



Instituto Privado de Investigación
sobre Cambio Climático

ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO LOS ESCLAVOS

Guatemala, Centroamérica



Instituto Privado de Investigación
sobre Cambio Climático

ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO LOS ESCLAVOS

Guatemala, Centroamérica

Autor: Sergio Gil Villalba

Impreso: Digitalhouse

Guatemala, 2017

Tiraje: 12 ejemplares

Digital: ISBN 978-9929-8241-2-6

CITA BIBLIOGRÁFICA

ICC (Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático). 2012. Estudio hidrológico de la cuenca del río Los Esclavos. Guatemala. 67 p.



Índice

1. INTRODUCCIÓN	4
1.1. ANTECEDENTES	5
2. ZONA DE ESTUDIO	8
2.1. TIPO DE SUELO	8
2.2. USOS DEL SUELO	9
3. OBJETIVOS	12
4. INTRODUCCIÓN A LOS MODELOS	13
4.1. MODELOS HIDROLÓGICOS	13
5. DATOS DE PARTIDA	15
5.1. MORFOLOGÍA	16
5.2. DATOS PLUVIOMÉTRICOS	19
5.3. DATOS DE CAUDAL	20
6. METODOLOGÍA	22
6.1. PRECIPITACIÓN	22
6.2. PROCESOS HIDROLÓGICOS	26
6.2.1. GEOLOGÍA	26
6.2.2. USO DE LA TIERRA	28
6.2.3. NÚMERO DE CURVA	28
6.3. CAUDAL	30
6.3.1. MÉTODO DE LA CRECIDA ÍNDICE	30
6.3.2. MODELOS LLUVIA-ESCORRENTÍA	32
6.3.2.1. TIEMPO DE RETARDO	33
6.3.2.2. PROPAGACIÓN DE LA CRECIDA	36
7. RESULTADOS	39
8. CONCLUSIONES	47
9. RECOMENDACIONES	49
10. GLOSARIO	51
11. REFERENCIAS	52
ANEXO I. DATOS PLUVIOMÉTRICOS	55
ANEXO II. TABLAS PARA LA DETERMINACIÓN DE MANNING	60
ANEXO III. RESULTADOS DEL MODELO HIDROLÓGICO	62

Índice de figuras

Figura 1. Mapa de texturas de suelo de la cuenca de Los Esclavos _____	9
Figura 2. Mapa de uso de la tierra de la cuenca del Río Los Esclavos _____	11
Figura 3. Zona de estudio del río Los Esclavos _____	15
Figura 4. Subcuencas naturales en la cuenca del río Los Esclavos. _____	18
Figura 5. Estaciones meteorológicas existentes en la zona de estudio _____	20
Figura 6. Estaciones de aforo en la cuenca de Los Esclavos _____	21
Figura 7. Esquema de funcionamiento de los modelos precipitación-escorrentía _____	22
Figura 8. Ejemplo de los hietogramas generados para la estación Los Esclavos _____	24
Figura 9. Estaciones meteorológicas utilizadas y área de influencia según Thiessen _____	25
Figura 10. Mapa de tipo de suelo según la clasificación del NRCS _____	27
Figura 11. Mapa de uso de la tierra según clasificación NRCS _____	28
Figura 12. Mapa de distribución de parámetro del número de curva _____	29
Figura 13. Regiones hidrológicas para la estimación de crecidas en Guatemala. INSIVUMEH_	31
Figura 14. División de la cuenca de Los Esclavos en subcuencas para la generación del modelo hidrológico _____	33
Figura 15. Ejemplo de los efectos de la propagación de la crecida aguas abajo en el hidrograma _____	36
Figura 16. Tramos de estudio en el modelo de Los Esclavos _____	37
Figura 17. Hietograma calculado en la subcuenca W200 y hidrograma generado _____	44
Figura 18. Hidrograma generado en el modelo hidrológico en el tramo alto de Los Esclavos_	44

Índice de cuadros

Cuadro 1. Parámetros morfométricos del río Los Esclavos y cuencas vecinas _____	16
Cuadro 2. Atributos de las subcuencas _____	17
Cuadro 3. Datos de aforo disponibles en la cuenca de Los Esclavos _____	21
Cuadro 4. Estaciones meteorológicas utilizadas, volumen diario de precipitación por período de retorno y corrección mediante el coeficiente de simultaneidad _____	25
Cuadro 5. Criterios de clasificación del tipo de suelo según el NRCS _____	27
Cuadro 6. Clasificación de los usos de la tierra según el criterio del NRCS y número de curva	29
Cuadro 7. Regiones hidrológicas para la estimación de crecidas en Guatemala _____	31

Cuadro 8. Determinación del tiempo de retardo con los métodos de Kirpich y Giandotti para las 19 subcuencas	35
Cuadro 9. Parámetros calculados para la metodología Muskingum-Cunge	38
Cuadro 10. Lluvia neta y pérdidas a partir de la lluvia inicial	39
Cuadro 11. Tiempo de concentración y retardo para cada una de las subcuencas	41
Cuadro 12. Tiempo de propagación de la crecida calculado mediante la fórmula de Muskingum-Cunge	42
Cuadro 13. Caudales máximos estimados para los períodos de retorno de 10, 25 y 50 años	44
Cuadro 14. Comparación de los resultados del método regional con el modelo lluvia-escorrentía	45

1. Introducción

Los fenómenos naturales, ya sean de tipo climático, sísmico o vulcanológico, son frecuentes en América Latina. En esta región se producen anualmente pérdidas por este tipo de manifestaciones que se estiman en más de 1,500 millones de dólares y cobran casi 6,000 vidas (Jovel et al., 1993). Tales efectos son exacerbados por las disparidades estructurales de las sociedades, que exponen a mayores grados de riesgo a contingentes poblacionales en condiciones económicas y sociales ya de por sí precarias (CEPAL, 1999). A estos episodios se les suman otros efectos como riesgos de salud y sanitarios, riesgo nutricional, riesgo educativo por abandono escolar, riesgo habitacional y psicosocial y desempleo (CEPAL, 2003).

En este contexto, se debe priorizar la búsqueda de herramientas que permitan minimizar los efectos producidos por estos eventos. En el ámbito de la industria agroalimentaria, el sector azucarero ha fundado una institución independiente con el nombre de “Instituto Privado de Investigación en Cambio Climático” (ICC). Ésta tiene el objetivo de crear y promover acciones que desarrollen procesos adecuados de mitigación y adaptación al cambio climático en las comunidades, procesos productivos e infraestructura en la región.

Uno de los objetivos principales del ICC es el estudio del comportamiento de los episodios extremos de inundación, entender como les afecta el cambio climático y determinar las medidas que se deben adoptar para mitigar sus efectos. En este sentido se ha iniciado una línea de investigación en el campo de la hidrología mediante la aplicación de modelos predictivos. Se trata de una metodología pionera en la región, y su correcta implementación permitiría fortalecer los mecanismos de prevención a partir de la predicción de los episodios de inundación.

El presente estudio desarrolla un modelo hidrológico que permite predecir el caudal del río Los Esclavos ante diferentes episodios de precipitación. Se trata de un proyecto piloto puesto que nunca antes se ha aplicado esta metodología en la región y, por tanto, se deben evaluar con detenimiento los resultados que se generen. Éste es el primer paso de un proceso, cuyo objetivo final es establecer las diferentes zonas de riesgo por inundación y contribuir a mejorar los sistemas de alerta temprana por inundación.

1.1. Antecedentes

El incremento de episodios extremos de precipitación que producen calamidades por inundación es un hecho. En Guatemala, en los últimos 15 años, se han registrado 4 episodios con especial incidencia a nivel económico, social y ambiental:

- **Huracán Mitch (1998):** Ocurrido entre el 28 de octubre y el 5 de noviembre. Presentó precipitaciones acumuladas de hasta 950mm (estación Puerto San José). Las pérdidas humanas se calcularon en 268 fallecidos, 121 desaparecidos y 750,000 damnificados. Las pérdidas económicas se estimaron en 7,377 millones de Quetzales (INSIVUMEH; CEPAL, 1999).
- **Tormenta tropical Stan (2005):** Ocurrido entre el 1 y 10 de octubre. Presentó valores diarios de precipitación de hasta 267mm (estación Rehutalueu) y precipitaciones acumuladas de hasta 868mm (estación Ciudad Tecun Uman). Las pérdidas humanas se calcularon en 670 fallecidos, 850 desaparecidos y 3.5 millones de damnificados. Las pérdidas económicas se estimaron en 7,473 millones de Quetzales (INSIVUMEH; CEPAL, 2005).
- **Tormenta tropical Agatha (2010):** Ocurrido entre el 25 y 30 de mayo. Presentó valores diarios de precipitación de hasta 426.2mm (estación Montúfar) y precipitaciones acumuladas de hasta 565.6mm (estación Mazatenango). Las pérdidas humanas se calcularon en 96 fallecidos, 62 desaparecidos y 338,500 damnificados. Las pérdidas económicas se estimaron en 7,916 millones de Quetzales (INSIVUMEH; CEPAL, 2010).
- **Depresión 12E (2011):** Ocurrido entre el 10 y 20 de octubre. Presentó valores diarios de precipitación de hasta 308mm (estación Puerto San José) y precipitaciones acumuladas de hasta 808mm (estación Montufar). Las pérdidas humanas se calcularon en 38 fallecidos, 5 desaparecidos y 524,500 damnificados. Las pérdidas económicas se estimaron en 2,697 millones de Quetzales (INSIVUMEH; SE-CONRED).

La magnitud de los episodios descritos, sumada a la vulnerabilidad de la población, sitúa a Guatemala en el tercer puesto a nivel mundial en la clasificación de riesgo a mortalidad múltiple relativa (ONU, 2009).

Del análisis de los datos de estaciones con registros superiores a 30 años en Guatemala se desprende que la precipitación anual, así como la correspondiente a episodios extremos, se

mantiene en algunos lugares y tiende a incrementar en otros. Existe una tendencia al incremento de los valores de precipitación desde 1970, concretamente en el centro y este del país, intensificando el riesgo de desastres debidos a precipitaciones intensas (Guerra, 2010).

Hasta la fecha se han realizado algunos estudios que tratan de predecir los efectos de las inundaciones y delimitar las diferentes zonas de riesgo.

- **Larios, 1986.** Se trata del primer análisis regional de frecuencia de avenidas máximas realizado en la República de Guatemala. Realiza una regionalización, determinando siete regiones hidrológicas diferenciadas en base al régimen de precipitaciones y la orografía. Esta regionalización parte de los datos registrados por 152 estaciones meteorológicas ubicadas en Guatemala y, algunas, en México. Para el análisis de avenidas, se consta de 62 estaciones hidrométricas, de las cuales el 69% con registros superiores a 10 años.
- **MAGA-INSIVUMEH, 2002.** Estudio realizado en toda Guatemala que evalúa el riesgo de inundación a partir del análisis de las zonas inundadas en el período 1996-2000. Establece, a partir de los datos recopilados, zonas inundables, zonas de humedales y poblaciones con riesgo de inundación. Según la probabilidad de ocurrencia de inundaciones se establecen 4 cuencas prioritarias: Achiguate, Coyolate, María Linda y Motagua. Asimismo, determina que el 60% de los episodios de inundación fueron registrados en la vertiente del Pacífico. A pesar de los interesantes aportes de este estudio, cuatro años de registro parecen insuficientes para representar el riesgo de inundación y predecir episodios a medio y largo plazo.
- **UNESCO-RAPCA, 2003.** Estudio de la cuenca del río Samalá, en el cual se zonifican las zonas de riesgo por inundación, inestabilidad de laderas y riesgo volcánico. En el estudio participaron INSIVUMEH, CONRED, el IGN y la Universidad de San Carlos de Guatemala. La predicción de caudales se realiza con métodos regionales, y se determinan las zonas inundables cercanas a la población de San Sebastián (Rehutulueu).
- **INSIVUMEH, 2004.** Análisis regional de crecidas en la República de Guatemala. Divide la superficie del país en ocho regiones hidrológicas y determina, en cada una de ellas, la relación entre superficie de drenaje y frecuencia de caudal. Parte de un estudio estadístico de 86 estaciones repartidas en todo el país y con registros de caudal

instantáneo superiores a ocho años. Se ajustan 7 distribuciones teóricas de frecuencia mediante el método de momentos convencionales y el método de momentos lineales ponderados probabilísticamente. Las que mejor se ajustan son la Log-Normal y la Gumbel. Aun y así, los métodos estadísticos no permiten predecir cuál será la tendencia de los valores máximos de caudal a medio plazo y ocho años de registro pueden ser insuficientes para determinar periodos de retorno elevados.

- CIV, 2006. Estudio de la cuenca de Los Esclavos. Determina los valores de caudal a partir del método regional propuesto en (INSIVUMEH, 2004). Genera modelos hidráulicos con HEC-RAS en los puntos de interés. Se trata de un estudio completo, pese a estar basado en metodología regional. Su ámbito de aplicación está reducido a las zonas de mayor interés, especialmente infraestructura vial.

2. Zona de estudio

El río Los Esclavos se ubica en la vertiente del Pacífico, en el suroeste de Guatemala. A diferencia de otras cuencas de esta región, la cuenca de Los Esclavos no recibe el aporte de sedimento directo al no existir volcanes activos dentro de la cuenca. No obstante si existen tres volcanes inactivos en la cuenca: Tecuamburro, Moyuta y Jumaytepeque. En la parte alta de la cuenca se originan numerosos afluentes: Las Cañas, Los Achiotes, San Antonio y Los Vados, entre otros. Todas estas corrientes se unen al cauce principal del río Los Esclavos, que recibe un importante aporte de otro afluente, las Margaritas, en el tramo final. El cauce principal tiene una longitud de 135.6 kilómetros, salvando un desnivel de 2,238 metros. La cuenca hidrológica abarca una extensión de 2,019 kilómetros cuadrados, formando parte de los departamentos de Santa Rosa, Guatemala, Jalapa y Jutiapa.

Debido a la magnitud de los episodios de inundación, los ríos de Guatemala -especialmente en la vertiente sur- han experimentado una serie de cambios tanto en su morfología como en el comportamiento hidráulico (CIV, 2006). En el río Los Esclavos estos cambios se han producido como resultado de variaciones en los patrones climáticos, erosión de los suelos, falta de una cobertura vegetal apropiada y modificaciones en el lecho del río (CIV, 2006).

2.1. Tipo de suelo

La geología de la cuenca está determinada por el aporte de material del cinturón volcánico en las partes altas de la cuenca. Los materiales arrojados y depositados por la actividad volcánica comprenden depósitos de arenas, tobas, cenizas, pómez, lahares y sedimentos piroclásticos en general, que conforman una extensa planicie al pie de las montañas volcánicas como resultado de los procesos de erosión, transporte y sedimentación. Los materiales que conforman esta parte de la llanura se encuentran inconsolidados y presentan permeabilidades elevadas. En el cauce del río se presentan condiciones de resistencia y compactación muy bajas debido a las condiciones de depósito (escorrentías abruptas), las cuales se dan año tras año en la época de invierno, impidiendo la consolidación de los materiales y generando una morfología del cauce irregular e inestable (CIV, 2006).

Para el estudio de los diferentes tipos de suelo se ha utilizado la cartografía de PEDN-MAGA¹ (figura 1).

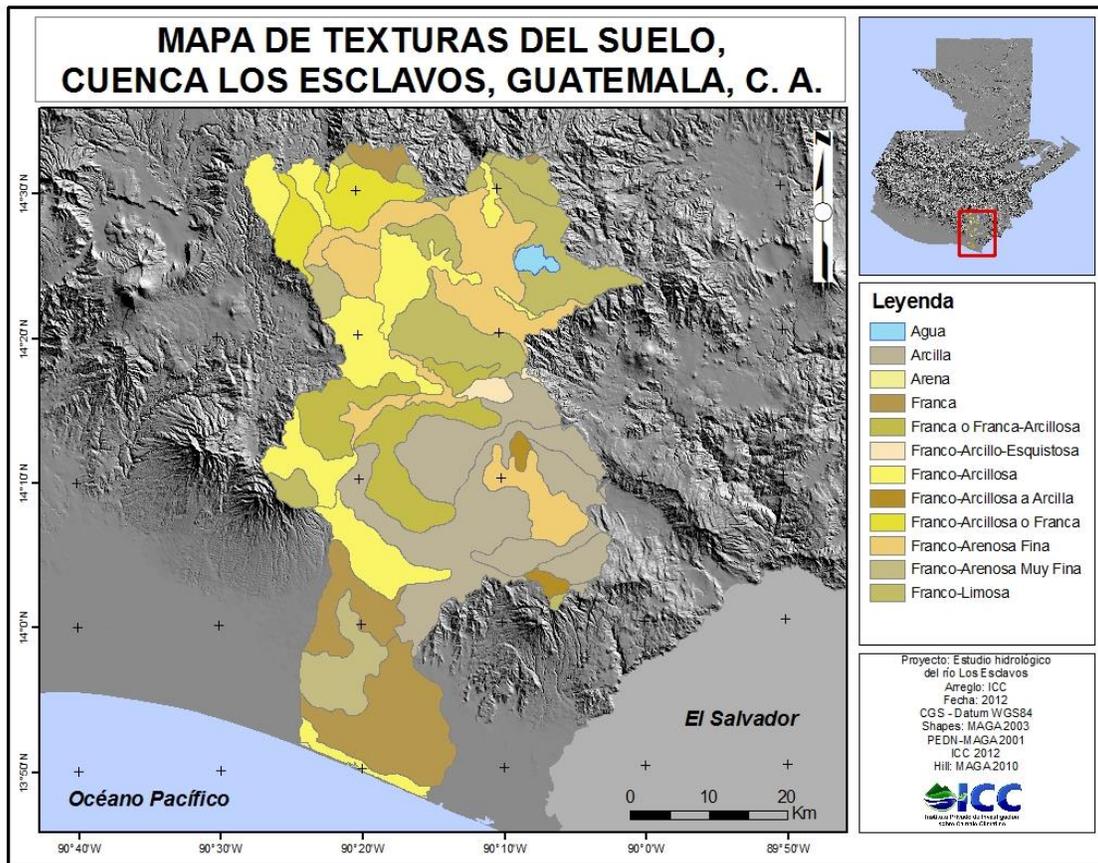


Figura 1. Mapa de texturas de suelo de la cuenca de Los Esclavos (PEDN-MAGA, 2001).

2.2. Usos del suelo

La Cuenca recibe una fuerte presión de los sistemas productivos agrícolas, ocupando éstos un 70.6% de la superficie. Por otro lado la cobertura vegetal representa el 27.1% de la cuenca. Estos porcentajes implican una baja retención del agua de precipitación, con la consecuente generación de crecidas de mayor magnitud y una rápida concentración del caudal en el lecho del río. En cuanto a la superficie urbanizada, únicamente un 0.2% de la superficie corresponde a centros urbanos. A continuación se detallan los diferentes usos de la tierra en la cuenca.

Únicamente un 0.2% de la superficie de la cuenca corresponde a superficie urbana. La mayor parte de ésta se ubica en el departamento de Guatemala y en los municipios de Nueva Santa

¹ Base digital de Guatemala, generada por el Programa de Emergencia por Desastres Naturales (PEDN-MAGA, 2,001), a escala 1:250,000.

Rosa, Santa Rosa de Lima y Oratorio, en el departamento de Santa Rosa. Aun y así, este reducido porcentaje de urbanización no debería afectar en gran medida a la generación de escorrentía.

A nivel de cultivos, éstos varían a lo largo del transcurso del río, en función de la altitud y la inclinación del terreno. En la parte alta de la cuenca se encuentran cultivos de hortalizas, maíz y café. En la parte media de la cuenca se cultiva principalmente café y en algunas zonas caña de azúcar. En la parte baja de la cuenca, donde las pendientes son más suaves, predominan los pastos cultivados. Cerca de la costa se encuentran, además, algunas zonas de mangle. A nivel de cuenca, un 70.6% de la cuenca corresponde a usos agrícolas, de los cuales un 64.6% a agricultura limpia anual², un 17.5% al cultivo de café y un 2% a caña de azúcar.

En cuanto a masas forestales, los bosques de coníferas y latifoliadas se ubican en la parte alta y media de la cuenca. Éstos bosques representan el 12.8% del total de la superficie. Además, las zonas con vegetación arbustiva o matorrales suponen un 3.1% de la superficie de la cuenca y el hierbazal un 10.4%, por lo que la cobertura vegetal natural abarca un 27.1% de la superficie.

Por otro lado un 0.75% de la cuenca corresponde a cuerpos de agua (lagos), así como un 1.35% son tierras áridas o rocas expuestas.

Para el estudio de los usos del suelo se ha utilizado la cartografía del MAGA³ (figura 2).

² Según la memoria técnica del mapa de coberturas del suelo (MAGA, 2003), la categoría *agricultura limpia anual* engloba a granos básicos como maíz, frijol y sorgo.

³ Escala 1:50.000. Uso de la tierra 2003, MAGA (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación).

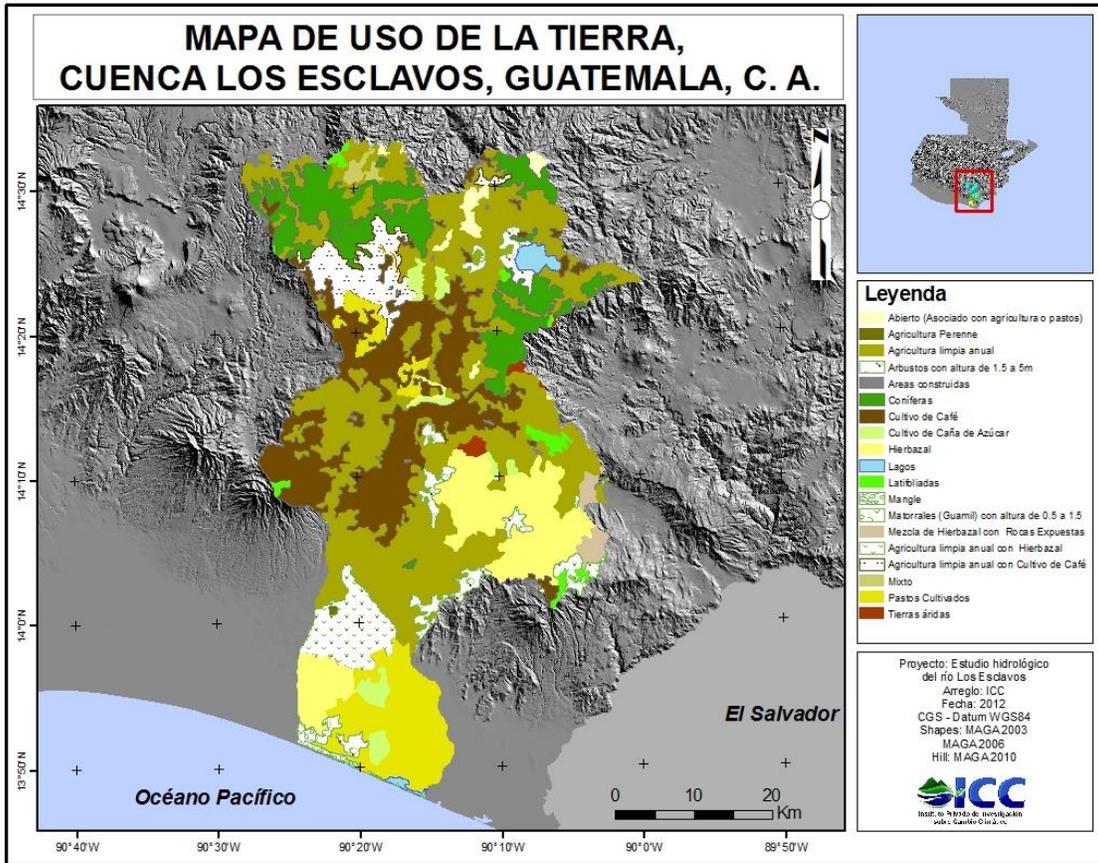


Figura 2. Mapa de uso de la tierra de la cuenca del Río Los Esclavos.

3. Objetivos

Objetivo general

El objetivo principal del presente estudio es la generación de un modelo hidrológico de la cuenca del río Los Esclavos, que proporcione datos de magnitud y frecuencia de caudales y que sirva de entrada para la evaluación de inundaciones y el diseño de estructuras fluviales a partir de modelos hidráulicos.

Objetivos específicos

- a. Determinar la precipitación umbral, es decir, establecer qué parte de la precipitación pasa a formar parte de la escorrentía superficial y cual se retiene en otros procesos (vegetación, almacenamiento superficial, evaporación, etc.).
- b. Establecer los parámetros de tiempo de retardo, tiempo de concentración y tiempo de propagación de la crecida a partir de diferentes metodologías basadas en parámetros morfométricos de la cuenca. Estos permitirán estimar cuánto tarda la escorrentía superficial en llegar a formar parte del caudal del río.
- c. Determinar el caudal con el método de la crecida índice para contrastar los resultados obtenidos con los del modelo hidrológico lluvia-escorrentía.
- d. Proponer una estimación de los valores de caudal para la cuenca, para los períodos de retorno de 10, 25 y 50 años.
- e. Identificar vacíos de información y elaborar una serie de recomendaciones para mejorar este tipo de modelo en un futuro.

4. Introducción a los modelos

Durante la elaboración de estudios para la predicción de inundaciones se pueden discernir el uso de dos tipos de modelos: hidrológicos e hidráulicos. Estos modelos tratan de simplificar toda la información de la cuenca en un conjunto de parámetros que permiten estimar valores como el caudal generado a partir de una precipitación o la zona inundada y la altura de la inundación que generara un determinado caudal.

4.1. Modelos hidrológicos

Son modelos que engloban toda la cuenca y permiten establecer el caudal en función del periodo de retorno. Existen diferentes métodos para estimar el caudal máximo de crecida:

- **Modelos estocásticos:** son modelos inductivos, es decir, solo interpretan la aleatoriedad con la que se producen los procesos naturales, en este caso caudales máximos. Normalmente se trata de modelos regionales, en los cuales se utilizan todos los registros de caudal de una región con características hidrológicas similares (Pandey, et al., 1999).

Por ejemplo:

- **Métodos de regresión directa:** Se basan en el desarrollo de ecuaciones de regresión que permiten extender el registro de caudales disponible en las estaciones de aforo (Bobée B. et al., 1995). Normalmente se establece una relación entre caudal y superficie de drenaje, estableciendo un parámetro que permite determinar la similitud o diferencia hidrológica entre diferentes cuencas, el caudal generado por unidad de superficie. Con esta metodología se asume que si la regresión es válida para diferentes cuencas aforadas, generará buenas estimaciones en cuencas no aforadas. No obstante, las características singulares de algunas cuencas no aforadas pueden provocar que esto no se cumpla, mermando la portabilidad de éste método (Boni G. et al., 2007).
- **Método de la crecida índice:** Permite determinar valores de caudal asociados con diferentes periodos de retorno asumiendo que los valores, en diferentes puntos de una región, siguen los mismos patrones de distribución, estableciendo una misma curva de crecimiento del caudal respecto al periodo de retorno, exceptuando la

escala, que será determinada por la crecida índice (Boni G. et al., 2007) Este modelo ha sido utilizado por el INSIVUMEH (INSIVUMEH, 2004).

- **Modelos determinísticos:** son modelos deductivos, esto es, incorporan parámetros físicos, químicos y biológicos para entender los procesos que tienen lugar en la cuenca.

Por ejemplo:

- **Método precipitación-escorrentía:** permite simular episodios de inundación a corto plazo. Determina el caudal en función de la precipitación que cae sobre la cuenca y el comportamiento del agua en la misma. En el presente estudio se utiliza este método, basado en un parámetro llamado *número de curva*. Es un modelo más exhaustivo y debe ser calibrado con datos reales de caudal para obtener resultados óptimos (Pasche, E., 2007).
- **Modelo de balance hídrico:** determina todos los procesos hidrológicos que tienen lugar en la cuenca y su tendencia a largo plazo, incluyendo los flujos subterráneos. Se requieren numerosos años de registro de parámetros de la cuenca para poder generar un modelo de este tipo, pero es especialmente útil para determinar el comportamiento de la cuenca y el balance de recursos hídricos subterráneos (Pasche, E., 2007).

5. Datos de partida

La cuenca del río Los Esclavos se extiende desde el cinturón volcánico hasta la costa del Pacífico y comprende los volcanes Tecuanburro, Moyuta y Jumaytepeque (figura 3).

Los límites de la cuenca se han delimitado a partir del modelo de elevación del terreno (DEM) de resolución 15m x 15m con la ayuda de sistemas de información geográfica. El resultado obtenido es idéntico a la cuenca delimitadas por el MAGA (2003) excepto en el tramo final, donde no se han incluido algunas corrientes de agua que drenan directamente al canal de Chiquimulilla, y no aportan su caudal al río Los Esclavos de manera directa. Estas corrientes se han excluido de la superficie de estudio puesto que se pretende determinar el caudal que se genera en el cauce del río Los Esclavos, y estas corrientes no drenan al cauce principal.

La caracterización hidrológica y pluviométrica de la cuenca se ha determinado para la superficie determinada por MAGA (2003) y los límites delimitada por el DEM únicamente se han utilizado en la elaboración del modelo.

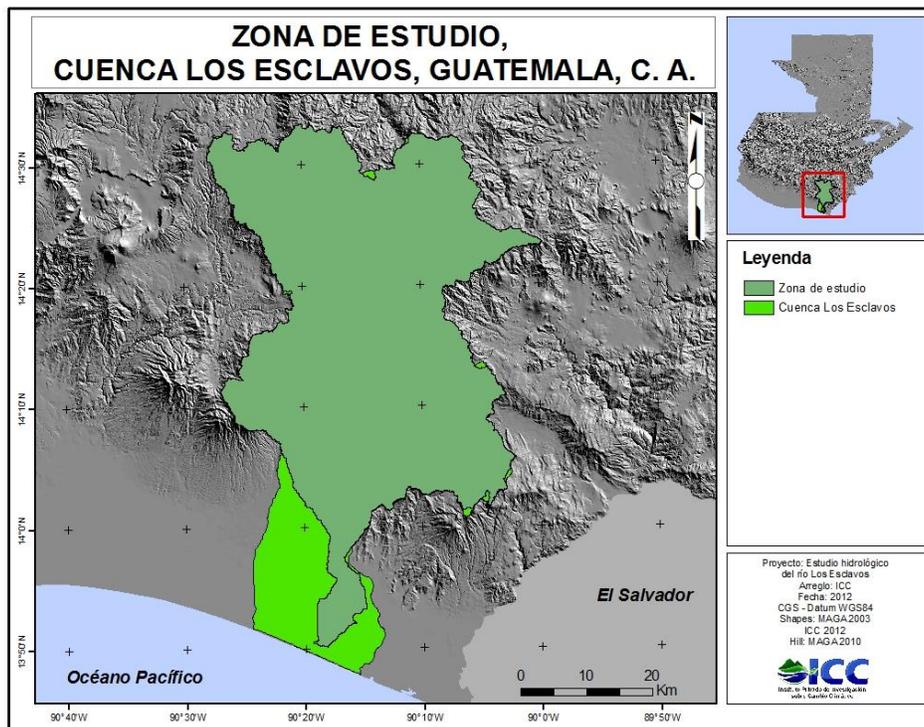


Figura 3. Zona de estudio del río Los Esclavos. Nótese como no coincide con la cuenca delimitada por el MAGA (MAGA 2003) en el tramo final.

5.1. Morfología

Los datos morfométricos aportan criterios para la determinación de características hidrológicas de una cuenca, así como para permitir el análisis comparativo entre diferentes cuencas (CIV, 2007).

Se han calculado los principales parámetros morfométricos de la cuenca Los Esclavos, comparándolos con las cuencas vecinas que drenan hacia el Océano Pacífico (cuadro 1).

Cuadro 1. Parámetros morfométricos del río Los Esclavos y cuencas vecinas.

Cuenca	A (km ²)	P (km)	L (km)	I/Rf	D (km/km ²)	E _{max} (msnm)	E _{min} (msnm)	E (msnm)	Sg (%)
Achiguate	1,048	301	125	15	2.5	3,973	0	1,118	24
Coyolate	1,616	261	150	14	2.5	3,973	0	721	10
María Linda	2,269	359	128	7	2.2	3,759	0	851	22
Los Esclavos	2,007	447	133	9	2.5	2,704	0	1,077	34

Los parámetros determinados son:

A: Área total de la cuenca (kilómetros cuadrados)

P: Perímetro de la cuenca (kilómetros)

L: Longitud del cauce principal (kilómetros)

I/Rf: Factor de forma (L^2/A)

D: Densidad de drenaje de la cuenca (kilómetros de cauce por kilómetros cuadrados de superficie).

E_{max}: Elevación máxima de la cuenca (msnm)

E_{min}: Elevación mínima de la cuenca (msnm)

E: Elevación promedio de la cuenca (msnm)

Sg: Pendiente promedio del terreno (porcentaje)

A continuación se detalla la información que se puede extraer de cada uno de los parámetros.

La longitud de las corrientes es una medida de extensión de la cuenca y representa un índice de evacuación de escorrentía. Generalmente son mejor drenadas las cuencas con un mayor número de afluentes, y esto se puede determinar a partir de la densidad de drenaje. El río que tiene mayor densidad de drenaje tiende a presentar picos de caudal mayores (CIV, 2009). No obstante éste parámetro es muy uniforme en las cuencas presentadas en el cuadro 1.

La forma de la cuenca también puede indicar sus características hidrológicas. Cuencas con formas circulares producen flujos de descarga altos en períodos de tiempo cortos y con hidrogramas de puntas agudas. En una cuenca alargada se producen flujos de descarga menores en períodos de tiempo más largos y con hidrogramas menos prominentes (Ponce, 1989). El factor de forma es la relación entre el cuadrado de la longitud del cauce más largo y el área total de la cuenca. Si diferentes cuencas presentan valores similares, éstas presentarán características de drenaje parecidas (Snyder, 1938). Según este criterio, los valores del cuadro 1 indican que las cuencas de María Linda y Los Esclavos presentarán patrones de drenaje similares, así como las cuencas de Achiguat y Coyolate.

La elevación promedio de la cuenca permite comprender las diferencias en las distribuciones de temperaturas y lluvia en diversas cuencas, especialmente en regiones donde los patrones de precipitación están relacionados con la elevación del terreno.

El perfil longitudinal del cauce determina en gran medida la velocidad de evacuación de caudal, así como el arrastre y la deposición de sedimentos. La cabecera de la cuenca de los esclavos se divide en numerosos afluentes que aportan gran parte del caudal al río principal. Los afluentes más importantes en ese tramo son las corrientes de Pinula y Cañas. El río Los Esclavos se puede dividir en tramo alto, medio y bajo. En el tramo bajo, el río recibe e caudal de su afluente más importante, el río Margaritas (cuadro 2).

Cuadro 2. Atributos de las subcuencas. TA=tramo alto, TM=tramo medio, TB=tramo bajo.

Subcuenca	Cañas	Pinula	Margaritas	Los Esclavos (TA)	Los Esclavos (TM)	Los Esclavos (TB)
Superficie (km ²)	126	151	573	670	371	387
Longitud (km)	36	31	65	65	50	29
Desnivel cauce(m)	1,000	963	1,412	1,865	699	48

La cabecera de la cuenca se divide en numerosos afluentes que aportan gran parte del caudal al río principal. Los afluentes más importantes en ese tramo son las corrientes de Cañas y Pinula. En el tramo bajo, el río recibe su afluente más importante, el río Margaritas (figura 4).

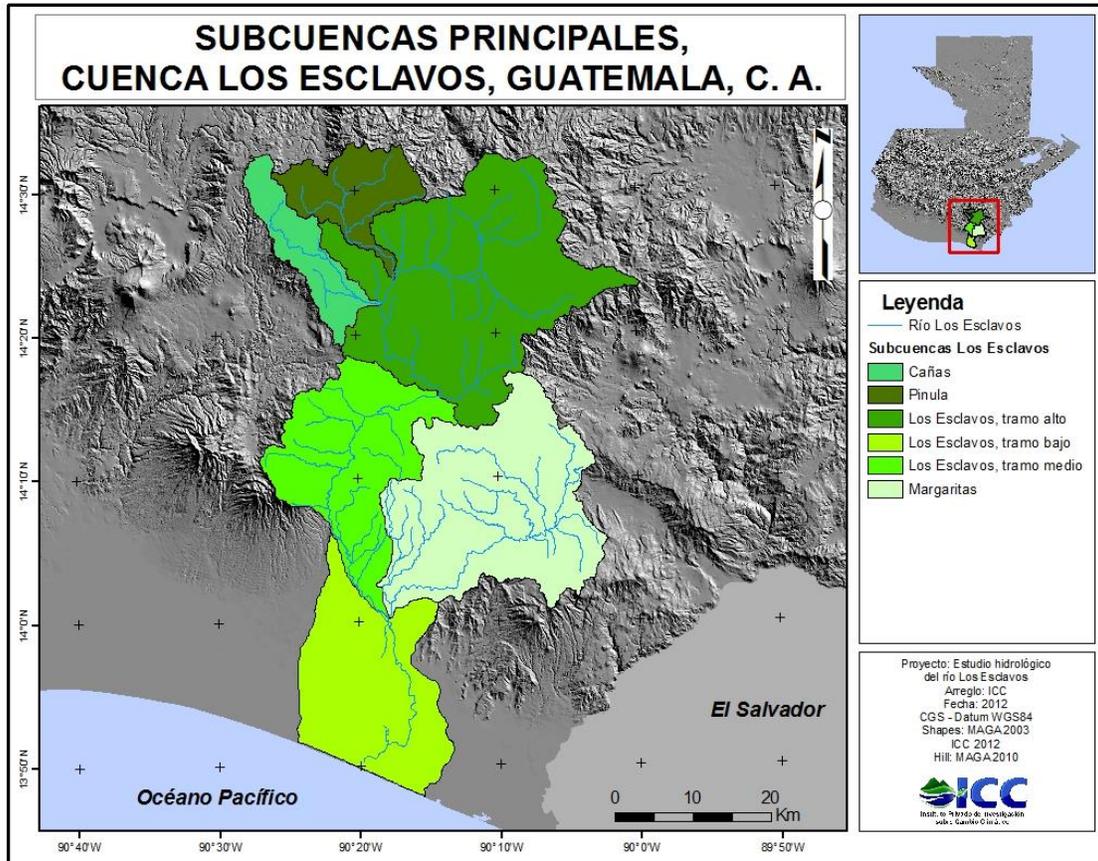


Figura 4. Subcuencas naturales en la cuenca del río Los Esclavos.

5.2. Datos pluviométricos

En la zona de estudio y sus proximidades se han ubicado un total de 10 estaciones meteorológicas, todas ellas instaladas por INSIVUMEH⁴. Tres de estas estaciones disponen de registros de intensidad de precipitación, mientras que el resto dispone de registros diarios (figura 5). Para realizar un estudio de inundaciones es necesario que el registro de datos sea lo más extenso posible, por lo cual se han seleccionado las estaciones con un mayor número de años en funcionamiento idealmente igual o superior a 40 años (Mendoza, 1994). Se han seleccionado las estaciones con un mayor número de años de funcionamiento. INSIVUMEH, Los Esclavos, Quezada y Montufar, con 81, 41, 39 y 36 años de registro, respectivamente.

La mayoría de estaciones existentes disponen de datos diarios de precipitación mientras que los modelos requieren la entrada de valores de precipitación horarios, puesto que los episodios de precipitación se acostumbran a originar en pocas horas. Por eso se ha realizado un estudio de distribución temporal de la precipitación en episodios extremos, partiendo de registros de intensidad de lluvia (Estudio de intensidad de precipitación en las cuencas prioritarias del ICC, 2012). En la cuenca de los Esclavos se dispone de registros de intensidad en la estación de Los Esclavos, aunque debido a la proximidad a la zona de estudio, también se han utilizado las curvas P_d/P_{24} de las estaciones de INSIVUMEH y Montufar (Anexo I).

Los datos de precipitación disponibles se presentan en valores de precipitación diaria. Los episodios de lluvia intensa se acostumbran a originar en pocas horas, por eso se utilizan ecuaciones de desagregación de precipitaciones diarias, generadas a partir de los registros de intensidad de lluvia en las estaciones de INSIVUMEH, Los Esclavos y Montufar (Gil, 2012).

⁴ Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.

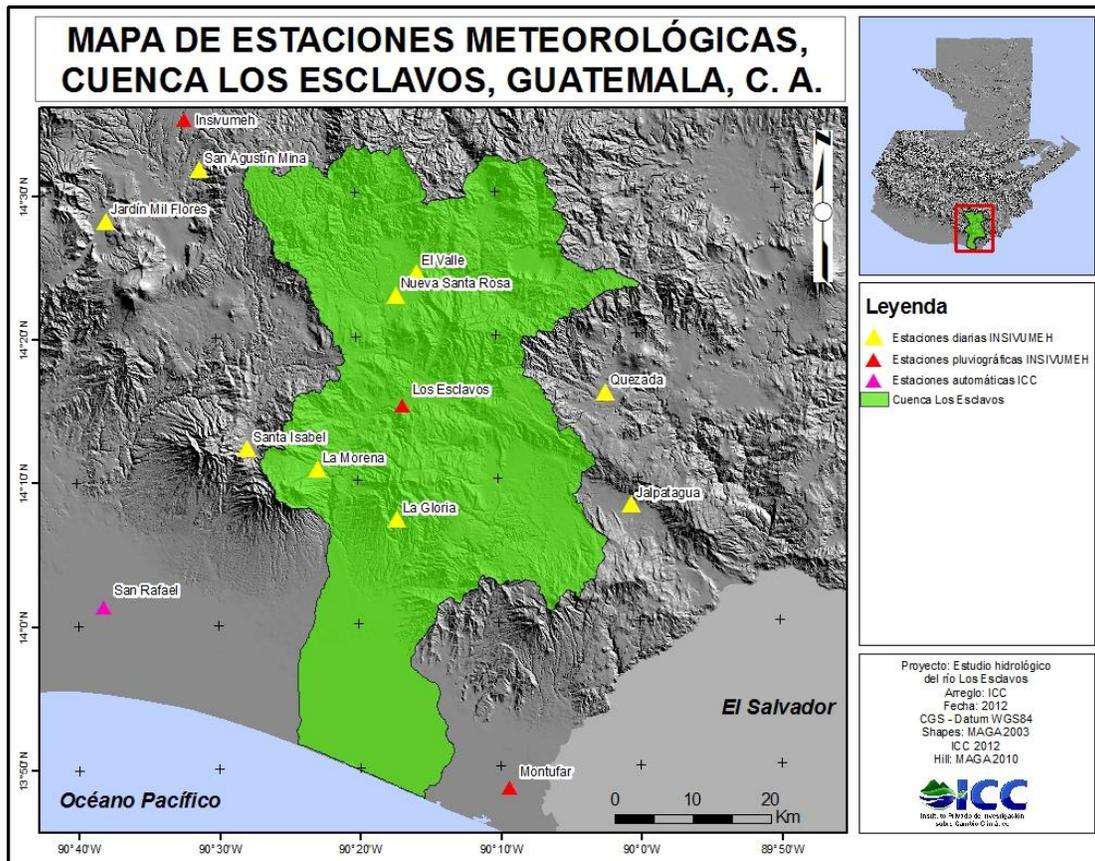


Figura 5. Estaciones meteorológicas existentes en la zona de estudio. Amarillo: Pluviométrica INSIVUMEH. Rojo: Pluviográfica INSIVUMEH. Morado: Automática ICC.

5.3. Datos de caudal

Los datos de caudal permiten calibrar y validar los resultados obtenidos por el modelo. Históricamente, en la cuenca del río Los Esclavos han existido estaciones de aforo en cinco puntos, instaladas por INSIVUMEH (figura 6). De éstas, solamente se dispone de registros en tres (cuadro 3). Las estaciones de aforo constituyen puntos de referencia que permiten comprobar si el caudal real corresponde con el caudal generado por el modelo. Dos de las estaciones, por su ubicación, podrían resultar de gran utilidad son las de para calibrar el modelo hidrológico. La estación Sinacantan para calibrar el río Los Esclavos en su tramo medio y la estación de Chiquimulilla para calibrar el aporte de caudal correspondiente al afluente Margaritas. Sin embargo, no se ha conseguido obtener ningún registro procedente de estas estaciones. De las estaciones restantes la Sonrisa podría generar datos útiles para calibrar el

tramo alto del río Los Esclavos, mientras que en el tramo bajo no existe información relativa a ubicación de estaciones de aforo.

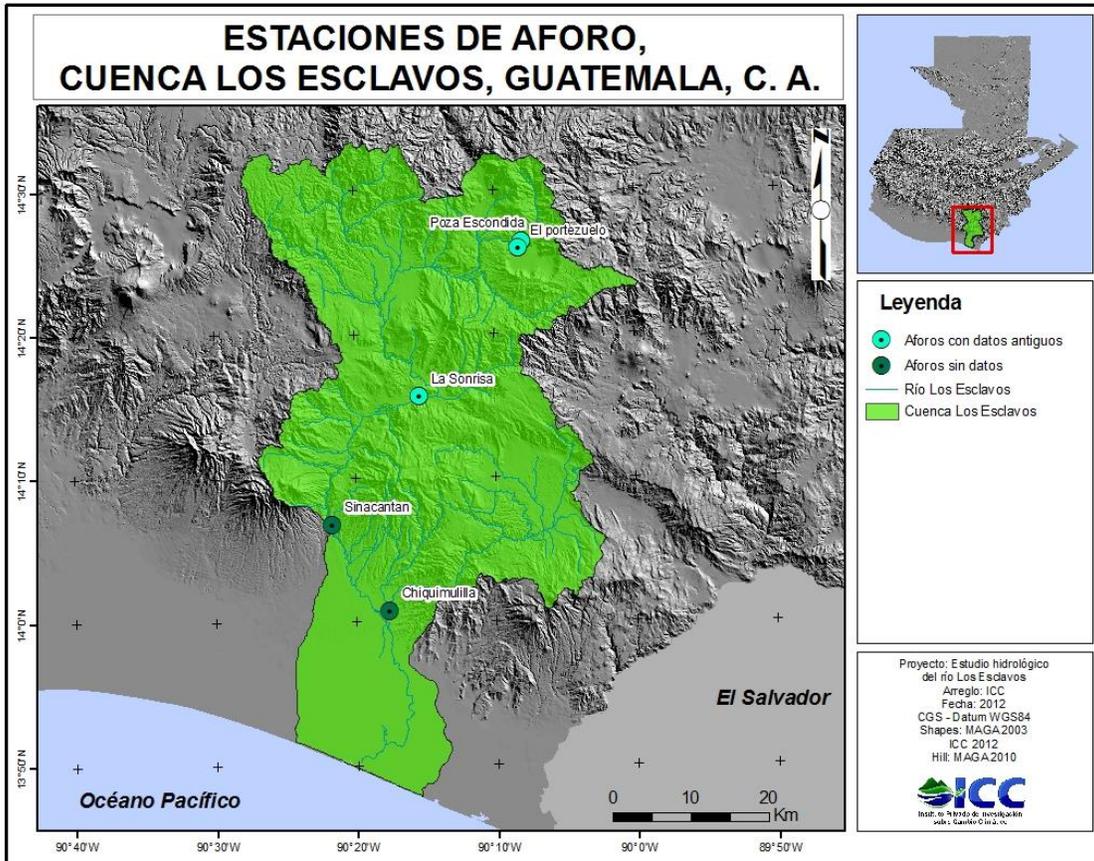


Figura 6. Estaciones de aforo en la cuenca de Los Esclavos.

Cuadro 3. Datos de aforo disponibles en la cuenca de Los Esclavos.

Estación	Registros	Periodicidad	Tipo de dato	Máximo registrado (m ³ /s)
Poza Escondida	06/1966 – 04/1982	Diarios	Caudal	915.00
El Portezuelo	05/1966 – 04/1984	Diarios	Caudal	91.00
La Sonrisa	06/1966 – 03/1976	Diarios	Caudal	445.50

6. Metodología

En el modelo hidrológico, el hietograma de precipitación proporciona los datos de entrada, y los hidrogramas correspondientes a dichas precipitaciones son los datos de salida. Es decir, el objetivo del modelo es obtener los caudales correspondientes a diferentes episodios de precipitación. Para esto se necesita conocer las características hidrológicas del terreno, que serán las que permitirán construir el modelo con una base empírica. Este método se llama precipitación-escorrentía (figura 7).



Figura 7. Esquema de funcionamiento de los modelos precipitación-escorrentía.

6.1. Precipitación

Los datos de precipitación en un estudio del riesgo de inundación se suelen introducir en base horaria, aunque los modelos son flexibles en este aspecto. Los registros disponibles presentan datos de lluvia diarios. Se ha utilizado el método de desagregación de precipitaciones diarias (Gil, 2012), para obtener hietogramas con valores horarios (figura 9).

Para determinar el caudal correspondiente a una inundación con un período de retorno determinado, se deben introducir en el modelo los datos de precipitación correspondientes a dicho período de retorno. Por este motivo es importante disponer de un registro amplio de datos meteorológicos. En el caso del río Los Esclavos, se ha determinado el volumen de

precipitación máxima correspondiente a los períodos de retorno de 10, 25 y 50 años para cada una de las estaciones meteorológicas estudiadas. La determinación se ha realizado con el método de Gumbel, en el cual se determina el período de retorno en función de las precipitaciones diarias máximas anuales y el número años de registro (anexo I). Mediante este método se ha determinado el volumen de precipitación para los períodos de retorno mencionados en las estaciones de INSIVUMEH, Los Esclavos, Quezada y Montufar.

Las curvas de desagregación de precipitaciones de 24 horas (Gil, 2012) generadas para las estaciones de INSIVUMEH, Los Esclavos y Montufar (Ec. 1-3) han permitido distribuir valores de precipitación diaria en hietogramas horarios (figura 8). La distribución temporal de Los Esclavos se ha aplicado para generar los hietogramas de la estación de Quezada debido a la proximidad de estas estaciones.

$$\frac{P_d}{P_{24}} = \frac{d}{17.39 \cdot T^{0.588} + d} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$\frac{P_d}{P_{24}} = \frac{d}{34.86 \cdot T^{0.602} + 0.990 \cdot d} \quad (\text{Ec. 2})$$

$$\frac{P_d}{P_{24}} = \frac{d}{16.05 \cdot T^{0.709} + 0.910 \cdot d} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

d es la longitud de la precipitación, en minutos

P_d es el volumen de precipitación correspondiente a la duración “d”, en milímetros

P₂₄ es la precipitación diaria, en milímetros

T es el período de retorno, en años

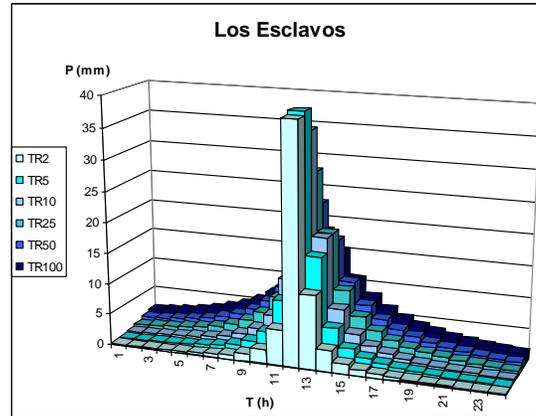


Figura 8. Ejemplo de los hietogramas generados con el método Pd/P24 modificado para la estación Los Esclavos.

Se recomienda corregir el valor de precipitación diaria calculado con el ajuste de Gumbel mediante la aplicación del coeficiente de simultaneidad (K_A) (ACA 2003). Este coeficiente corrige la asunción que la distribución espacial de la precipitación es constante. En efecto, mientras mayor sea la superficie de estudio, más desigual será la distribución de la precipitación en el territorio. Por este motivo la ecuación para el cálculo de K_A depende directamente de la superficie de estudio:

$$K_A = 1 - \frac{\log S}{15}$$

Donde,

K_A es el coeficiente de simultaneidad (adimensional)

S es la superficie de influencia de la estación (kilómetros cuadrados)

Éste coeficiente permite corregir el valor de precipitación diaria, mediante la siguiente ecuación:

$$P'_d = P_d \cdot K_A$$

Donde,

P'_d es la precipitación diaria corregida (milímetros)

P_d es la precipitación diaria (milímetros)

K_A es el coeficiente de simultaneidad (adimensional)

En la cuenca del río Los Esclavos se han utilizado cuatro estaciones para obtener los datos pluviométricos (figura 9). En las estaciones de INSIVUMEH, Los Esclavos y Montufar se han utilizado las curvas P_d/P_{24} generadas a partir de sus propios registros, mientras que en la estación de Quezada, por no disponer esta de registros de intensidad de precipitación, se ha utilizado la distribución calculada en la estación de Los Esclavos. El volumen de precipitación diaria se ha calculado mediante la ley de Gumbel y se ha corregido con el coeficiente de simultaneidad (cuadro 4).

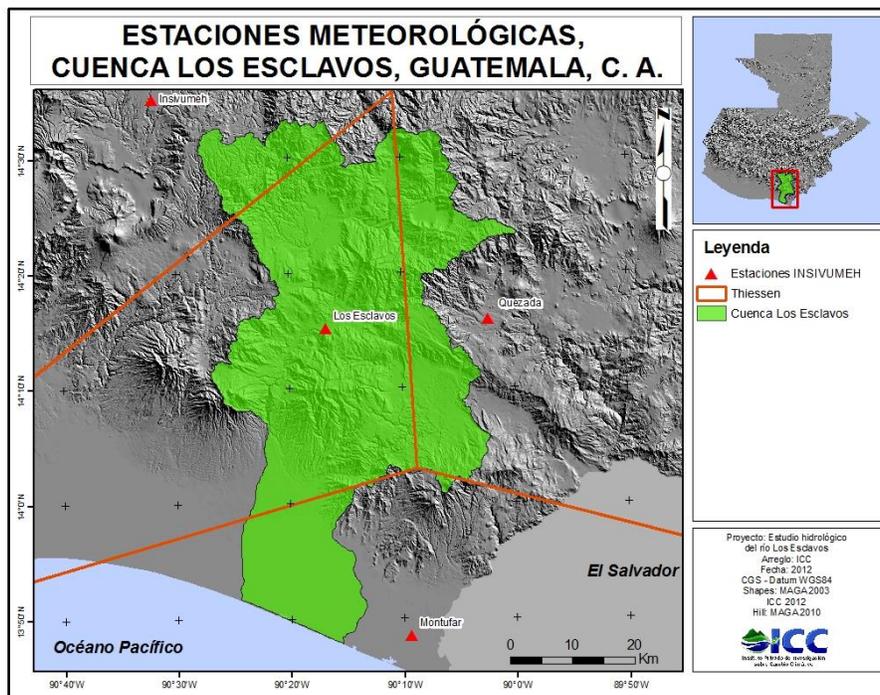


Figura 9. Estaciones meteorológicas utilizadas y área de influencia según Thiessen.

Cuadro 4. Estaciones meteorológicas utilizadas, volumen diario de precipitación por período de retorno y corrección mediante el coeficiente de simultaneidad.

Estación	INSIVUMEH	Los Esclavos	Quezada	Montufar
Elevación (msnm)	2,240	737	980	10
Distribución P_d/P_{24}	INSIVUMEH	Los Esclavos	Los Esclavos	Montufar
P_d T10 (mm)	113	119	92	172
P_d T25 (mm)	140	145	111	214
P_d T50 (mm)	161	165	125	245
Superficie (km ²)	525	1917	1774	105
KA	0.82	0.78	0.78	0.87
P_d' T10 (mm)	93	93	72	149
P_d' T25 (mm)	115	113	87	184
P_d' T50 (mm)	132	129	98	212

6.2. Procesos hidrológicos

Para calcular la escorrentía que se generará aguas abajo es necesario determinar la distribución del agua una vez que esta ha alcanzado la superficie de la cuenca, es decir qué cantidad de agua se convierte en infiltración, evaporación y retención superficial (figura 7). No es sencillo determinar empíricamente estos tres parámetros para una cuenca, debido a la heterogénea distribución de éstos a lo largo del territorio y a la extensión de la cuenca de estudio (2,007 km²). Por este motivo, el Soil Conservation Service (SCS) de los Estados Unidos, ha establecido un método basado en estudios realizados en numerosas cuencas del sur de ese país (SCS, 1972). El método del número de curva permite aunar los parámetros correspondientes a las pérdidas hidrológicas (infiltración, evapotranspiración y retención superficial) en un parámetro adimensional. El parámetro del número de curva es inversamente proporcional a la capacidad de almacenamiento de agua del terreno, y aunque existe una fórmula que permite calcularlo empíricamente, se acostumbra a determinar mediante una serie de cuadros publicadas por el NRCS (Natural Resources Conservation Service), en las cuales se puede obtener el número de curva para una determinada superficie en función del tipo de suelo, uso de la tierra e inclinación de la superficie (ACA, 2003; Chow V.T., 1988; Ponce, 1989). Una vez conocido el número de curva de la cuenca, el software de modelación puede estimar el caudal generado a partir de una determinada precipitación.

6.2.1. Geología

Uno de los parámetros necesarios para el cálculo del número de curva es el tipo de suelo. Éste se clasifica en cuatro categorías, en función de su capacidad de infiltración (cuadro 5).

Cuadro 5. Criterios de clasificación del tipo de suelo según el NRCS.

Grupo	A	B	C	D
Tasa de infiltración	0.80-1.10 cm/h	0.40-0.80cm/h	0.10-0.40 cm/h	0-0.10cm/h
Permeabilidad	Infiltración rápida incluso con humedad elevada	Infiltración moderada con humedad elevada	Infiltración lenta si presentan humedad	Infiltración muy lenta cuando están húmedos
Textura	Arenas, arenas y limos	Franco-arenosas, franco-arcillo-arenosas, o franco-limosas	Franco-argilosas, franco-arcillo-limosas, limosas o arcillo-arenosas	Arcillosos o niveles freáticos permanentemente cercanos a la superficie.

Se ha clasificado el tipo de suelo en función de la textura y la tasa de infiltración (Tarjuelo, 2005). La mayoría de la superficie de la cuenca corresponde a suelos permeables o muy permeables, mientras que algunas zonas en la parte baja presentan tasas de infiltración moderadas que oscilan entre 0.35 y 0.8 cm/h. Los cuerpos de agua se consideran superficies impermeables, por eso existen regiones con la categoría D (Figura 10).

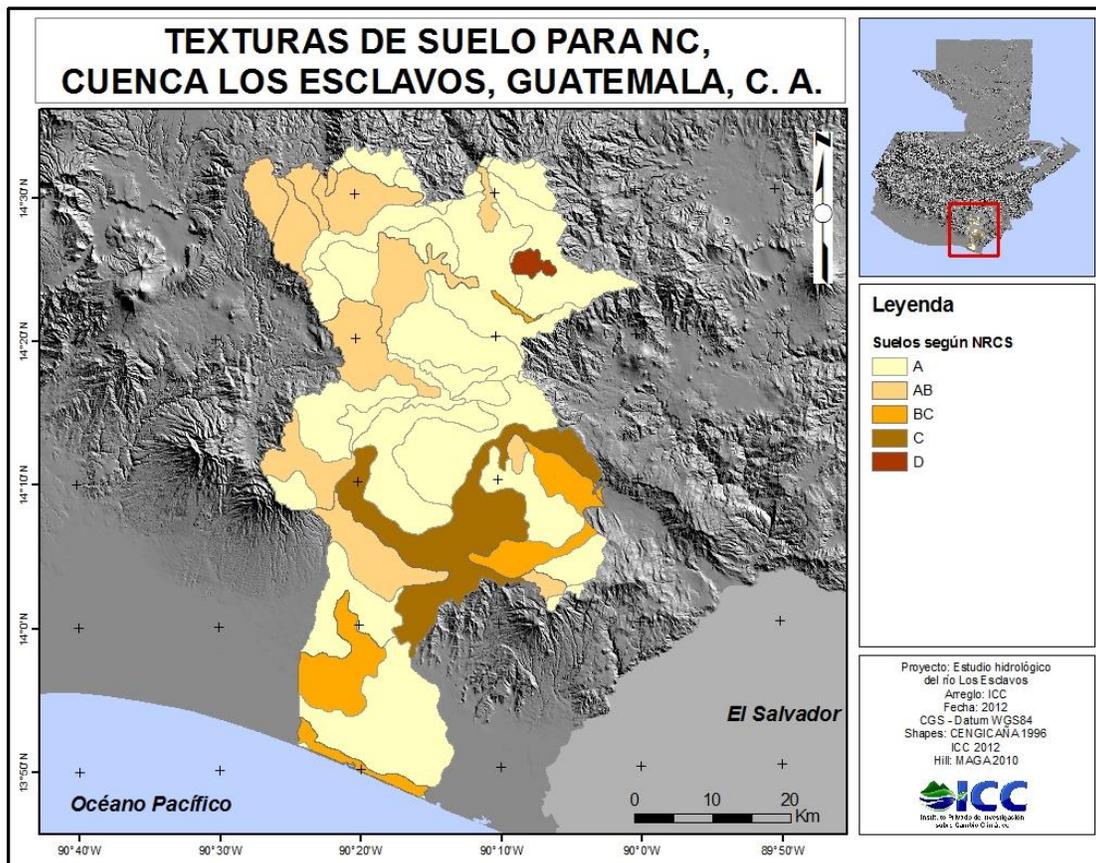


Figura 10. Mapa de tipo de suelo según la clasificación del NRCS.

6.2.2. Uso de la tierra

El uso de la tierra también ha sido clasificado en función de la tipología establecida por el NRCS (figura 11). Esto ha conllevado una simplificación del mapa de uso de la tierra (MAGA, 2003) agrupando, por ejemplo, los usos agrícolas con el mismo sistema de cultivo (como el cultivo en hilera). De un número inicial de 23 categorías de suelo, se ha obtenido un total de 11 (cuadro 6).

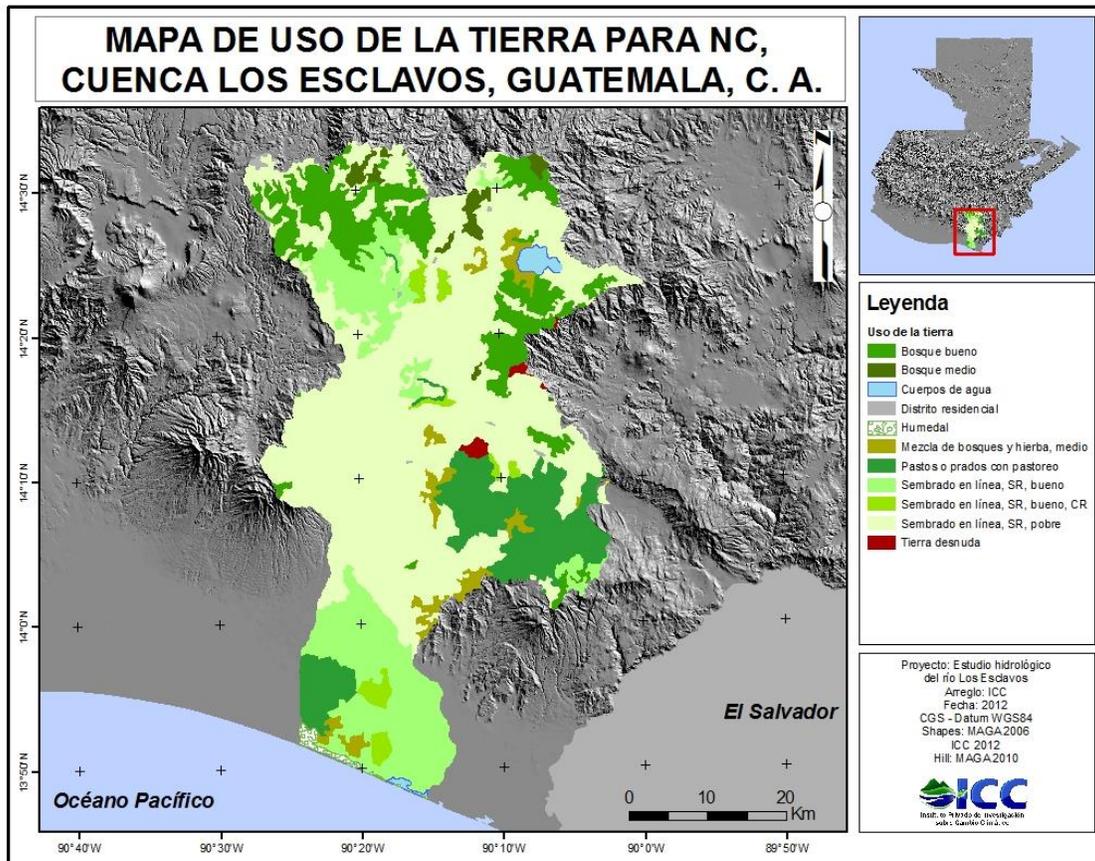


Figura 11. Mapa de uso de la tierra según clasificación NRCS. Los términos “pobre, medio y bueno” se refieren a la cobertura vegetal, SR corresponde a cultivos en línea (Straight Row) y CR a la cobertura del suelo en cultivos (Crop Residue).

6.2.3. Número de curva

Con la cartografía de usos de la tierra y tipo de suelo tipificadas según el criterio del NRCS, el software ArcGIS permite calcular el valor del número de curva para la superficie de la cuenca, a partir de una tabla similar al cuadro 6. De este modo se obtiene un nuevo mapa con la distribución del valor del número de curva en la cuenca (figura 12). El software permite obtener el valor promedio para cada una de las subcuencas.

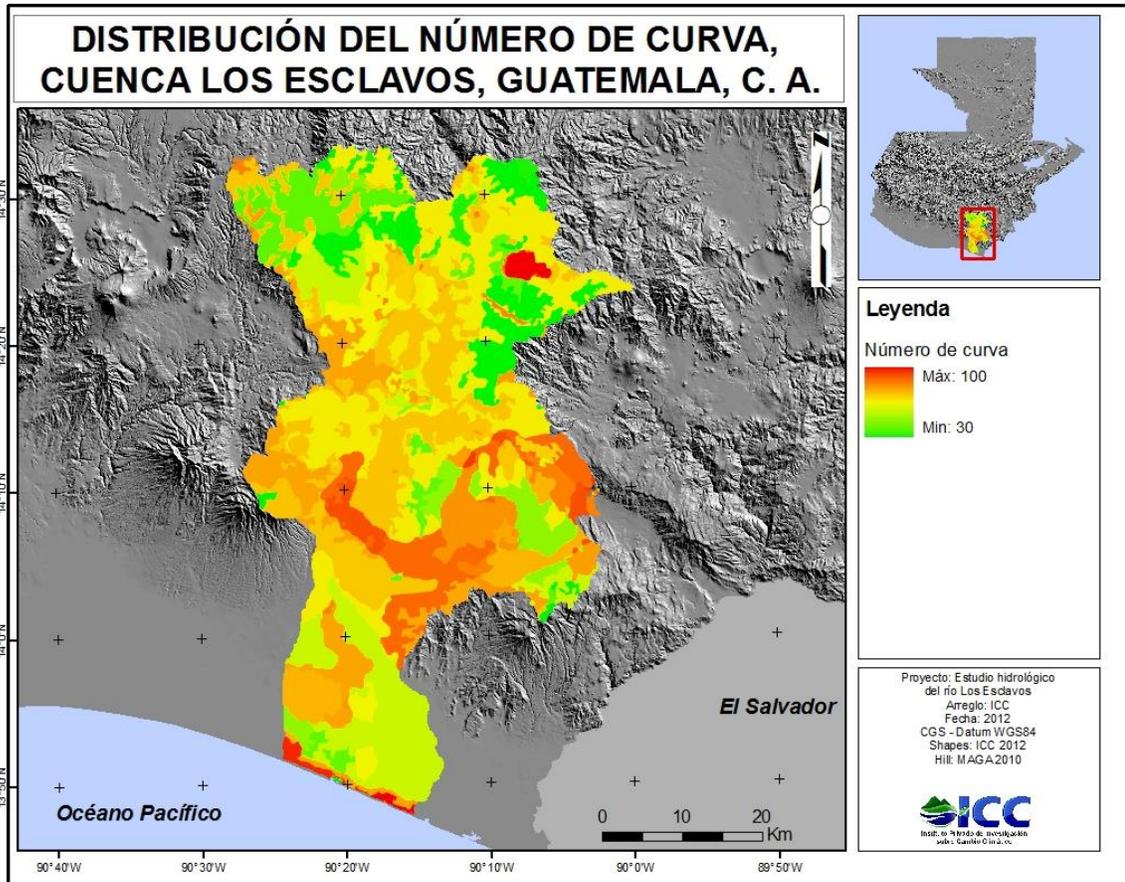


Figura 12. Mapa de distribución de parámetro del número de curva.

Cuadro 6. Clasificación de los usos de la tierra según el criterio del NRCS y número de curva correspondiente según el tipo de suelo (A, B, C o D).

Uso de la tierra	Clasificación NRCS	A	B	C	D
Agroindustria	Ranchos, construcciones, vías de comunicación y parcelas circundantes	59	74	82	86
Aguacate	Plantación forestal	57	73	82	86
Arbustos-matorrales	Arbustos, condiciones hidrológicas medias	68	89	70	77
Arena y/o material piroclástico	Suelo desnudo	77	86	91	94
Bosque conífero	Bosque, condiciones hidrológicas pobres	45	66	77	83
Bosque latifoliado	Bosque, condiciones hidrológicas medias	43	65	76	82
Bosque Mixto	Bosque, condiciones hidrológicas medias	43	65	76	82
Café	Cultivo en línea, condiciones hidrológicas buenas	72	81	88	91
Caña de azúcar	Cultivo en línea, cobertura vegetal, condiciones hidrológicas buenas	64	75	82	85
Cementerio	Espacio abierto, condiciones hidrológicas buenas	39	61	74	80
Centros poblados	Zona urbana, 65% impermeable	77	85	90	92
Cítricos	Plantación forestal	57	73	82	86
Frutales deciduos	Plantación forestal	57	73	82	86
Granos básicos	Cultivo en línea, pobre	65	76	84	88
Hortaliza - ornamental	Cultivo en línea, pobre	65	76	84	88

Hule	Plantación forestal	57	73	82	86
Uso de la tierra	Clasificación NRCS	A	B	C	D
Humedal con otra vegetación	Suelo desnudo	77	86	91	94
Mango	Plantación forestal	57	73	82	86
Minas descubiertas	Suelo impermeable	93	93	93	93
Pastos cultivados	Prado	49	69	79	84
Pastos naturales y/o yerbazal	Prado	30	58	71	78
Pajibaya	Plantación forestal	43	65	76	82
Piña	Cultivo en línea, pobre	72	81	88	91
Plantación Conífera	Plantación forestal	43	65	76	82
Playa/arena	Suelo desnudo	77	86	91	94
Río	Río	10	10	10	10

6.3. Caudal

6.3.1. Método de la crecida índice

La metodología de la crecida índice se basa en el estudio regional de los datos de caudal. En un determinado territorio, se establecen regiones hidrológicas a partir de las características morfológicas, climáticas y de uso de la tierra. Se agrupan todos los registros de caudal disponibles para cada una de las regiones hidrológicas, y se elabora una correlación entre el caudal máximo y la superficie de drenaje (Boni G. et al., 2007). En Guatemala, (INSIVUMEH, 2004) propone la división del territorio nacional en un total de ocho regiones hidrológicas (figura 13). Otros autores ya habían propuesto anteriormente sistemas de división similares del territorio (Larios, 1986).

Para cada una de estas regiones se han establecido ecuaciones de ajuste para determinar el caudal de crecida índice o estándar en una determinada superficie de drenaje. Este caudal de crecida índice se deberá multiplicar por un parámetro de ajuste en función del período de retorno para el cual se quiera determinar el caudal máximo. La cuenca del río Los Esclavos se encuentra íntegramente en la región hidrológica III (Pacífico sur-oriental). Se ha estimado el caudal máximo de crecida con éste método para comparar los resultados obtenidos con éste con los resultados generados en el presente estudio (cuadro 7).

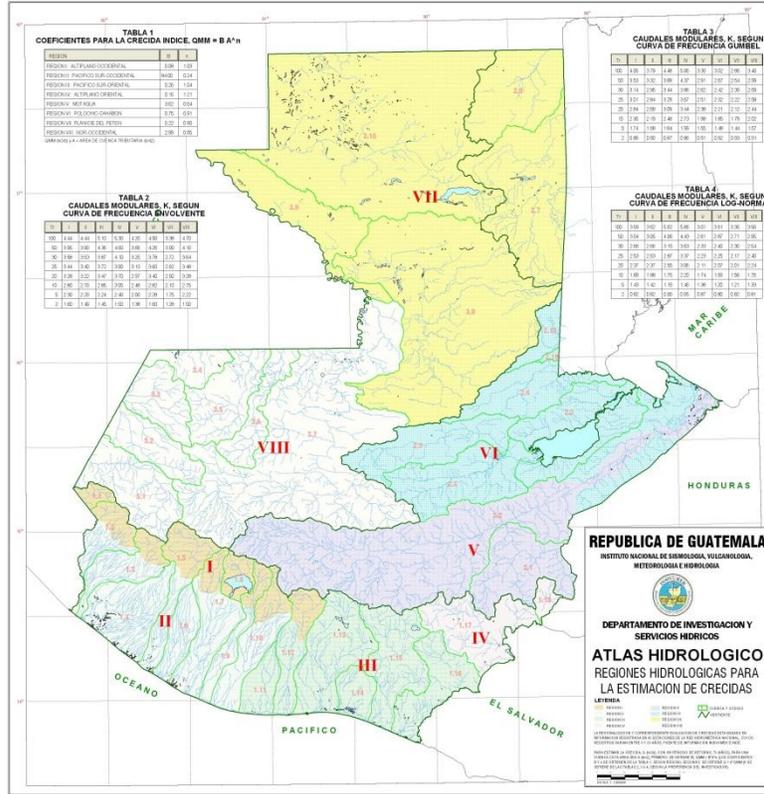


Figura 13. Regiones hidrológicas para la estimación de crecidas en Guatemala. INSIVUMEH.

Cuadro 7. Regiones hidrológicas para la estimación de crecidas en Guatemala. INSIVUMEH.

Subcuenca	Los Esclavos TA	Los Esclavos TM	Los Esclavos TB	Pinula	Cañas	Margaritas	
Superficie drenaje (km2)	978	1349	2309	151	127	573	
Crecida índice (m3/s)	335	468	818	48	40	192	
Caudal T10 (m3/s)	834	1165	2038	119	100	478	
Caudal T25 (m3/s)	1102	1540	2692	158	132	632	Gumbel
Caudal T50 (m3/s)	1303	1820	3183	187	156	747	
Caudal T10 (m3/s)	586	819	1432	84	70	336	
Caudal T25 (m3/s)	894	1249	2185	128	107	513	Log-normal
Caudal T50 (m3/s)	1360	1900	3322	195	163	780	
Caudal T10 (m3/s)	938	1334	2332	137	114	547	
Caudal T25 (m3/s)	1152	1741	3044	179	149	714	Curva envolvente
Caudal T50 (m3/s)	1323	2040	3568	209	175	837	

6.3.2 Modelos lluvia-escorrentía

Éste tipo de modelo proporciona valores de caudal a partir de la precipitación y el número de curva. Para obtener un modelo que genere estimaciones fiables es necesario calibrar y validar los resultados del modelo con datos reales. El método del número de curva es semiempírico y, por tanto, los resultados previos a la calibración pueden no ser tan precisos como se requiere (Ponce, 1989).

Para calibrar un modelo se necesita un hietograma correspondiente a un episodio de precipitación conocido. Introduciendo los valores de dicha precipitación, se observa si el hidrograma generado por el modelo se corresponde con el hidrograma real que esta generó. Se aconseja disponer de dos episodios registrados. El primero se utiliza para calibrar el modelo, es decir, comparar el hidrograma real con el generado por el modelo e introducir las correcciones pertinentes para que ambos coincidan. Las correcciones tratarán de ajustar tanto el valor máximo de caudal como el momento en el que éste se produjo, esto es, se ajusta el caudal máximo y el tiempo de concentración. El segundo se utiliza para validar que la calibración haya sido efectiva y comprobar que el modelo ya es predictivo, estableciendo el posible margen de error y la sensibilidad del modelo.

Cuando no sea posible conseguir hidrogramas en el punto de drenaje del modelo, se podrá calibrar por un lado el valor de caudal máximo, conociendo el caudal máximo asociado a una determinada precipitación, y por otro lado el tiempo de concentración, midiendo el tiempo que transcurre entre el máximo de precipitación y el pico de caudal.

Para la elaboración del estudio, la cuenca del río Los Esclavos se ha dividido en un total de 19 subcuencas (figura 14). Las subcuencas de Cañas y Pinula representan una subcuenca del modelo cada una. El afluente Margaritas se ha dividido en siete subcuencas. En cuanto al río principal, el tramo alto se ha dividido en ocho subcuencas, mientras el tramo medio y bajo suponen una subcuenca cada uno ya que presentan un relieve más homogéneo.

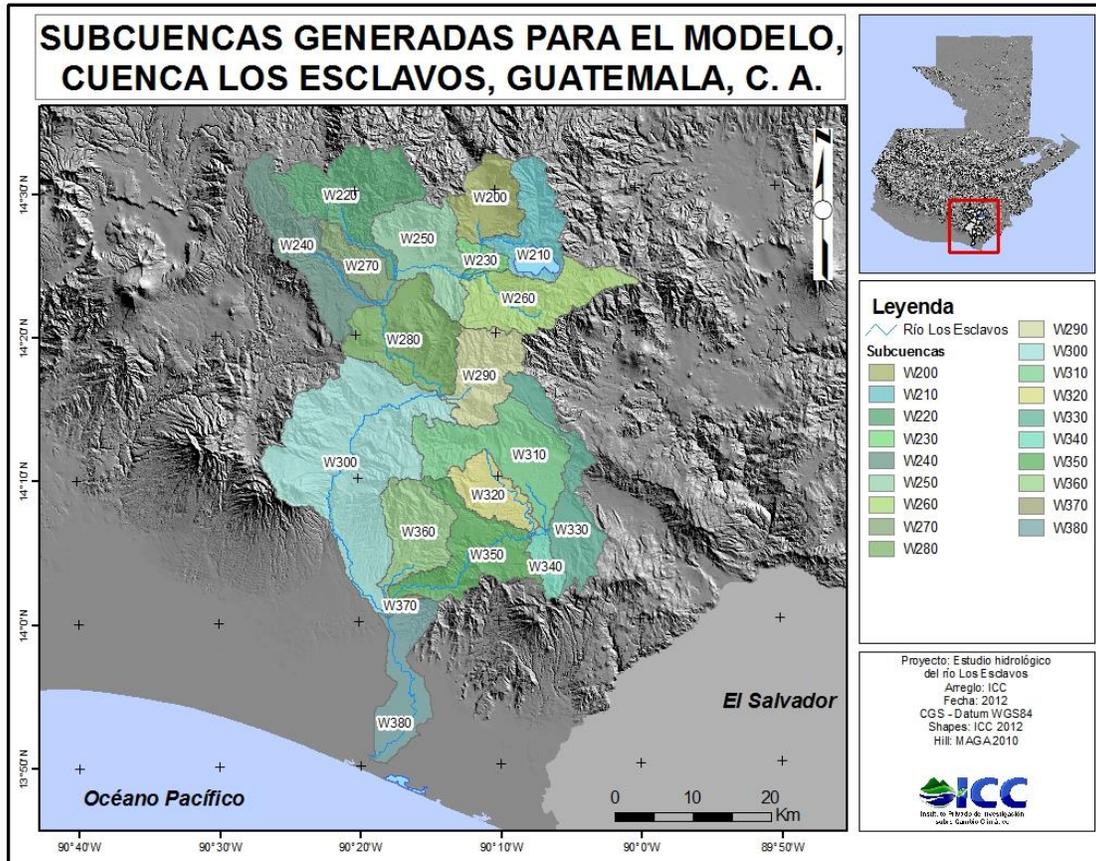


Figura 14. División de la cuenca de Los Esclavos en subcuencas para la generación del modelo hidrológico.

6.3.2.1 Tiempo de retardo

El tiempo de retardo representa el tiempo que transcurre entre el momento de máxima precipitación en la cuenca y el momento de caudal máximo en el punto de drenaje. Es un parámetro que se puede determinar a partir de registros de lluvia y caudal, pero en caso de no disponer de éstos, se puede estimar como el 60% del tiempo de concentración (ACA, 2003; Chow V.T., 1988; Ponce, 1989).

El tiempo de concentración representa el tiempo que transcurre entre la finalización de la precipitación y el punto de inflexión del hidrograma. Para calcular este parámetro de manera empírica también se necesitan registros instantáneos de precipitación y de caudal. En el caso de la cuenca del río Los Esclavos no se dispone de registros de caudal de este tipo todavía. No obstante, el tiempo de concentración se puede estimar a partir de diferentes métodos

teóricos que se basan en parámetros morfométricos de la cuenca. En el presente estudio se utilizaron dos métodos teóricos para determinar el T_c :

- **Fórmula de California o Kirpich:** El tiempo de concentración depende de la longitud del cauce y el desnivel del mismo. Su aplicación es recomendada en cauces montañosos o con inclinaciones elevadas.

$$T_c = 0.95 \left(\frac{L^3}{H_{\text{máx}}} \right)^{0.385}$$

Donde:

T_c es el Tiempo de concentración, en horas.

L es la longitud del recorrido más largo del agua en la subcuenca, en kilómetros.

$H_{\text{máx}}$ es el desnivel máximo de la cuenca, en metros.

- **Fórmula de Giandotti:** incorpora la diferencia de altura entre el centro de gravedad de la cuenca y el punto de salida:

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H_g}}$$

Dónde:

T_c = Tiempo de concentración de la cuenca, en horas

L = Longitud del cauce principal, en kilómetros

H_g = Desnivel entre el centro de gravedad y el punto de salida de la cuenca, en metros

A = Área de la cuenca (kilómetros cuadrados)

La diferencia entre estas dos fórmulas reside en el valor de desnivel que se tiene en cuenta para efectuar el cálculo. La fórmula de California tiene en cuenta el desnivel máximo del tramo de estudio, desde su punto más alto hasta el punto final. La fórmula de Giandotti, en cambio, utiliza el desnivel entre la altitud del río en el centro de gravedad de la subcuenca y el punto final del tramo de estudio del río. La combinación de los dos métodos permite determinar mejor el tiempo de concentración en subcuencas donde se producen variaciones importantes en la pendiente. El tiempo de retardo que ha utilizado en la modelación será el promedio de los resultados de ambos métodos (cuadro 8).

Cuadro 8. Determinación del tiempo de retardo con los métodos de Kirpich y Giandotti para las 19 subcuencas.

California	W200	W210	W220	W230	W240	W250	W260	W270	W280
L (km)	19	22	30.5	11	35.9	17.5	33.8	17.7	31.5
Hmax (m)	1457	1426	963	422	1000	1031	777	756	930
Tc (h)	1.72	2.06	3.49	1.48	4.16	1.79	4.27	2.05	3.68
Tlag	1.03	1.24	2.10	0.89	2.49	1.08	2.56	1.23	2.21

California	W290	W300	W310	W320	W330	W340	W350	W360	W370	W380
L (km)	18.7	50.1	34.4	23.6	30.6	12.4	42.3	26.1	6.6	35.1
Hmax (m)	1098	1164	823	1007	1071	1300	1357	1444	461	624
Tc (h)	1.89	5.76	4.27	2.55	3.37	1.10	4.47	2.50	0.79	4.86
Tlag	1.13	3.46	2.56	1.53	2.02	0.66	2.68	1.50	0.48	2.91

Giandotti	W200	W210	W220	W230	W240	W250	W260	W270	W280
L (km)	19	22	30.5	11	35.9	17.5	33.8	17.7	31.5
Hg (m)	203	570	358	156	374	181	490	125	198
A (km ²)	75.2	91.1	149.3	18.5	124.2	108.1	123.9	49.3	142.9
Tc (h)	5.54	3.73	6.25	3.37	6.36	6.30	5.38	6.11	8.45
Tlag	3.33	2.24	3.75	2.02	3.82	3.78	3.23	3.67	5.07
Tlag promedio	2.18	1.74	2.92	1.46	3.16	2.43	2.90	2.45	3.64

Giandotti	W290	W300	W310	W320	W330	W340	W350	W360	W370	W380
L (km)	18.7	50.1	64.4	23.6	30.6	12.4	42.3	26.1	6.6	35.1
Hg (m)	245	487	152	141	111	286	291	285	101	17
A (km ²)	91.1	372.5	111.8	102.7	106.6	24.2	124.4	95.2	3.6	104
Tc (h)	5.29	10.39	14.08	7.99	10.35	2.83	7.92	5.79	2.18	28.33
Tlag	3.17	6.23	8.45	4.80	6.21	1.70	4.75	3.47	1.31	17.00
Tlag promedio	2.15	4.85	5.50	3.16	4.11	1.18	3.72	2.49	0.89	9.96

6.3.2.2. Propagación de la crecida

Se trata del tiempo que tarda la crecida en circular a través de una subcuenca situada aguas abajo. Es decir, si la zona de estudio se divide en diferentes subcuencas, el hidrograma de la crecida que se genere en el punto de drenaje de la subcuenca más elevada se deberá propagar aguas abajo por el lecho del río de la subcuenca siguiente. Esta circulación produce dos efectos en el flujo: retardo en el caudal máximo del hidrograma debido al tiempo que tarda el río en atravesar el tramo de río de la nueva subcuenca; atenuación del caudal máximo causado por procesos de dispersión y almacenamiento del flujo que tienen lugar en el canal (figura 15).

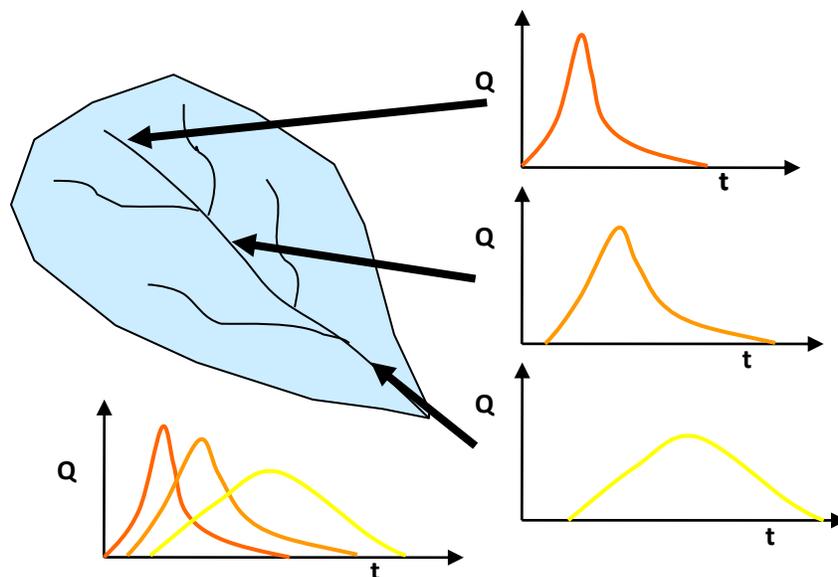


Figura 15. Ejemplo de los efectos de la propagación de la crecida aguas abajo en el hidrograma. Se observa tanto el retardo como la atenuación del máximo.

Existen diversos mecanismos para calcular la propagación de la crecida:

- T_{lag} : Únicamente representa el retardo en la propagación de la crecida, no atenúa el máximo del hidrograma. Se basa en cálculos empíricos del tiempo de propagación, por lo que únicamente se puede aplicar en tramos donde se dispone de registros de este dato. Este método no tiene en cuenta la atenuación en el pico del hidrograma.
- Muskingum: Se basa en el análisis de hidrogramas reales y parte de dos parámetros, uno representa el retardo en la propagación de la crecida y el otro la atenuación del caudal máximo. Se trata de un método muy utilizado que proporciona excelentes resultados, pero para su utilización se requieren hidrogramas registrados para diferentes episodios de precipitación.

- **Munskingum-Cunge:** Se trata de una modificación del método de Muskingum que se basa en parámetros físicos de la cuenca. Elimina la necesidad de utilizar hidrogramas reales, pudiendo aplicar el método en cuencas sin estaciones de aforo.

En el caso del río Los Esclavos, al no disponer de hidrogramas reales se ha utilizado el método de Muskingum-Cunge (cuadro 9). Este método requiere los siguientes datos para su uso:

- Longitud del tramo por donde se propaga la crecida (metros).
- Pendiente del cauce por donde se propaga la crecida (metros/metros).
- Coeficiente de rugosidad de Manning promedio del cauce (adimensional).
- Forma del lecho del río (en este estudio se han simplificado los cauces a formas rectangulares).
- Ancho del cauce (metros).

Estos datos se han estimado, a partir de ortofotomapas, para cada uno de los tramos donde se propagan las crecidas en el modelo del río Los Esclavos (figura 16).

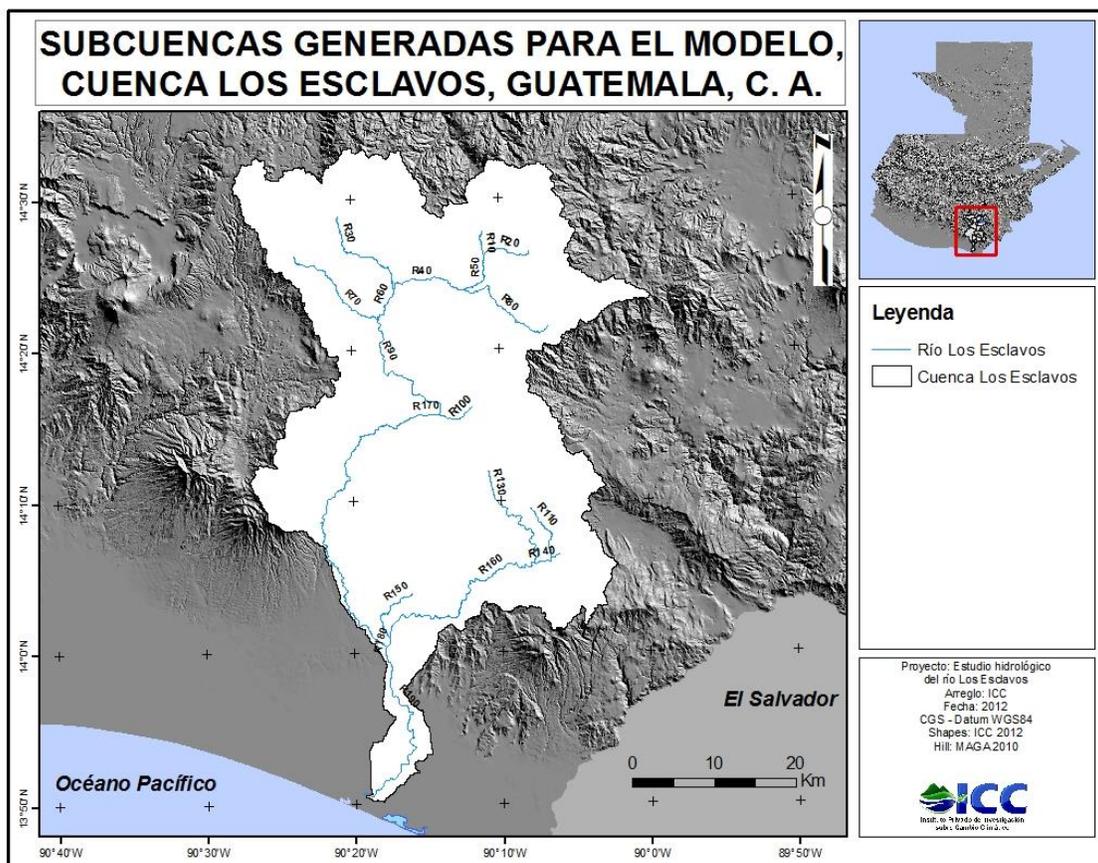


Figura 16. Tramos de estudio en el modelo de Los Esclavos. Nótese que el método de Muskingum-Cunge únicamente se ha aplicado en los tramos donde la crecida se propaga aguas abajo.

Cuadro 9. Parámetros calculados para la metodología Muskingum-Cunge.

Tramo	Forma	Longitud (m)	Inclinación (m/m)	Ancho promedio	Manning promedio
R50	Rectangular	6428	0.019	9.53	0.040
R40	Rectangular	11240	0.010	24.59	0.045
R60	Rectangular	5344	0.006	44.91	0.050
R90	Rectangular	20232	0.008	109.29	0.049
R170	Rectangular	50090	0.014	35.32	0.050
R140	Rectangular	3146	0.007	29.18	0.045
R160	Rectangular	29266	0.011	22.95	0.045
R190	Rectangular	28473	0.001	68.22	0.048
R180	Rectangular	1380	0.008	50.65	0.048

7. Resultados

El modelo hidrológico se ha generado con el software HEC-HMS 3.5, a partir de los datos expuestos en la sección anterior. El caudal máximo se ha calculado en base a la precipitación de diseño con periodos de retorno de 10, 25 y 50 años. Se han determinado los hietogramas correspondientes a las estaciones meteorológicas de INSIVUMEH, Los Esclavos, Quezada y Montufar para estos períodos de retorno, utilizando la metodología de Mendoza modificada propuesta en (Gil, 2012). Los hietogramas de diseño se han introducido junto con los parámetros hidrológicos de la cuenca: número de curva, superficie, longitud del cauce, tiempo de concentración y de propagación de la crecida.

A partir del número de curva, se ha determinado la precipitación umbral en cada una de las subcuencas, es decir, la cantidad de lluvia que se distribuye en los procesos de evaporación, infiltración, interceptación o almacenamiento superficial. De este modo se ha determinado la cantidad de lluvia que se convierte en caudal del río. Se han analizado los resultados del modelo obteniendo los valores mostrados en el cuadro 10.

Cuadro 10. Lluvia neta y pérdidas a partir de la lluvia inicial.

Subcuenca	W200	W210	W220	W230	W240	W250	W260	
Área (km ²)	75.2	91.1	149.3	18.5	124.2	108.1	123.9	
Área (tanto por uno)	0.04	0.05	0.07	0.01	0.06	0.05	0.06	
T10	Lluvia bruta (mm)	76.69	66.64	87.92	81.52	87.32	85.58	71.09
	Lluvia neta (mm)	7.96	6.67	6.86	11.00	14.17	10.98	2.87
	Pérdidas (mm)	68.7	59.97	81.06	70.52	73.15	74.60	68.22
	% lluvia neta (mmneta/mmbruta)	0.12	0.11	0.08	0.16	0.19	0.15	0.04
	Lluvia neta/lluvia bruta ²	0.0017	0.0019	0.0010	0.0022	0.0026	0.0020	0.0006
T25	Lluvia bruta (mm)	87.27	75.59	103.95	92.88	102.31	97.60	80.76
	Lluvia neta (mm)	11.82	9.87	11.99	15.81	21.30	15.93	4.92
	Pérdidas (mm)	75.45	65.72	91.95	77.07	81.02	81.66	75.83
	% lluvia neta (mmneta/mmbruta)	0.16	0.15	0.13	0.21	0.26	0.20	0.06
	Lluvia neta/lluvia bruta ²	0.0021	0.0023	0.0014	0.0027	0.0032	0.0024	0.0009
T50	Lluvia bruta (mm)	92.19	79.24	113.83	98.42	111.21	103.65	84.97
	Lluvia neta (mm)	13.82	11.32	15.74	18.38	25.98	18.68	5.98
	Pérdidas (mm)	78.37	67.92	98.10	80.03	85.23	84.96	78.98
	% lluvia neta (mmneta/mmbruta)	0.18	0.17	0.16	0.23	0.30	0.22	0.08
	Lluvia neta/lluvia bruta ²	0.0023	0.0025	0.0016	0.0029	0.0036	0.0026	0.0010

Subcuenca	W270	W280	W290	W300	W310	W320	W330	
Área (km2)	49.4	142.9	91.1	372.5	111.8	102.7	106.6	
Área (tanto por uno)	0.02	0.07	0.05	0.18	0.06	0.05	0.05	
T10	Lluvia bruta (mm)	85.78	85.58	81.72	85.58	83.07	69.73	66.26
	Lluvia neta (mm)	7.92	24.47	73.58	26.64	20.34	14.13	11.37
	Pérdidas (mm)	77.86	61.12	8.13	58.94	62.73	55.60	54.88
	% lluvia neta (mmneta/mmbruta)	0.10	0.40	9.05	0.45	0.32	0.25	0.21
	Lluvia neta/lluvia bruta ²	0.0013	0.0066	1.1132	0.0077	0.0052	0.0046	0.0038
T25	Lluvia bruta (mm)	98.14	97.60	93.11	97.60	94.68	79.18	75.14
	Lluvia neta (mm)	12.17	32.10	12.21	34.62	27.15	19.12	15.66
	Pérdidas (mm)	85.98	65.49	80.90	62.98	67.53	60.06	59.48
	% lluvia neta (mmneta/mmbruta)	0.14	0.49	0.15	0.55	0.40	0.32	0.26
	Lluvia neta/lluvia bruta ²	0.0016	0.0075	0.0019	0.0087	0.0060	0.0053	0.0044
T50	Lluvia bruta (mm)	104.52	103.65	98.66	103.65	100.41	83.22	78.74
	Lluvia neta (mm)	14.64	36.16	14.43	38.84	30.71	21.40	17.53
	Pérdidas (mm)	89.88	67.49	84.24	64.81	69.70	61.82	61.21
	% lluvia neta (mmneta/mmbruta)	0.16	0.54	0.17	0.60	0.44	0.35	0.29
	Lluvia neta/lluvia bruta ²	0.0018	0.0079	0.0020	0.0092	0.0063	0.0056	0.0047

Subcuenca	W340	W350	W360	W370	W380	
Área (km2)	24.2	124.4	95.2	3.6	104.2	
Área (tanto por uno)	0.01	0.06	0.05	0.00	0.05	
T10	Lluvia bruta (mm)	77.67	84.63	85.58	85.58	151.32
	Lluvia neta (mm)	10.52	32.92	29.49	40.46	57.01
	Pérdidas (mm)	67.15	51.71	56.09	45.12	94.31
	% lluvia neta (mmneta/mmbruta)	0.16	0.64	0.53	0.90	0.60
	Lluvia neta/lluvia bruta ²	0.0023	0.0123	0.0094	0.0199	0.0064
T25	Lluvia bruta (mm)	88.83	96.56	97.60	97.60	177.16
	Lluvia neta (mm)	15.26	41.78	37.90	50.22	76.00
	Pérdidas (mm)	73.57	54.78	59.70	47.37	101.15
	% lluvia neta (mmneta/mmbruta)	0.21	0.76	0.63	1.06	0.75
	Lluvia neta/lluvia bruta ²	0.0028	0.0139	0.0106	0.0224	0.0074
T50	Lluvia bruta (mm)	93.81	102.48	103.65	103.65	190.99
	Lluvia neta (mm)	17.58	46.33	42.31	55.27	86.65
	Pérdidas (mm)	76.22	56.14	61.33	48.37	104.35
	% lluvia neta (mmneta/mmbruta)	0.23	0.83	0.69	1.14	0.83
	Lluvia neta/lluvia bruta ²	0.0030	0.0147	0.0112	0.0236	0.0080

Parámetros:

Lluvia bruta (mm) volumen de lluvia total caída sobre una zona determinada.

Lluvia neta (mm) fracción de la lluvia bruta que pasa a formar escorrentía superficial en forma de ríos, arroyos u otras corrientes de agua.

Pérdidas (mm) fracción de la lluvia bruta que se distribuye en procesos como evaporación, infiltración, intercepción o almacenamiento superficial.

Porcentaje de lluvia neta (mm lluvia neta/mm lluvia bruta) porcentaje de lluvia que se convierte en escorrentía directa.

Lluvia neta/lluvia bruta²

Se pueden observar tendencias importantes en el porcentaje de lluvia inicial que se convierte en lluvia neta, por ejemplo, en una misma subcuenca el porcentaje de lluvia neta incrementa cuando incrementa el periodo de retorno. Esto significa que cuanto mayor es el volumen de precipitación mayor será la proporción de agua que generará escorrentía superficial. Esta relación tiene sentido puesto que las pérdidas hidrológicas no pueden incrementar indefinidamente (el suelo tiene una capacidad limitada de absorción de agua de lluvia). Cuando el volumen de precipitación excede el valor máximo de pérdidas hidrológicas, la proporción de lluvia neta incrementa rápidamente.

La escorrentía determinada con los resultados anteriores se caracteriza por su distribución y recorrido en la cuenca. Esto se ha determinado a partir de parámetros como el tiempo de concentración, el tiempo de retardo y el tiempo de propagación de la crecida. En los cuadros 11 y 12 se resumen los diferentes valores calculados para las subcuencas de Los Esclavos.

Cuadro 11. Tiempo de concentración y retardo para cada una de las subcuencas. El tiempo de concentración se ha determinado mediante el promedio de los métodos de Kirpich y Giandotti. El tiempo de retardo se ha calculado como el 60% del tiempo de concentración.

	W200	W210	W220	W230	W240	W250	W260	W270	W280	W290
Tiempo de concentración (h)	3,63	2,89	4,87	2,43	5,26	4,05	4,85	4,08	6,06	3,59
Tiempo de retardo (h)	2,18	1,74	2,92	1,46	3,16	2,43	2,90	2,45	3,64	2,15

	W300	W310	W320	W330	W340	W350	W360	W370	W380
Tiempo de concentración (h)	8,08	9,17	5,27	6,86	1,97	6,19	4,14	1,48	16,59
Tiempo de retardo (h)	4,85	5,50	3,16	4,11	1,18	3,72	2,49	0,89	9,96

La subcuenca con mayor tiempo de retardo es W380, puesto que corresponde al tramo final del río, donde la inclinación es muy suave y el tramo presenta una longitud de 35 kilómetros. Tramos de la parte alta de la cuenca, como el correspondiente a la subcuenca W280 aun presentando longitudes similares (31.5km) tienen tiempos de concentración muy inferiores.

Se puede apreciar el valor que aporta la combinación de los métodos de Giandotti y Kirpich analizando los resultados obtenidos para la subcuenca W310, correspondiente a una subcuenca de la parte alta de la cuenca. La fórmula de Kirpich determina un tiempo de concentración de 4,27 horas mientras que con el método de Giandotti el resultado se triplica obteniendo un tiempo de 14,08 horas. Esto es debido a que la primera considera el desnivel absoluto de la subcuenca (823 metros) mientras que la segunda evalúa el desnivel desde el centro de la subcuenca hasta el final de ésta (152 metros). Debido a la diferencia entre estos dos valores se obtienen resultados tan diferentes.

La combinación de las metodologías ha sido una buena herramienta para representar la morfología de esta región, donde muchas de las subcuencas presentan pendientes muy elevadas en el tramo inicial que se suavizan aguas abajo en la planicie del Pacífico.

A pesar del valor añadido que supone la combinación de dos ecuaciones, sigue siendo necesaria la validación de los valores obtenidos con registros reales para dar mayor fiabilidad al modelo.

Cuadro 12. Tiempo de propagación de la crecida calculado mediante la fórmula de Muskingum-Cunge. Los valores de Manning asignados han sido de 0,046.

Tramo	Subcuenca	Longitud tramo (km)	Inclinación tramo (m/m)	Amplitud promedio del cauce (m)	Tiempo de propagación
R40	W250	11,2	0,01	24,6	47 min
R50	W230	6,4	0,019	9,5	18 min
R60	W270	5,3	0,006	44,9	25 min
R90	W280	20,2	0,008	109,3	1 h 40 min
R140	W340	3,2	0,007	29,2	14 min
R160	W350	29,3	0,011	23,0	1 h 32 min
R170	W300	50,1	0,014	35,3	2 h 6 min
R180	W370	1,4	0,008	50,7	5 min
R190	W380	28,5	0,001	50,7	2 h 26 min

El tramo que presenta un mayor tiempo de propagación de crecida es R190, puesto que es el tramo más largo del modelo que transcurre por la llanura del Pacífico.

El coeficiente de Manning promedio utilizado ha sido de 0,046, con valores que oscilan entre 0,04 y 0,05. De este modo, tramos con valores de Manning superiores, mayores longitudes en los cauces y desniveles reducidos presentarán mayor retraso en la propagación de la crecida así como una mayor atenuación del caudal máximo del hidrograma debido a los procesos de dispersión.

Los datos de tiempo de concentración y propagación de la crecida pueden servir para realizar predicciones en la ocurrencia de inundaciones. Por ejemplo, si se quisiera determinar en cuanto tiempo llegará a la desembocadura la crecida causada por un episodio de lluvia extremo concentrado en la cabecera del río Margaritas (subcuenca W310) se debería sumar el tiempo de retardo de dicha subcuenca con el tiempo de propagación de la crecida hasta la desembocadura (R140, R160, R180 y R190). De este modo se podría estimar que desde el máximo de precipitación se dispone de unas 9.5 horas para alertar a las poblaciones asentadas en la línea de costa y proximidades de los Esclavos.

A pesar de que el método Muskingum-Cunge determina un tiempo de propagación de la crecida para una longitud determinada, no es conveniente establecer datos de velocidad del flujo a partir de estas estimaciones. La velocidad está fuertemente relacionada con la topografía del cauce y se debe estimar a partir de modelos hidráulicos.

A partir de los datos expuestos, el software HEC-HMS 3.5 ha generado hidrogramas de crecida para los diferentes períodos de retorno (figura 17). El tiempo estimado entre el valor de precipitación promedio máxima en la cuenca y el valor de caudal máximo en la desembocadura es de 9 horas y 40 minutos. Se han determinado, además, el tiempo de retardo para cada una de las subcuencas.

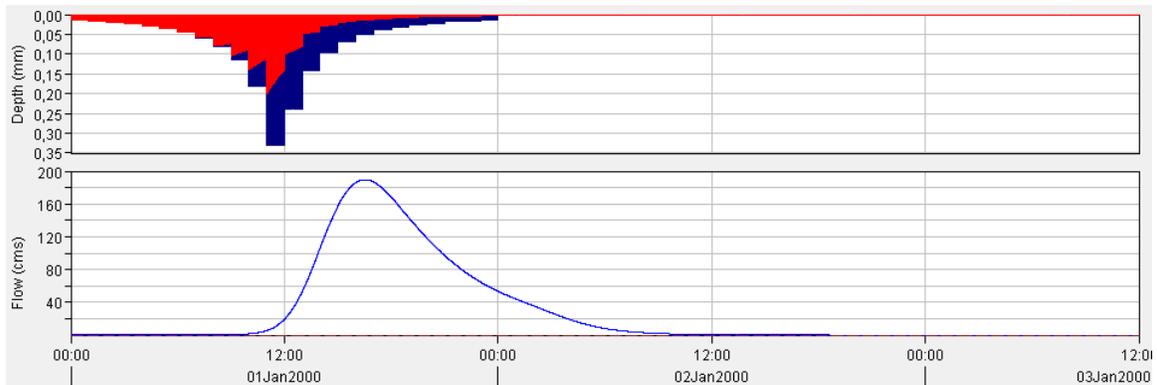


Figura 17. Hietograma calculado en la subcuenca W200 (arriba) y hidrograma generado por dicha precipitación (abajo). Nótese que la precipitación neta (azul) se diferencia de las pérdidas hidrológicas (rojo) a partir del parámetro del número de curva.

Se han generado hidrogramas para diferentes puntos de interés (figura 18) y se han determinado los caudales máximos para los periodos de retorno de 10, 25 y 50 años, correspondientes a los afluentes de Las Cañas, Pinula, Margaritas y los tramos alto, medio y bajo de Los Esclavos (cuadro 13).

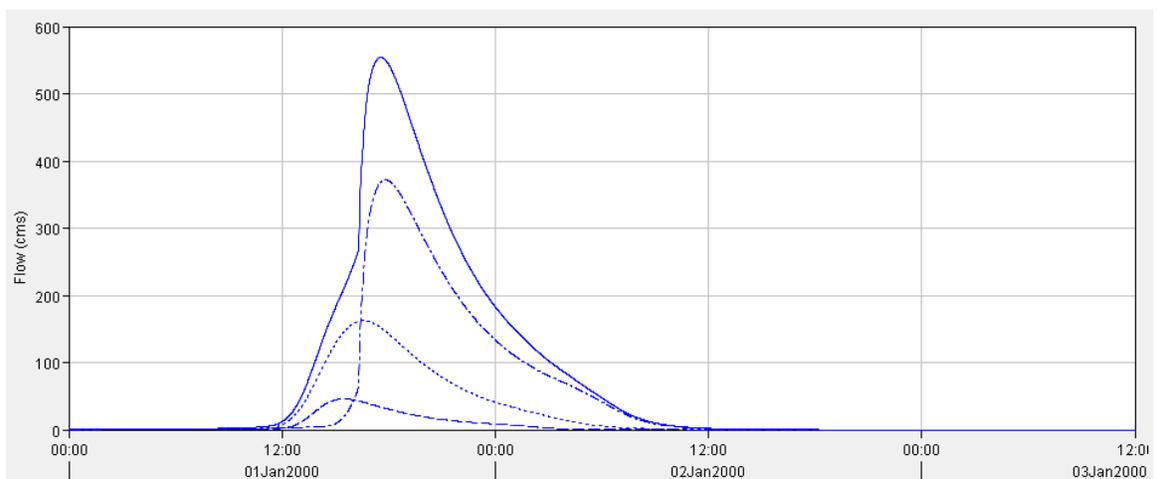


Figura 18. Hidrograma generado en el modelo hidrológico en el tramo alto de Los Esclavos, para un periodo de retorno de 25 años. Nótese que este hidrograma es la suma de todos los hidrogramas procedentes de las subcuencas situadas río arriba (hidrogramas discontinuos).

Cuadro 13. Caudales máximos estimados (en m³/s) para los periodos de retorno de 10, 25 y 50 años.

	T10	T25	T50
Las Cañas	79.4	108	119.6
Pinula	44.7	71.3	84.9
Margaritas	357.1	435.9	449.4
Los esclavos tramo alto	416.4	554	591.7
Los Esclavos tramo medio	992.8	1314.1	1396.3
Los Esclavos tramo bajo	991.2	1311.9	1419.1

Los hidrogramas generados en cada punto se pueden consultar en el Anexo III.

Se han contrastado estos resultados con los valores obtenidos con el método de la crecida índice (cuadro 14). Se observa que los valores obtenidos en la modelación hidrológica son menores, especialmente con mayores períodos de retorno. Esto podría estar relacionado con los datos de precipitación utilizados para la estación Los Esclavos, que presentan una distribución diferente al resto de estaciones utilizadas en esta región. Podría ser que el método regional de la crecida índice no tuviese en cuenta esta variabilidad en la precipitación o que los datos tomados por la estación tengan una precisión limitada. En cualquier caso, el hecho que los caudales sean menores con esta metodología, sugiere la conveniencia de precaución en la utilización estos resultados como caudales de diseño, al menos hasta que el modelo sea calibrado con datos reales.

Cuadro 14. Comparación de los resultados del método regional con el modelo lluvia-escorrentía. Los valores del método regional corresponden al método de curva envolvente y log-normal.

Subcuenca	Método regional			Método lluvia-escorrentía			Variación máxima
	T10	T25	T50	T10	T25	T50	
Las Cañas	70	107	156	79	108	120	30%
Pinula	84	128	187	45	71	85	120%
Margaritas	336	513	747	357	436	449	66%
Los Esclavos tramo alto	586	894	1303	416	554	592	120%
Los Esclavos tramo medio	819	1249	1820	993	1314	1396	30%
Los Esclavos tramo bajo	1432	2185	3183	991	1312	1419	124%

No se pueden interpretar los valores generados por el modelo hidrológico sin tener en cuenta las limitaciones de éste. A continuación se detallan dichas limitaciones:

- La escasez de datos de intensidad de precipitación es un fuerte limitante, teniendo en cuenta la superficie que se está modelando. Sería conveniente empezar a realizar estudios de intensidad de precipitación de las estaciones administradas por el ICC, así como planificar la instalación de nuevas estaciones en las partes altas de las cuencas.
- Falta de registros fiables para calcular el tiempo de retardo. Para determinar este parámetro se necesitan registros recientes de precipitación y caudal que permitan relacionar la precipitación máxima con el caudal máximo asociado y determinar el tiempo que transcurre entre ambos.
- Falta de registros fiables del tiempo de propagación de la crecida. Sería necesario disponer de registros continuos de caudal en diferentes puntos a lo largo del río.

- **Falta de registros continuos de caudal asociados a episodios de precipitación recientes para calibrar y validar el modelo. El margen de error del modelo será igual que la resolución temporal de los datos de calibración, por eso se recomiendan intervalos de entre 15 y 60 minutos.**

En resumen, se requieren datos para contrastar los resultados del modelo con registros reales. En primer lugar para determinar el intervalo de confianza de los resultados del modelo. Posteriormente, una vez se calibre y valide el modelo, este será plenamente funcional, generando predicciones con elevada fiabilidad.

8. Conclusiones

En el presente estudio se ha desarrollado un modelo hidrológico lluvia-escorrentía para obtener estimaciones de caudales de crecida en la cuenca del río Los Esclavos. A diferencia de los métodos regionales utilizados hasta la fecha en la región, el modelo generado incorpora características hidrológicas de la cuenca: estima cómo se distribuye el agua de lluvia, determinando la cantidad que pasará a formar parte de la escorrentía a partir del método del número de curva (cuadro 8). Posteriormente, se ha estimado el comportamiento de dicha escorrentía mediante los parámetros de tiempo de concentración y tiempo de propagación de la crecida, valores que se han calculado a partir de ecuaciones teóricas debido a la escasa disponibilidad de registros de caudal en la cuenca (cuadros 11 y 12).

Los valores de caudal determinados por el modelo lluvia-escorrentía se han comparado con las estimaciones del método de la crecida índice (cuadro 14). La comparación muestra unas diferencias muy elevadas, superiores al 100% en la desembocadura. Esta diferencia es debida, probablemente, a un cambio de patrón en la distribución de las precipitaciones extremas que tiene lugar entre las estaciones de Camantulul y Los Esclavos. El método de la crecida índice, al englobar toda la cuenca en una misma región no es capaz de representar esta variabilidad, mientras que los modelos lluvia-escorrentía, al basarse en registros de precipitación en diferentes estaciones (Gil, 2012) representa mejor la heterogeneidad en los patrones de lluvia. Debido a esta diferencia entre los resultados de los métodos utilizados, se requieren registros reales de caudal para determinar la precisión del modelo hidrológico. Estos registros también se deberán utilizar para calibrar y validar el modelo. Mediante este proceso no sólo se mejoraría la capacidad predictiva del modelo sino que también se podrían ajustar los diferentes parámetros que lo componen (tiempo de concentración, número de curva, etc.).

En futuros estudios del río Los Esclavos se recomienda utilizar una horquilla de valores de caudal, con los generados con el modelo lluvia-escorrentía y el método de la crecida índice (cuadro 14), por los motivos ya citados. Para el diseño de medidas estructurales de defensa ante inundaciones siempre se recomienda utilizar el mayor valor. Por tanto, a nivel de cuenca, se propone la valoración de los siguientes rangos de caudal:

T10: 991-1,432m³/s; T25:1,312-2185m³/s; T50:1419-3183m³/s.

9. Recomendaciones

A continuación se detallan una serie de recomendaciones referentes a los datos necesarios para optimizar el modelo. La mayoría corresponden a vacíos de información necesaria para la calibración del modelo:

- **Modelo de Elevación Digital:** Para generar el modelo hidrológico de la cuenca no es necesario disponer de un DEM de gran resolución, bastará con uno de 15m x 15m.
- **Registros de precipitación:** Los registros diarios establecen una buena base para estimar la precipitación asociada a un determinado periodo de retorno. No obstante, se necesitan datos con mayor resolución temporal, entre 10 y 60 minutos, para determinar el tiempo de concentración y para calibrar el modelo con precisión. La red de estaciones administradas por el ICC supone un excelente complemento a los registros de INSIVUMEH. A pesar de esto, sería necesaria la colocación de un mayor número de estaciones en las zonas altas de las cuencas.
- **Registros de caudal:** Los registros de caudal a lo largo del curso del río, así como en sus afluentes principales, son de gran importancia para valorar la fiabilidad y precisión de los caudales estimados por los modelos. Es importante establecer una red de registro de caudales. Para esto se recomienda establecer los puntos de interés para obtener medidas de caudal (que permita, por ejemplo, determinar qué cantidad de agua aporta un determinado afluente al cauce principal o el caudal de salida al océano al final del río). Los puntos de medida se deben ubicar en secciones lo más estables posibles (por ejemplo en puentes que encaucen el río). Aquí se podrá instalar un sensor del nivel del agua que, mediante una curva de calibración, permitirá determinar el caudal. Se recomienda la reconstrucción las estaciones de aforo Sinacantan y Chiquimulilla, o la instalación de estaciones nuevas en ubicaciones cercanas, para poder calibrar la subcuenca de Margaritas y el tramo medio de Los Esclavos. También sería de gran utilidad disponer de datos de caudal cerca de la desembocadura del río para calibrar el tramo bajo de Los Esclavos, así como para establecer el balance hídrico de la cuenca.

- La frecuencia en la toma de datos es importante y debe realizarse en períodos cortos de tiempo. Se recomienda registrar valores de caudal en intervalos de tiempo de entre 15 y 60 minutos. Estos valores no solo permitirán determinar el valor de caudal en cada momento, sino el tiempo de transito de la crecida en diferentes episodios de inundación, calculando el tiempo transcurrido entre los caudales máximos. La fiabilidad del tiempo estimado dependerá de la resolución temporal en la toma de datos. Éste punto es fundamental para la creación o el apoyo a Sistemas de Alerta Temprana por Inundación.
- A partir de los registros de precipitación y caudal que se especifican anteriormente, se debe proceder a la calibración y validación del modelo. Así como a realizar un análisis de sensibilidad del modelo a los diferentes parámetros.
- Tiempo de propagación de la crecida: A pesar de que es un parámetro importante del modelo, se puede calcular mediante las fórmulas teóricas de Kirpich y Giandotti, siempre que se posea de un hidrograma para calibrar el modelo posteriormente.

10. Glosario

En este apartado definen algunos conceptos utilizados en éste documento que pueden resultar ambiguos y generar confusión.

Cauce: Canal natural por el cual transcurre el río.

Coefficiente de rugosidad de Manning: Coeficiente adimensional que determina la dificultad del agua para atravesar un terreno, ya sea en el cauce del río o en los márgenes de éste. La determinación de este parámetro es empírica y cualitativa.

Cuenca: Porción de territorio en la que la precipitación incidente pasa a formar parte del río principal a través de escorrentía superficial. También se denomina cuenca hidrográfica.

Curva de gastos: Gráfico que muestra la relación entre la altura de la lámina de agua y el caudal en el río.

Hidrograma: Gráfico que muestra el valor del caudal en función del tiempo.

Hietograma: Gráfico que muestra el valor de precipitación en función de tiempo.

Lecho: Canal natural por el cual transcurre el río.

Modelo hidráulico: Proyecta el caudal obtenido por el modelo hidrológico dentro del lecho del río y modela su comportamiento. Estima la altura y alcance de la crecida.

Modelo hidrológico: Permite determinar el caudal correspondiente a un determinado episodio de precipitación.

Período de retorno: Inverso de la probabilidad de que un fenómeno suceda. Una precipitación con un período de retorno de 50 años tiene una probabilidad de 1/50 de ocurrir en un año determinado.

Precipitación de diseño: Precipitación teórica, generalmente correspondiente a la precipitación máxima probable para un determinado período de retorno. Esta precipitación de diseño es el resultado del estudio estadístico de los registros de lluvia existentes.

Tiempo de concentración: Es el tiempo que transcurre entre el valor de precipitación máxima y el caudal máximo.

Velocidad de propagación: Determina el tiempo que tarda la crecida en propagarse de un punto a otro.

11. Referencias

- ACA, 2003. Recomanacions tècniques per als estudis d'inundabilitat d'àmbit local. Agència Catalana de l'Aigua. Generalitat de Catalunya. Barcelona.
- Bobée B, Rasmussen PF, Recent advances in flood frequency analysis. U.S. national report to IUGG, 1991-1994, Rev. Geophys., 1995; 33(Suppl.):1111-6.
- Boni B., Ferraris L., Giannoni F., Roth G., Rudari R., 2007. Flood probability for un-gauged watershed by means of a simple distributed hydrologic model. Advances in Water Resources, 2007, Vol.30(10), pp.2135-2144.
- CEPAL, 1999. Guatemala: Evaluación de los daños ocasionados por el huracán Mitch, 1998. Guatemala, Comisión Económica Para América Latina y el Caribe. Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Sistema de Naciones Unidas.
- CEPAL, 2003. Manual para la evaluación del impacto socioeconómico y ambiental de los desastres. Comisión Económica Para América Latina y el Caribe. Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Sistema de Naciones Unidas.
- CEPAL, 2005. Efectos en Guatemala de las lluvias torrenciales y la tormenta tropical Stan, octubre de 2005. Guatemala, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Sistema de Naciones Unidas.
- CEPAL, 2010. Evaluación de daños y pérdidas sectoriales y estimación de necesidades ocasionados por el paso de la tormenta tropical Agatha y la erupción del volcán Pacaya. Guatemala, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Sistema de Naciones Unidas.
- CHOW V. T., 1988. Chow, V. T.; Maidment, D. R.; Mays, L. W. 1988. Applied Hydrology, McGraw-Hill International editions
- CIV, 2006. Río Los Esclavos. Estudio del río. Unidad de Manejo de Ríos y Canales. Dirección General de Caminos. Ministerio de comunicaciones, infraestructura y vivienda. Guatemala.
- CIV, 2009. Estudio y diseño de las obras para mitigar el impacto del río Achiguate sobre la infraestructura vial de la ruta CA-02 occidente (puente Achiguate), ruta RD-38-ESC (puente La Barrita), CA-09-SUR y poblaciones aledañas al cauce. Unidad de manejo de ríos y

canales, Dirección General de Caminos. Ministerio de Comunicaciones, infraestructura y vivienda. Guatemala.

Guerra, A., 2010. Climate-related disaster risk in mountain areas: the Guatemalan highlands at the start of the 21st Century. School of Geography and the Environment. Oxford, University of Oxford.

Gil, 2012. Estudio de intensidad de precipitación en las cuencas de los ríos Coyolate, Achiguate, Acomé, María Linda, Los Esclavos y Paso Hondo. Instituto Privado de Investigación sobre cambio Climático. Guatemala.

INSIVUMEH, 2004. Estudio regional de crecidas de la República de Guatemala. INSIVUMEH. Ministerio de Infraestructura y Vivienda. Guatemala.

Jovel, R. y R. Zapata (1993), Macroeconomic effects of natural disasters in Latin America and the Caribbean, ponencia presentada a la 40^a Reunión Norteamericana de la Asociación Internacional de Ciencia Regional, Houston, 11-14 de noviembre.

Larios R., 1986. Análisis regional de frecuencia de avenidas máximas. Universidad Mariano Gálvez de Guatemala. Guatemala. MAGA-INSIVUMEH, 2002. Estimación de amenazas inducidas por fenómenos hidrometeorológicos en la República de Guatemala. Colaboradores: PMA (Programa Mundial de Alimentos) y CONRED.

MAGA-INSIVUMEH, 2002. Estimación de amenazas inducidas por fenómenos hidrometeorológicos en la República de Guatemala. Programa de Emergencia por Desastres Naturales, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. INSIVUMEH. Programa Mundial de Alimentos. Guatemala.

Mendoza, J. C., 1994. Determinación de las relaciones temporales entre precipitación de 24 horas y precipitaciones horarias. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia.

ONU 2009. Informe de evaluación global sobre la reducción del riesgo de desastres. Naciones Unidas, Ginebra, Suiza.

Pandey G.R., Nguyen V., 1999. A comparative study of regression based methods in regional flood frequency analysis. Journal of Hydrology, 1999, Vol.225(1), pp.92-101.

Pasche, E. 2007. Surface hydrology. University of Technology Hamburg-Harburg (TUHH). Hamburgo, Alemania.

Ponce, V. M., 1989. Ponce, V. M. Engineering hydrology. Principles and practices. New Jersey. Ed. Prentice Hall.

Salguero, M.R., 2002. Estudio hidrogeológico con fines de riego, de la cuenca del río Acomé, Escuintla, Guatemala.

SCS, 1972. Section 4: hydrology. National Engineering Handbook. Soil Conservation Service. United States Department of Agriculture.

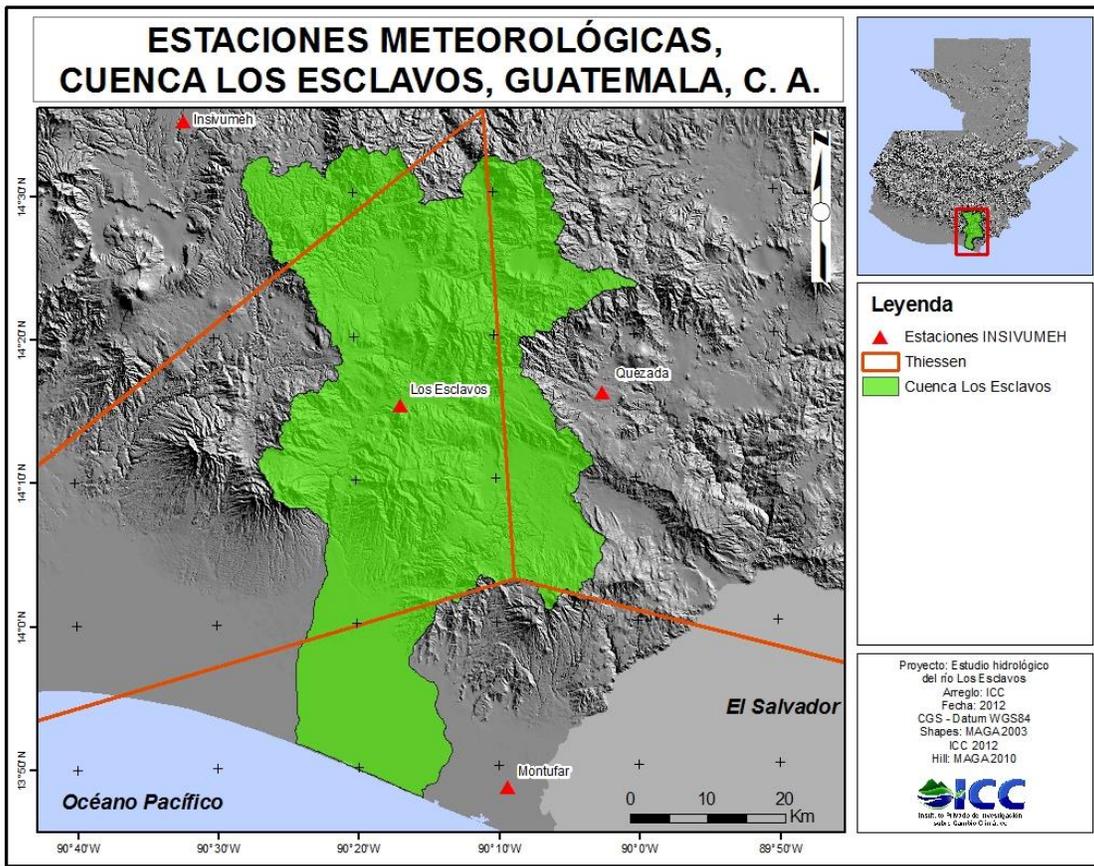
Snyder, F. F., 1938, Synthetic unit graphs, Trans. ACU, vol. 19, pp. 447-454.

Tarjuelo, 2005. El Riego por aspersión y su tecnología. Ediciones Mundi-Prensa.

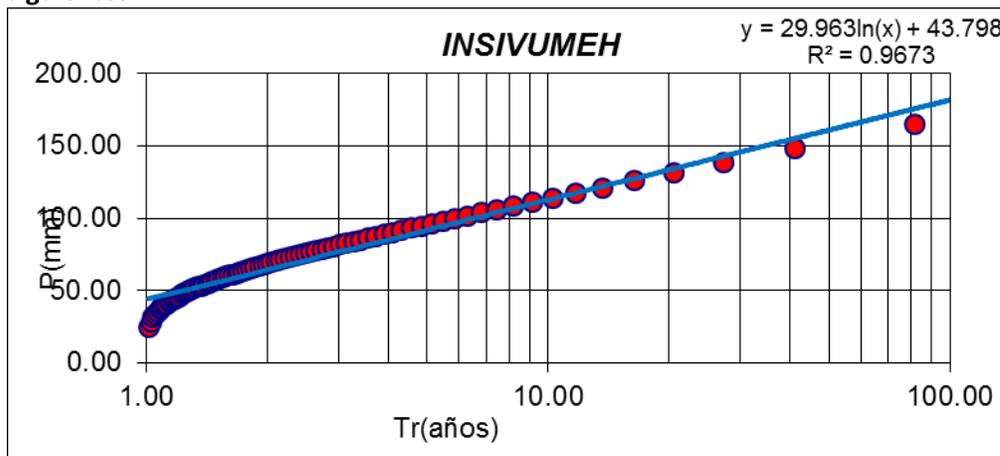
UNESCO-RAPCA, 2003. Zonificación de amenazas naturales en la cuenca del río Samalá y análisis de vulnerabilidad y riesgo en la población de San Sebastián Rehutalueu, Guatemala, Centro América. Programa de Acción Regional para Centro América, UNESCO.

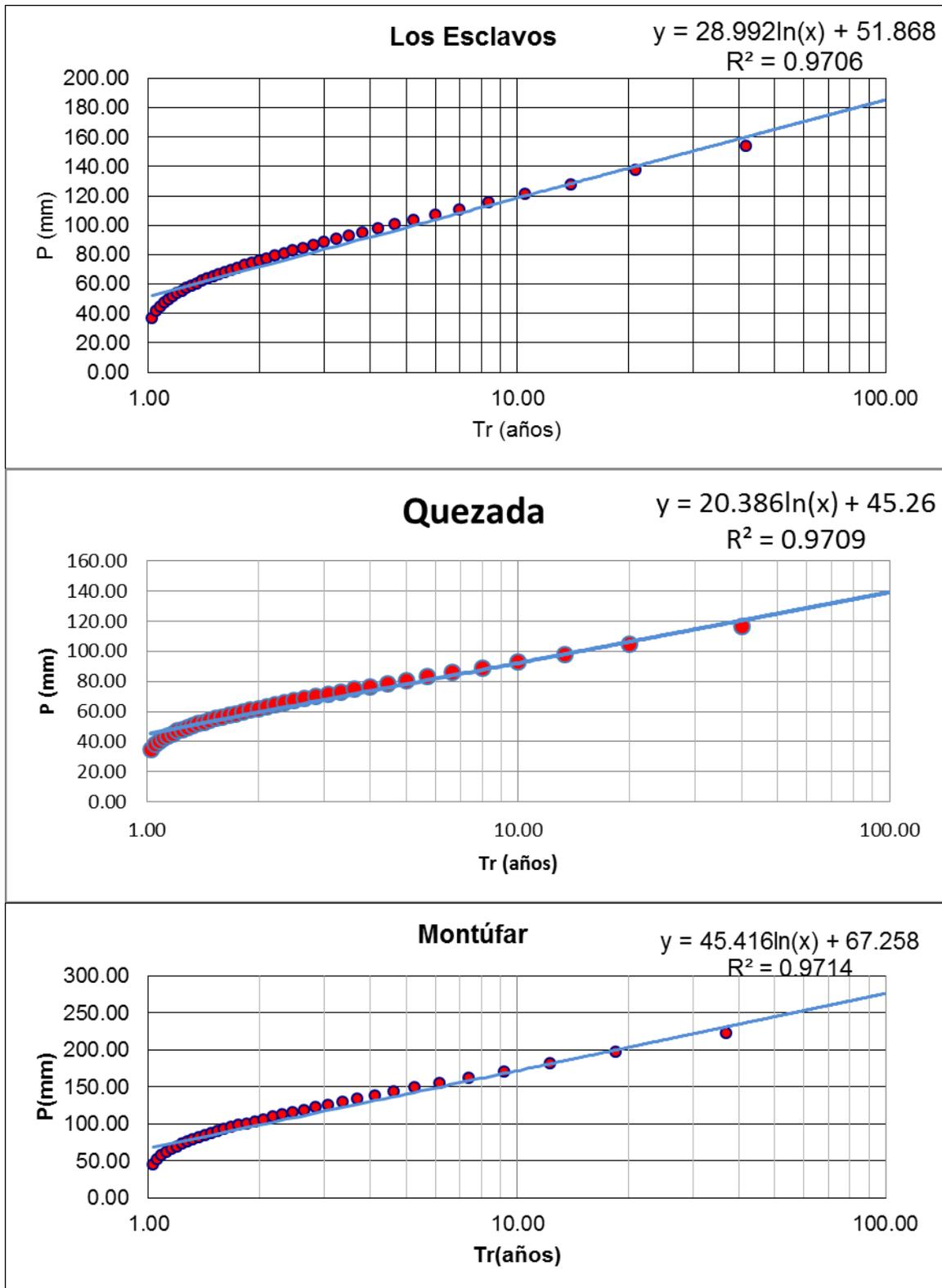
ANEXO I. DATOS PLUVIOMÉTRICOS

Los datos pluviométricos utilizados para la generación del estudio hidrológico proceden de las estaciones de INSIVUMEH, Los Esclavos, Quezada y Montufar. Se ha determinado su área de influencia a partir de polígonos de Thiessen, tal y como se muestra en el siguiente mapa:



Para cada una de estas estaciones se ha determinado el volumen de precipitación para los períodos de retorno de 10, 25 y 50 años. Las ecuaciones de Gumbel utilizadas fueron las siguientes:





Las tablas para generar estas ecuaciones se pueden consultar en “Estudio de intensidad de precipitación de las cuencas prioritarias del ICC” (ICC, 2012).

A partir de estas ecuaciones se han determinado los volúmenes de precipitación diarios para los diferentes períodos de retorno. Éstos valores se han corregido con el coeficiente de simultaneidad, tal y como se detalla en el apartado 5.1 de este proyecto.

Estación	INSIVUMEH	Los Esclavos	Quezada	Montufar
Elevación (msnm)	2240	737	980	10
Distribución Pd/P24	INSIVUMEH	Los Esclavos	Los Esclavos	Montufar
Pd T10 (mm)	113	119	92	172
Pd T25 (mm)	140	145	111	214
Pd T50 (mm)	161	165	125	245
Superficie (km ²)	525	1917	1774	105
Coef. Simultaneidad	0.82	0.78	0.78	0.87
Pd' T10 (mm)	93	93	72	149
Pd' T25 (mm)	115	113	87	184
Pd' T50 (mm)	132	129	98	212

Finalmente se han generado los hietogramas para cada una de las estaciones, a partir de las siguientes curvas P_d/P_{24} :

Estación	Ecuación utilizada	Ecuación
INSIVUMEH	INSIVUMEH	$\frac{P_d}{P_{24}} = \frac{d}{17.39 \cdot T^{0.588} + d}$
Los Esclavos	Los Esclavos	$\frac{P_d}{P_{24}} = \frac{d}{34.86 \cdot T^{0.602} + 0.990 \cdot d}$
Quezada	Los Esclavos	$\frac{P_d}{P_{24}} = \frac{d}{34.86 \cdot T^{0.602} + 0.990 \cdot d}$
Montufar	Montufar	$\frac{P_d}{P_{24}} = \frac{d}{16.05 \cdot T^{0.709} + 0.910 \cdot d}$

Los hietogramas generados se recogen en la siguiente tabla:

Horas	INSIVUMEH			Los Esclavos			Quezada			Montufar		
	T10	T25	T50	T10	T25	T50	T10	T25	T50	T10	T25	T50
1	0.2	0.4	0.6	0.4	0.7	1.0	0.3	0.5	0.7	0.4	0.9	1.5
2	0.2	0.4	0.7	0.4	0.8	1.1	0.3	0.6	0.9	0.5	1.1	1.7
3	0.3	0.5	0.8	0.5	0.9	1.3	0.4	0.7	1.0	0.6	1.3	2.0
4	0.3	0.6	1.0	0.6	1.1	1.6	0.5	0.8	1.2	0.8	1.6	2.4
5	0.4	0.8	1.2	0.8	1.3	1.9	0.6	1.0	1.4	1.0	1.9	3.0
6	0.5	1.0	1.6	1.0	1.7	2.3	0.8	1.3	1.8	1.3	2.5	3.7
7	0.7	1.4	2.1	1.3	2.2	2.9	1.0	1.7	2.2	1.7	3.3	4.8
8	1.1	2.0	2.9	1.9	2.9	3.7	1.5	2.3	2.8	2.5	4.5	6.3
9	1.7	3.1	4.2	2.8	4.2	5.0	2.2	3.2	3.8	3.9	6.6	8.8
10	3.2	5.3	6.9	4.7	6.3	7.1	3.7	4.9	5.4	6.9	10.7	13.0
11	7.9	11.3	13.1	9.5	10.8	10.7	7.3	8.3	8.2	15.6	20.3	21.2
12	43.3	39.7	34.2	28.1	22.5	18.2	21.7	17.3	13.8	65.3	52.0	40.7
13	15.4	19.2	20.0	15.2	15.1	13.7	11.7	11.6	10.4	28.1	30.7	28.6
14	4.8	7.5	9.2	6.5	8.1	8.6	5.0	6.3	6.5	9.9	14.4	16.3
15	2.3	3.9	5.3	3.6	5.1	5.9	2.8	3.9	4.5	5.1	8.3	10.6
16	1.4	2.4	3.4	2.3	3.5	4.3	1.8	2.7	3.3	3.1	5.4	7.4
17	0.9	1.7	2.4	1.6	2.5	3.3	1.2	1.9	2.5	2.0	3.8	5.4
18	0.6	1.2	1.8	1.2	1.9	2.6	0.9	1.5	2.0	1.5	2.8	4.2
19	0.5	0.9	1.4	0.9	1.5	2.1	0.7	1.2	1.6	1.1	2.2	3.3
20	0.4	0.7	1.1	0.7	1.2	1.7	0.5	0.9	1.3	0.9	1.7	2.7
21	0.3	0.6	0.9	0.6	1.0	1.4	0.4	0.8	1.1	0.7	1.4	2.2
22	0.2	0.5	0.7	0.5	0.8	1.2	0.4	0.6	0.9	0.6	1.2	1.9
23	0.2	0.4	0.6	0.4	0.7	1.1	0.3	0.5	0.8	0.5	1.0	1.6
24	0.2	0.3	0.5	0.3	0.6	0.9	0.3	0.5	0.7	0.4	0.8	1.4

ANEXO II. TABLAS PARA LA DETERMINACIÓN DE MANNING

Lecho del río	Valor de Manning
a. Limpio, recto, sin grietas o pozas	0.030
b. Lo mismo que arriba, pero con piedras y vegetación herbácea	0.035
c. Limpio, devanado, algunas pozas y saltos	0.040
d. Lo mismo que arriba pero con piedras y vegetación herbácea	0.045
e. Lo mismo que arriba pero con nivel de agua muy bajo e inclinaciones muy suaves	0.048
f. Lo mismo que "d" pero con mayor cantidad de piedras.	0.050
g. Tramos lentos, con vegetación y pozas profundas	0.070
h. tramos con mucha vegetación y pozas profundas	0.100
Lecho excavado o dragado	Valor de Manning
a. Tierra, recto y uniforme	
a.1. Limpio, finalizado recientemente	0.018
a.2 Limpio después de meteorización	0.022
a.3 Grava, sección uniforme, limpio	0.025
a.4 Vegetación herbácea o algunos arbustos	0.027
b. Tierra, devanado y lento	
b.1 Sin vegetación	0.025
b.2 Vegetación herbácea, malas hierbas	0.030
b.3 Alta densidad malas hierbas o plantas acuáticas en lechos profundos	0.035
b.4 Fondo de tierra y escombros en los márgenes	0.030
b.5 Fondo rocoso y márgenes con malas hierbas	0.035
c. Canal excavado	
c.1 Sin vegetación	0.028
c.2 Pequeños arbustos en márgenes	0.050
Llanuras de inundación	Valor de Manning
a. Pasto sin arbustos	
a.1. Hierba alta	0.030
a.2. Hierba baja	0.035
b. Áreas cultivadas	
b.1. Sin cosechar	0.030
b.2. Cosechas en hilera	0.035
b.3. Campos cosechados	0.040
c. Arbustos	
c.1. Arbustos dispersos y vegetación herbácea	0.050
c.3. Arbustos pequeños y árboles	0.060
c.4. Arbustos medianos o densos	0.100
d. Árboles	
d.1. Terreno limpio con árboles, sin brotes	0.040
d.2. Lo mismo que arriba pero con brotes	0.060
d.3. Bosque denso, pocos árboles bajos, sotobosque no desarrollado Flujo por debajo de las ramas	0.100
d.4. Lo mismo que arriba pero flujo por encima de las ramas	0.120
d.5. Bosques muy densos	0.150
Ríos de montaña, sin vegetación en el lecho, grandes pendientes	
a. gravas, adoquines y algunas rocas	0.040
b. adoquines y grandes rocas	0.050

ANEXO III. RESULTADOS DEL MODELO HIDROLÓGICO

La simulación hidrológica se generó entre las 00:00 del 01 de enero de 2000 y las 12:00 del 03 de enero del 2000. El máximo de precipitación en los hietogramas de entrada son las 12:00 del 01 de enero.

Período de retorno: 10 años

En la siguiente tabla se muestran los resultados del modelo para cada una de las subcuencas y período de retorno de 10 años, la desembocadura y algunos puntos determinados.

Elementos hidrológicos	Área de drenaje (km ²)	Caudal máximo (m ³ /s)	Hora del máximo
W380	104.0	113	01ene2000, 22:53
W370	3.5	13.3	01ene2000, 12:45
W360	95.2	144.6	01ene2000, 14:58
W350	124.4	171.1	01ene2000, 16:15
W340	24.2	18.8	01ene2000, 13:44
W330	106.6	45.3	01ene2000, 17:07
W320	102.7	51.9	01ene2000, 17:14
W310	111.8	67	01ene2000, 18:40
W300	372.5	338.5	01ene2000, 17:36
W290	91.1	35.8	01ene2000, 15:16
W280	142.9	139.6	01ene2000, 16:27
W270	49.3	19.4	01ene2000, 15:26
W260	123.9	12.4	01ene2000, 16:54
W250	108.1	55.9	01ene2000, 15:28
W240(Cañas)	124.2	79.4	01ene2000, 16:00
W230	18.5	12.3	01ene2000, 14:11
W220 (Pinula)	149.3	44.7	01ene2000, 16:04
W210	91.1	32.4	01ene2000, 14:45
W200	75.2	28.8	01ene2000, 15:17
Outlet (desembocadura)	2018.7	991.2	01ene2000, 21:50
J63 (tramo medio)	1914.7	992.8	01ene2000, 19:22
J66 (Margaritas)	564.9	357.1	01ene2000, 17:12
J71	345.3	164.3	01ene2000, 17:44

Período de retorno: 25 años

En la siguiente tabla se muestran los resultados del modelo para cada una de las subcuencas y período de retorno de 25 años, la desembocadura y algunos puntos determinados.

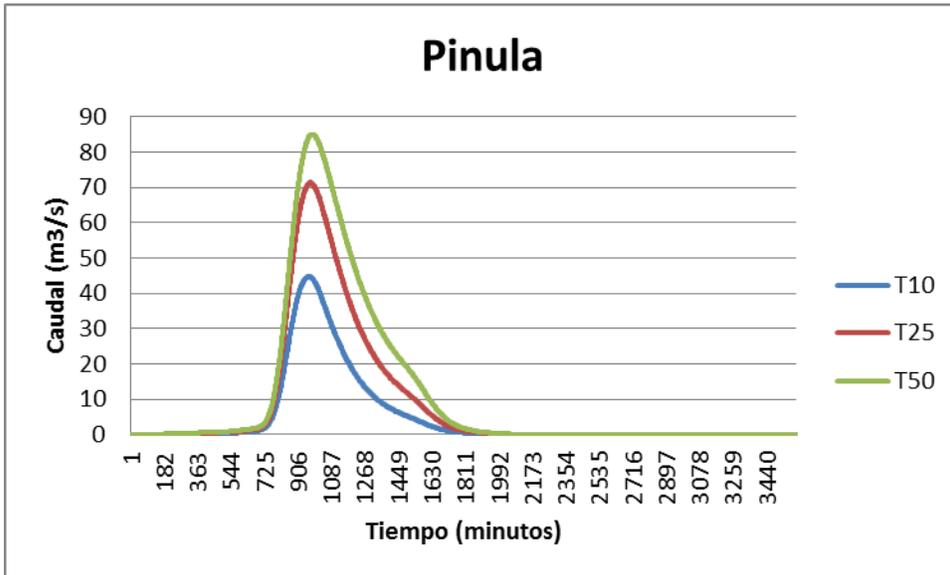
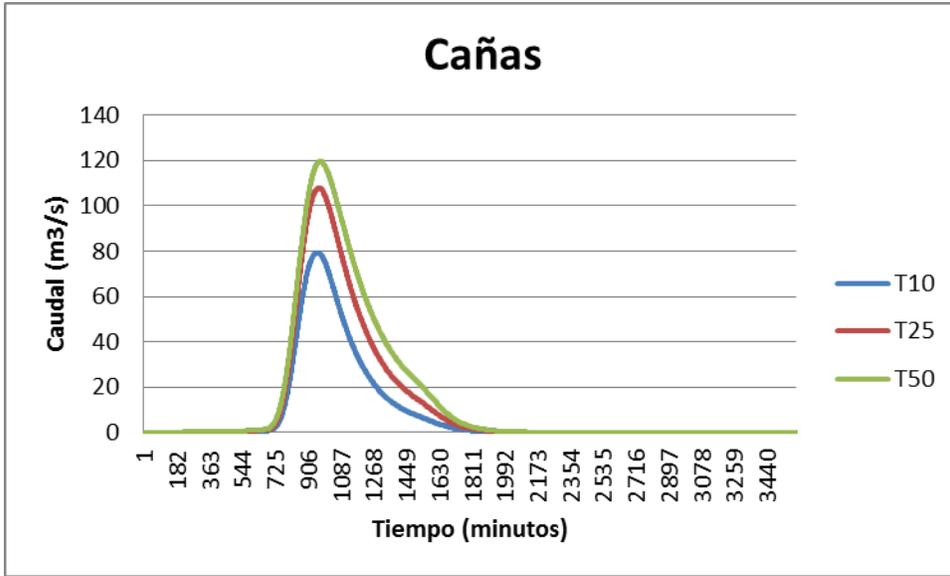
Elementos hidrológicos	Área de drenaje (km ²)	Caudal máximo (m ³ /s)	Hora del máximo
W380	104.0	144.5	01ene2000, 23:19
W370	3.5	12.4	01ene2000, 12:48
W360	95.2	157.7	01ene2000, 15:04
W350	124.4	192.5	01ene2000, 16:24
W340	24.2	21.8	01ene2000, 13:51
W330	106.6	56	01ene2000, 17:24
W320	102.7	63.2	01ene2000, 17:27
W310	111.8	82.5	01ene2000, 18:57
W300	372.5	401.3	01ene2000, 17:52
W290	91.1	45.8	01ene2000, 15:29
W280	142.9	162.4	01ene2000, 16:36
W270	49.3	26.4	01ene2000, 15:35
W260	123.9	19.6	01ene2000, 17:16
W250	108.1	69.6	01ene2000, 15:38
W240(Cañas)	124.2	108	01ene2000, 16:07
W230	18.5	14.5	01ene2000, 14:21
W220 (Pinula)	149.3	71.3	01ene2000, 16:13
W210	91.1	40.1	01ene2000, 14:57
W200	75.2	36.6	01ene2000, 15:29
Outlet (desembocadura)	2018.7	1312	01ene2000, 21:40
J63 (tramo medio)	1914.7	1314	01ene2000, 19:04
J66 (Margaritas)	564.9	435.9	01ene2000, 17:24
J71	104.0	144.5	01ene2000, 23:19

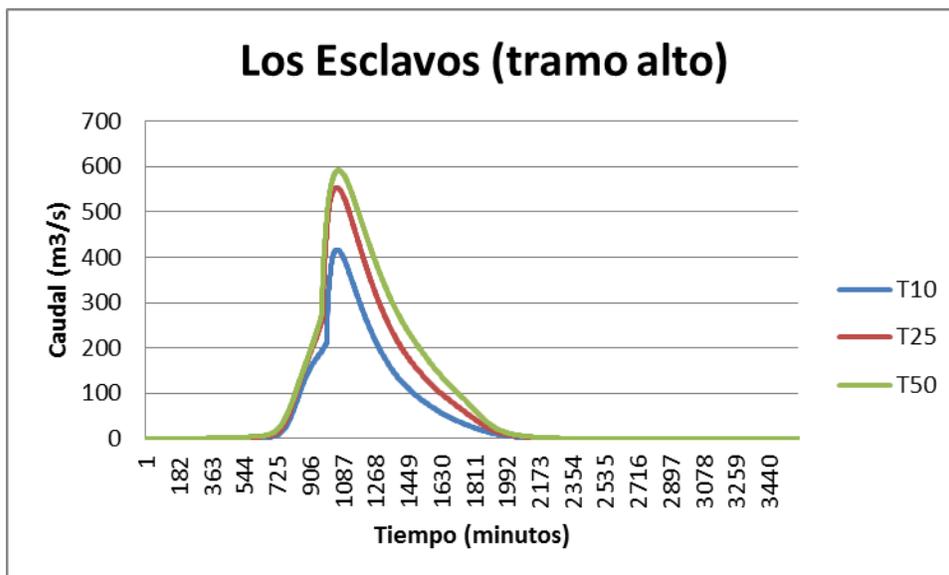
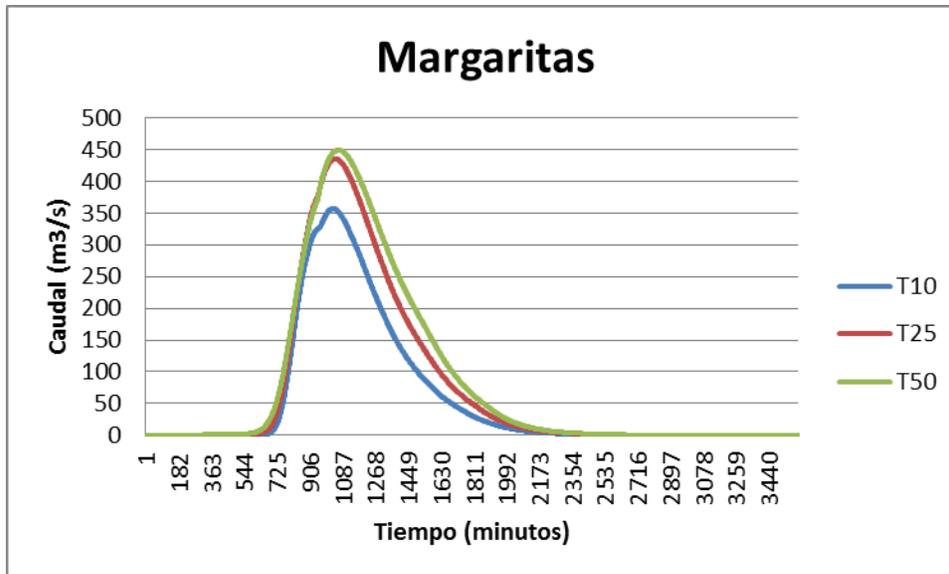
Período de retorno: 50 años

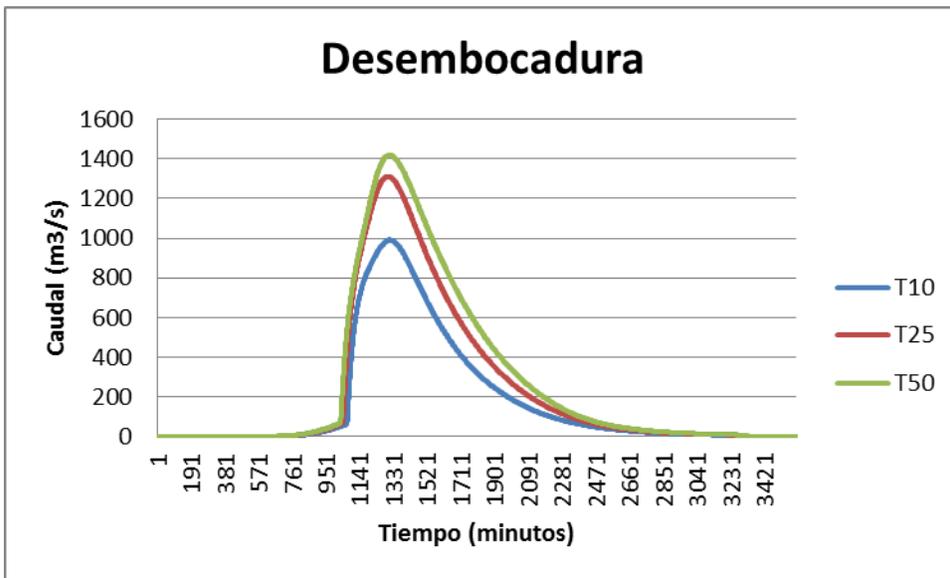
En la siguiente tabla se muestran los resultados del modelo para cada una de las subcuencas y período de retorno de 50 años, la desembocadura y algunos puntos determinados.

Elementos hidrológicos	Área de drenaje (km ²)	Caudal máximo (m ³ /s)	Hora del máximo
W380	104.0	158.3	01ene2000, 23:43
W370	3.5	10.7	01ene2000, 12:54
W360	95.2	151.8	01ene2000, 15:10
W350	124.4	189.5	01ene2000, 16:32
W340	24.2	20.3	01ene2000, 14:01
W330	106.6	56.5	01ene2000, 17:41
W320	102.7	64	01ene2000, 17:41
W310	111.8	86.4	01ene2000, 19:13
W300	372.5	410.3	01ene2000, 18:05
W290	91.1	46.9	01ene2000, 15:45
W280	142.9	163.2	01ene2000, 16:45
W270	49.3	28.3	01ene2000, 15:45
W260	123.9	21.5	01ene2000, 17:50
W250	108.1	71.1	01ene2000, 15:54
W240(Cañas)	124.2	119.6	01ene2000, 16:14
W230	18.5	14.1	01ene2000, 14:32
W220 (Pinula)	149.3	84.9	01ene2000, 16:23
W210	91.1	39.1	01ene2000, 15:12
W200	75.2	37	01ene2000, 15:46
Outlet (desembocadura)	2018.7	1419	01ene2000, 21:49
J63 (tramo medio)	1914.7	1396	01ene2000, 19:09
J66 (Margaritas)	564.9	449.4	01ene2000, 17:43
J71	104.0	158.3	01ene2000, 23:43

A continuación se presentan los hidrogramas generados en los puntos principales de estudio para los períodos de retorno de 10, 25 y 50 años.









**Instituto Privado de Investigación
sobre Cambio Climático**