



Instituto Privado de Investigación
sobre Cambio Climático

ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO MARÍA LINDA

Guatemala, Centroamérica



Instituto Privado de Investigación
sobre Cambio Climático

ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO MARÍA LINDA

Guatemala, Centroamérica

Autor: Sergio Gil Villalba

Impreso: Digitalhouse

Guatemala, 2017

Tiraje: 12 ejemplares

Digital: ISBN 978-9929-8241-6-4

CITA BIBLIOGRÁFICA

ICC (Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático). 2012. Estudio hidrológico de la cuenca del río María Linda. Guatemala. 66 p.

La impresión de esta publicación ha sido financiada a través del proyecto **“Alianza Público-Privada para enfrentar el riesgo a desastres en Guatemala”**, en consorcio con Acción contra el Hambre, TRÓCAIRE, Centro para la Acción de la Responsabilidad Social Empresarial e Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático. Proyecto realizado gracias al auspicio de la Dirección General de Ayuda Humanitaria y Protección Civil de la Unión Europea (ECHO).

Las opiniones expresadas en este documento son de exclusiva responsabilidad del autor y no representan necesariamente la opinión de la Unión Europea. La Comisión Europea de Protección Civil y Ayuda Humanitaria (ECHO) no es responsable por ningún uso que se realice de la información que contenga el presente documento.

Este documento forma parte de los anexos del Plan de Respuesta Departamental ante Emergencias –CODRED– Escuintla.



Financiado por
Unión Europea
Protección Civil y
Ayuda Humanitaria



Índice

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 5 |
| 1.1. ANTECEDENTES | 6 |
| 2. ZONA DE ESTUDIO..... | 9 |
| 2.1. TIPO DE SUELO | 10 |
| 2.2. USOS DEL SUELO | 11 |
| 3. OBJETIVOS | 13 |
| 4. INTRODUCCIÓN A LOS MODELOS..... | 14 |
| 4.1. MODELOS HIDROLÓGICOS | 14 |
| 5. DATOS DE PARTIDA..... | 16 |
| 5.1. MORFOLOGÍA..... | 17 |
| 5.2. DATOS PLUVIOMÉTRICOS | 20 |
| 5.3. DATOS DE CAUDAL | 21 |
| 6. METODOLOGÍA | 23 |
| 6.1. PRECIPITACIÓN..... | 23 |
| 6.2. PROCESOS HIDROLÓGICOS | 27 |
| 6.2.1. GEOLOGÍA | 27 |
| 6.2.2. USO DE LA TIERRA..... | 29 |
| 6.2.3. NÚMERO DE CURVA..... | 29 |
| 6.3. CAUDAL | 31 |
| 6.3.1. MÉTODO DE LA CRECIDA ÍNDICE..... | 31 |
| 6.3.2. MODELOS LLUVIA-ESCORRENTÍA..... | 33 |
| 6.3.2.1 TIEMPO DE RETARDO..... | 34 |
| 6.3.2.2. PROPAGACIÓN DE LA CRECIDA..... | 37 |
| 7. RESULTADOS..... | 39 |
| 8. CONCLUSIONES | 47 |
| 9. RECOMENDACIONES | 48 |
| 10. GLOSARIO | 50 |
| 11. REFERENCIAS..... | 51 |
| ANEXO I. DATOS PLUVIOMÉTRICOS | 54 |
| ANEXO II. TABLAS PARA LA DETERMINACIÓN DE MANNING..... | 59 |
| ANEXO III. RESULTADOS DEL MODELO HIDROLÓGICO | 61 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Mapa de texturas de suelo de la cuenca del María Linda _____ | 10 |
| Figura 2. Mapa de uso de la tierra de la cuenca del Río María Linda. _____ | 12 |
| Figura 3. Zona de estudio del río María Linda. _____ | 16 |
| Figura 4. Perfil longitudinal del cauce principal de la cuenca del María Linda. _____ | 19 |
| Figura 5. Subcuencas naturales en la cuenca del Río María Linda. _____ | 19 |
| Figura 6. Estaciones meteorológicas existentes en la zona de estudio. _____ | 20 |
| Figura 7. Estaciones de aforo en la cuenca del María Linda. _____ | 21 |
| Figura 8. Esquema de funcionamiento de los modelos precipitación-escorrentía. _____ | 23 |
| Figura 9. Ejemplo de los hietogramas generados para la estación de San José. _____ | 25 |
| Figura 10. Estaciones meteorológicas utilizadas y área de influencia según Thiessen. _____ | 26 |
| Figura 11. Mapa de tipo de suelo según la clasificación del NRCS. _____ | 28 |
| Figura 12. Mapa de uso de la tierra según clasificación NRCS. _____ | 29 |
| Figura 13. Mapa de distribución de parámetro del número de curva. _____ | 30 |
| Figura 14. Regiones hidrológicas para la estimación de crecidas en Guatemala. INSIVUMEH, 2004. _____ | 32 |
| Figura 15. División de la cuenca en subcuencas para la generación del modelo hidrológico. _ | 34 |
| Figura 16. Efectos de la propagación de la crecida aguas abajo en el hidrograma. _____ | 37 |
| Figura 17. Tramos de estudio en el modelo del María linda. _____ | 38 |
| Figura 18. Hietograma calculado en la subcuenca W200 (arriba) y hidrograma generado por dicha precipitación (abajo). _____ | 44 |
| Figura 19. Hidrograma generado en la estación Amatillo, para un periodo de retorno de 50 años. _____ | 44 |

Índice de cuadros

| | |
|---|----|
| Cuadro 1. Parámetros morfométricos del río María Linda y cuencas vecinas. _____ | 17 |
| Cuadro 2. Atributos de las subcuencas. _____ | 18 |
| Cuadro 3. Datos de aforo disponibles en la cuenca del río María Linda. _____ | 22 |
| Cuadro 4. Estaciones meteorológicas utilizadas, volumen diario de precipitación por período de retorno y corrección mediante el coeficiente de simultaneidad. _____ | 26 |
| 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 correspondiente según el tipo de suelo (A, B, C o D). _____ | 30 |
| Cuadro 7. Caudales máximos generados con el método de la crecida índice. _____ | 32 |
| Cuadro 8. Determinación del tiempo de retardo con los métodos de Kirpich y Giandotti para las 19 subcuencas. _____ | 36 |
| Cuadro 9. Lluvia neta y pérdidas a partir de la lluvia inicial. _____ | 39 |
| Cuadro 10. Tiempo de concentración y retardo para cada una de las subcuencas. _____ | 41 |
| Cuadro 11. Tiempo de propagación de la crecida calculado mediante la fórmula de Muskingum-Cunge. _____ | 42 |
| Cuadro 12. Caudales máximos estimados (en m ³ /s) para los períodos de retorno de 10, 25 y 50 años. _____ | 44 |
| Cuadro 13. 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 María Linda 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, 2007. Estudio de la cuenca del María Linda. 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 María Linda se ubica en la vertiente del Océano Pacífico, en el suroeste de Guatemala. El volcán de Pacaya, ubicado dentro de la cuenca, se encuentra en estado activo, aportando grandes cantidades de material que se deposita conformando una extensa llanura de material volcánico. En la parte alta de la cuenca se originan los ríos Chapetón, Aguacapa y Michatoya que, tras su unión, dan lugar al río María Linda. El río Michatoya nace a 1,286 msnm, en la cabecera de la cuenca, y comprende parte de la Ciudad de Guatemala. Esto provoca un doble efecto en el sistema fluvial: por una parte la calidad del agua se ve afectada por los contaminantes procedentes de la ciudad. Por otro lado, el elevado grado de urbanización y pavimentación reduce la superficie de infiltración provocando un mayor aporte del agua de lluvia al río en un tiempo menor. Este efecto en el caudal queda amortiguado en el lago de Amatitlán. El lago de Amatitlán ocupa una superficie de 15.2km², y su capacidad de almacenamiento se estima en 286hm³ (AMSA¹). El lago drena una superficie de 399km², de manera que la lluvia que se genera en esta área queda retenida en el lago, que presenta variaciones en su nivel de entre 1.5 y 2.3m cuando absorbe el caudal asociado a episodios de crecida. Después del lago de Amatitlán, el Michatoya desciende casi 1,000m, hasta alcanzar la llanura del pacífico, uniéndose al resto de afluentes y formando el río María Linda. El cauce principal tiene una longitud de 85.7km, y la cuenca hidrológica abarca una extensión de 2,488km², formando parte de los departamentos de Escuintla, Guatemala, Sacatepéquez y Santa Rosa (IGN, 1974).

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, 2007). En el río María Linda estos cambios se han producido como resultado de cambios en los patrones climáticos, erosión de los suelos, la falta de una cobertura vegetal apropiada y la actividad volcánica del Volcán de Pacaya. (CIV, 2009).

¹ Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán

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, 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 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 lluviosa, impidiendo la consolidación de los materiales y generando una morfología irregular e inestable (CIV, 2007).

Para el estudio de los diferentes tipos de suelo se ha utilizado la cartografía de PEDN-MAGA² (figura 1).

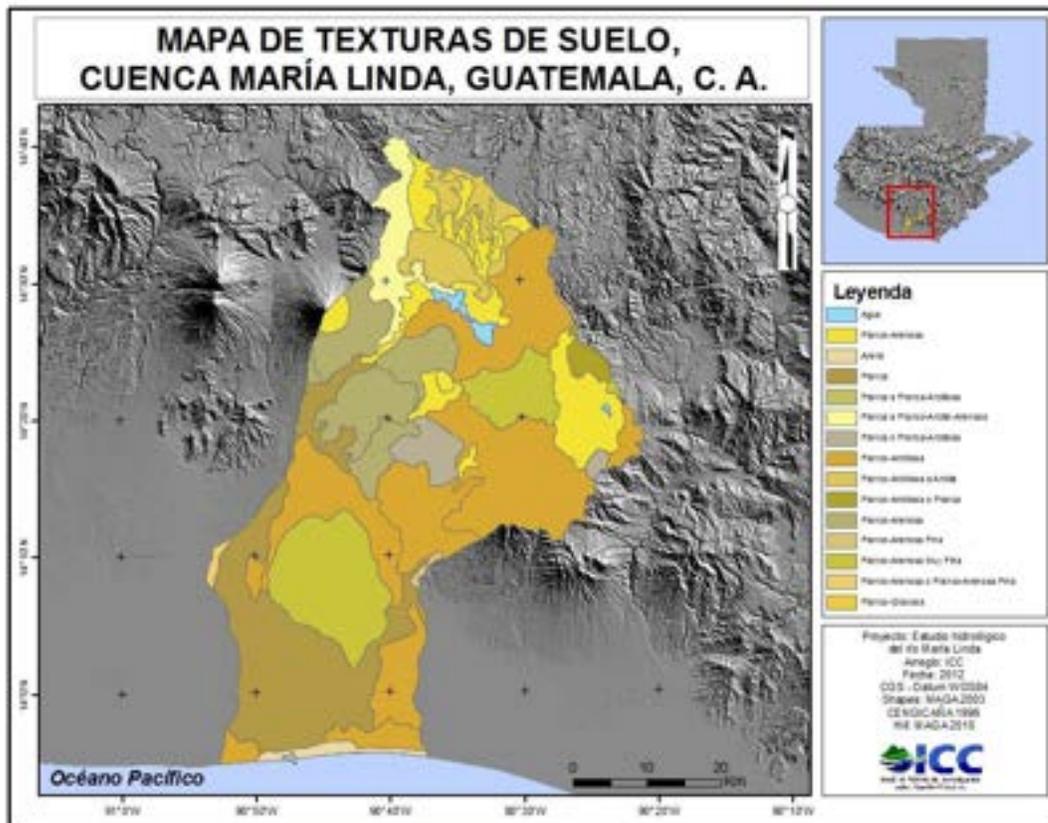


Figura 1. Mapa de texturas de suelo de la cuenca del María Linda (PEDN-MAGA, 2001).

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

2.2. Uso de la tierra

La cuenca recibe una fuerte presión de los sistemas productivos agrícolas, ocupando éstos un 60.9% de la superficie. Por otro lado la cobertura forestal representa el 8.9% 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 superficie urbanizada, un 7% de la superficie de la cuenca corresponde a centros urbanos. Un porcentaje elevado correspondiente a la Ciudad de Guatemala y alrededores. A continuación se detallan los diferentes usos de la tierra en la cuenca.

Un 7% de la superficie de la cuenca corresponde a áreas urbanas. Este porcentaje se concentra en la cabecera de la cuenca y corresponde a la Ciudad de Guatemala y cercanías. Un elevado porcentaje de uso urbano genera un mayor volumen de escorrentía superficial y una respuesta más rápida del río ante una precipitación intensa. Por otro lado, el efecto producido por esta gran superficie urbanizada queda amortiguado por el lago de Amatitlán que absorbe el caudal de crecida del río mientras que la variación en el caudal de salida del lago no es tan significativa (AMSA).

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, café y pastos cultivados. En la parte media de la cuenca se cultiva principalmente café y, en menor medida, granos básicos. En la parte baja de la cuenca, donde las pendientes son más suaves, predomina el cultivo de caña de azúcar aunque el hierbazal ocupa también gran parte del territorio. Cerca de la costa se encuentran, principalmente, pastos cultivados. A nivel global, un 60.9% de la cuenca corresponde a usos agrícolas, de los cuales un 17.4% corresponde a caña de azúcar y un 18% a café. 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.

En cuanto a masas forestales, predomina el bosque latifoliado en la parte media de la cuenca, mientras que en las partes más altas se encuentran pequeños bosques coníferos. Los bosques representan tan solo el 8.9% del total de la superficie de la cuenca. En la línea de costa destaca la presencia de manglar.

3. Objetivos

Objetivo general

El objetivo principal del presente estudio es la generación de un modelo hidrológico de la cuenca del río María Linda, 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 María Linda se extiende desde la Ciudad de Guatemala, en el altiplano, hasta la costa del Pacífico y comprende los volcanes Acatenango y Pacaya (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 delimitada por (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 María Linda.

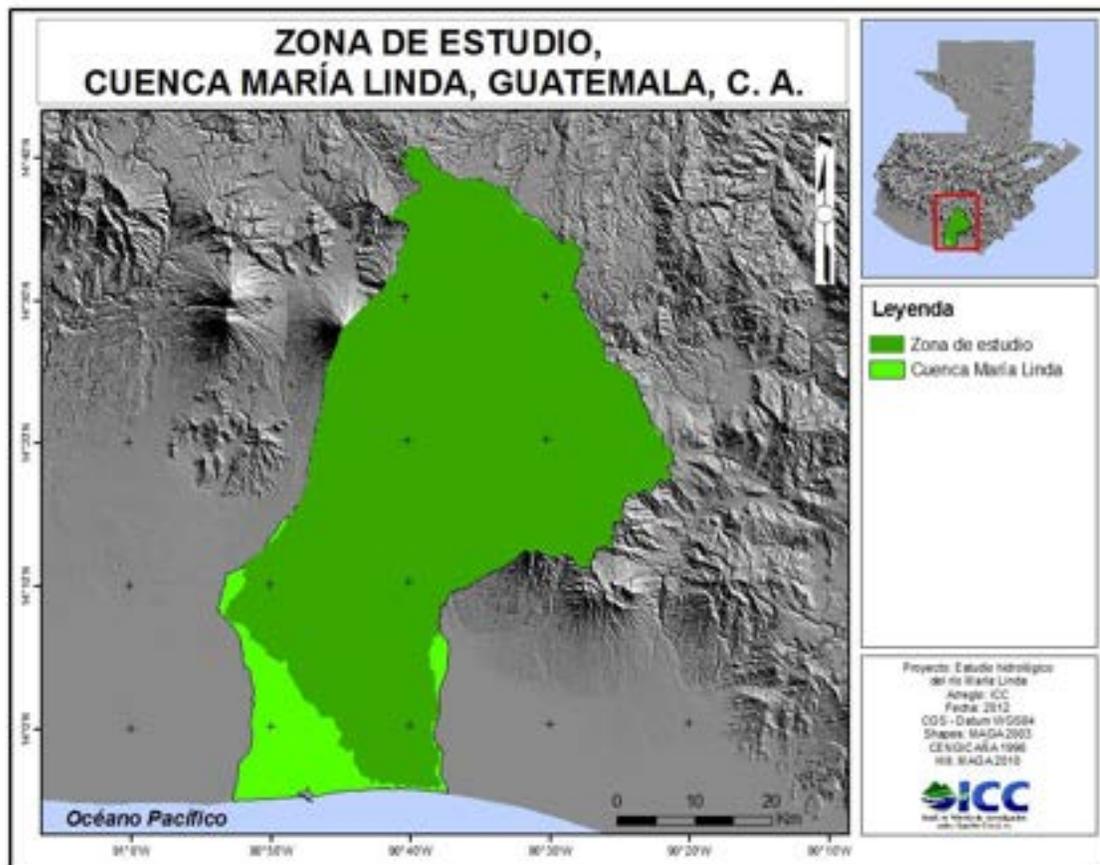


Figura 3. Zona de estudio del río María Linda. Nótese como no coincide con la cuenca delimitada por el MAGA (MAGA 2003) en el tramo final.

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 del río María Linda, comparándolos con las cuencas vecinas que drenan hacia el Océano Pacífico (cuadro 1).

Cuadro 1. Parámetros morfométricos del río María Linda 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 Achiguate 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 del río María Linda se divide de manera natural en dos grandes subcuencas, que dan lugar al Michatoya y al Aguacapa. El Michatoya presenta inclinaciones elevadas en el tramo inicial que se van suavizando hasta los 40 kilómetros, donde se encuentra el lago de Amatitlán. Aguas abajo del lago, el cauce presenta un gran desnivel hasta alcanzar la planicie del Pacífico. El Aguapaca presenta una inclinación constante hasta alcanzar también la llanura costera, donde se une al Michatoya (figura 4).

Cuadro 2. Atributos de las subcuencas.

| Subcuenca | Aguacapa | Michatoya | María Linda (desde la unión) | El Naranjo |
|-------------------------------|----------|-----------|---------------------------------|------------|
| Superficie (km ²) | 664 | 1055 | 233 | 295 |
| Longitud (km) | 59 | 102 | 26 | 33 |
| Desnivel (m) | 1344 | 1519 | 25 | 58 |

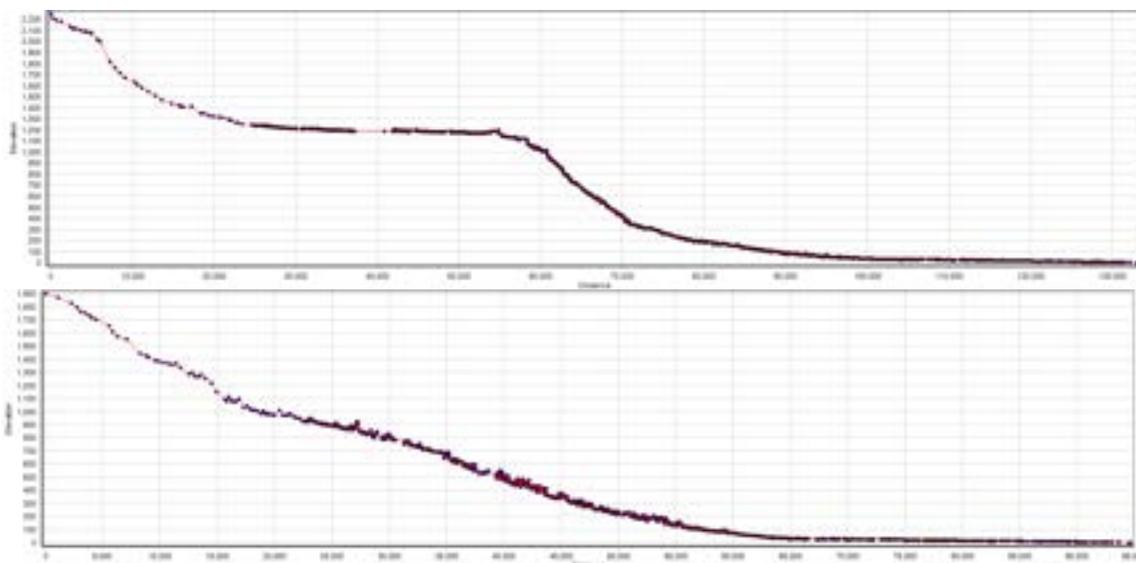


Figura 4. Perfil longitudinal del cauce principal de la cuenca del río María Linda (arriba Michatoya, abajo Aguacapa).

Los ríos Michatoya y Aguacapa se extienden ocupando la mayor parte de la superficie de la cuenca (cuadro 2). En el tramo bajo, éstos se unen para dar lugar al río María Linda. Otro afluente importante en el tramo final es el Río Naranjo (figura 5).

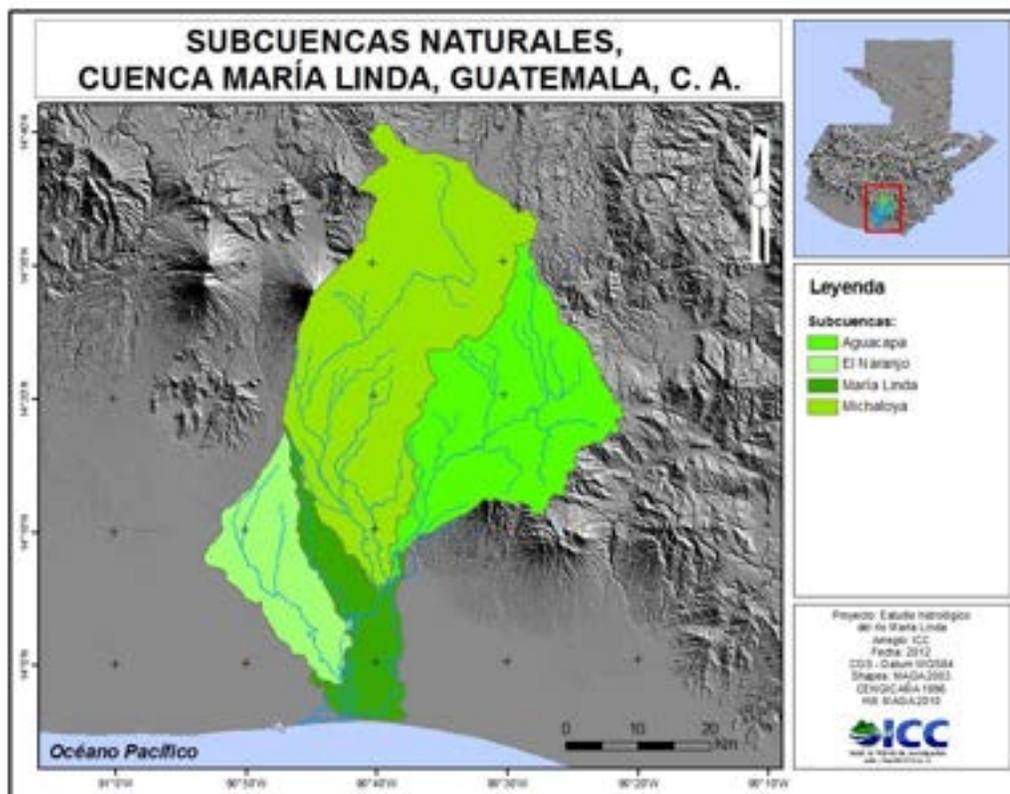


Figura 5. Subcuencas naturales en la cuenca del Río María Linda.

5.2. Datos pluviométricos

La información meteorológica encontrada en la cuenca es muy diversa. Dentro de la zona de estudio se han ubicado un total de 13 estaciones, de las cuales 10 pertenecen al INSIVUMEH⁴ y 3 a ASAZGUA⁵ (figura 6). 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 de INSIVUMEH, Camantulul, Puerto San José, con 81, 40 y 39 años de registro respectivamente. Estos datos han sido reforzados con los registros de las estaciones de Santa Isabel y Santillana del Mar con 43 y 18 años de registro.

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, Puerto San José, Los Esclavos y Camantulul (Gil, 2012).

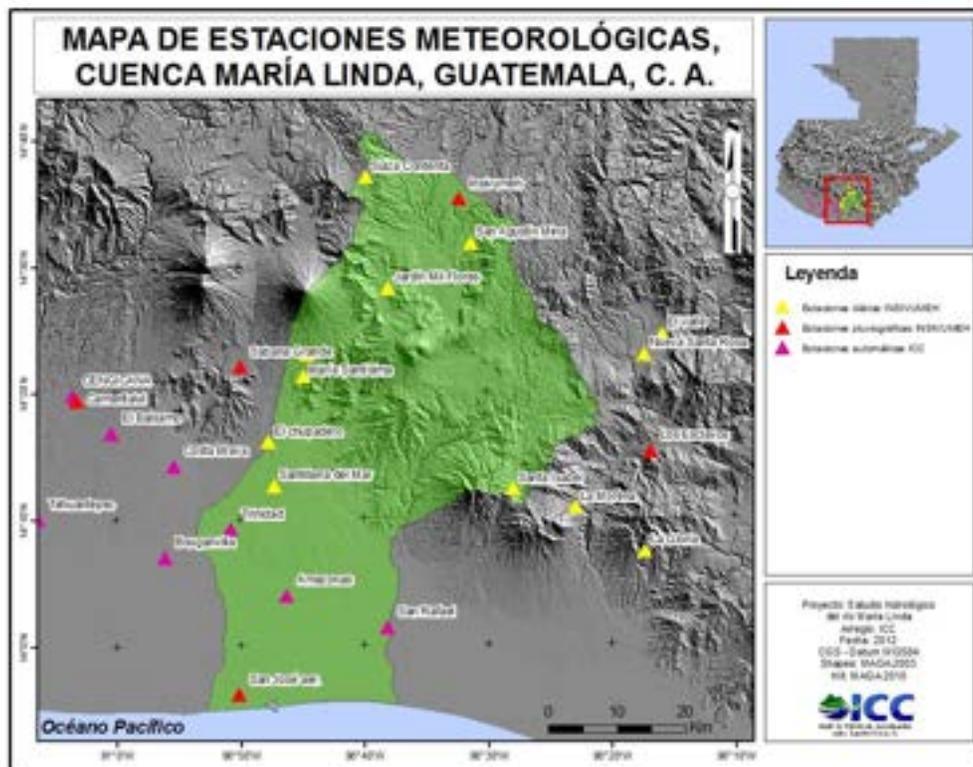


Figura 6. Estaciones meteorológicas existentes en la zona de estudio. Amarillo: Pluviométrica INSIVUMEH. Rojo: Pluviográfica INSIVUMEH. Morado: Automática ICC.

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

⁵ Asociación de Azucareros de Guatemala.

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 María Linda han existido estaciones de aforo en diez puntos, de las cuales sólo una sigue en funcionamiento (cuadro 3). Las estaciones de aforo constituyen puntos de referencia que permiten comprobar que el caudal real corresponde con el caudal calculado por el modelo. Según su colocación, la estación de Las Guacamayas podría servir para calibrar el hidrograma generado por la subcuenca del Aguacapa (figura 7).

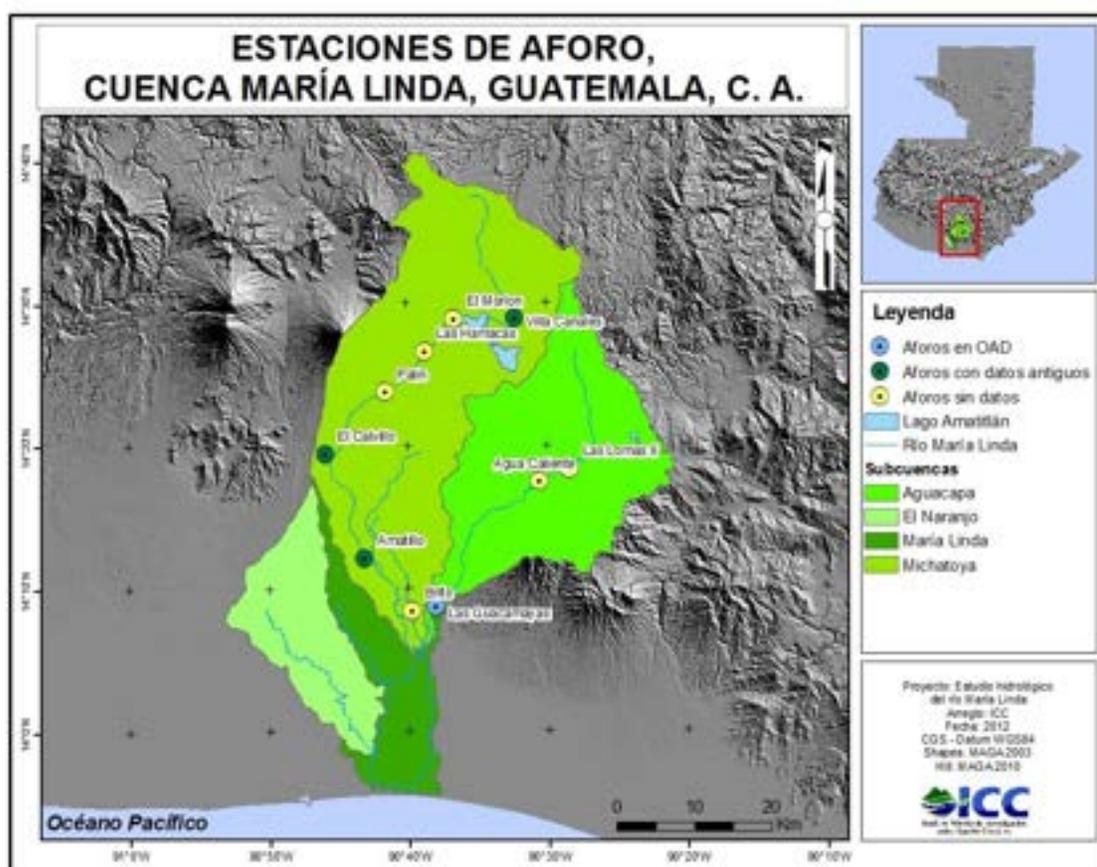


Figura 7. Estaciones de aforo en la cuenca del María Linda.

Cuadro 3. Datos de aforo disponibles en la cuenca del río María Linda.

| Estación | Registros | Periodicidad | Tipo de dato | Máximo registrado |
|---------------|----------------------|-------------------------------------|--------------|-------------------------|
| Amatillo | 06/2000 – 04/2003 | Diarios | Caudal | 36.37 m ³ /s |
| Amatillo II | 04/2003 – 07/ 2010 | 4 valores diarios (7, 13, 16 y 20h) | Nivel | 8.39 m |
| Calvillo | 09/1969 – 12/1974 | Diarios | Caudal | 14.46 m ³ /s |
| Calvillo II | 02/1973 – 04/1982 | Diarios | Caudal | 7.46 m ³ /s |
| Guacamayas I | 04/1968 – 04/1984 | Diarios | Caudal | 391.3 m ³ /s |
| Guacamayas II | 11/2010 – Actualidad | Horarios | Nivel | 8.5 m |
| Villacanales | 05/2003 – 02/2010 | 4 valores diarios (7, 13, 16 y 20h) | Nivel | 3.10 m |

Sería necesaria la construcción de nuevas estaciones de aforo para poder calibrar las subcuencas del Michatoya y el Naranja. También sería de gran utilidad disponer de datos de caudal antes y después del lago de Amatitlán para estudiar la relación entre los caudales de entrada y salida del mismo. Otro vacío importante de información corresponde a la falta de registros de caudal en la desembocadura del río, donde una estación de aforo permitiría calibrar el modelo completo, así como determinar el balance hídrico de la cuenca.

No obstante, la construcción de estaciones de aforo en esta región no es sencilla debido a que la sección de éstas debe mantenerse constante. El aporte de sedimentos que tiene lugar en estos ríos es extraordinario, pudiendo generar errores en la determinación de caudales y dificultades para mantener el funcionamiento de dichas estaciones.

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 8).



Figura 8. 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 María Linda, se ha determinado el volumen de precipitación correspondiente al período 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 de datos (anexo I). Mediante este método se ha determinado el volumen de precipitación para los períodos de retorno mencionados en las estaciones de INSIVUMEH, Santillana de mar, Santa Isabel y Puerto San José.

Las ecuaciones de desagregación de precipitaciones de 24 horas (Gil, 2012) generadas para las estaciones de Camantulul, INSIVUMEH, Los Esclavos y Puerto San José (Ec. 1-4) han permitido distribuir valores de precipitación diaria en hietogramas horarios. Las distribuciones temporales de Camantulul y Los Esclavos se han aplicado para generar los hietogramas de Santillana de Mar y Santa Isabel debido a la proximidad de estas estaciones.

$$\frac{P_d}{P_{24}} = \frac{d}{23.36 \cdot T^{0.386} + 0.991 \cdot d} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$\frac{P_d}{P_{24}} = \frac{d}{17.39 \cdot T^{0.588} + d} \quad (\text{Ec. 2})$$

$$\frac{P_d}{P_{24}} = \frac{d}{34.86 \cdot T^{0.602} + 0.990 \cdot d} \quad (\text{Ec. 3})$$

$$\frac{P_d}{P_{24}} = \frac{d}{23.81 \cdot T^{0.438} + 0.966 \cdot d} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

d es la longitud de la precipitación que se desea determinar, 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

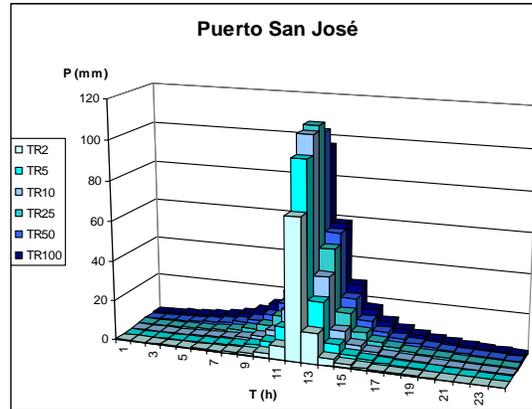


Figura 9. Ejemplo de los hietogramas generados con el método Pd/P24 modificado para la estación de San José.

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 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)

Anteriormente se han propuesto cuatro estaciones para obtener los datos pluviométricos (figura 10). En las estaciones de INSIVUMEH y Puerto San José se han utilizado las ecuaciones de desagregación generadas a partir de sus propios registros, mientras que en las estaciones

de Santillana de Mar y Santa Isabel se han utilizado las distribuciones calculadas en las estaciones de Camantulul y Los Esclavos, respectivamente, por motivos de proximidad. El volumen de precipitación diaria se ha calculado mediante la ley de Gumbel y se ha corregido con el coeficiente de simultaneidad (cuadro 4).

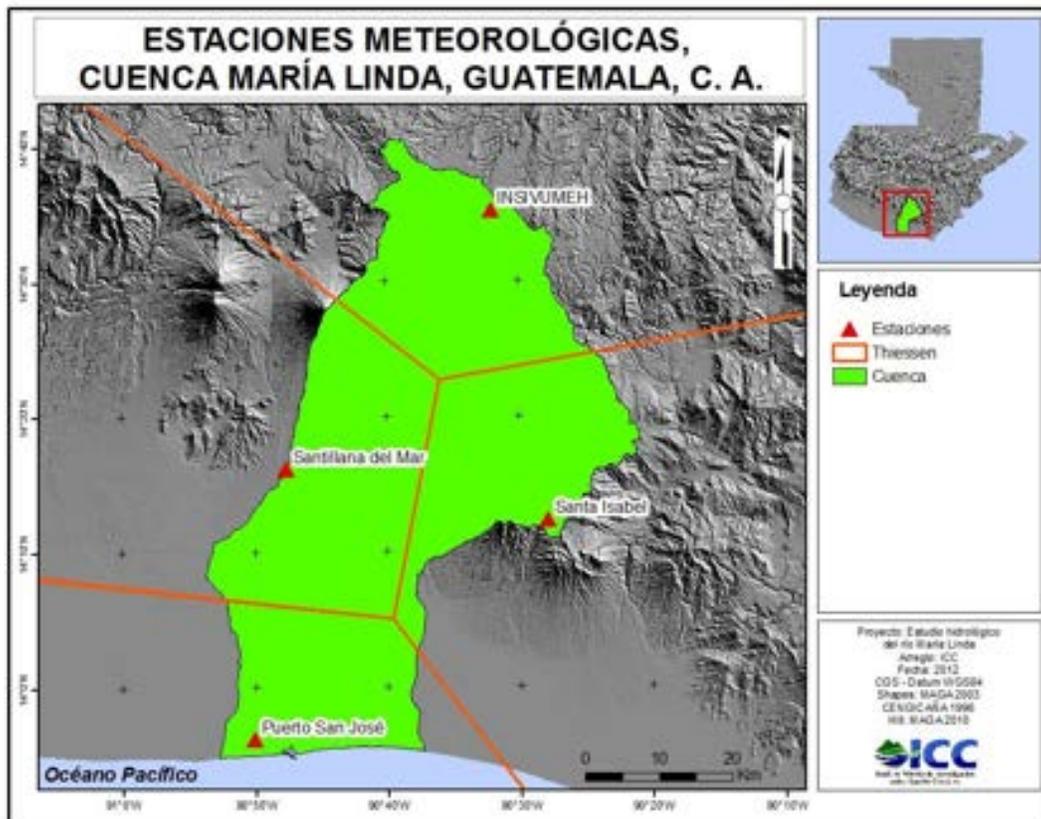


Figura 10. Estaciones meteorológicas utilizadas y área de influencia según Thiessen.

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

| Estación | INSIVUMEH | Santillana del Mar | Santa Isabel | Puerto San José |
|-------------------------------|-----------|--------------------|--------------|-----------------|
| Elevación (msnm) | 1502 | 70 | 1040 | 6 |
| Distribución Pd/P24 | INSIVUMEH | Camantulul | Los Esclavos | Puerto San José |
| Pd T10 (mm) | 113 | 181 | 182 | 219 |
| Pd T25 (mm) | 140 | 226 | 269 | 283 |
| Pd T50 (mm) | 161 | 259 | 335 | 331 |
| Superficie (km ²) | 633 | 759 | 597 | 204 |
| Coef. Simultaneidad | 0.81 | 0.81 | 0.82 | 0.85 |
| Pd' T10 (mm) | 91 | 147 | 149 | 186 |
| Pd' T25 (mm) | 114 | 183 | 221 | 241 |

| | | | | |
|--------------|-----|-----|-----|-----|
| Pd' T50 (mm) | 130 | 210 | 275 | 282 |
|--------------|-----|-----|-----|-----|

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, evapotranspiración y retención superficial (figura 8). 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 (2,269 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 publicados 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- | Franco-argilosas, franco-arcillo-limosas, limosas o | Arcillosos o niveles freáticos permanentemente |

limosas

arcillo-arenosas

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 0.8cm/h. Los cuerpos de agua se consideran superficies impermeables, por este motivo la superficie del lago de Amatitlán se ha clasificado como tipo D (figura 11).

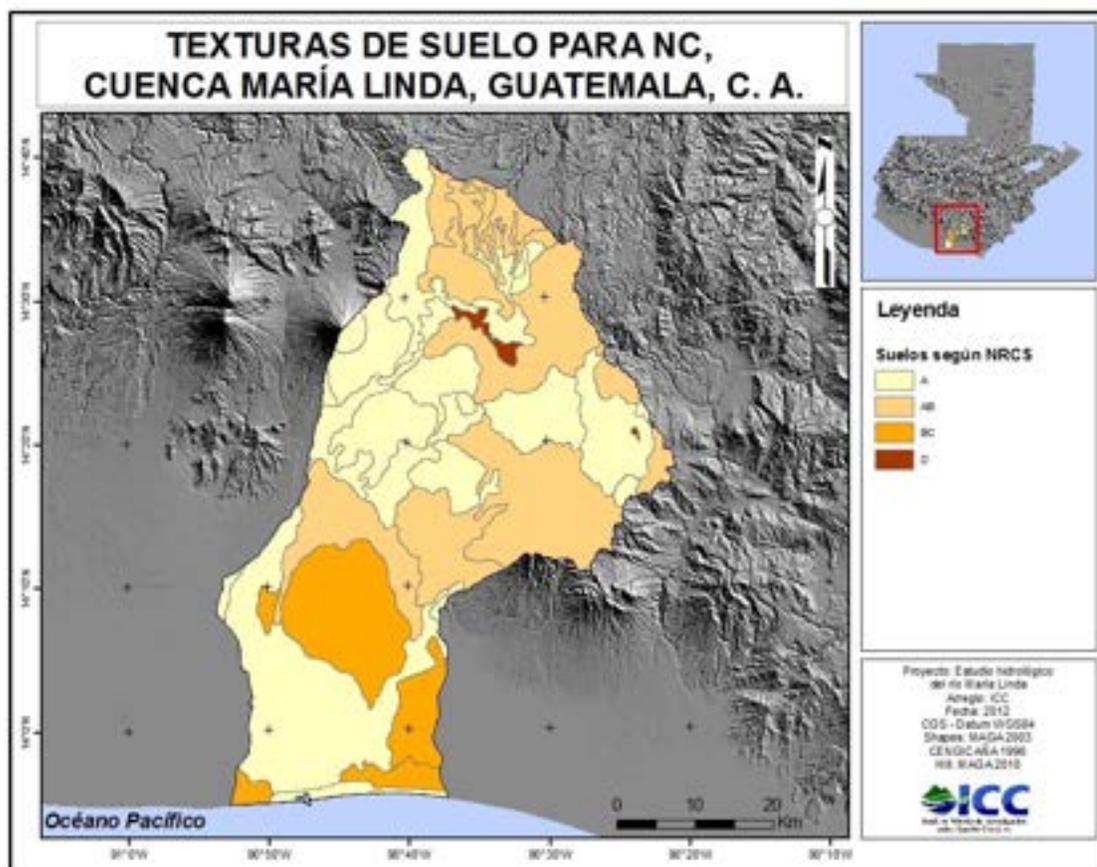


Figura 11. Mapa de tipo de suelo según la clasificación del NRCS.

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 12). 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 han obtenido un total de 15 (cuadro 6).

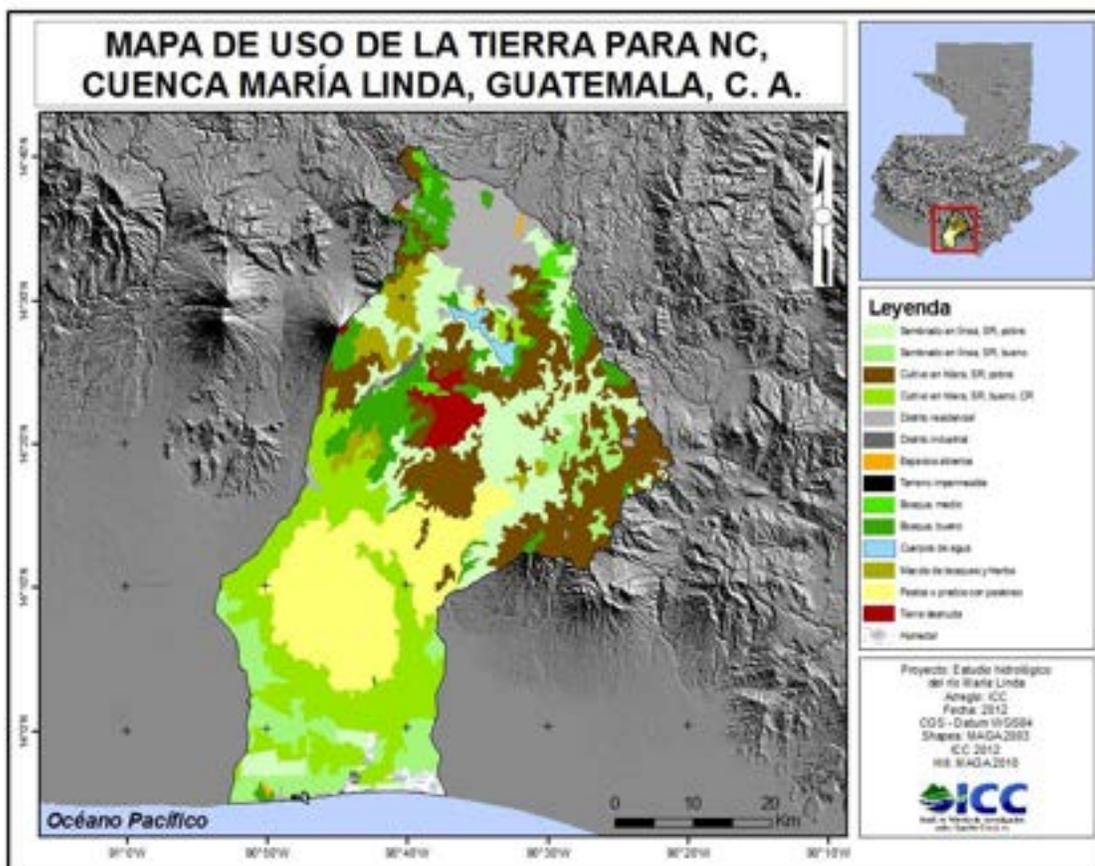


Figura 12. Mapa de uso de la tierra según clasificación NRCS. Los términos “pobre y bueno” se refieren a la cobertura vegetal, SR corresponde a cultivos en línea (Straight Row) y CR a la cobertura del suelo (Crop residue).

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 13). El software permite obtener el valor promedio para cada una de las subcuencas.

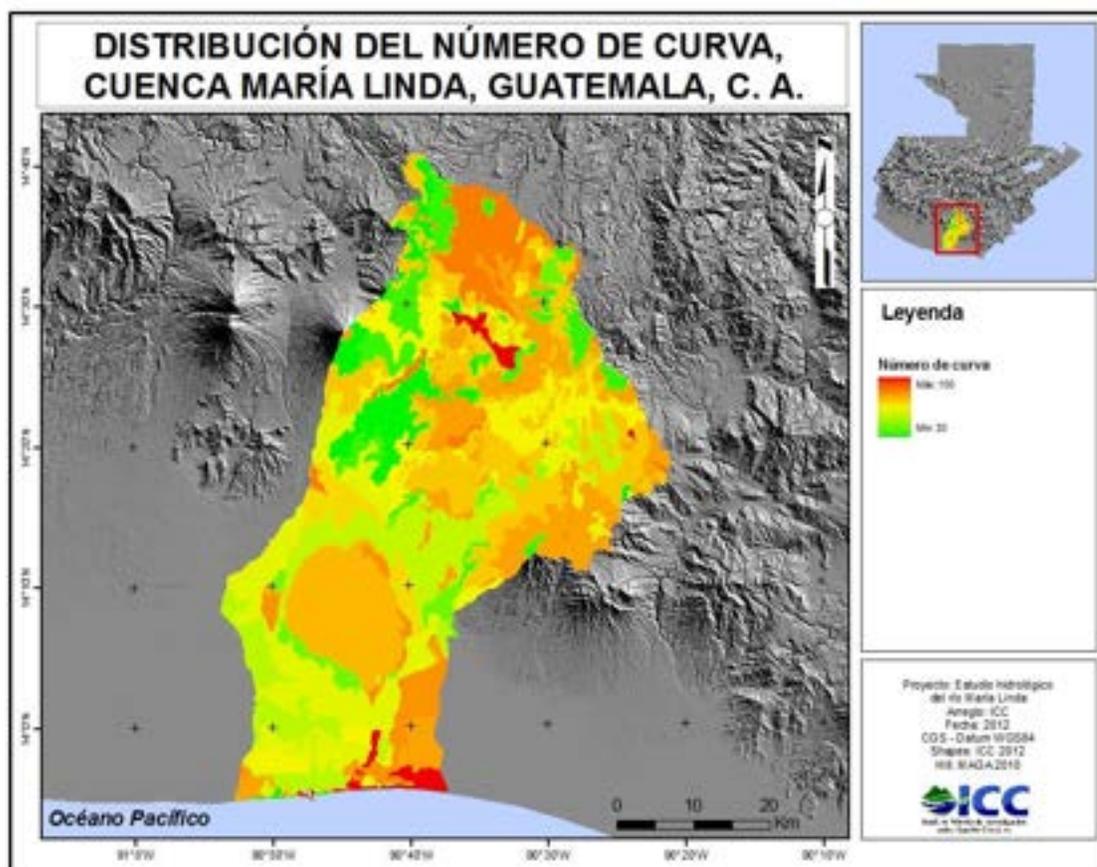


Figura 13. Mapa de distribución de parámetro del número de curva.

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 |

| | | | | | |
|-------------------------------|-------------------------|----|----|----|----|
| Humedal con otra vegetación | Suelo desnudo | 77 | 86 | 91 | 94 |
| Uso de la tierra | Clasificación NRCS | A | B | C | D |
| 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 |
| Pejibaya | 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 parte del 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 14). 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 María Linda 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).

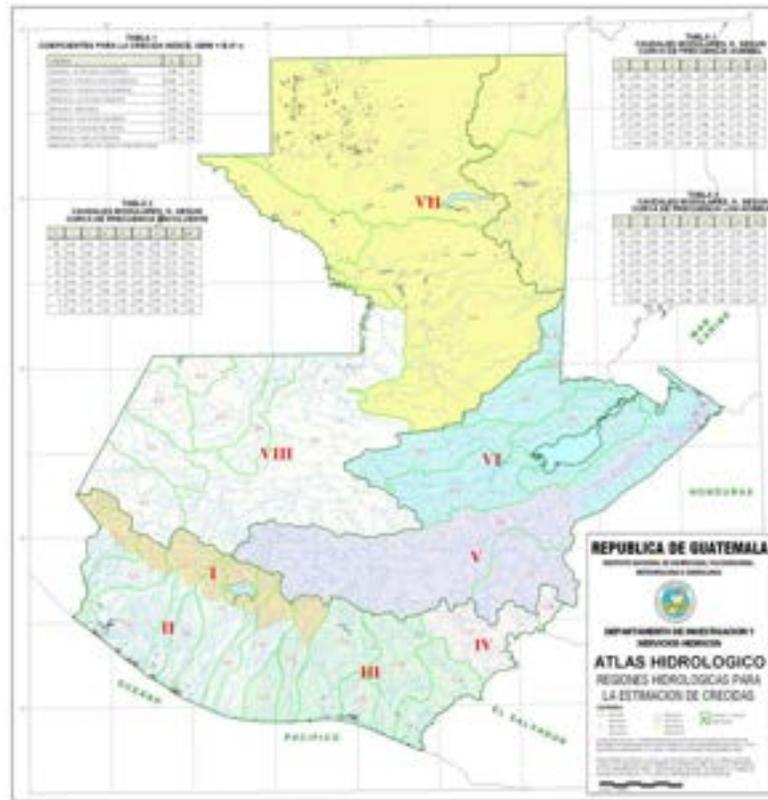


Figura 14. Regiones hidrológicas para la estimación de crecidas en Guatemala. INSIVUMEH, 2004.

Cuadro 7. Caudales máximos generados con el método de la crecida índice.

| Subcuenca | Aguacapa | Michatoya | El Naranjo | María Linda | |
|------------------------------------|----------|-----------|------------|-------------|------------------|
| Superficie (km ²) | 812 | 890 | 297 | 2197 | |
| Crecida índice (m ³ /s) | 276 | 304 | 97 | 777 | |
| Caudal T10 (m ³ /s) | 687 | 756 | 241 | 1935 | |
| Caudal T25 (m ³ /s) | 908 | 999 | 319 | 2557 | Gumbel |
| Caudal T50 (m ³ /s) | 1074 | 1181 | 377 | 3023 | |
| Caudal T10 (m ³ /s) | 483 | 531 | 170 | 1360 | |
| Caudal T25 (m ³ /s) | 737 | 810 | 259 | 2075 | Log-normal |
| Caudal T50 (m ³ /s) | 1121 | 1232 | 394 | 3155 | |
| Caudal T10 (m ³ /s) | 787 | 865 | 276 | 2215 | |
| Caudal T25 (m ³ /s) | 1027 | 1129 | 361 | 2891 | Curva envolvente |
| Caudal T50 (m ³ /s) | 1204 | 1323 | 423 | 3388 | |

6.3.2 Modelos lluvia-escorrentía

Este tipo de modelo proporciona un valor 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 María Linda se ha dividido en un total de 19 subcuencas (figura 15). La zona de drenaje del lago de Amatitlán se divide en dos subcuencas, para poder determinar las entradas y salidas de éste. El Aguacapa se divide en seis subcuencas y el Michatoya en ocho, pudiendo estudiar la salida de ambos afluentes. El naranjo únicamente ocupa una subcuenca mientras que el María Linda se divide en cuatro, de manera que toda la cuenca queda representada con múltiples puntos de estudio donde se van a generar hidrogramas.

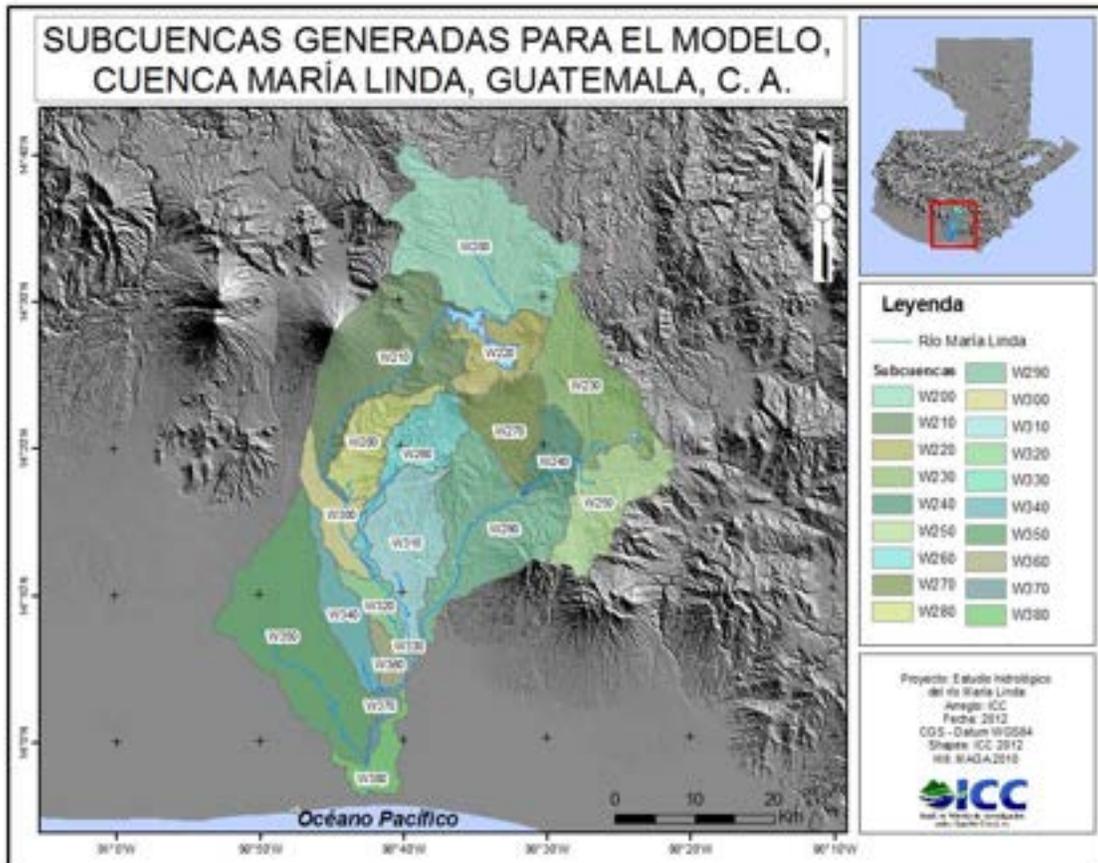


Figura 15. División de la cuenca del María linda en subcuencas para la generación del modelo hidrológico.

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 María Linda 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 han utilizado 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 superficie de la cuenca y la diferencia de altura entre el centro de gravedad de la cuenca y el punto de salida:

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

Donde:

T_c es el tiempo de concentración de la cuenca, en horas.

L es la longitud del cauce principal, en kilómetros.

H_g es el desnivel entre el centro de gravedad y el punto de salida de la cuenca, en metros.

A es el área de la cuenca, en 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.

| Datos | W200 | W210 | W220 | W230 | W240 | W250 | W260 | W270 | W280 |
|----------------------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|
| California | | | | | | | | | |
| L (km) | 43.4 | 44.7 | 20.7 | 28.8 | 17.1 | 25.9 | 35.5 | 19.3 | 26.3 |
| Hmax (m) | 1070 | 2220 | 519 | 1031 | 752 | 943 | 2515 | 1897 | 2057 |
| Tc (h) | 5.04 | 3.94 | 2.83 | 3.19 | 1.97 | 2.92 | 2.88 | 1.59 | 2.20 |
| Tlag | 3.03 | 2.36 | 1.70 | 1.91 | 1.18 | 1.75 | 1.73 | 0.95 | 1.32 |
| Giandotti | | | | | | | | | |
| L (km) | 43.4 | 44.7 | 20.7 | 28.8 | 17.1 | 25.9 | 35.5 | 19.3 | 26.3 |
| Hg (m) | 178 | 964 | 1 | 313 | 287 | 66 | 574 | 605 | 212 |
| A (km ²) | 310.50 | 255.70 | 88.60 | 172.50 | 52.80 | 126.70 | 88.30 | 89.50 | 84.80 |
| Tc (h) | 12.70 | 5.27 | 85.88 | 6.76 | 4.04 | 12.91 | 4.74 | 3.39 | 6.55 |
| Tlag | 7.62 | 3.16 | 51.53 | 4.06 | 2.42 | 7.74 | 2.84 | 2.04 | 3.93 |
| Tlag promedio | 5.32 | 2.76 | 26.61 | 2.98 | 1.80 | 4.75 | 2.29 | 1.49 | 2.62 |

| Datos | W290 | W300 | W310 | W320 | W330 | W340 | W350 | W360 | W370 | W380 |
|----------------------|--------|-------|--------|-------|------|-------|--------|-------|-------|-------|
| California | | | | | | | | | | |
| L (km) | 46.2 | 25.4 | 40.7 | 19.5 | 2.6 | 33.2 | 51.8 | 12.9 | 12.4 | 17.6 |
| Hmax (m) | 1887 | 590 | 1491 | 118 | 7 | 244 | 302 | 52 | 16 | 21 |
| Tc (h) | 4.36 | 3.42 | 4.12 | 4.68 | 1.35 | 6.54 | 10.07 | 3.98 | 5.98 | 8.08 |
| Tlag | 2.61 | 2.05 | 2.47 | 2.81 | 0.81 | 3.92 | 6.04 | 2.39 | 3.59 | 4.85 |
| Giandotti | | | | | | | | | | |
| L (km) | 46.2 | 25.4 | 40.7 | 19.5 | 2.6 | 33.2 | 51.8 | 12.9 | 12.4 | 17.6 |
| Hg (m) | 415 | 130 | 50 | 23 | 1 | 70 | 31 | 4 | 7 | 3 |
| A (km ²) | 231.90 | 62.00 | 138.80 | 35.80 | 0.90 | 73.00 | 296.90 | 27.00 | 14.80 | 46.80 |
| Tc (h) | 7.99 | 7.63 | 19.12 | 13.86 | 9.62 | 12.55 | 32.92 | 25.08 | 16.06 | 38.80 |
| Tlag | 4.79 | 4.58 | 11.47 | 8.32 | 5.77 | 7.53 | 19.75 | 15.05 | 9.63 | 23.28 |
| Tlag promedio | 3.70 | 3.31 | 6.97 | 5.56 | 3.29 | 5.73 | 12.90 | 8.72 | 6.61 | 14.06 |

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 16).

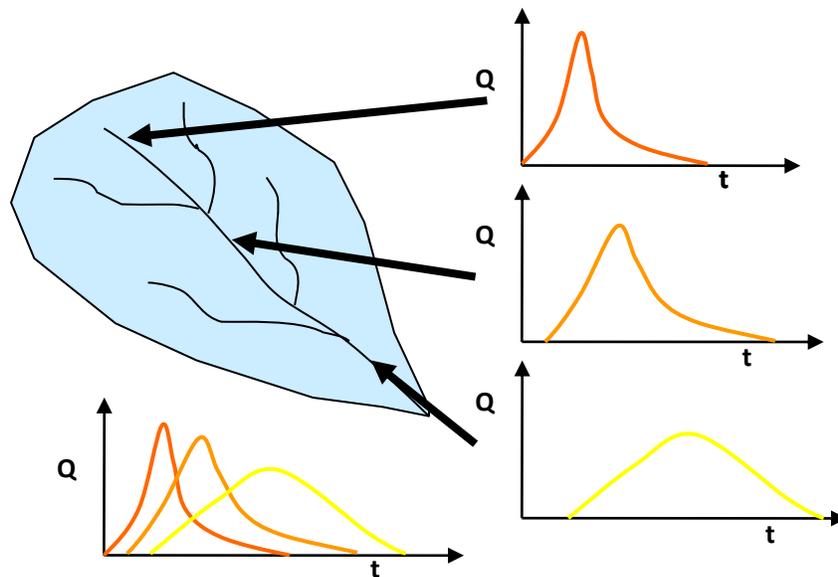


Figura 16. Ejemplo de los efectos de la propagación de la crecida aguas abajo en el hidrograma. Se observa tanto el retardo como la atenuación del máximo.

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.

- **Muskingum-Cunge:** Se trata de una modificación del método de Muskingum basada 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 María Linda, al no disponer de hidrogramas reales se ha utilizado el método de Muskingum-Cunge. 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 María Linda (figura 17).

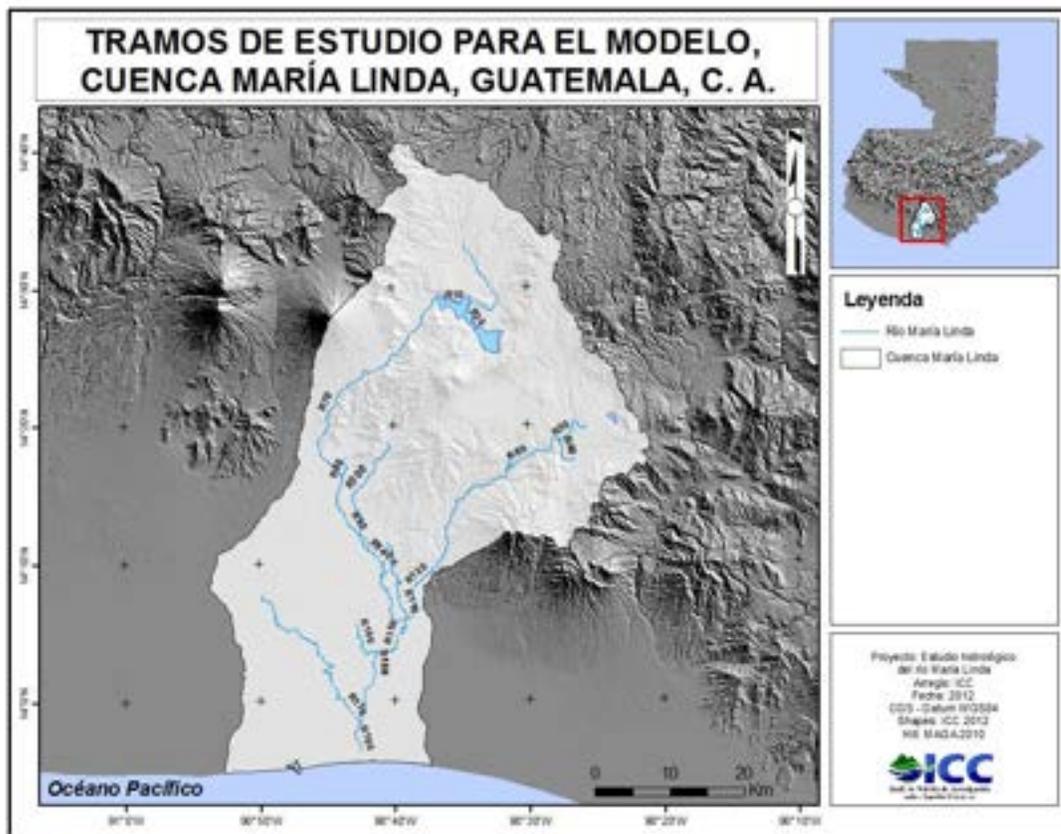


Figura 17. Tramos de estudio en el modelo del María linda. Nótese que el método de Muskingum-Cunge únicamente se ha aplicado en los tramos donde la crecida se propaga aguas abajo. En la nomenclatura utilizada, la letra "R" indica cada uno de los tramos (reaches) que conforman el río. Cada uno de éstos se ha numerado durante la generación del modelo.

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, Santillana del Mar, Santa Isabel y Puerto San José 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, intercepción 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 9.

Cuadro 9. Lluvia neta y pérdidas a partir de la lluvia inicial.

| Subcuenca | | W200 | W210 | W220 | W230 | W240 | W250 | W260 |
|-------------------------|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Área (km ²) | | 310,51 | 255,69 | 88,58 | 172,48 | 52,79 | 126,65 | 88,27 |
| Área (tanto por uno) | | 0,14 | 0,12 | 0,04 | 0,08 | 0,02 | 0,06 | 0,04 |
| T10 | Lluvia bruta (mm) | 87,70 | 118,14 | 87,70 | 114,09 | 135,56 | 136,56 | 148,68 |
| | Lluvia neta (mm) | 22,40 | 25,57 | 27,39 | 36,15 | 52,78 | 64,37 | 61,49 |
| | Pérdidas (mm) | 65,30 | 92,57 | 60,31 | 77,93 | 83,78 | 72,19 | 87,19 |
| | % lluvia neta (mmneta/mmbruta) | 0,26 | 0,22 | 0,31 | 0,32 | 0,39 | 0,47 | 0,41 |
| T25 | Lluvia bruta (mm) | 105,83 | 143,76 | 105,83 | 151,06 | 189,58 | 189,58 | 183,65 |
| | Lluvia neta (mm) | 33,57 | 40,14 | 39,72 | 62,08 | 93,76 | 108,74 | 88,71 |
| | Pérdidas (mm) | 72,27 | 103,63 | 66,12 | 88,98 | 95,82 | 80,84 | 94,94 |
| | % lluvia neta (mmneta/mmbruta) | 0,32 | 0,28 | 0,38 | 0,41 | 0,49 | 0,57 | 0,48 |
| T50 | Lluvia bruta (mm) | 117,21 | 161,12 | 117,21 | 172,49 | 219,59 | 219,59 | 203,64 |
| | Lluvia neta (mm) | 41,18 | 51,06 | 48,00 | 78,47 | 118,72 | 135,22 | 105,07 |
| | Pérdidas (mm) | 76,03 | 110,06 | 69,21 | 94,02 | 100,86 | 84,36 | 98,57 |
| | % lluvia neta (mmneta/mmbruta) | 0,35 | 0,32 | 0,41 | 0,45 | 0,54 | 0,62 | 0,52 |

| Subcuenca | W270 | W280 | W290 | W300 | W310 | W320 | W330 | |
|-------------------------|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Área (km ²) | 89,48 | 84,80 | 231,92 | 61,99 | 138,79 | 35,83 | 0,89 | |
| Área (tanto por uno) | 0,04 | 0,04 | 0,11 | 0,03 | 0,06 | 0,02 | 0,00 | |
| T10 | Lluvia bruta (mm) | 127,28 | 150,48 | 136,70 | 151,11 | 149,37 | 151,11 | 146,31 |
| | Lluvia neta (mm) | 50,61 | 17,80 | 54,22 | 66,02 | 53,82 | 77,52 | 57,88 |
| | Pérdidas (mm) | 76,67 | 132,68 | 82,48 | 85,09 | 95,55 | 73,60 | 88,43 |
| | % lluvia neta (mmneta/mmbruta) | 0,40 | 0,12 | 0,40 | 0,44 | 0,36 | 0,51 | 0,40 |
| T25 | Lluvia bruta (mm) | 173,67 | 184,06 | 189,53 | 184,85 | 185,42 | 184,85 | 186,41 |
| | Lluvia neta (mm) | 86,78 | 31,92 | 94,49 | 91,87 | 80,22 | 106,22 | 88,67 |
| | Pérdidas (mm) | 76,89 | 152,14 | 94,05 | 91,98 | 105,20 | 78,64 | 97,74 |
| | % lluvia neta (mmneta/mmbruta) | 0,50 | 0,17 | 0,50 | 0,50 | 0,43 | 0,57 | 0,48 |
| T50 | Lluvia bruta (mm) | 200,13 | 207,77 | 219,48 | 208,68 | 209,99 | 208,68 | 212,28 |
| | Lluvia neta (mm) | 108,88 | 43,57 | 120,59 | 112,76 | 99,43 | 127,21 | 109,79 |
| | Pérdidas (mm) | 91,26 | 164,19 | 98,88 | 95,92 | 110,56 | 81,48 | 102,49 |
| | % lluvia neta (mmneta/mmbruta) | 0,54 | 0,21 | 0,55 | 0,54 | 0,47 | 0,61 | 0,52 |

| Subcuenca | W340 | W350 | W360 | W370 | W380 | |
|-------------------------|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Área (km ²) | 73,01 | 296,94 | 26,98 | 14,83 | 46,83 | |
| Área (tanto por uno) | 0,03 | 0,14 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | |
| T10 | Lluvia bruta (mm) | 155,82 | 163,67 | 162,97 | 182,50 | 182,50 |
| | Lluvia neta (mm) | 80,90 | 70,94 | 82,80 | 92,02 | 106,51 |
| | Pérdidas (mm) | 74,92 | 92,73 | 80,17 | 90,49 | 76,00 |
| | % lluvia neta (mmneta/mmbruta) | 0,52 | 0,43 | 0,51 | 0,50 | 0,58 |
| T25 | Lluvia bruta (mm) | 191,72 | 203,16 | 203,94 | 230,61 | 230,61 |
| | Lluvia neta (mm) | 111,60 | 102,34 | 117,62 | 132,83 | 149,58 |
| | Pérdidas (mm) | 80,12 | 100,82 | 86,32 | 97,78 | 81,03 |
| | % lluvia neta (mmneta/mmbruta) | 0,58 | 0,50 | 0,58 | 0,58 | 0,65 |
| T50 | Lluvia bruta (mm) | 216,97 | 230,78 | 232,09 | 263,92 | 263,92 |
| | Lluvia neta (mm) | 133,95 | 125,43 | 142,47 | 162,23 | 180,24 |
| | Pérdidas (mm) | 83,01 | 105,34 | 89,62 | 101,69 | 83,67 |
| | % lluvia neta (mmneta/mmbruta) | 0,62 | 0,54 | 0,61 | 0,61 | 0,68 |

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.

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 10 y 11 se resumen los diferentes valores calculados para las subcuencas del río María Linda.

Cuadro 10. 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) | 8,87 | 4,61 | 44,35 | 4,97 | 3,00 | 7,91 | 3,81 | 2,49 | 4,37 | 6,17 |
| Tiempo de retardo (h) | 5,32 | 2,76 | 26,61 | 2,98 | 1,80 | 4,75 | 2,29 | 1,49 | 2,62 | 3,70 |

| | W300 | W310 | W320 | W330 | W340 | W350 | W360 | W370 | W380 |
|-----------------------------|------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| Tiempo de concentración (h) | 5,52 | 11,62 | 9,27 | 5,49 | 9,54 | 21,49 | 14,53 | 11,02 | 23,44 |
| Tiempo de retardo (h) | 3,31 | 6,97 | 5,56 | 3,29 | 5,73 | 12,90 | 8,72 | 6,61 | 14,06 |

La subcuenca con mayor tiempo de retardo es W220, puesto que corresponde con el lago de Amatitlán. Cabe destacar que la siguiente subcuenca con mayor tiempo de retardo es W350, correspondiente al afluente El Naranjo. El elevado tiempo de retardo aquí se debe a la longitud del cauce, de 51,8 kilómetros, la totalidad del cual transcurre sobre la planicie del Pacífico, salvando un desnivel de tan solo 302 metros.

Se puede apreciar el valor que aporta la combinación de los métodos de Giandotti y Kirpich analizando los resultados obtenidos para la subcuenca W280, correspondiente a un afluente que se origina en el volcán de Pacaya. La fórmula de Kirpich determina un tiempo de concentración de 2,20 horas mientras que con el método de Giandotti el resultado se triplica obteniendo un tiempo de 6,55 horas. Esto se debe a que la primera considera el desnivel absoluto de la subcuenca (2.057m) mientras que la segunda evalúa el desnivel desde el centro de la subcuenca hasta el final de ésta (212m). 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 11. Tiempo de propagación de la crecida calculado mediante la fórmula de Muskingum-Cunge. Los valores de Manning asignados han sido de 0,0475.

| Tramo | Subcuenca | Longitud tramo (km) | Inclinación tramo (m/m) | Amplitud promedio del cauce (m) | Tiempo de propagación |
|-------|-----------|---------------------|-------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| R60 | W240 | 10,6 | 0,030 | 17,9 | 13 min |
| R70 | W210 | 37,3 | 0,026 | 15,9 | 51 min |
| R90 | W300 | 12,6 | 0,010 | 28,3 | 25 min |
| R120 | W290 | 31,4 | 0,017 | 18,5 | 54 min |
| R130 | W330 | 0,4 | 0,002 | 22,2 | 1 min |
| R140 | W320 | 16,9 | 0,003 | 31,5 | 53 min |
| R150 | W360 | 9,6 | 0,001 | 41,5 | 40 min |
| R180 | W370 | 11,5 | 0,001 | 35,4 | 1 h 14 min |
| R190 | W380 | 4,4 | 0,001 | 44,2 | 37 min |

El tramo que presenta un mayor tiempo de propagación de la crecida es R180. 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 0.0475, con valores que oscilan entre 0.035 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 el tramo medio de la subcuenca del Aguacapa, se debería sumar el tiempo de retardo de la subcuenca del Aguacapa medio (W290) al tiempo de propagación de la crecida hasta la desembocadura (R130, R150, R180 y R190). De este modo se podría estimar que desde el máximo de precipitación se dispone de unas 6 horas para alertar a las poblaciones asentadas en la línea de costa y proximidades del río María Linda.

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 resultados expuestos, el software HEC-HMS 3.5 ha generado hidrogramas de crecida para los diferentes períodos de retorno (figura 18). El tiempo estimado entre el valor de precipitación promedio máxima en la cuenca y el valor de caudal máximo en la desembocadura es de unas 7 horas y 16 minutos. Se ha determinado, además, el tiempo de retardo para cada una de las subcuencas.

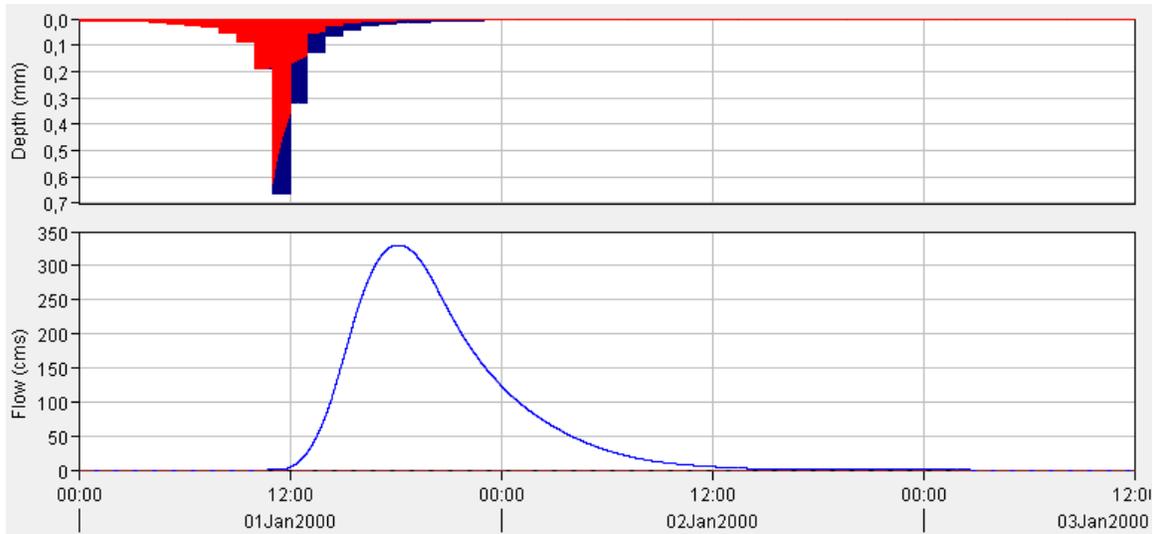


Figura 18. Hietograma calculado en la subcuena W200 (arriba) y hidrograma generado por dicha precipitación (abajo). Nótese que la precipitación neta (azul) se diferencia de las pérdidas hidrológicas (rojo) a partir del parámetro del número de curva.

Se han generado hidrogramas para diferentes puntos de interés (figura 19) y se han determinado los caudales máximos para los períodos de retorno de 10, 25 y 50 años, en los puntos de Amatillo, las Guacamayas y la desembocadura, así como para el aporte del río El Naranjo (cuadro 12).

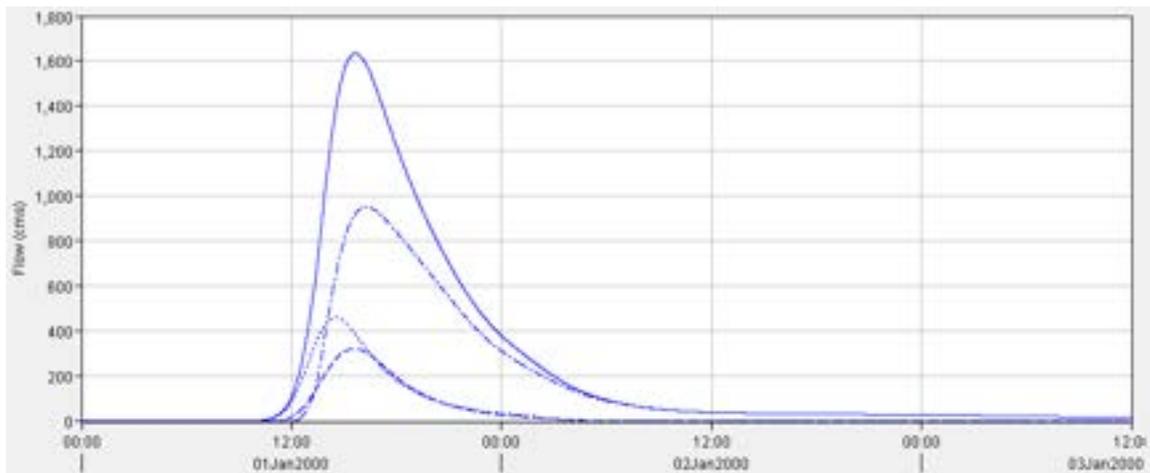


Figura 19. Hidrograma generado en la estación Amatillo, para un periodo de retorno de 50 años. Nótese que este hidrograma es la suma de todos los hidrogramas procedentes de las subcuenas situadas río arriba (hidrogramas discontinuos).

Cuadro 12. Caudales máximos estimados (en m³/s) para los períodos de retorno de 10, 25 y 50 años.

| Subcuena | T10 | T25 | T50 |
|----------------------|-------|--------|--------|
| Michatoya (Amatillo) | 970,6 | 1390,2 | 1633,8 |

| | | | |
|-----------------------|--------|--------|--------|
| Aguacapa (Guacamayas) | 1453,4 | 2299,6 | 2665,7 |
| El Naranjo | 326 | 466 | 564 |
| Desembocadura | 2383,4 | 3503,7 | 4150,2 |

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 13). Se observa que los valores obtenidos en la modelación hidrológica son mayores. A pesar de que el modelo debería ser calibrado para obtener resultados predictivos, el hecho que los caudales sean mayores con esta metodología, sugiere la conveniencia de precaución en el uso de caudales de diseño basados en el método de la crecida índice.

Los resultados presentan una diferencia mayor en la subcuenca del Aguacapa, de hasta el 55%. La precipitación de diseño para esta subcuenca se ha determinado en base a los registros de la estación Santa Isabel y la distribución de la precipitación observada en la estación Los Esclavos. Esto podría significar que el método regional se ajusta más a la pluviometría que se encuentra en la mitad occidental de la cuenca, determinada a partir de las estaciones INSIVUMEH, Camantulul y Puerto San José, dado que la diferencia en los resultados obtenidos por los dos métodos es menor aquí (en torno al 20%). Esta observación únicamente se podrá confirmar una vez se haya validado el modelo hidrológico.

Cuadro 13. Comparación de los resultados del método regional con el modelo lluvia-escorrentía. Todos los valores del método regional corresponden al método de curva envolvente.

| Subcuenca | Método regional | | | Método lluvia-escorrentía | | | Variación máxima |
|---------------|-----------------|------|------|---------------------------|------|------|------------------|
| | T10 | T25 | T50 | T10 | T25 | T50 | |
| Michatoya | 865 | 1129 | 1323 | 971 | 1390 | 1634 | 19% |
| Aguacapa | 787 | 1027 | 1204 | 1453 | 2300 | 2666 | 55% |
| El Naranjo | 276 | 361 | 423 | 326 | 466 | 564 | 25% |
| Desembocadura | 2215 | 2891 | 3388 | 2383 | 3504 | 4150 | 18% |

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 María Linda. A diferencia de los métodos regionales utilizados hasta ahora 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 9). 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 10 y 11).

Los valores de caudal determinados por el modelo lluvia-escorrentía se han comparado con las estimaciones del método de la crecida índice (cuadro 13). La comparación muestra una diferencia del 20% en la desembocadura, dada la diferente naturaleza de los métodos. Esta diferencia se incrementa significativamente en la subcuenca del Aguacapa, donde alcanza valores de hasta el 55%. Esto puede ser debido al cambio en el patrón de precipitación 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 el modelo lluvia-escorrentía, basado en registros de precipitación de diferentes estaciones (Gil, 2012) representa mejor la heterogeneidad en los patrones de lluvia.

No obstante, 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 mejora la capacidad predictiva del modelo sino que también se ajustan los diferentes parámetros que lo componen (tiempo de concentración, número de curva, etc.). Asimismo, se requiere mayor información del funcionamiento del lago Amatitlán, así como datos de aforo en la entrada y salida del mismo.

En futuros estudios del río María Linda se recomienda utilizar los valores de caudal generados por el modelo lluvia-escorrentía (cuadro 12) en detrimento del método regional, por los motivos ya citados. Por tanto a nivel de cuenca se proponen las siguientes estimaciones de caudal:

T10: 2,383m³/s; T25: 3,504m³/s; T50: 4,150m³/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. 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 se 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 en una sección determinada.

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 (2%) de ocurrir en un año determinado.

Tiempo de concentración: Es el tiempo que transcurre entre el valor de precipitación máxima y el punto de inflexión del hidrograma.

Tiempo de retardo: 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, 2007. Estudio del diseño de las obras para mitigar el impacto del río María Linda sobre la infraestructura de la ruta CA-02 oriente, RD-17-ESC y poblaciones aledañas al cauce. 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.

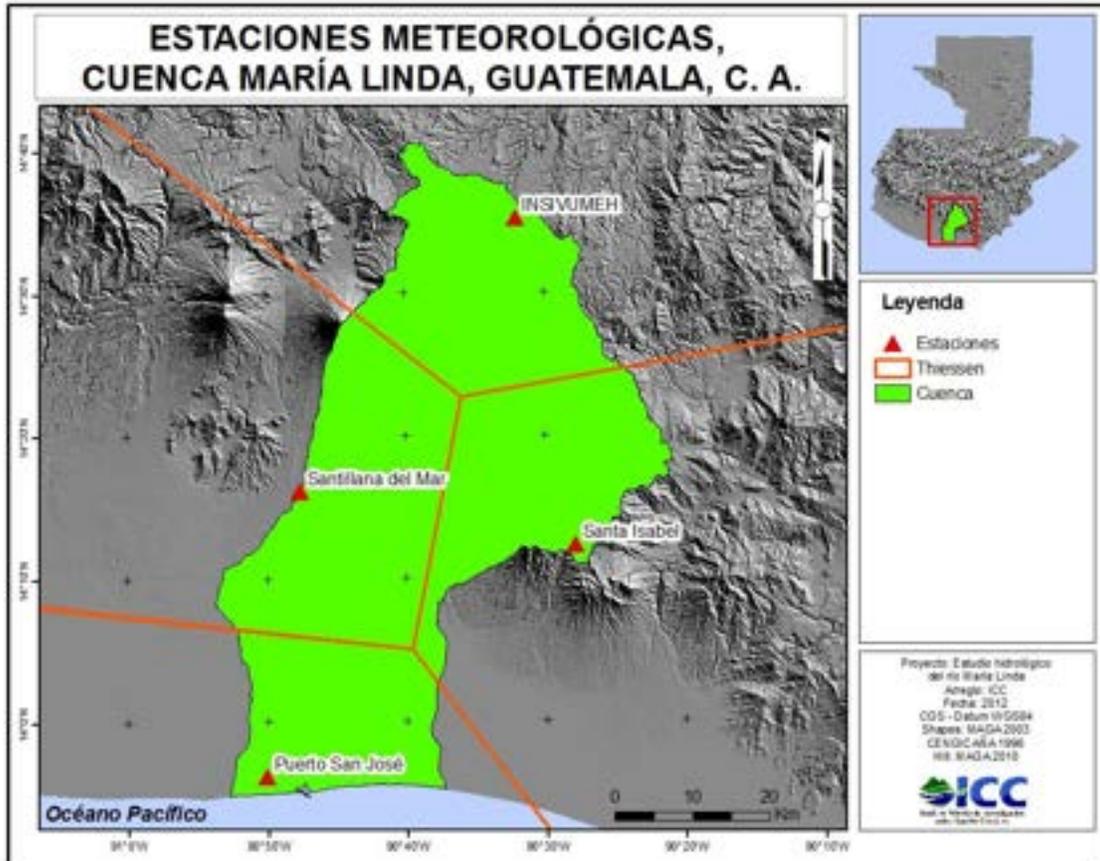
Snyder, F. F., 1938, Synthetic unit graphs, Trans. ACU, vol. 19, pp. 447-454.

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

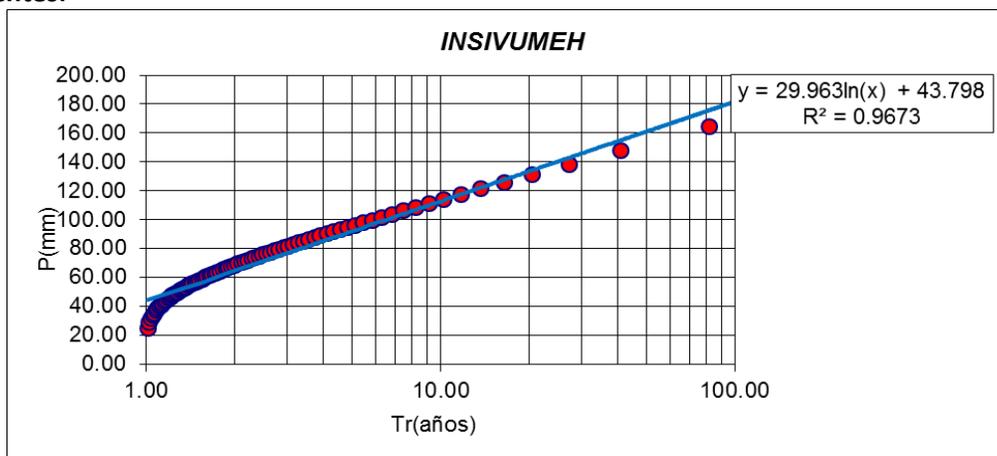
UNESCO-RAPCA, 2003. Zonificación de amenazas naturales en la cuenca del río Samalá y análisis de vulnerabilidad y riesgo en la población de San Sebastián Rehutalueu, Guatemala, Centro América. Programa de Acción Regional para Centro América, UNESCO.

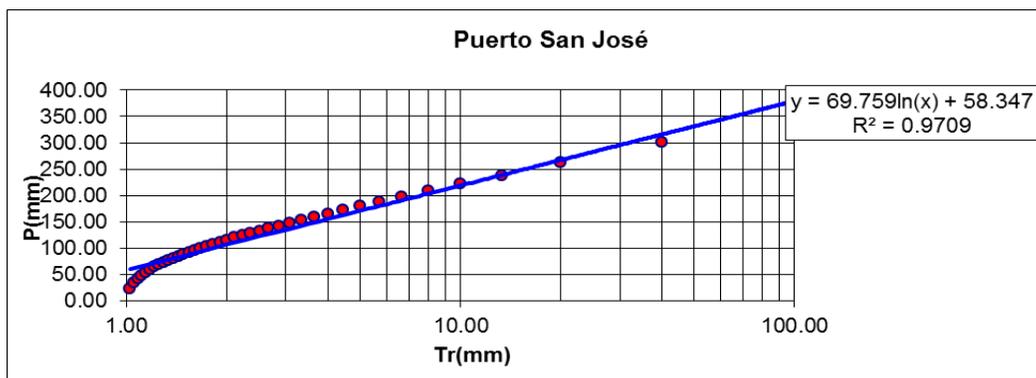
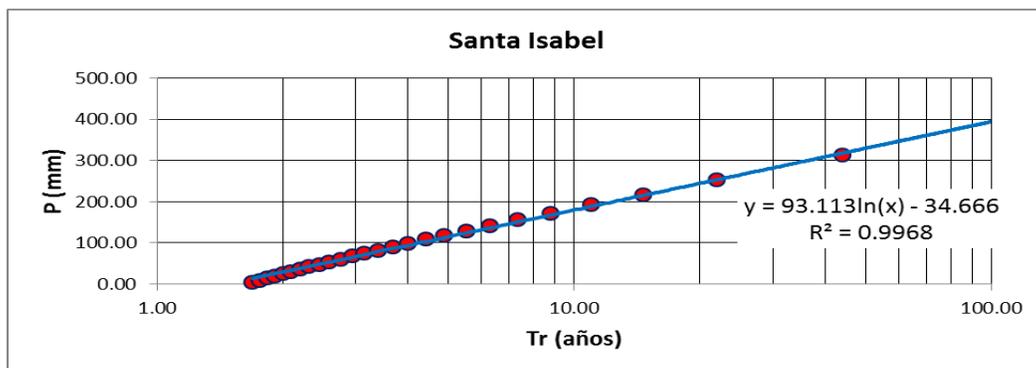
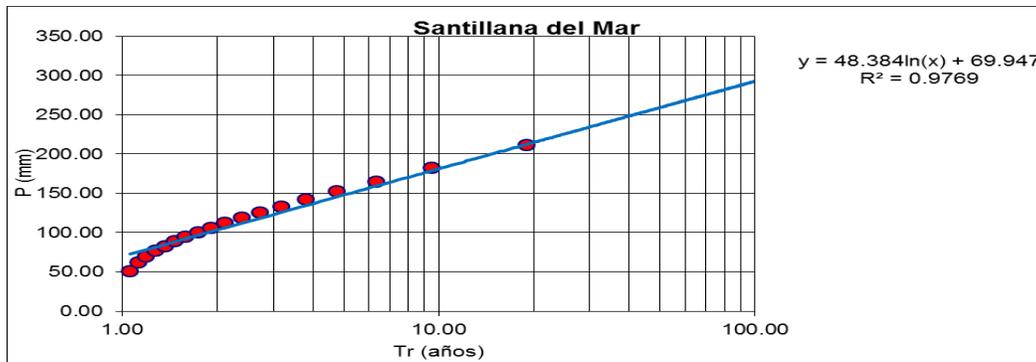
ANEXO I. DATOS PLUVIOMÉTRICOS

Los datos pluviométricos utilizados para la generación del estudio hidrológico proceden de las estaciones de INSIVUMEH, Santillana del Mar, Santa Isabel y Puerto San José. 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 | Santillana del Mar | Santa Isabel | Puerto San José |
| Elevación (msnm) | 2240 | 620 | 2060 | 280 |
| Distribución Pd/P24 | INSIVUMEH | Camantulul | Los Esclavos | Puerto San José |
| Pd T10 (mm) | 113 | 181 | 182 | 219 |
| Pd T25 (mm) | 140 | 226 | 269 | 283 |
| Pd T50 (mm) | 161 | 259 | 335 | 331 |
| Superficie (km2) | 633 | 759 | 597 | 204 |
| Coef. Simultaneidad | 0.81 | 0.81 | 0.82 | 0.85 |
| Pd' T10 (mm) | 91 | 147 | 149 | 186 |
| Pd' T25 (mm) | 114 | 183 | 221 | 241 |
| Pd' T50 (mm) | 130 | 210 | 275 | 282 |

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 | $\frac{P_d}{P_{24}} = \frac{d}{17.39 \cdot T^{0.588} + d}$ |
| Santillana del Mar | Camantulul | $\frac{P_d}{P_{24}} = \frac{d}{23.36 \cdot T^{0.386} + 0.991 \cdot d}$ |
| Santa Isabel | Los Esclavos | $\frac{P_d}{P_{24}} = \frac{d}{34.86 \cdot T^{0.602} + 0.990 \cdot d}$ |
| Puerto San José | Puerto San José | $\frac{P_d}{P_{24}} = \frac{d}{23.81 \cdot T^{0.438} + 0.966 \cdot d}$ |

Los hietogramas generados se recogen en la siguiente tabla:

| Horas | INSIVUMEH | | | Santillana del Mar | | | Santa Isabel | | | Puerto San José | | |
|-------|-----------|------|------|--------------------|------|-------|--------------|------|------|-----------------|------|------|
| | T10 | T25 | T50 | T10 | T25 | T50 | T10 | T25 | T50 | T10 | T25 | T50 |
| 1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.6 | 1.3 | 2.1 | 0.4 | 0.7 | 1.1 |
| 2 | 0.2 | 0.4 | 0.7 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.7 | 1.5 | 2.4 | 0.5 | 0.8 | 1.3 |
| 3 | 0.3 | 0.5 | 0.8 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.8 | 1.8 | 2.8 | 0.6 | 1.0 | 1.5 |
| 4 | 0.3 | 0.6 | 1.0 | 0.5 | 0.7 | 0.7 | 1.0 | 2.1 | 3.3 | 0.7 | 1.3 | 1.9 |
| 5 | 0.4 | 0.8 | 1.2 | 0.7 | 0.8 | 1.0 | 1.2 | 2.6 | 4.0 | 0.9 | 1.6 | 2.3 |
| 6 | 0.5 | 1.0 | 1.6 | 0.9 | 1.1 | 1.3 | 1.6 | 3.3 | 4.9 | 1.2 | 2.1 | 3.0 |
| 7 | 0.7 | 1.4 | 2.1 | 1.2 | 1.5 | 1.7 | 2.1 | 4.3 | 6.2 | 1.6 | 2.8 | 4.1 |
| 8 | 1.1 | 2.0 | 2.9 | 1.8 | 2.2 | 2.5 | 3.0 | 5.8 | 8.0 | 2.3 | 4.0 | 5.7 |
| 9 | 1.7 | 3.1 | 4.2 | 2.9 | 3.6 | 4.1 | 4.5 | 8.1 | 10.7 | 3.7 | 6.2 | 8.6 |
| 10 | 3.2 | 5.3 | 6.9 | 5.3 | 6.6 | 7.6 | 7.6 | 12.4 | 15.1 | 6.9 | 11.0 | 14.5 |
| 11 | 7.9 | 11.3 | 13.1 | 13.3 | 16.5 | 19.0 | 15.2 | 21.2 | 22.9 | 16.7 | 24.2 | 29.3 |
| 12 | 43.3 | 39.7 | 34.2 | 78.3 | 97.5 | 111.9 | 45.0 | 44.0 | 38.7 | 90.4 | 92.9 | 88.9 |
| 13 | 15.4 | 19.2 | 20.0 | 26.4 | 32.9 | 37.7 | 24.3 | 29.5 | 29.3 | 32.5 | 42.3 | 47.3 |
| 14 | 4.8 | 7.5 | 9.2 | 8.0 | 9.9 | 11.4 | 10.4 | 15.9 | 18.4 | 10.2 | 15.7 | 20.0 |
| 15 | 2.3 | 3.9 | 5.3 | 3.8 | 4.7 | 5.4 | 5.8 | 9.9 | 12.6 | 4.9 | 8.1 | 11.0 |
| 16 | 1.4 | 2.4 | 3.4 | 2.2 | 2.8 | 3.2 | 3.7 | 6.8 | 9.2 | 2.9 | 5.0 | 6.9 |
| 17 | 0.9 | 1.7 | 2.4 | 1.5 | 1.8 | 2.1 | 2.5 | 4.9 | 7.0 | 1.9 | 3.3 | 4.8 |
| 18 | 0.6 | 1.2 | 1.8 | 1.0 | 1.3 | 1.5 | 1.8 | 3.8 | 5.5 | 1.4 | 2.4 | 3.5 |
| 19 | 0.5 | 0.9 | 1.4 | 0.8 | 1.0 | 1.1 | 1.4 | 2.9 | 4.4 | 1.0 | 1.8 | 2.7 |
| 20 | 0.4 | 0.7 | 1.1 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 1.1 | 2.4 | 3.7 | 0.8 | 1.4 | 2.1 |
| 21 | 0.3 | 0.6 | 0.9 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.9 | 2.0 | 3.1 | 0.6 | 1.1 | 1.7 |
| 22 | 0.2 | 0.5 | 0.7 | 0.4 | 0.5 | 0.5 | 0.7 | 1.6 | 2.6 | 0.5 | 0.9 | 1.4 |
| 23 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 1.4 | 2.2 | 0.4 | 0.8 | 1.2 |
| 24 | 0.2 | 0.3 | 0.5 | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 1.2 | 1.9 | 0.4 | 0.7 | 1.0 |

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 | 46.8 | 71.3 | 02ene2000, 02:46 |
| W370 | 14.8 | 38.7 | 01ene2000, 18:59 |
| W360 | 27.0 | 48.9 | 01ene2000, 21:17 |
| W350 (El Naranjo) | 296.9 | 326.2 | 02ene2000, 01:41 |
| W340 | 73.0 | 190.8 | 01ene2000, 18:01 |
| W330 | 0.9 | 2.4 | 01ene2000, 15:40 |
| W320 | 35.8 | 92.4 | 01ene2000, 17:51 |
| W310 | 138.8 | 194.3 | 01ene2000, 19:40 |
| W300 | 62.0 | 207.8 | 01ene2000, 15:32 |
| W290 | 231.9 | 545.5 | 01ene2000, 16:07 |
| W280 | 84.8 | 84 | 01ene2000, 15:20 |
| W270 | 89.5 | 337.7 | 01ene2000, 13:39 |
| W260 | 88.3 | 338.1 | 01ene2000, 14:30 |
| W250 | 126.7 | 277.7 | 01ene2000, 17:21 |
| W240 | 52.8 | 172.9 | 01ene2000, 14:06 |
| W230 | 172.5 | 304.2 | 01ene2000, 15:30 |
| W220 (Lago Amatitlán) | 88.6 | 18.7 | 02ene2000, 16:08 |
| W210 | 255.7 | 364.7 | 01ene2000, 15:14 |
| W200 | 310.5 | 232.3 | 01ene2000, 17:55 |
| Desembocadura | 2197.2 | 2383.4 | 01ene2000, 19:28 |
| J73 (Michatoya+Aguacapa) | 1738.7 | 2494.7 | 01ene2000, 16:24 |
| J78 (Guacamayas) | 812.1 | 1453.4 | 01ene2000, 16:17 |
| J81 (Amatillo) | 889.8 | 970.6 | 01ene2000, 15:26 |

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.

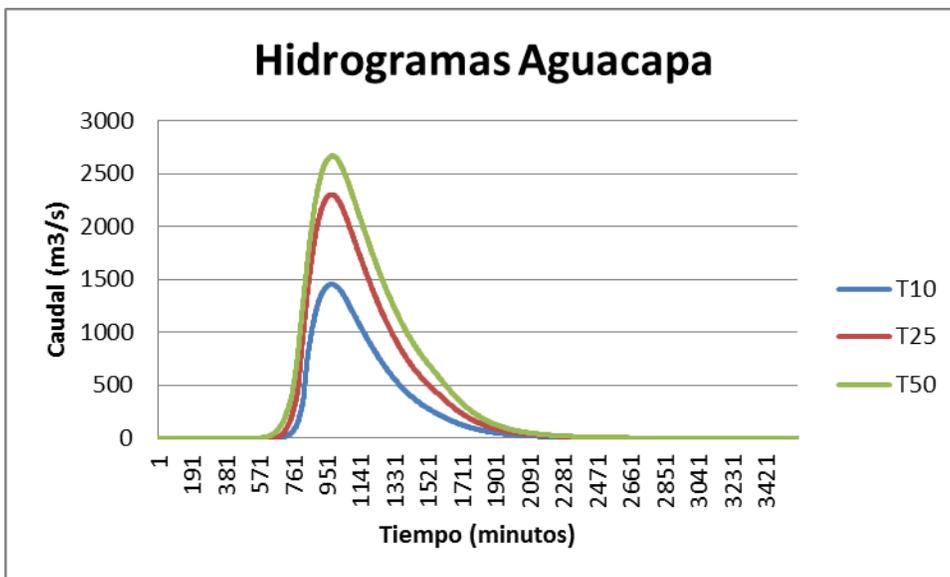
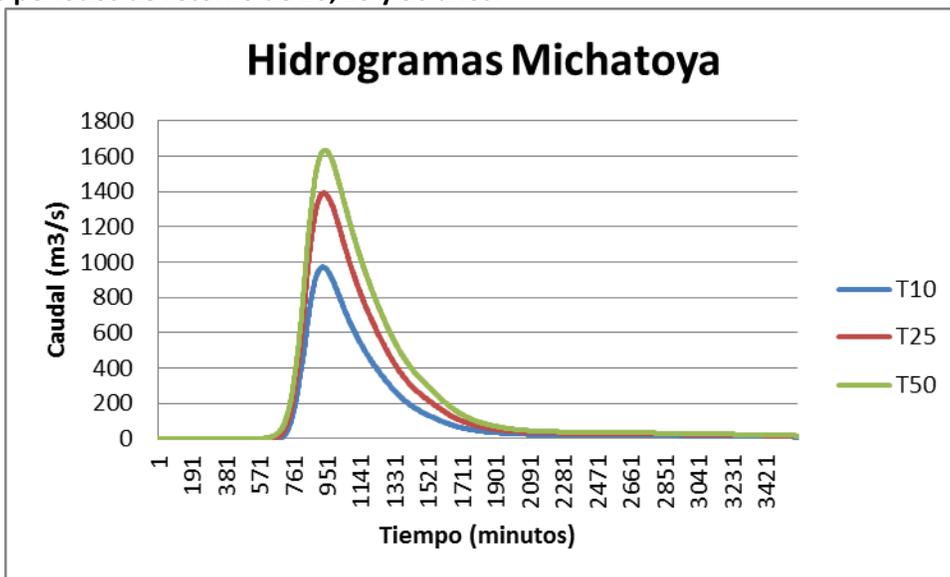
| Elementos hidrológicos | Área de drenaje (km ²) | Caudal máximo (m ³ /s) | Hora del máximo |
|--------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------|
| W380 | 46.8 | 99.1 | 02ene2000, 02:49 |
| W370 | 14.8 | 54.2 | 01ene2000, 19:04 |
| W360 | 27.0 | 67.4 | 01ene2000, 21:24 |
| W350 (El Naranjo) | 296.9 | 465.5 | 02ene2000, 01:45 |
| W340 | 73.0 | 254.6 | 01ene2000, 18:05 |
| W330 | 0.9 | 3.4 | 01ene2000, 15:42 |
| W320 | 35.8 | 122.8 | 01ene2000, 17:54 |
| W310 | 138.8 | 277.1 | 01ene2000, 19:52 |
| W300 | 62.0 | 278.8 | 01ene2000, 15:34 |
| W290 | 231.9 | 889 | 01ene2000, 16:07 |
| W280 | 84.8 | 141.5 | 01ene2000, 15:22 |
| W270 | 89.5 | 478.2 | 01ene2000, 13:38 |
| W260 | 88.3 | 433.9 | 01ene2000, 14:31 |
| W250 | 126.7 | 424.2 | 01ene2000, 17:23 |
| W240 | 52.8 | 252.7 | 01ene2000, 14:05 |
| W230 | 172.5 | 464.3 | 01ene2000, 15:32 |
| W220 (Lago Amatitlán) | 88.6 | 27.1 | 02ene2000, 16:28 |
| W210 | 255.7 | 536.3 | 01ene2000, 15:18 |
| W200 | 310.5 | 330.1 | 01ene2000, 18:09 |
| Desembocadura | 2197.2 | 3503.7 | 01ene2000, 19:17 |
| J73 (Michatoya+Aguacapa) | 1738.7 | 3781.6 | 01ene2000, 16:25 |
| J78 (guacamayas) | 812.1 | 2299.6 | 01ene2000, 16:17 |
| J81 (Amatillo) | 889.8 | 1390.2 | 01ene2000, 15:33 |

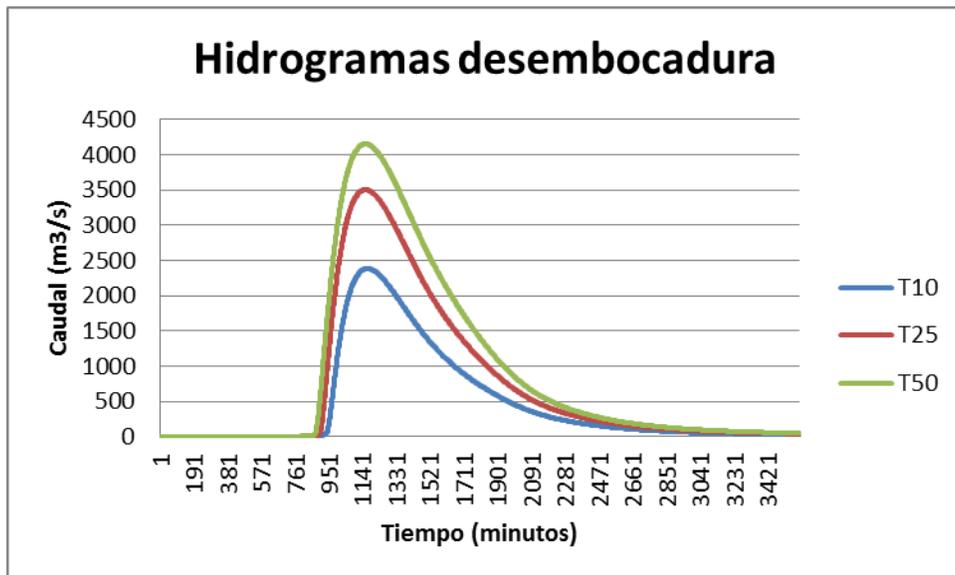
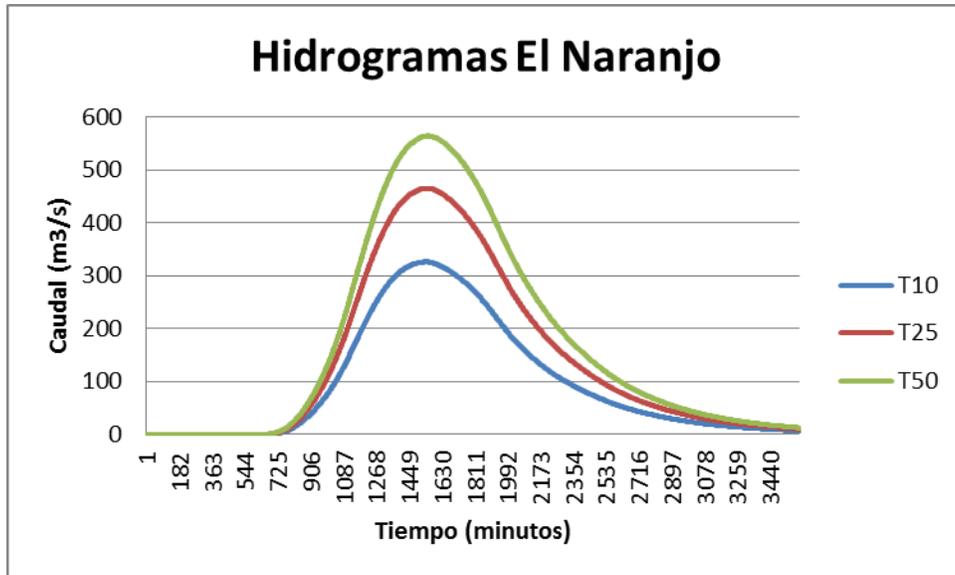
Período de retorno: 50 años

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 | 46.8 | 118.1 | 02ene2000, 02:54 |
| W370 | 14.8 | 64.1 | 01ene2000, 19:08 |
| W360 | 27.0 | 79.2 | 01ene2000, 21:30 |
| W350 (El Naranjo) | 296.9 | 564.3 | 02ene2000, 01:51 |
| W340 | 73.0 | 295.6 | 01ene2000, 18:08 |
| W330 | 0.9 | 3.9 | 01ene2000, 15:43 |
| W320 | 35.8 | 142.8 | 01ene2000, 17:56 |
| W310 | 138.8 | 329.5 | 01ene2000, 20:00 |
| W300 | 62.0 | 323 | 01ene2000, 15:36 |
| W290 | 231.9 | 1040.3 | 01ene2000, 16:08 |
| W280 | 84.8 | 181.1 | 01ene2000, 15:24 |
| W270 | 89.5 | 503.5 | 01ene2000, 13:40 |
| W260 | 88.3 | 461.5 | 01ene2000, 14:32 |
| W250 | 126.7 | 477.3 | 01ene2000, 17:28 |
| W240 | 52.8 | 267.8 | 01ene2000, 14:06 |
| W230 | 172.5 | 521.7 | 01ene2000, 15:35 |
| W220 (Lago Amatitlán) | 88.6 | 32.6 | 02ene2000, 16:34 |
| W210 | 255.7 | 640.2 | 01ene2000, 15:20 |
| W200 | 310.5 | 384 | 01ene2000, 18:20 |
| Desembocadura | 2197.2 | 4150.2 | 01ene2000, 19:16 |
| J73 (Michatoya+Aguacapa) | 1738.7 | 4408.1 | 01ene2000, 16:30 |
| J78 (guacamayas) | 812.1 | 2665.7 | 01ene2000, 16:22 |
| J81 (Amatillo) | 889.8 | 1633.8 | 01ene2000, 15:40 |

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**