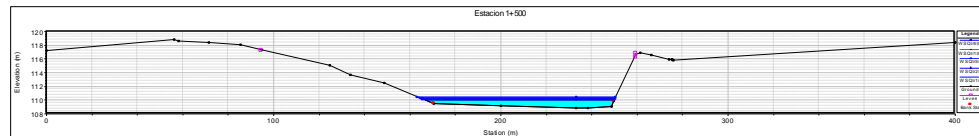
Fuente: elaboración propia.

Figura 55. **Simulación con las obras propuestas en la sección 1+400**



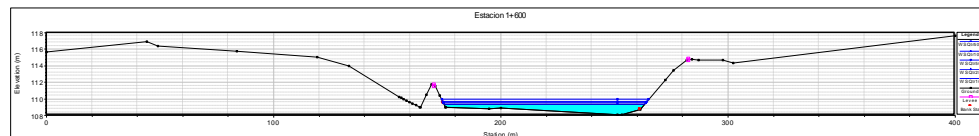
Fuente: elaboración propia.

Figura 56. **Simulación con las obras propuestas en la sección 1+500**



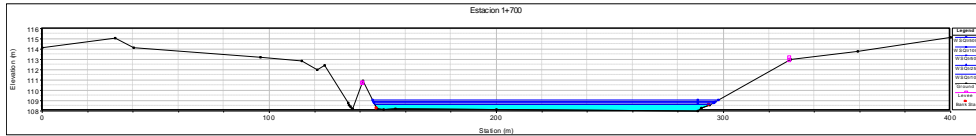
Fuente: elaboración propia.

Figura 57. **Simulación con las obras propuestas en la sección 1+600**



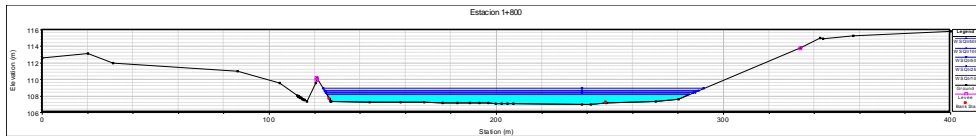
Fuente: elaboración propia.

Figura 58. **Simulación con las obras propuestas en la sección 1+700**



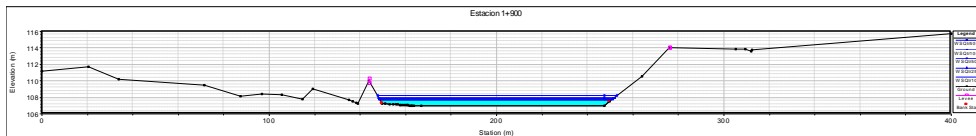
Fuente: elaboración propia.

Figura 59. **Simulación con las obras propuestas en la sección 1+800**



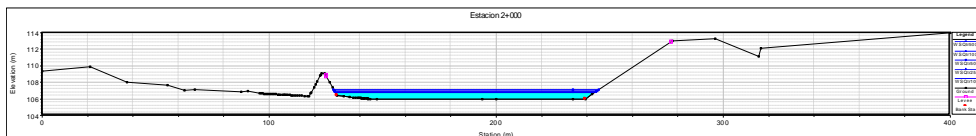
Fuente: elaboración propia.

Figura 60. **Simulación con las obras propuestas en la sección 1+900**



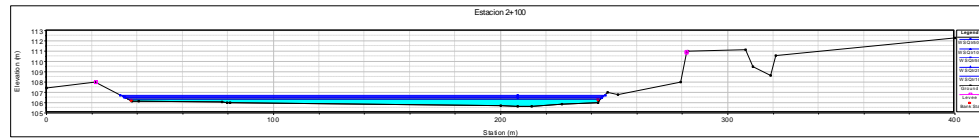
Fuente: elaboración propia.

Figura 61. **Simulación con las obras propuestas en la sección 2+000**



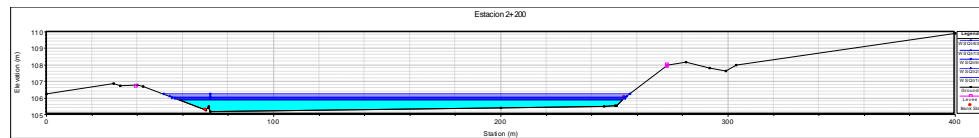
Fuente: elaboración propia.

Figura 62. **Simulación con las obras propuestas en la sección 2+100**



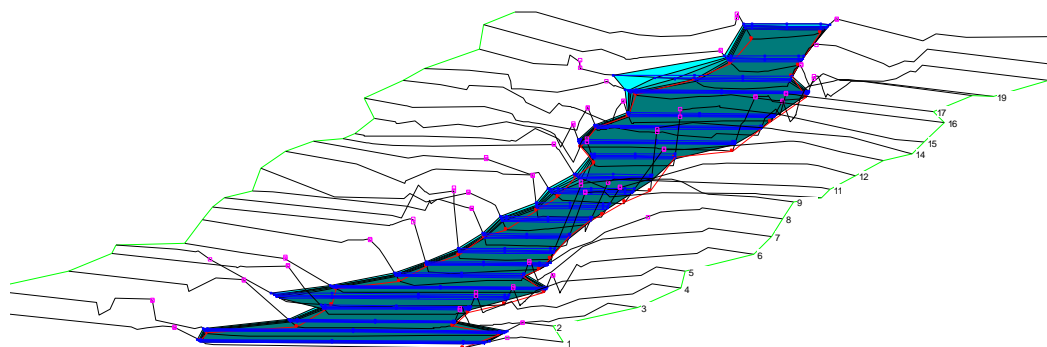
Fuente: elaboración propia.

Figura 63. **Simulación con las obras propuestas en la sección 2+200**



Fuente: elaboración propia.

Figura 64. **Resultado gráfico del perfil del cauce del río Guacalate, de la simulación con las obras propuestas en las secciones transversales 0+100 a 2+200**



Fuente: elaboración propia.

5.2. Conclusiones de la modelación hidráulica con el software HEC-RAS

A través de la simulación hidráulica realizada con el software HEC-RAS, se determinaron las llanuras de inundación y la altura del espejo de agua del río Guacalate para caudales de períodos de retorno de 2, 10, 25, 50, 100 y 500 años.

Como parte de los resultados de la simulación se determinan datos hidráulicos del río Guacalate como velocidad, régimen del flujo y energía específica del flujo.

Los resultados obtenidos en la simulación hidráulica son determinantes para el diseño de cualquier obra hidráulica; en este caso fueron de utilidad para el diseño de bordas con recubrimiento de roca. La velocidad del flujo fue utilizada para la determinación del diámetro del recubrimiento de rocas; la altura del espejo de agua fue utilizada para el diseño geométrico de la borda, y las gráficas de las secciones transversales después de la simulación determinaron la ubicación de las obras.

Finalmente una simulación hidráulica con las obras propuestas en el cauce del río Guacalate demostró que para caudales de períodos de retorno de 2, 10, 25, 50, 100 y 500 años, se eliminan las áreas de inundación y el riesgo potencial de la población ubicada en las cercanías de las riberas del río Guacalate.

CONCLUSIONES

1. Guatemala es afectada de manera recurrente por eventos de tipo hidrometeorológico, como huracanes y lluvias intensas que provocan inundaciones y deslizamientos, ocurriendo el 60 % de estos, en la vertiente del Pacífico, siendo la más afectada del país.
2. Masagua, Escuintla se encuentra a un costado del río Guacalate, que pertenece a la cuenca del río Achiguate, de la vertiente del Pacífico y ha sido afectada en numerosas ocasiones por varios eventos hidrometeorológicos, entre los que vale la pena destacar las fuertes precipitaciones de junio de 2,009 que causaron el colapso del puente Jaime Botrán, que comunicaba las ciudades de Masagua con El Milagro y las tormentas Agatha en 2,010 y la 12-E en 2,011.
3. La propuesta hecha para la protección de la ciudad de Masagua de las inundaciones causadas por el río Guacalate, fue hecha mediante un estudio hidrológico e hidráulico de la cuenca y del tramo del río Guacalate a un costado de la ciudad. El estudio hidráulico fue realizado mediante el programa HEC-RAS del Centro de Ingeniería Hidrológica (*Hydrologic Engineering Center*) del cuerpo de ingenieros de la armada de los EE.UU.
4. Los estudios demostraron las áreas a los costados del río que son vulnerables y los niveles del río, a partir de simulaciones hechas con el programa, para caudales con periodos de retorno de 100 y 500 años.

Partiendo de los resultados de la simulación, se propone la construcción de 1399 m de borda revestida en tres puntos diferentes a lo largo del cauce.

5. El primer tramo ubicado en el margen derecho del río Guacalate, a 445 m del puente del ferrocarril, tiene una longitud de 424.84 m y una altura de 2.40 m, con un recubrimiento de roca de diámetro promedio 1 m, y una capa de filtro inmediatamente debajo de la roca, con un espesor de 0.15 m; el segundo tramo ubicado en el margen izquierdo del río se encuentra ubicado a 230 m del puente del ferrocarril, tiene una longitud de 316.59 m y una altura de 1.95 m, con un recubrimiento de roca de diámetro promedio 1.20 m y una capa de filtro con un espesor de 0.18 m; finalmente, el último tramo se encuentra ubicado en el margen izquierdo del río a 197 m del puente en construcción y tiene una longitud de 250.13 m y una altura de 1.75 m, con un recubrimiento de roca de diámetro promedio 0.50 m y una capa de filtro con un espesor de 0.07 m.
6. Se llevó a cabo una simulación con las obras propuestas localizadas en el río, para los mismos caudales y tiempos de retorno, que demuestra que las obras propuestas evitan la inundación de Masagua.

RECOMENDACIONES

1. Que la municipalidad de Masagua, Escuintla, elabore un programa de ordenamiento territorial para evitar que la población se establezca en las riberas del río Guacalate y de esta manera evitar el riesgo de crecidas del río.
2. Que la corporación municipal realice las gestiones pertinentes ante instituciones gubernamentales e instituciones, a efecto de obtener el financiamiento necesario para la ejecución del proyecto.
3. Cumplir con las especificaciones técnicas de los materiales y realizar los ensayos propuestos.
4. Colocar para la conservación de la obra una capa de material para siembra de gramínea; debe asegurarse que la gramínea crezca hasta que exista cobertura sobre toda la superficie de la obra.
5. Realizar inspecciones trimestrales de la obra para verificar que la roca esté en su sitio, de lo contrario deberá reponerse con roca de iguales características.
6. A la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos, fomentar este tipo de análisis en regiones que tienen alta probabilidad de inundaciones.

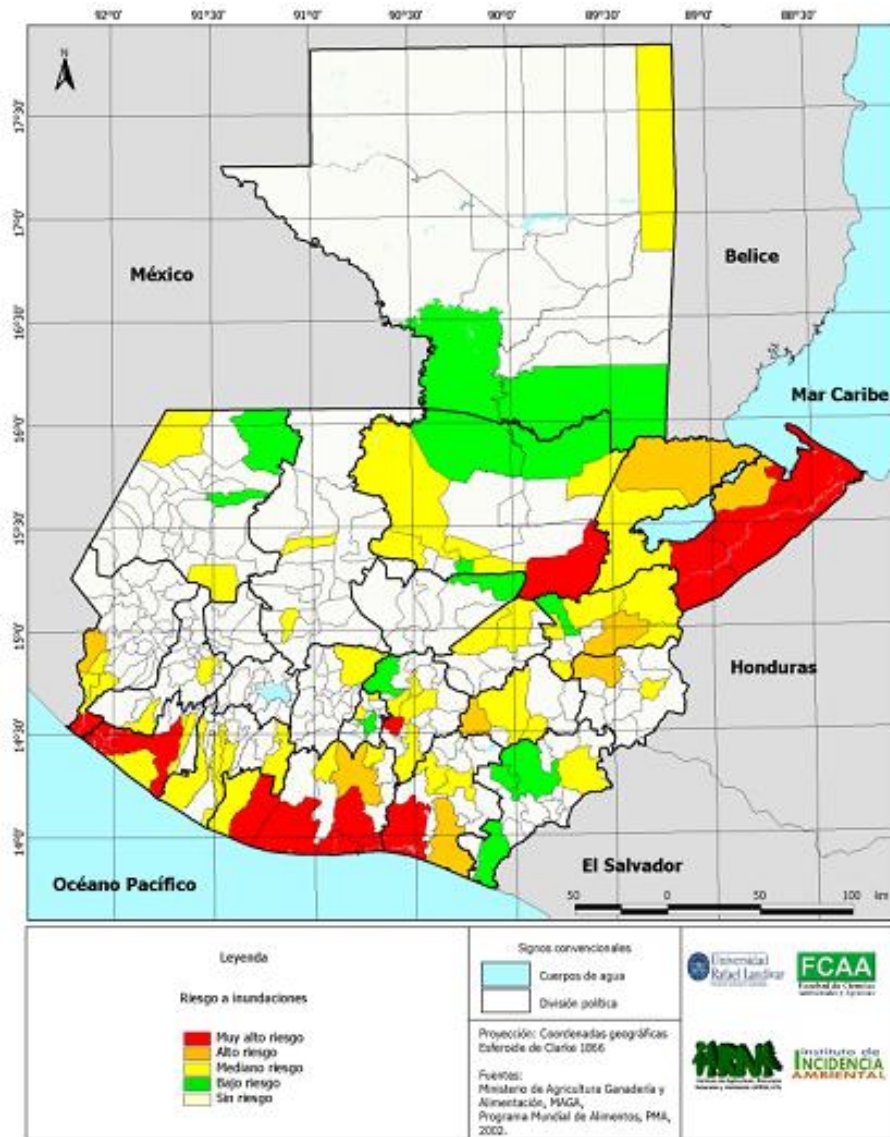
BIBLIOGRAFÍA

1. ANLEU FORTUNY, Rafael Ignacio. *Zonificación de la cuenca del río Achiguate-Guacalate: una propuesta de integración para la reducción del riesgo a desastres*. Trabajo de graduación de Ingeniería Agrónoma en Recursos Naturales Renovables. Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2008. 138 p.
2. Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente. *Perfil Ambiental de Guatemala, 2004*. Informe de estado del ambiente y bases para su evaluación sistemática, Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas, Universidad Rafael Landívar, Guatemala, 2004. 43 p.
3. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología INSIVUMEH. *Análisis regional de crecidas en la República de Guatemala*, Guatemala, 2004. 17 p.
4. LEONARDO NANIA, Emilio Morelo. *Manual básico de HEC-RAS 3.1.3 y HEC-GeoRAS 3.1.1. Curso de especialización de Modelación de ríos con HEC-RAS y SIG*. Área de Ingeniería Hidráulica y Área de Urbanismo y Ordenación del Territorio, Universidad de Granada, España, 1997. 59 p.

5. MAZA ÁLVAREZ, José Antonio. *Manual de ingeniería de ríos, estabilización y rectificación de ríos*. División de estudios de Postgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, 2012. 89 p.
6. OLGUÍN GÓMEZ, Saúl. Hidráulica de ríos. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Instituto Politécnico Nacional, México, 2009. 89 p.
7. SOTELO AVILA, Gilberto. *Apuntes de hidráulica, diseño hidráulico de obras*. Facultad de Ingeniería, México, UNAM, 1994. 647 p.
8. U.S. Army Corps of Engineers. *Design of rip rap revetment*. Hydraulic Engineering, Circular No. 11, 1989. 193 p.
9. ZAMORA LEANDRO, Ericka Patriciao. *Evaluación y propuesta de un sistema de alerta temprana para inundaciones en la parte baja de la cuenca del río Achiguate*. Trabajo de graduación, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2008. 166 p.

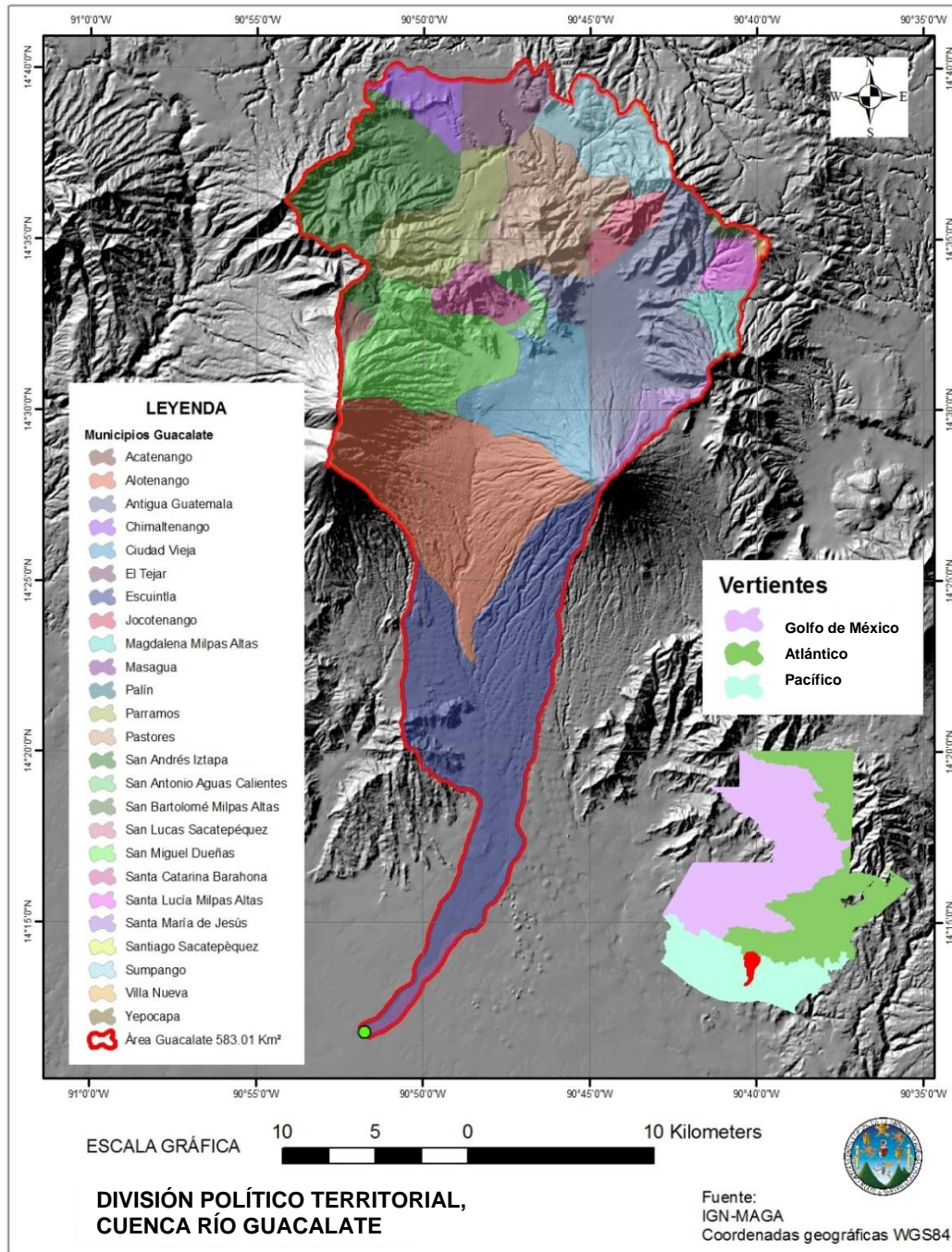
ANEXOS

Anexo 1. Mapa de riesgo a inundaciones



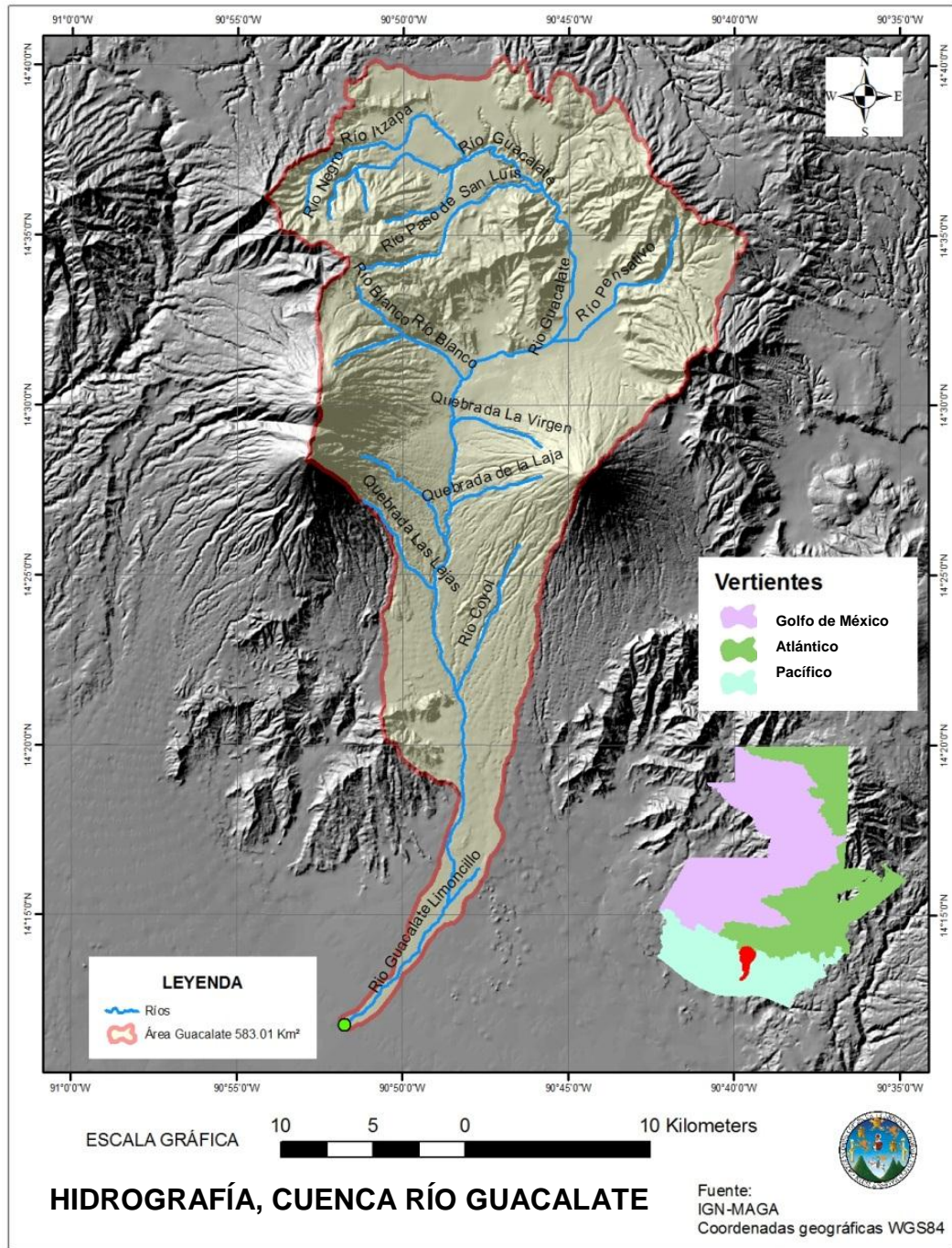
Fuente: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, MAGA, 2000.

Anexo 2. División político territorial, cuenca del río Guacalate



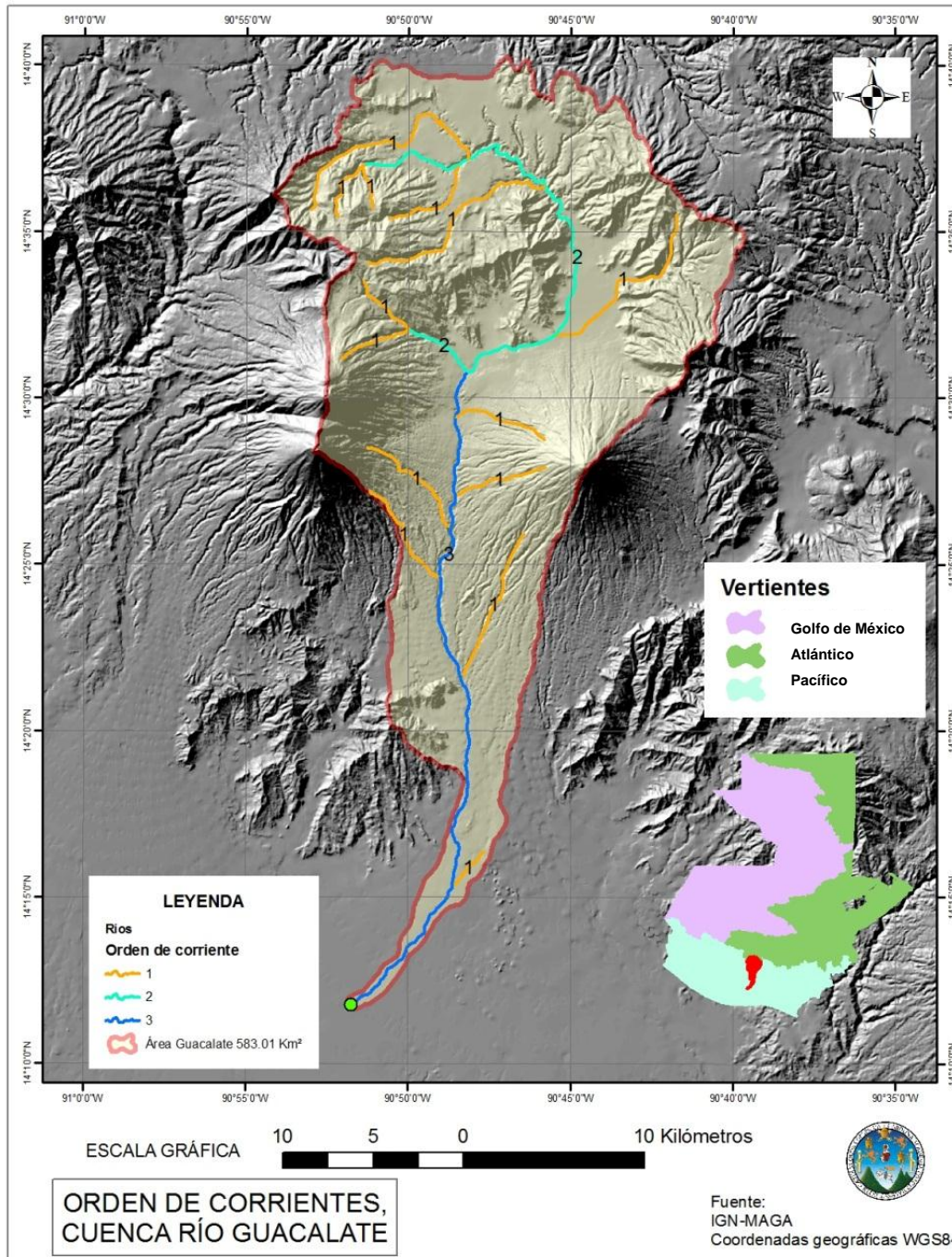
Fuente: Instituto Geográfico Nacional y Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación.

Anexo 3. Hidrografía de la cuenca del río Guacalate

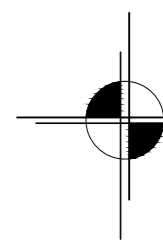
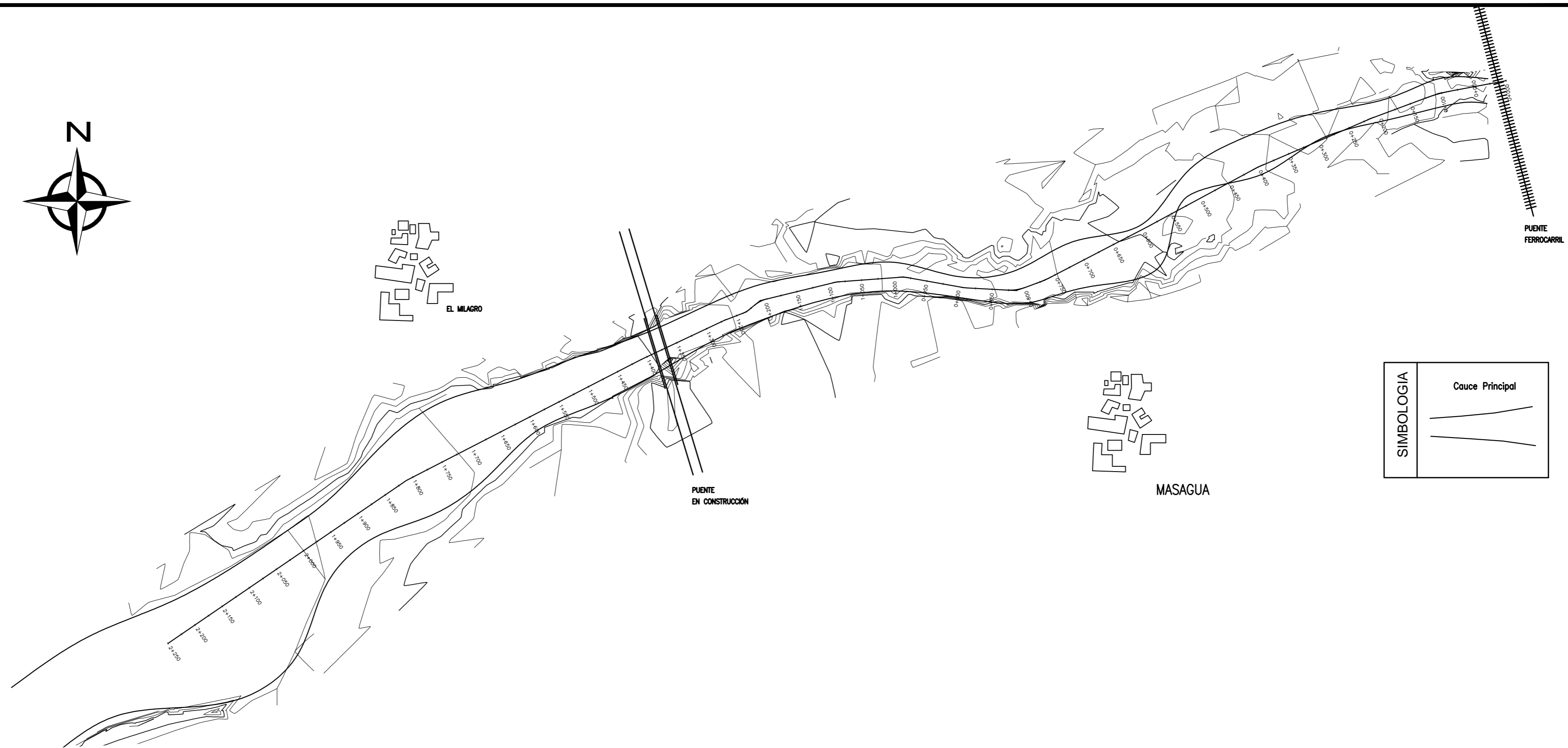
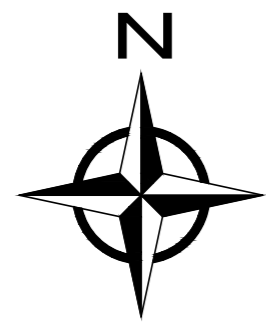


Fuente: Instituto Geográfico Nacional y Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación.

Anexo 4. Orden de corrientes, cuenca del río Guacalate



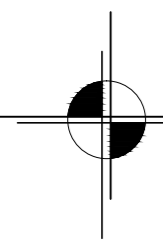
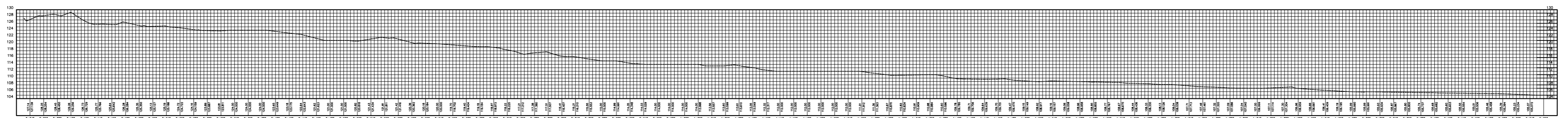
Fuente: Instituto Geográfico Nacional y Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación.



PLANTA

ESCALA 1:500

PERFIL RIO GUACALATE, MASAGUA



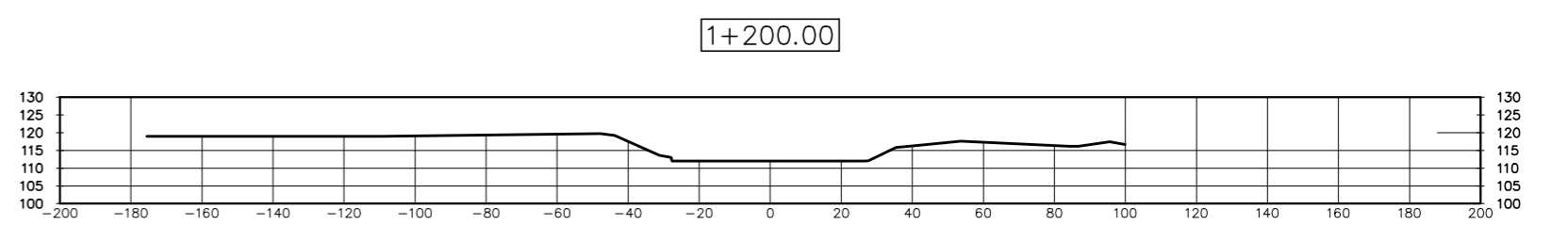
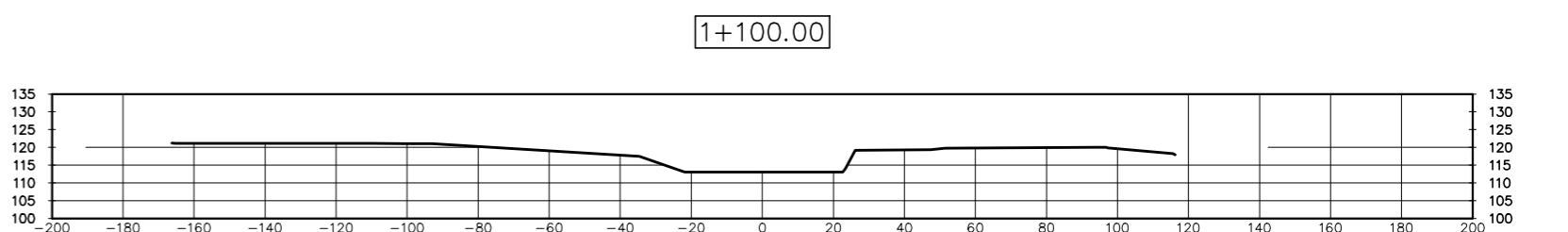
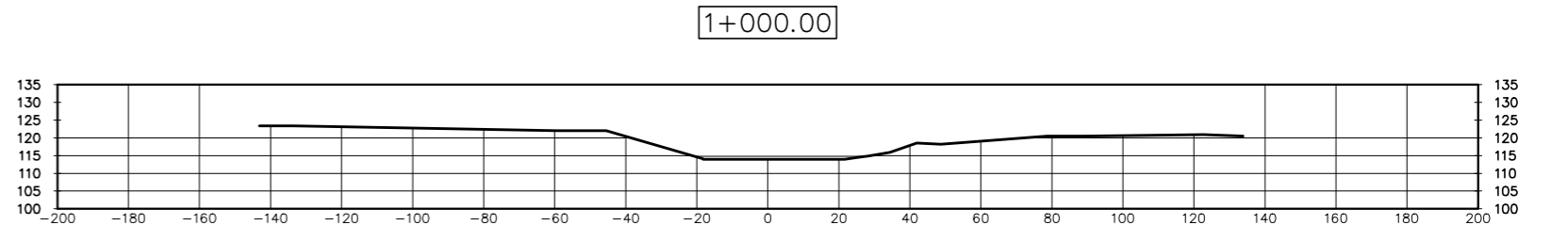
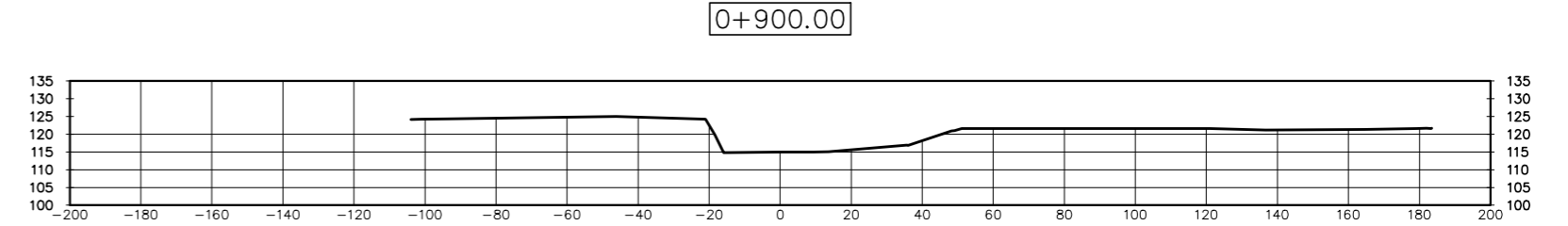
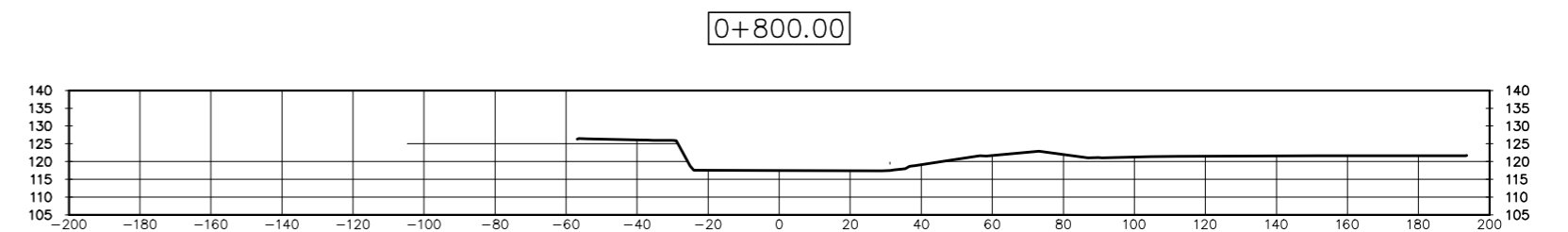
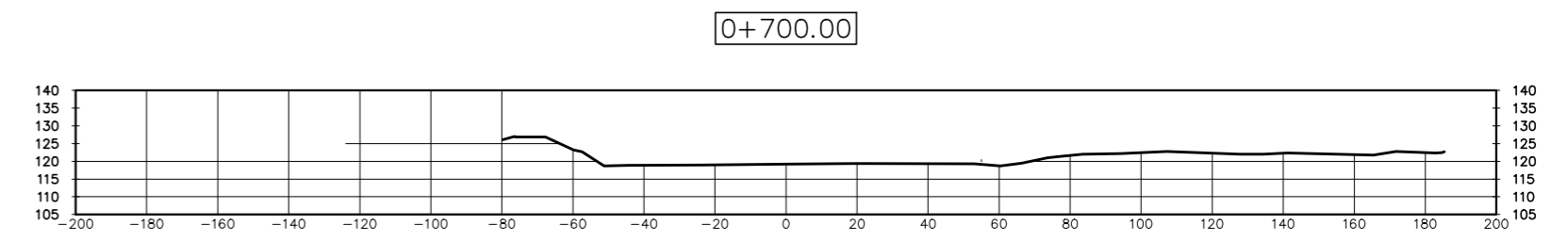
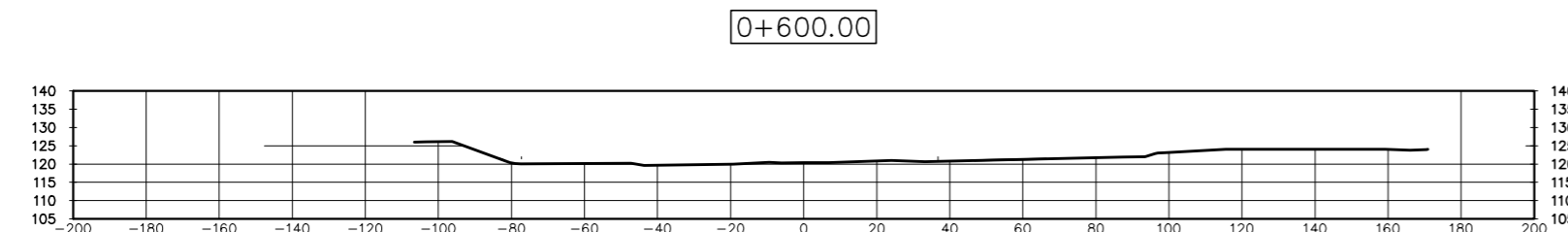
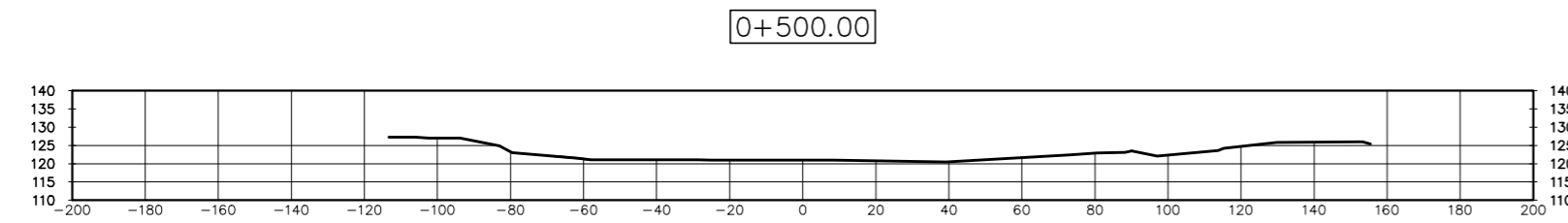
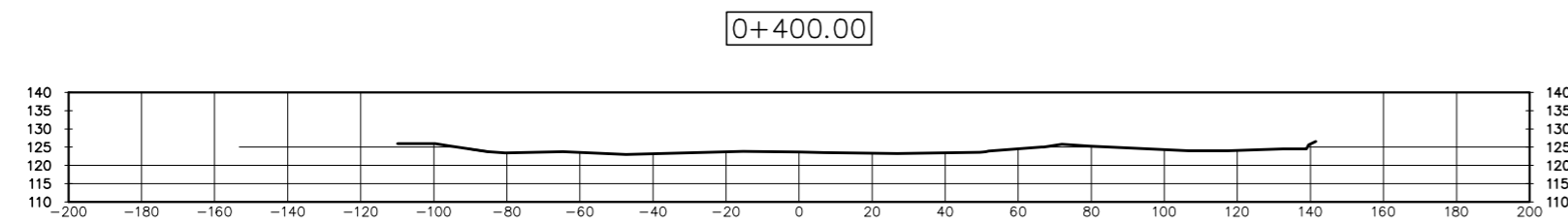
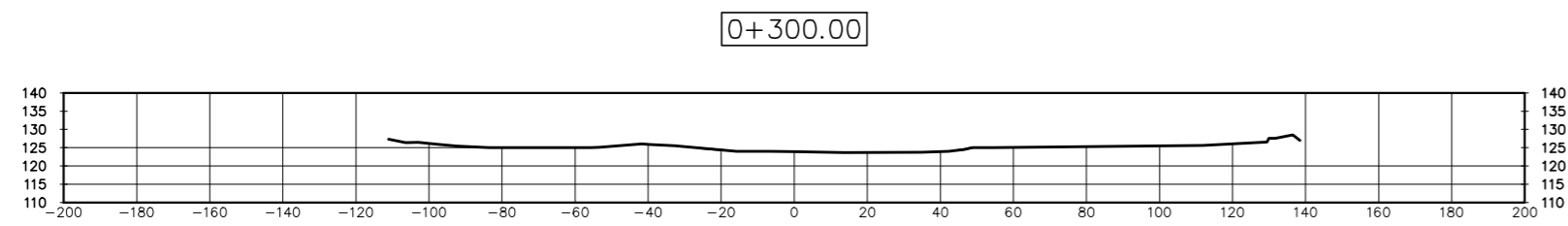
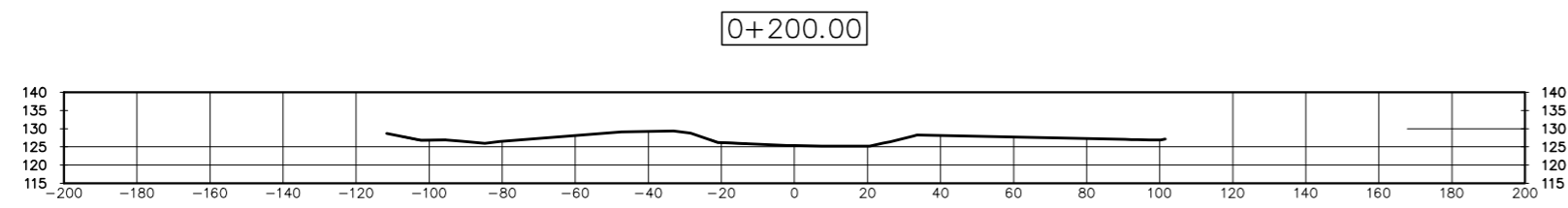
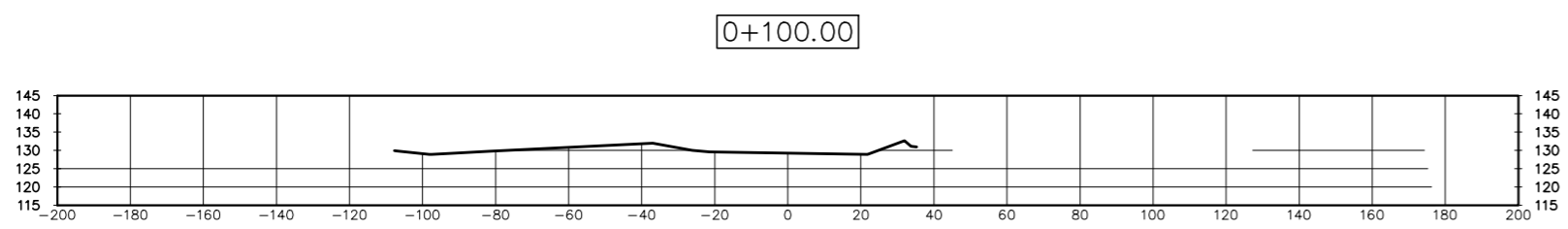
PERFIL


ESCALA 1:450

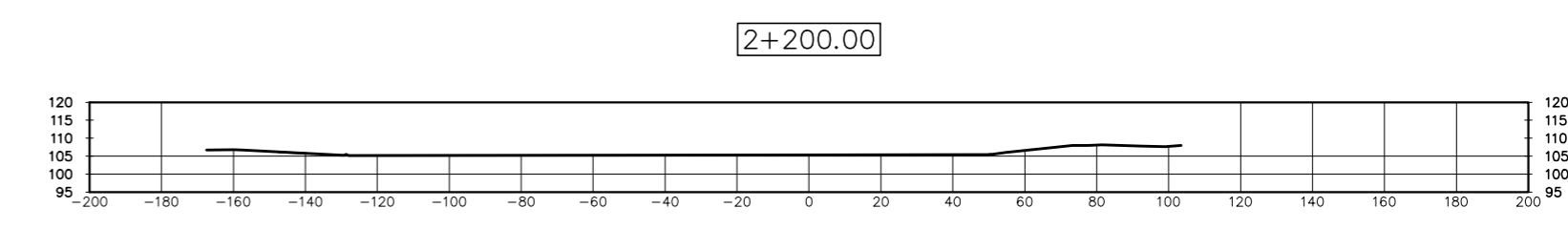
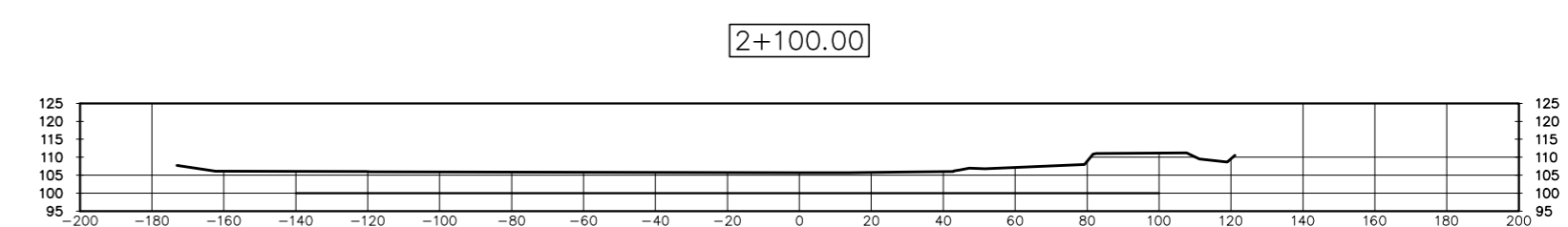
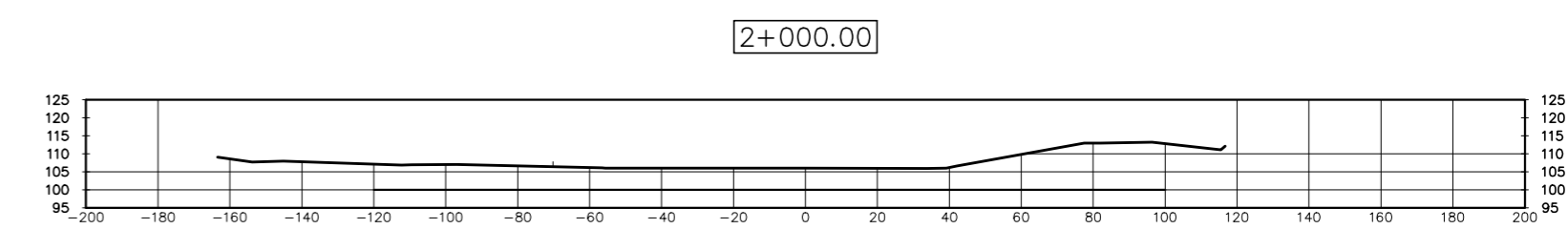
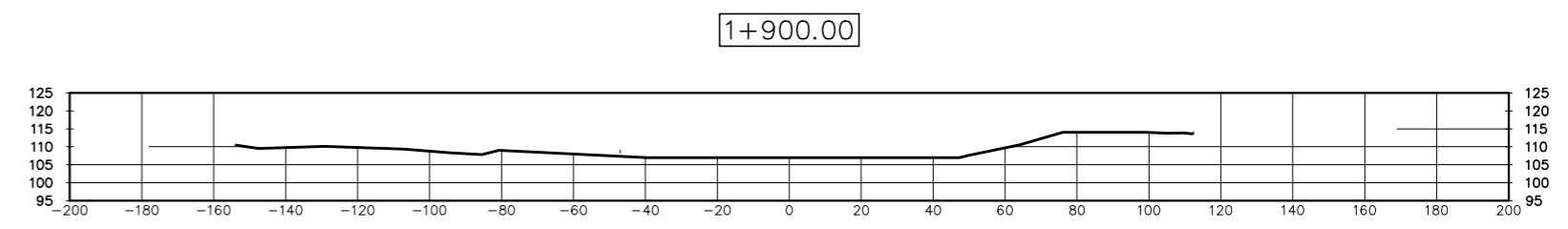
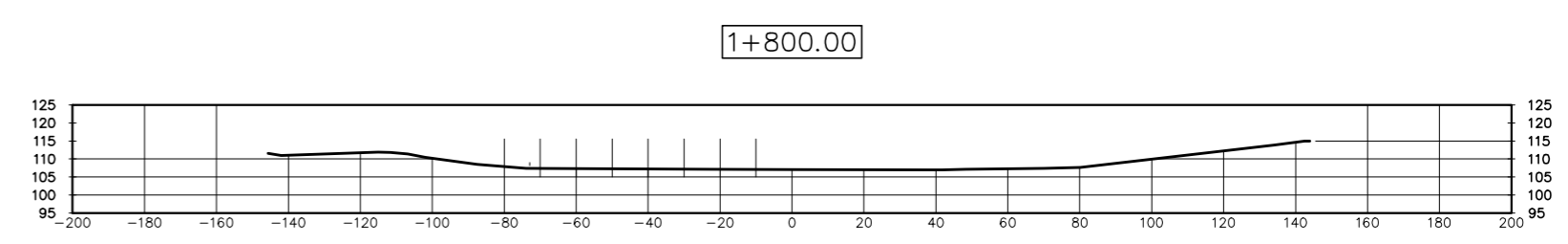
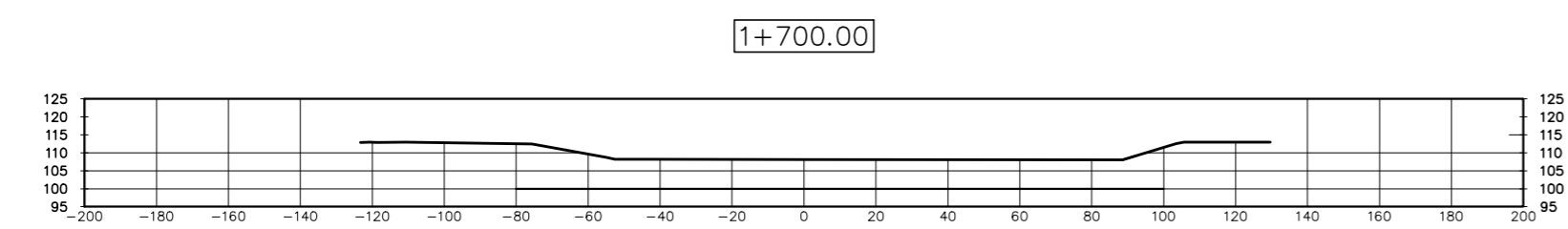
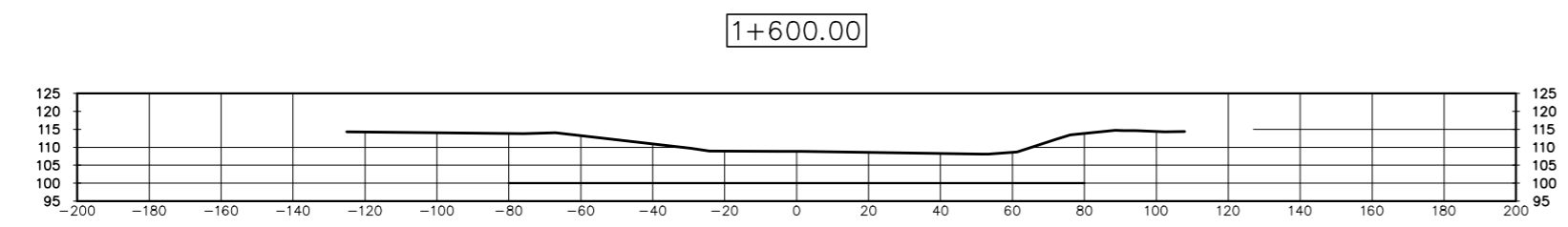
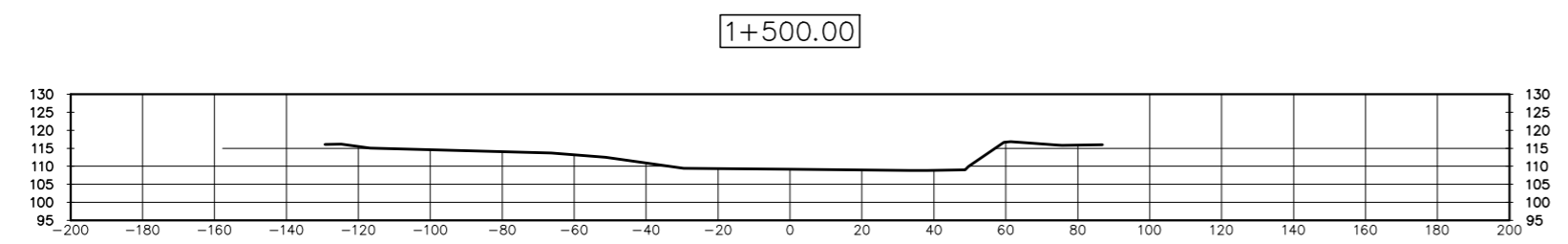
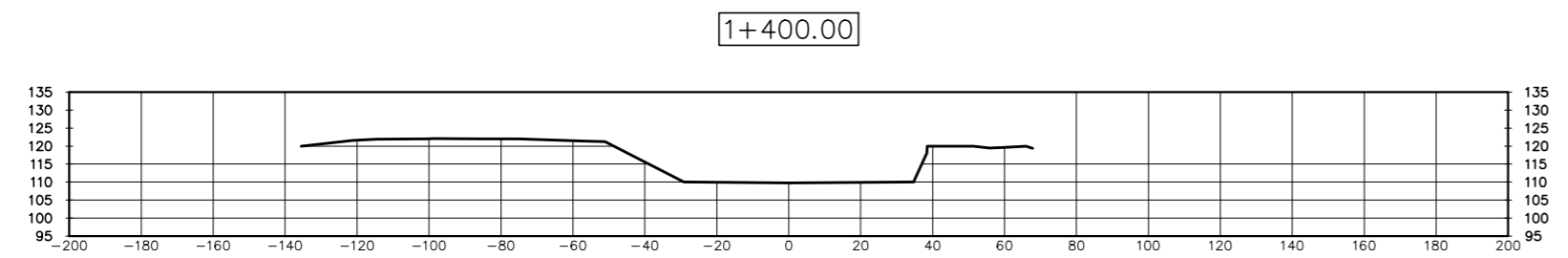
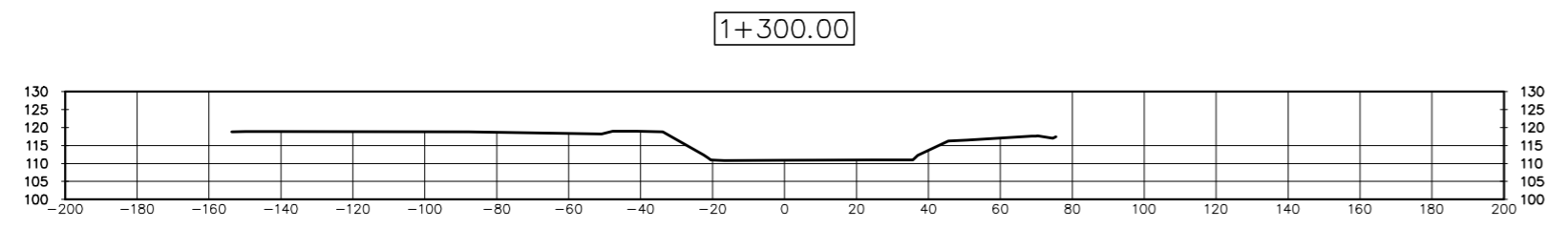



UNIVERSIDAD SAN CARLOS DE GUATEMALA
 FACULTAD DE INGENIERIA
 ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
 TRABAJO DE GRADUACIÓN: PROPUESTA OBRAS DE PROTECCIÓN CONTRA INUNDACIONES
 PROVOCADAS POR EL RIO GUACALATE EN LA CIUDAD DE MASAGUA, ESCUINTLA

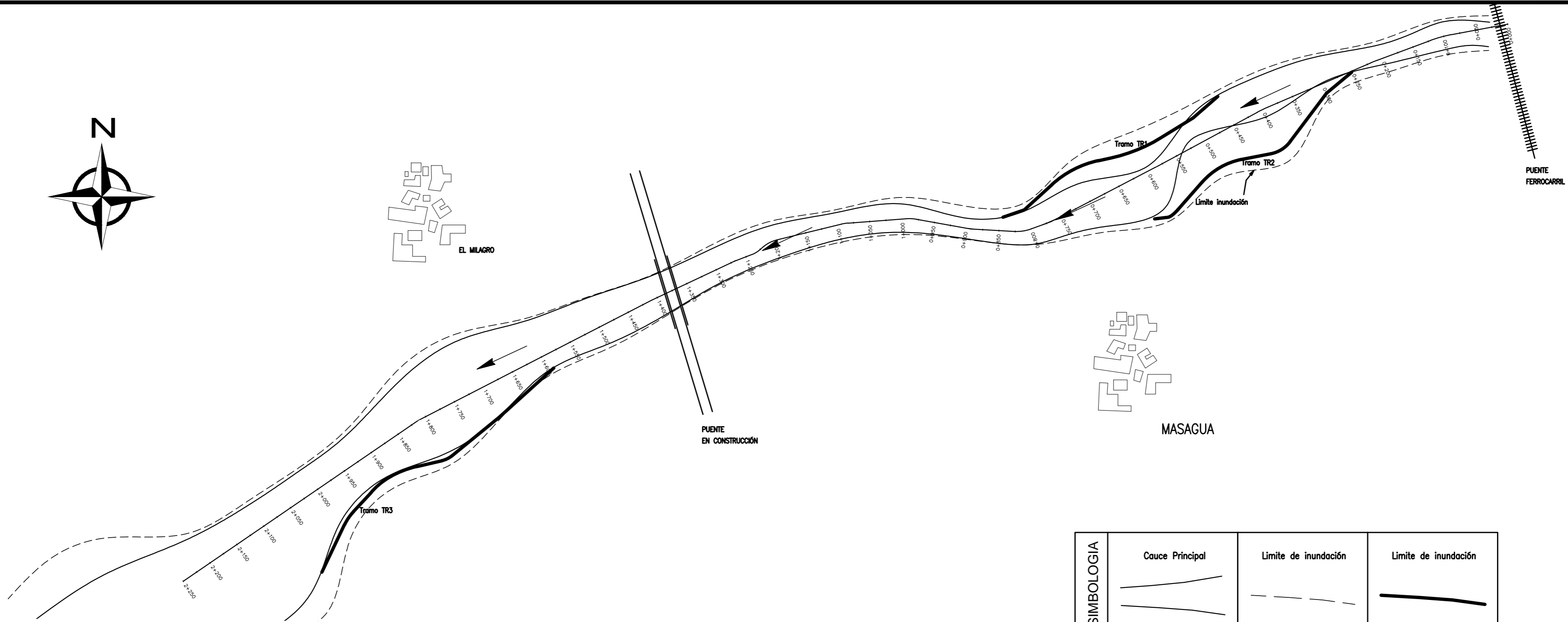
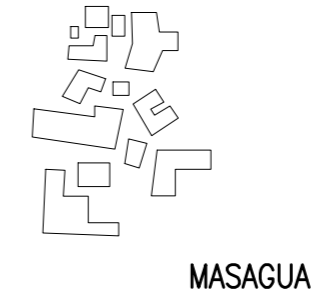
ESCALA	REVISO	CONTENIDO	A E I
Indicada	Ing. Claudio Castañón	PLANTA-PERFIL TRAMO DE ESTUDIO	HOJA No.
		UBICACION	1/6
		RIO GUACALATE, MASAGUA, ESCUINTLA	



 <p>UNIVERSIDAD SAN CARLOS DE GUATEMALA FACULTAD DE INGENIERIA ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL</p>		<p>TRABAJO DE GRADUACIÓN: PROPUESTA OBRAS DE PROTECCIÓN CONTRA INUNDACIONES PROVOCADAS POR EL RIO GUACALATE EN LA CIUDAD DE MASAGUA, ESCUINTLA</p>	
		<p>ESCALA 1:200</p>	<p>REVISOR Ing. Claudio Castañón</p>
			<p>HOJA No. 2/6</p>



		UNIVERSIDAD SAN CARLOS DE GUATEMALA FACULTAD DE INGENIERIA ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL							
TRABAJO DE GRADUACIÓN: PROPUESTA OBRAS DE PROTECCIÓN CONTRA INUNDACIONES PROVOCADAS POR EL RIO GUACALATE EN LA CIUDAD DE MASAGUA, ESCUINTLA									
ESCALA 1:200	REVISO Ing. Claudio Castañón	CONTENIDO SECCIONES TRANSVERSALES 1+400 A 2+200 UBICACION RIO GUACALATE, MASAGUA, ESCUINTLA	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;">A</td> <td style="width: 33%;">E</td> <td style="width: 33%;">I</td> </tr> <tr> <td colspan="3" style="text-align: center;"> HOJA No. 3/6 </td> </tr> </table>	A	E	I	HOJA No. 3/6		
A	E	I							
HOJA No. 3/6									

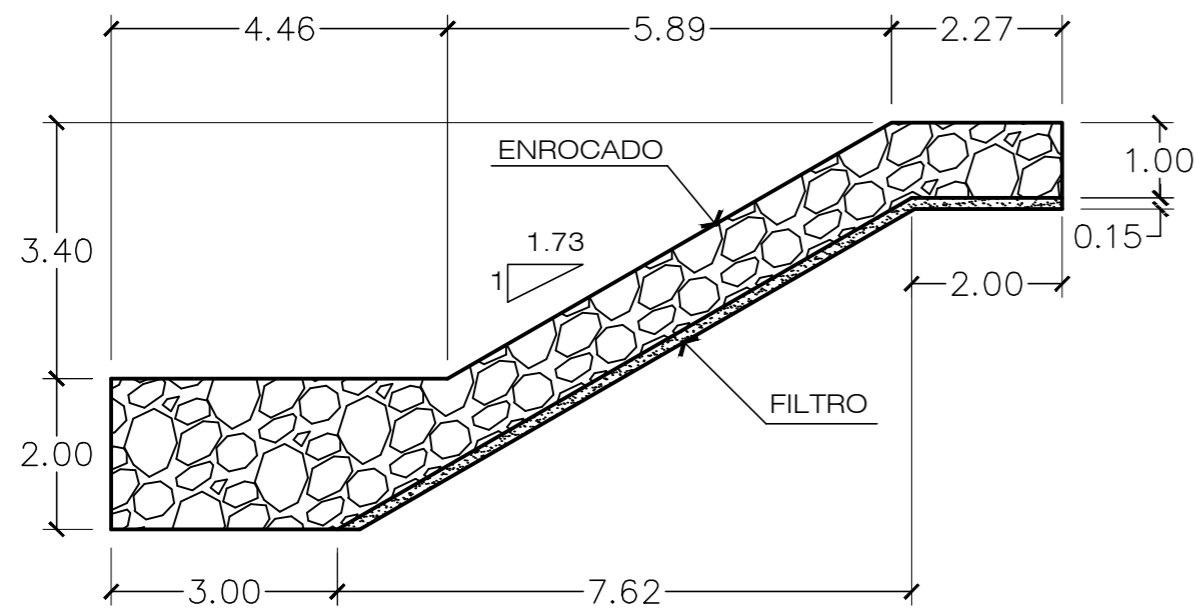


SIMBOLOGIA	Cauce Principal	Límite de inundación	Límite de inundación

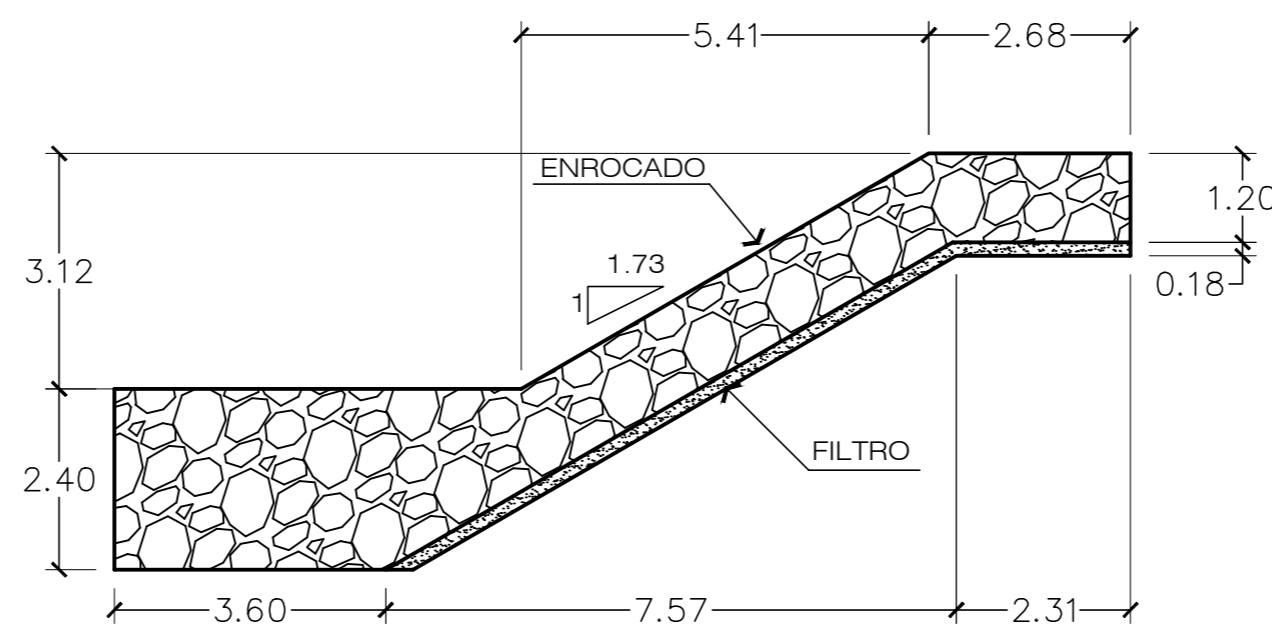
PLANTA

ESCALA 1:500

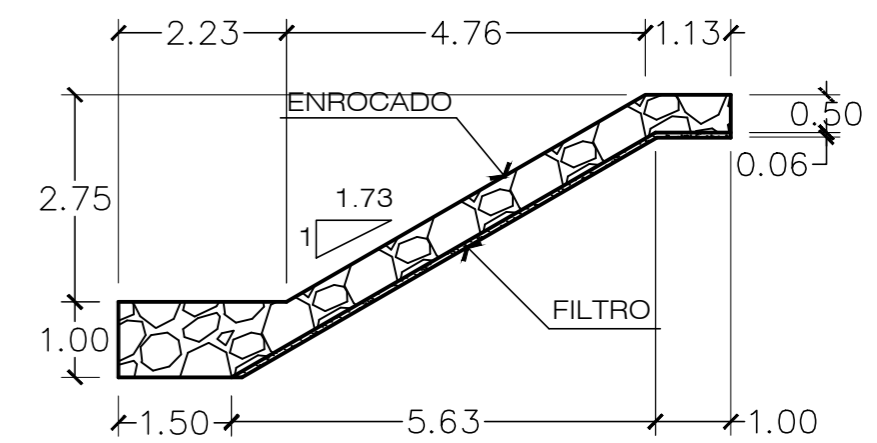
TRAMO 1 - TR1



TRAMO 2 - TR2



TRAMO 3 - TR3



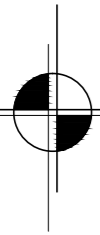
SECCIONES TIPICAS

ESCALA 1:10



UNIVERSIDAD SAN CARLOS DE GUATEMALA
 FACULTAD DE INGENIERIA
 ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
 TRABAJO DE GRADUACIÓN: PROPUESTA OBRAS DE PROTECCIÓN CONTRA INUNDACIONES
 PROVOCADAS POR EL RIO GUACALATE EN LA CIUDAD DE MASAGUA, ESCUINTLA

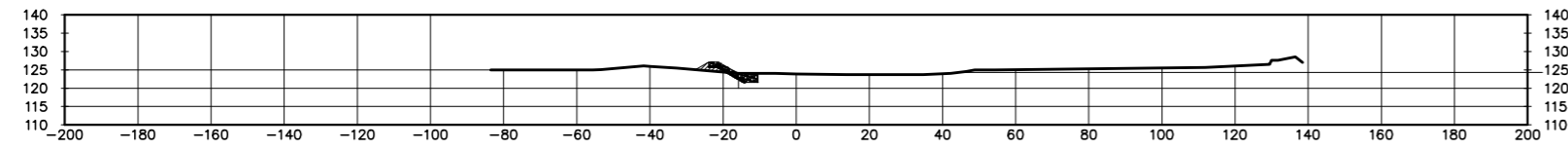
ESCALA	REVISO	CONTENIDO	A E T
Indicada	Ing. Claudio Castañón	UBICACIÓN DE OBRAS PROPUESTAS Y SECCIONES TIPICAS DE LA OBRA	HOJA No.
		UBICACION MASAGUA, ESCUINTLA	4/6



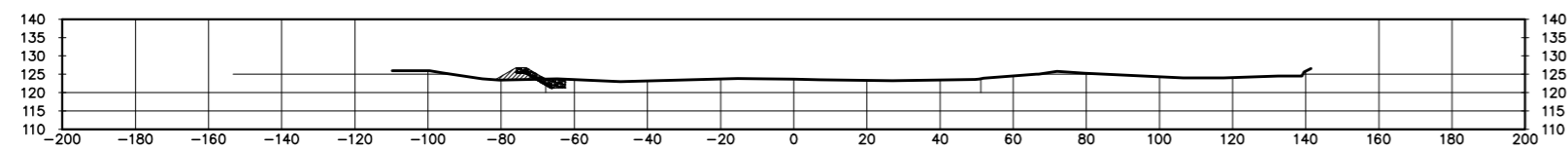
SECCIONES TRANSVERSALES TRAMO TR1

ESCALA 1:200

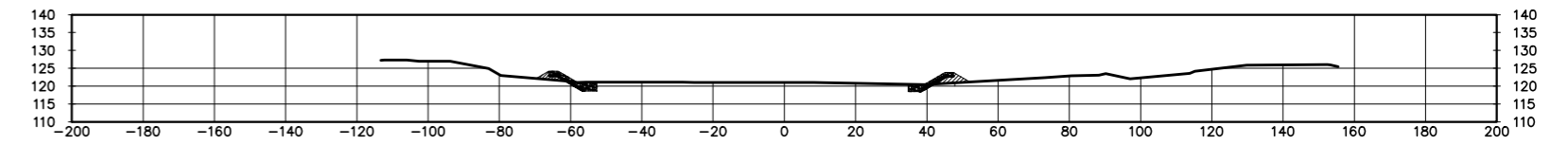
0+300.00



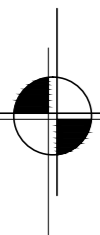
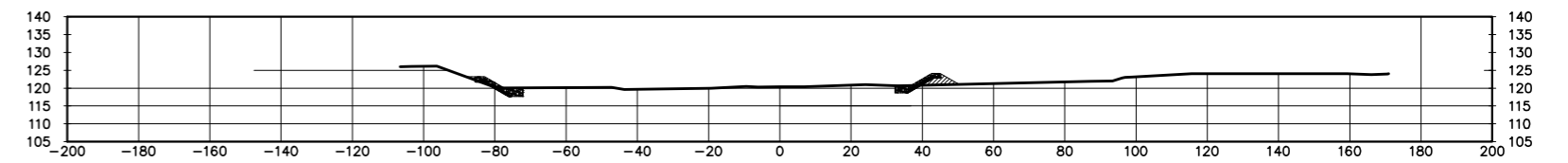
0+400.00



0+500.00



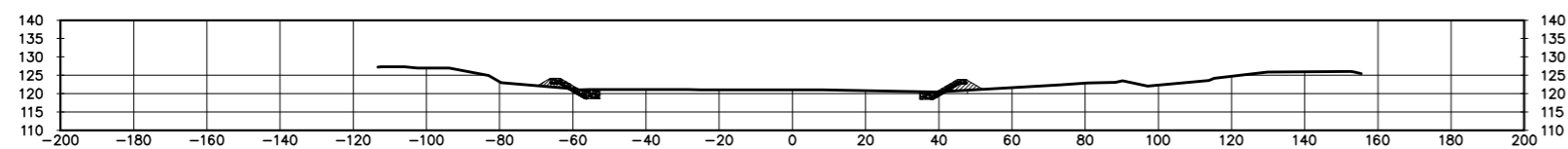
0+600.00



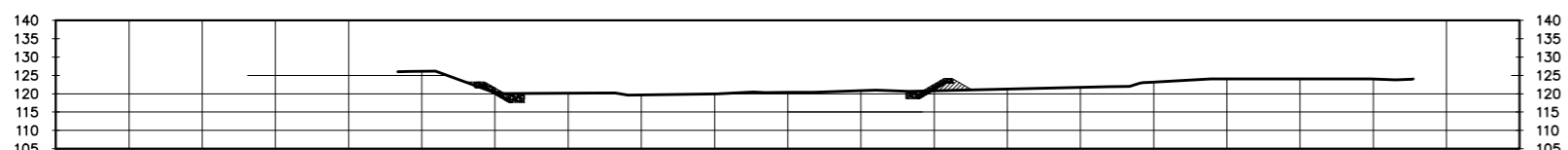
SECCIONES TRANSVERSALES TRAMO TR2

ESCALA 1:200

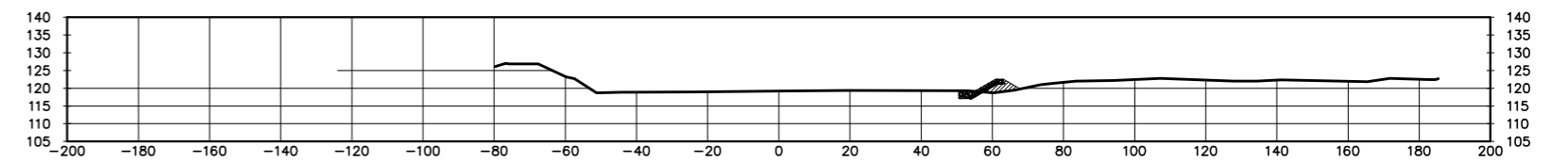
0+500.00



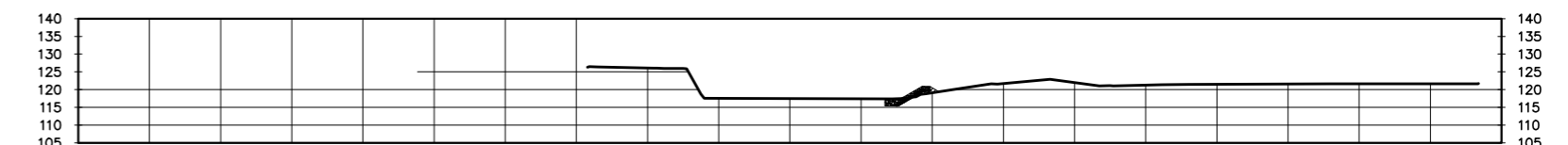
0+600.00



0+700.00



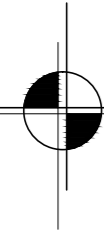
0+800.00



UNIVERSIDAD SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

TRABAJO DE GRADUACIÓN: PROPUESTA OBRAS DE PROTECCIÓN CONTRA INUNDACIONES
PROVOCADAS POR EL RIO GUACALATE EN LA CIUDAD DE MASAGUA, ESCUINTLA

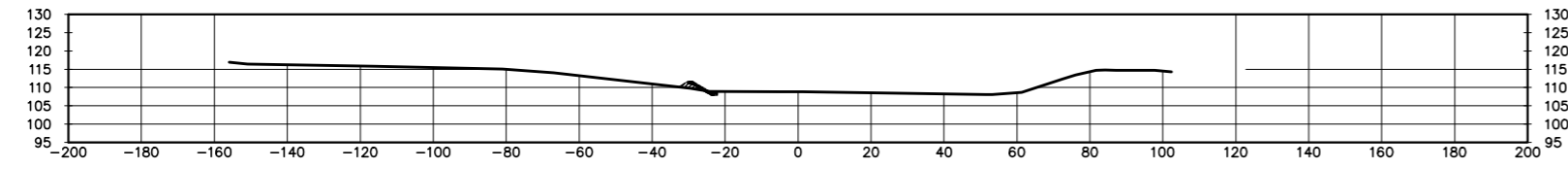
ESCALA	REVISO	CONTENIDO	A E T
INDICADA	Ing. Claudio Castañón	SECCIONES TRANSVERSALES TRAMOS TR1 Y TR2	Hoja No.
		UBICACION	5/6
		RIO GUACALATE, MASAGUA, ESCUINTLA	



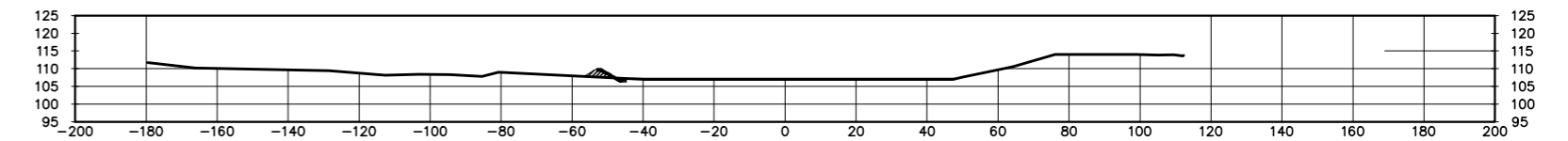
SECCIONES TRANSVERSALES TRAMO TR3

ESCALA 1:200

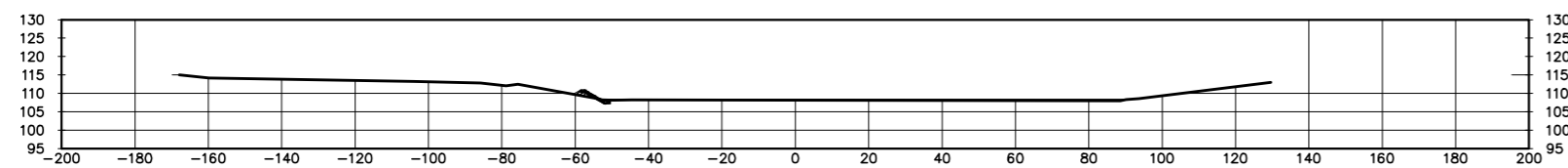
1+600.00



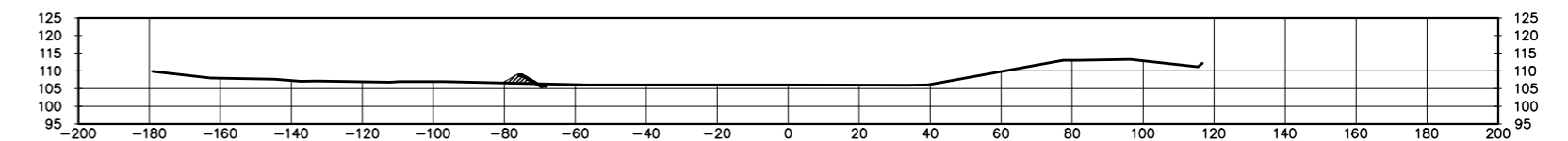
1+900.00



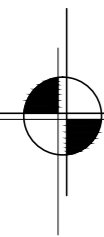
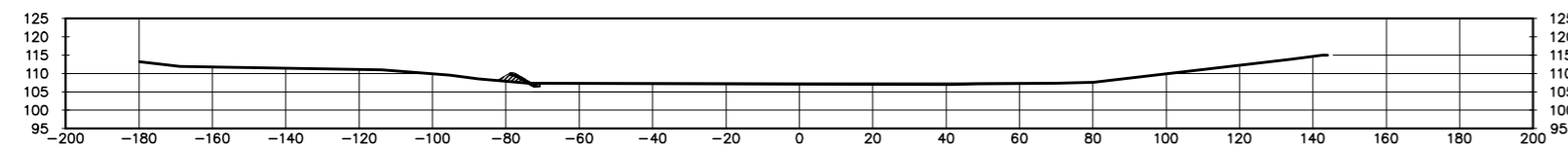
1+700.00



2+000.00

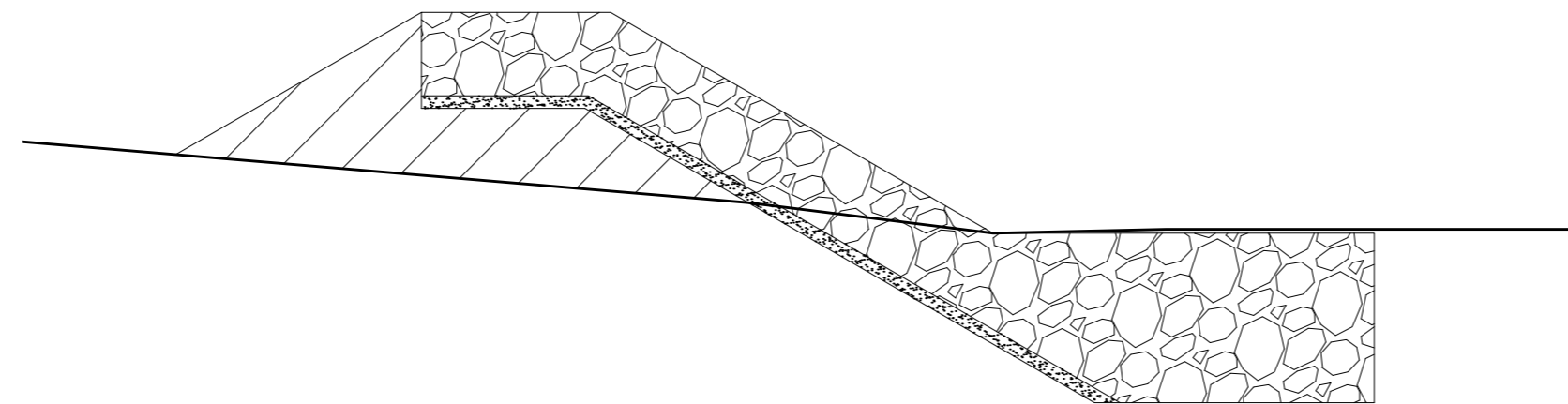


1+800.00



DETALLE DE BORDA UBICADA EN EL RIO

ESCALA 1:10



UNIVERSIDAD SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
TRABAJO DE GRADUACIÓN: PROPUESTA OBRAS DE PROTECCIÓN CONTRA INUNDACIONES
PROVOCADAS POR EL RIO GUACALATE EN LA CIUDAD DE MASAGUA, ESCUINTLA

ESCALA	REVISO	CONTENIDO	A E T
INDICADA	Ing. Claudio Castañón	SECCIONES TRANSVERSALES TRAMO TR3	HOJA No.
		UBICACION	6/6
		RIO GUACALATE, MASAGUA, ESCUINTLA	