



Instituto Privado de Investigación  
sobre Cambio Climático

# ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO COYOLATE

Guatemala, Centroamérica



Instituto Privado de Investigación  
sobre Cambio Climático

# ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO COYOLATE

Guatemala, Centroamérica

Autor: Sergio Gil Villalba

Impreso: Digitalhouse

Guatemala, 2017

Tiraje: 12 ejemplares

Digital: ISBN 978-9929-8241-0-2

### CITA BIBLIOGRÁFICA

ICC (Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático). 2011. Estudio hidrológico de la cuenca del río Coyolate. Guatemala. 71 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. GEOLOGÍA.....                      | 9  |
| 2.2. USO DE LA TIERRA .....             | 10 |
| 3. OBJETIVOS .....                      | 13 |
| 4. INTRODUCCIÓN A LOS MODELOS.....      | 14 |
| 4.1. MODELOS HIDROLÓGICOS .....         | 14 |
| 4.2. MODELOS HIDRÁULICOS.....           | 15 |
| 5. DATOS DE PARTIDA.....                | 17 |
| 5.1. MORFOLOGÍA.....                    | 18 |
| 5.2. DATOS PLUVIOMÉTRICOS .....         | 21 |
| 5.3. DATOS DE CAUDAL .....              | 22 |
| 6. METODOLOGÍA .....                    | 24 |
| 6.1. PRECIPITACIÓN.....                 | 24 |
| 6.2. PROCESOS HIDROLÓGICOS .....        | 28 |
| 6.2.1. GEOLOGÍA .....                   | 28 |
| 6.2.2. USO DE LA TIERRA.....            | 29 |
| 6.2.3. NÚMERO DE CURVA.....             | 30 |
| 6.3. CAUDAL .....                       | 32 |
| 6.3.1. MÉTODO DE LA CRECIDA ÍNDICE..... | 32 |
| 6.3.2. MODELOS LLUVIA-ESCORRENTÍA ..... | 34 |
| 6.3.2.1. TIEMPO DE RETARDO.....         | 36 |
| 6.3.2.2. PROPAGACIÓN DE LA CRECIDA..... | 38 |
| 6.4. MODELO HIDRÁULICO .....            | 41 |
| 6.4.1. SECCIONES.....                   | 41 |
| 6.4.2. COEFICIENTE DE MANNING .....     | 41 |
| 6.4.3. TIPO DE FLUJO .....              | 42 |
| 7. RESULTADOS.....                      | 43 |
| 7.1. MODELO HIDROLÓGICO .....           | 43 |
| 7.2. MODELO HIDRÁULICO .....            | 49 |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>8. CONCLUSIONES .....</b>                                  | <b>53</b> |
| <b>9. RECOMENDACIONES .....</b>                               | <b>55</b> |
| <b>10. GLOSARIO .....</b>                                     | <b>57</b> |
| <b>11. REFERENCIAS.....</b>                                   | <b>58</b> |
| <b>ANEXO I. DATOS PLUVIOMÉTRICOS .....</b>                    | <b>61</b> |
| <b>ANEXO II. TABLAS PARA LA DETERMINACIÓN DE MANNING.....</b> | <b>66</b> |
| <b>ANEXO III. RESULTADOS DEL MODELO HIDROLÓGICO .....</b>     | <b>68</b> |

## Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Mapa geológico de la cuenca del río Coyolate. ....  | 10 |
| Figura 2. Mapa de uso de la tierra de la cuenca del Río Coyolate. ....  | 12 |
| Figura 3. Zona de estudio de la cuenca del Coyolate. ....   | 18 |
| Figura 4. Perfil longitudinal del cauce principal de la cuenca del Coyolate. ....   | 20 |
| Figura 5. Subcuencas naturales compuestas por el río Coyolate y sus afluentes. ....   | 21 |
| Figura 6. Estaciones pluviométricas existentes en la zona de estudio. ....  | 22 |
| Figura 7. Estaciones de aforo existentes en la cuenca del Coyolate. ....  | 23 |
| Figura 8. Esquema de funcionamiento de los modelos precipitación-escorrentía. ....  | 24 |
| Figura 9. Ejemplo de los hietogramas generados con el método de desagregación para la estación de Camantulul. ....                                | 25 |
| Figura 10. Estaciones meteorológicas utilizadas y área de influencia según Thiessen. ....   | 27 |
| Figura 11. Mapa de tipo de suelo según clasificación NRCS. ....   | 29 |
| Figura 12. Mapa de uso de la tierra según clasificación NRCS. ....  | 30 |
| Figura 13. Mapa de distribución del parámetro de número de curva. ....  | 32 |
| Figura 14. Regiones hidrológicas para la estimación de crecidas en Guatemala. ....  | 33 |
| Figura 15. División de la cuenca del Coyolate en subcuencas para la generación del modelo hidrológico. ....                                       | 35 |
| Figura 16. Registros de caudal y lluvia en la estación Pantaleón. ....  | 36 |
| Figura 17. Efectos de la propagación de la crecida aguas abajo en un hidrograma. ....   | 39 |
| Figura 18. Tramos de estudio en el modelo del Coyolate. ....  | 40 |
| Figura 19. Secciones generadas a partir del Modelo de Elevaciones del Terreno. ....   | 42 |
| Figura 20. Hietograma calculado en la subcuenca Coyolate 2 y hidrograma generado por dicha precipitación. ....                                    | 47 |
| Figura 21. Hidrograma generado en el modelo hidrológico para el punto de Cerro Colorado, correspondiente a un periodo de retorno de 10 años. .... | 47 |
| Figura 22. Niveles de crecida para los periodos de retorno 10, 25 y 50 años estimados en HEC-RAS para una sección del tramo estudiado. ....       | 49 |
| Figura 23. Superficie con riesgo de inundación para periodos de retorno de 10, 25 y 50 años en un meandro cercano a Cerro Colorado. ....          | 50 |
| Figura 24. Perfil de velocidades del río estimado para un episodio con período de retorno de 50 años. ....  | 51 |

## Índice de cuadros

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Cuadro 1. Parámetros morfométricos del río Coyolate y cuencas vecinas. ....</b>  | <b>18</b> |
| <b>Cuadro 2. Atributos de las subcuencas.....</b>   | <b>20</b> |
| <b>Cuadro 3. Volumen diario de precipitación por período de retorno y corrección mediante el coeficiente de simultaneidad.....</b>  | <b>27</b> |
| <b>Cuadro 4. Criterios de clasificación del tipo de suelo según el NRCS.....</b>  | <b>28</b> |
| <b>Cuadro 5. Clasificación de los usos de la tierra según el criterio del NRCS y número de curva correspondiente a cada uso de la tierra según el tipo de suelo (A, B, C o D). ....</b> | <b>31</b> |
| <b>Cuadro 6. Caudales máximos calculados con el método de la crecida índice. ....</b>   | <b>34</b> |
| <b>Cuadro 7. Determinación del tiempo de retardo con los métodos de Kirpich y Giandotti.....</b>  | <b>38</b> |
| <b>Cuadro 8. Parámetros calculados para la metodología Muskingum-Cunge.....</b>   | <b>41</b> |
| <b>Cuadro 9. Lluvia neta y pérdidas a partir de la lluvia inicial. ....</b>   | <b>43</b> |
| <b>Cuadro 10. Tiempo de concentración y retardo para cada una de las subcuencas.....</b>  | <b>44</b> |
| <b>Cuadro 11. Tiempo de propagación de la crecida por los tramos R90, R100, R110, R120 y R310. ....</b>   | <b>45</b> |
| <b>Cuadro 12. Caudales máximos estimados para los períodos de retorno de 10, 25 y 50 años. ..</b>   | <b>47</b> |
| <b>Cuadro 13. Comparación de los resultados del método regional con el modelo lluvia-escorrentía. ....</b>  | <b>48</b> |

## 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 Coyolate 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 Coyolate. 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 Coyolate se ubica en la vertiente del Océano Pacífico, en el suroeste de Guatemala. Los volcanes Fuego y Acatenango, situados en la parte alta de la cuenca, aportan grandes cantidades de material que se deposita conformando una extensa llanura de material volcánico. En el tramo inicial la cuenca presenta grandes inclinaciones, salvando una diferencia de altura superior a 2.000 metros hasta llegar a los tramos medio y bajo, donde las pendientes son mucho más suaves. El cauce principal del Coyolate tiene una longitud de 150km, y la cuenca hidrológica abarca una superficie de 1.616km<sup>2</sup>, formando parte de los departamentos de Chimaltenango, Suchitepéquez y Escuintla (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 Coyolate estos cambios se han producido como resultado de cambios en los patrones climáticos, erosión de los suelos, la falta de una cobertura vegetal apropiada, los continuos aportes de sedimento volcánico y las modificaciones en el lecho del río (CIV, 2009).

Los cambios en morfología y comportamiento hidráulico del Coyolate han constituido una potencial amenaza a la infraestructura vial, poblados, instalaciones y plantaciones agrícolas (CIV, 2009).

### 2.1 Geología

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; CIV, 2009)

Para el estudio de la geología y el tipo de suelo se ha utilizado la cartografía SUNIL-IGN, 2000. MAGA-BID<sup>1</sup>, junio 2001 (figura 1).

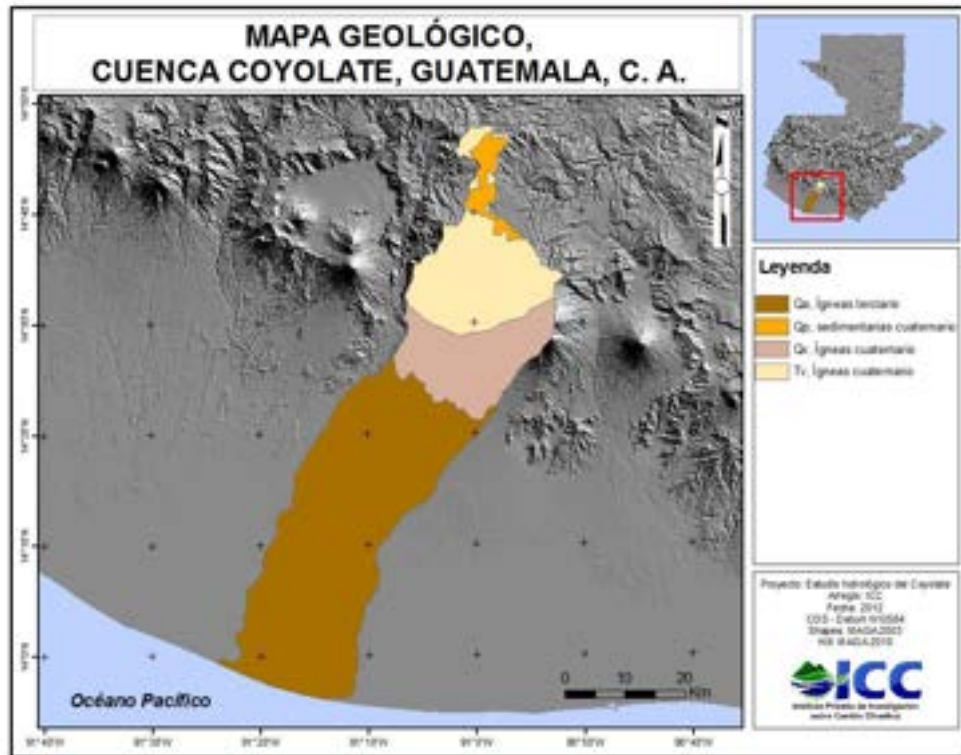


Figura 1. Mapa geológico de la cuenca del río Coyolate.

## 2.2. Uso de la tierra

La cuenca recibe una fuerte presión de los sistemas productivos agrícolas, ocupando éstos un 75.3% de la superficie. Por otro lado la cobertura forestal representa el 14.4% de la cuenca. Estos porcentajes indican 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, apenas un 1% de la superficie de la cuenca corresponde a centros urbanos. A continuación se detallan los diferentes usos de la tierra en la cuenca.

<sup>1</sup> Escala 1:250.000. IGN: Instituto Geográfico Nacional. MAGA: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. BID: Banco Interamericano de Desarrollo.

Casi un 1% de la superficie de la cuenca corresponde a áreas urbanas. Este porcentaje de urbanización se concentra en las partes altas de la cuenca y no es significativo, con lo cual se puede esperar que no provoque un gran impacto en la dinámica hidrológica de la cuenca.

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, hule y maíz. 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 también se encuentran cultivos de granos básicos, banano, palma africana y, en menor medida, papaya y pejibaya. A nivel global, un 75.3% de la cuenca corresponde a cultivos, de los cuales un 29% corresponde a caña de azúcar, un 13.8% a café, un 15.7% a agricultura limpia anual, un 3.1% a hortaliza ornamental y un 0.3% a hule. 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 el 14.4% del total de la superficie de la cuenca. En la línea de costa destaca la presencia de manglar (552ha.)

Existen también algunos lugares en la parte media de la cuenca donde existen minas descubiertas, que junto con los depósitos de arena y material piroclástico del volcán de Fuego, constituyen una fuente importante de sedimento a la cuenca.

Para el estudio de los usos del suelo se ha utilizado la cartografía del MAGA<sup>2</sup> (figura 2).

---

<sup>2</sup> Uso de la tierra 2003, MAGA (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación). Escala 1:50.000. Guatemala



### 3. Objetivos

#### Objetivo general

El objetivo principal del presente estudio es la generación de un modelo hidrológico de la cuenca del río Coyolate, 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.
- f. Elaborar un estudio hidráulico piloto en un punto de interés de la cuenca. Determinar las zonas de riesgo por inundación para diferentes períodos de retorno a partir de los datos de caudal obtenidos con el modelo hidrológico.



## 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).

## 4.2. Modelos hidráulicos

Determinan el comportamiento del flujo en el lecho del río en el momento de crecida. Basándose en el caudal obtenido por el modelo hidrológico pueden estimar la altura y velocidad de la crecida, así como la extensión de las zonas inundadas. Existen dos factores críticos para la generación de modelos hidráulicos: los datos de flujo (caudal para un episodio determinado) y la topografía del lecho del río y las zonas inundables (Horrit and Bates, 2001).

Los modelos hidráulicos se pueden dividir en:

- **Modelo unidimensional:** Los datos topográficos que se utilizan en el modelo corresponden a secciones transversales tomadas en el río. El flujo siempre se considera perpendicular a dichas secciones (1D). Para cada una de las secciones se calcula la altura y velocidad de la crecida. En el espacio entre dos secciones consecutivas, estos parámetros se estiman con una interpolación de los datos obtenidos, de manera que para realizar un modelo preciso es conveniente que la separación entre secciones sea

mínima, especialmente en el caso de cauces irregulares. El software más conocido para la generación de modelos hidráulicos unidimensionales es HEC-RAS<sup>3</sup>.

- **Modelo bidimensional:** La topografía se determina a partir de un modelo del terreno, bien a partir de un raster o una aproximación por elementos finitos (Bates et al., 2000; Feldhaus et al., 1992). El modelo bidimensional calcula el flujo en base a dos componentes, el movimiento aguas abajo y el movimiento lateral en el cauce. Se trata de un modelo especialmente útil cuando los flujos laterales son importantes, esto es en grandes llanuras de inundación o en lugares donde el río se divide formando islas (Ponce V.M. 1989; ACA, 2003). Existen varios software de modelación hidráulica 2D, como MIKE21<sup>4</sup>, Flo-2D, LISFLOOD-FP and TELEMAC-2D (Ponce V.M., 1989; Horrit and Bates, 2002).

---

<sup>3</sup> HEC-RAS: Hydrologic Engineering Center, River Analysis System. (US Army Engineers Corps).

<sup>4</sup> MIKE21 (Danish Hydraulic Institute).

## 5. Datos de partida

La cuenca del Coyolate se extiende desde el cinturón volcánico hasta la costa del Pacífico y comprende los volcanes Fuego y Acatenango. No obstante, debido a las limitaciones de los modelos y a la escasez de registros de caudal, la zona de estudio se ha determinado desde el comienzo del río hasta la antigua estación de aforo en Cerro Colorado (figura 3).

Esta división podría facilitar la calibración del modelo con los datos de caudal registrados en la antigua estación de aforo ubicada en Cerro Colorado. Además, se trata de la estación de aforo más cercana a la desembocadura del río.

Otra de las limitaciones principales reside en la modelación hidráulica de zonas con pendientes suaves, cuando los modelos digitales del terreno no tienen una resolución suficientemente buena (5m x 5m o superior). Debido a esto se ha desestimado la posibilidad de incluir el tramo bajo de la cuenca.

Asimismo, la zona más baja de la cuenca ha sido sometida en los últimos años a modificaciones del cauce que podrían no contemplarse en el modelo de elevación del terreno (DEM) y que complicarían aún más la modelación, generando resultados con un mayor margen de error.

Los límites de la cuenca se han delimitado a partir del DEM de resolución 15m x 15m con la ayuda de sistemas de información geográfica. El resultado obtenido es idéntico a las cuencas delimitadas por (MAGA 2003) en la superficie que drena hasta Cerro Colorado.

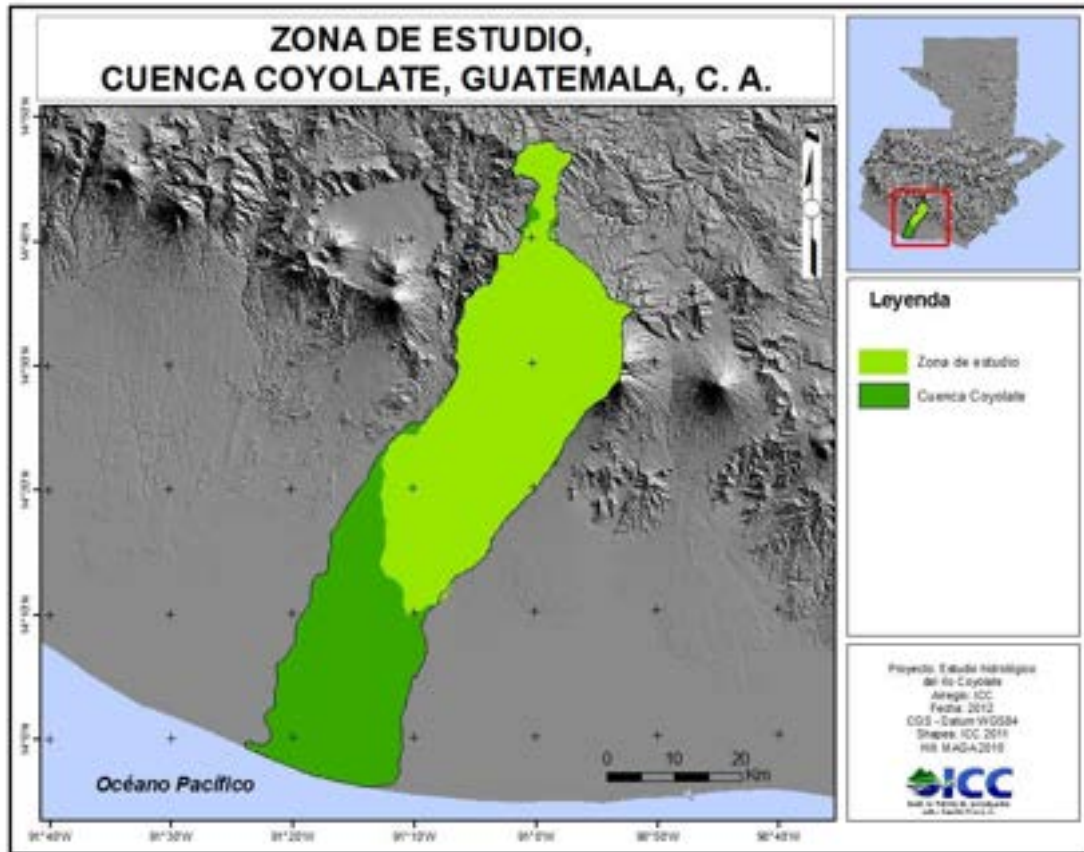


Figura 3. Zona de estudio de la cuenca del Coyolate.

## 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 Coyolate, comparándolos con las cuencas vecinas que drenan hacia el Océano Pacífico (cuadro 1).

Cuadro 1. Parámetros morfométricos del río Coyolate y cuencas vecinas.

| Cuenca       | A (km <sup>2</sup> ) | P (km) | L (km) | I/Rf | D (km/km <sup>2</sup> ) | E <sub>max</sub> (msnm) | E <sub>min</sub> (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)

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

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

E<sub>max</sub>: Elevación máxima de la cuenca (msnm)

E<sub>min</sub>: 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, como la cuenca del Coyolate, 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 Achiguate y Coyolate presentarán patrones de drenaje similares, así como las cuencas de María Linda y Los Esclavos.

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. A lo largo del cauce del Coyolate se observan variaciones importantes en la inclinación del lecho (figura 4). En el tramo inicial la inclinación suave corresponde a terrenos del altiplano. A este tramo inicial le sigue un desnivel de casi 2000 metros hasta llegar a la planicie del Pacífico, que presenta un relieve más suave hasta la desembocadura del río.

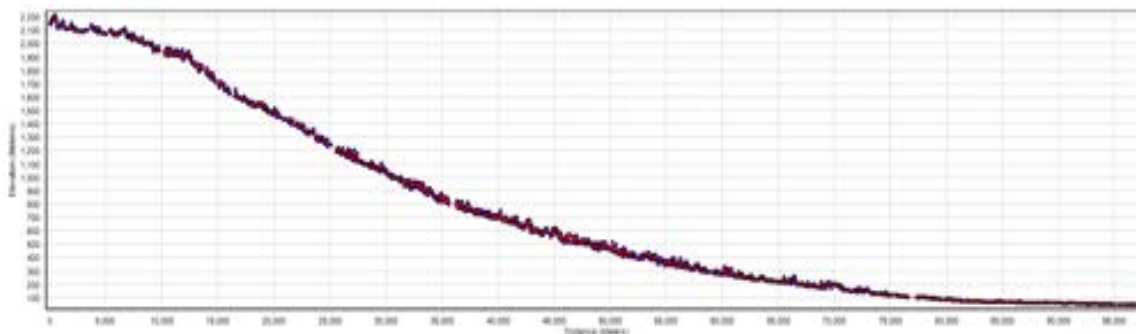


Figura 4. Perfil longitudinal del cauce principal de la cuenca del Coyolate.

La zona de estudio se divide de manera natural en tres grandes superficies de captación de agua. La subcuenca del Coyolate ocupa la mayor parte de la superficie estudiada (cuadro 2). En el presente estudio se ha dividido esta subcuenca en tres unidades (tramo alto, medio y bajo). Las dos subcuencas afluentes al cauce principal corresponden a los ríos Cristóbal y Pantaleón (figura 5).

Cuadro 2. Atributos de las subcuencas.

| Subcuenca                     | Coyolate | Cristóbal | Pantaleón |
|-------------------------------|----------|-----------|-----------|
| Superficie (km <sup>2</sup> ) | 727      | 245       | 131       |
| Longitud (km)                 | 97.5     | 27.9      | 37.4      |
| Desnivel cauce (m)            | 2102     | 130       | 806       |

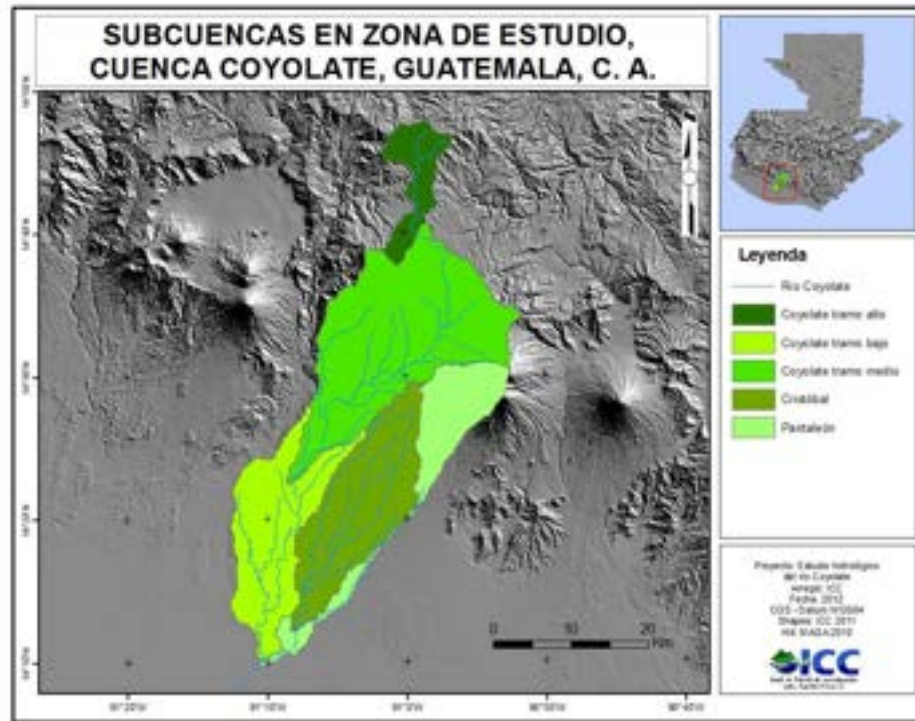


Figura 5. Subcuencas naturales compuestas por el río Coyolate y sus afluentes.

## 5.2. Datos pluviométricos

La información meteorológica disponible en la cuenca es muy diversa. En la zona de estudio se han ubicado un total de 16 estaciones, de las cuales 12 pertenecen al INSIVUMEH<sup>5</sup> y 4 al ASAZGUA<sup>6</sup> (figura 6). Para realizar un estudio hidrológico es necesario que el registro de datos sea lo más extenso posible, idealmente igual o superior a 40 años (Mendoza, 1994). Se han seleccionado las estaciones Camantulul y Santa Cruz Balanya, ambas con 40 años de registro. Estos datos han sido reforzados con los registros de las estaciones El Recuerdo y Peña Plata.

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 y Camantulul (Gil, 2012).

<sup>5</sup> Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.

<sup>6</sup> 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 Coyolate han existido estaciones de aforo en tres puntos: La Presa, Puente Coyolate y Cerro Colorado (figura 7). En 2011, el INSIVUMEH ha instalado una nueva estación de aforo en el río Pantaleón, pero ésta se encuentra aún en proceso de calibración. Las estaciones de aforo constituyen puntos de referencia que podrían permitir calibrar y validar el modelo, es decir, comprobar que el caudal real registrado corresponde con el caudal estimado por el modelo para una lluvia determinada. Por este motivo, en el estudio se han dividido las subcuencas a partir de las estaciones hidrométricas, para una posible calibración de los resultados. Un 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.

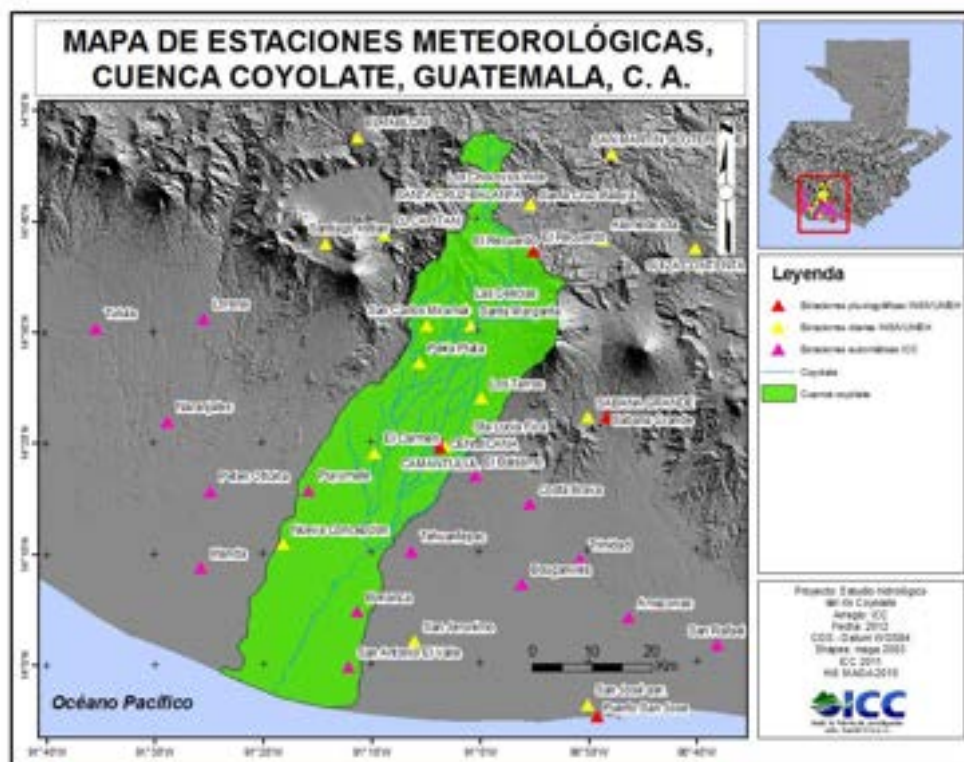


Figura 6. Estaciones pluviométricas existentes en la zona de estudio. Amarillo: pluviométrica INSIVUMEH. Rojo: Pluviográfica INSIVUMEH. Morado: Automática ICC.

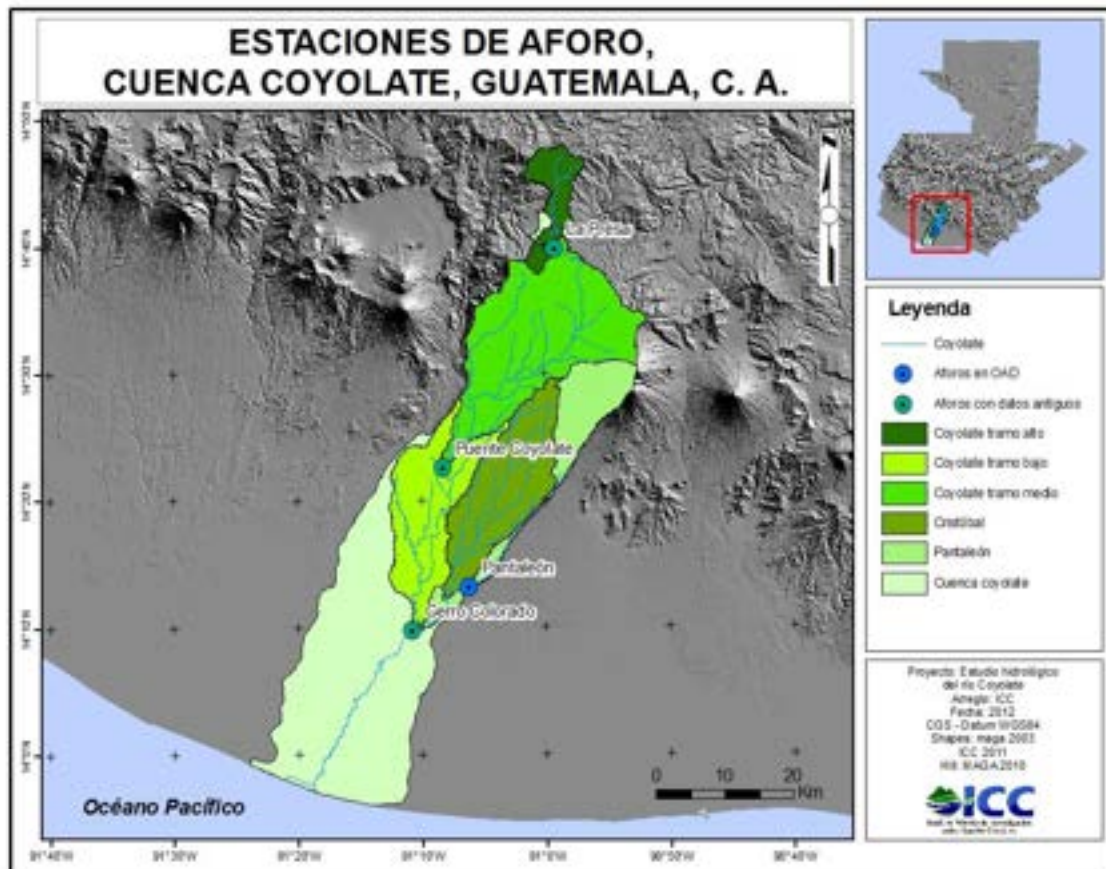


Figura 7. Estaciones de aforo existentes en la cuenca del Coyolate.

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 la región de estudio 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 presentan datos de lluvia diarios. Se han utilizado las ecuaciones 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 Coyolate, se ha determinado el volumen de precipitación diario correspondiente a los períodos de retorno de 10, 25 y 50 años para cada una de las estaciones meteorológicas estudiadas. La determinación se ha realizado con el método de Gumbel, en el cual se determina el período de retorno en función de las precipitaciones diarias máximas anuales y el número años de registro de datos (anexo I).

Mediante este método se ha determinado el volumen de precipitación para los períodos de retorno mencionados en las estaciones de El Recuerdo, Peña Plata, Santa Cruz Balanya, y Camantulul.

Las ecuaciones de desagregación de precipitaciones de 24 horas (Gil, 2012) generadas para las estaciones de Camantulul e INSIVUMEH (Ec. 1-2) han permitido distribuir valores de precipitación diaria en hietogramas horarios. La distribución temporal correspondiente a Camantulul se ha utilizado también para generar los hietogramas de Peña Plata y la distribución de INSIVUMEH se ha aplicado en las estaciones de Santa Cruz Balanya y El Recuerdo debido a la proximidad de estas estaciones.

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

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

Donde:

$d$  = Longitud de la precipitación que se desea determinar, en minutos

$P_d$  = Volumen de precipitación correspondiente a la duración “ $d$ ”, en milímetros

$P_{24}$  = Precipitación diaria, en milímetros

$T$  = Período de retorno, en años

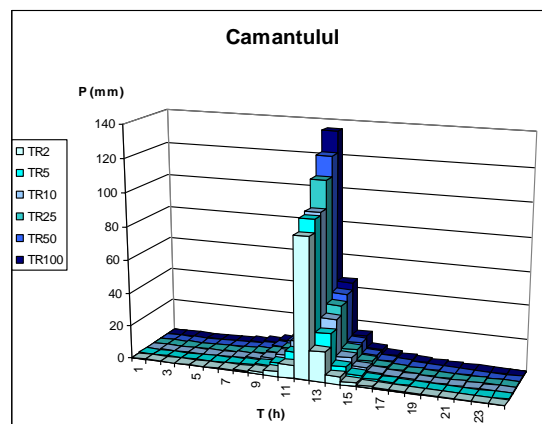


Figura 9. Ejemplo de los hietogramas generados con el método de desagregación para la estación de Camantulul.

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, según el método de Thiessen (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 El Recuerdo y Santa Cruz Balanya se han utilizado las ecuaciones de desagregación generadas en la estación de INSIVUMEH por motivos de proximidad, mientras que en las estaciones de Camantulul y Peña Plata se ha utilizado la distribución calculada en Camantulul. El volumen de precipitación diaria se ha calculado mediante la ley de Gumbel y se ha corregido con el coeficiente de simultaneidad (cuadro 3).

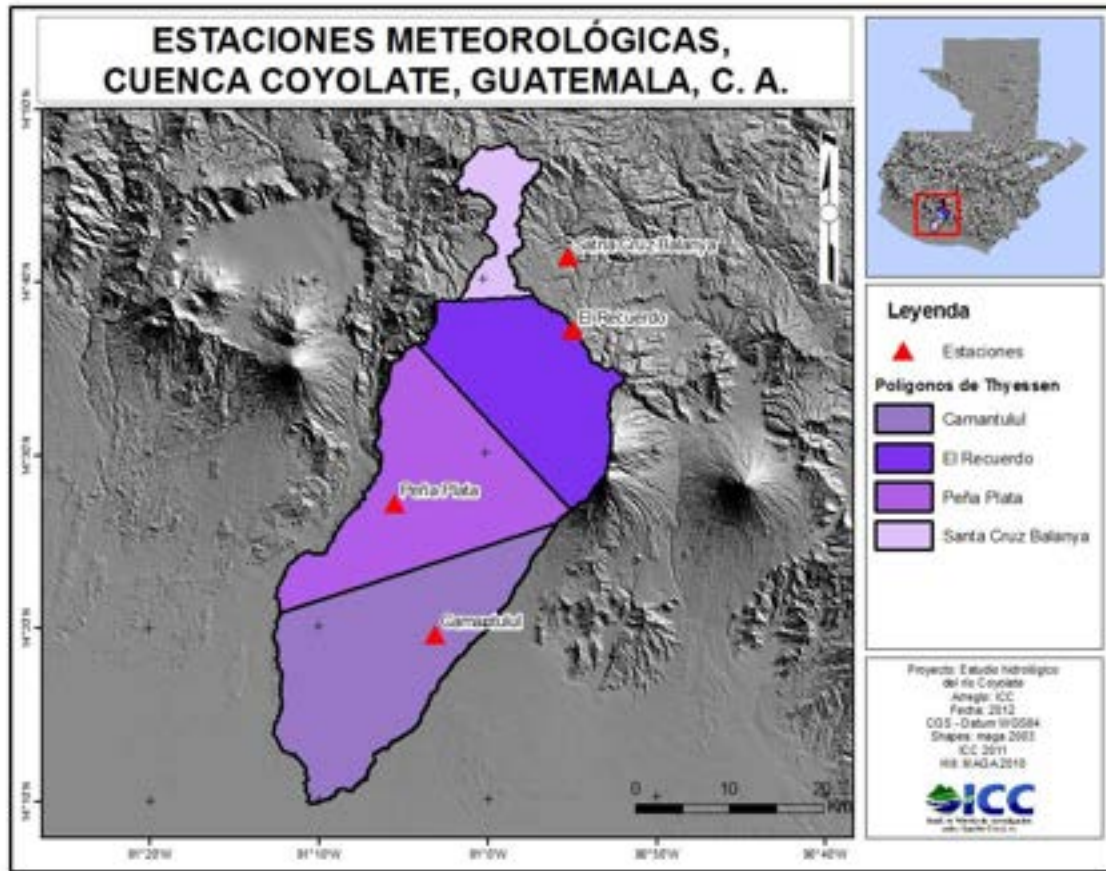


Figura 10. Estaciones meteorológicas utilizadas y área de influencia según Thiessen.

Cuadro 3. Volumen diario de precipitación por período de retorno y corrección mediante el coeficiente de simultaneidad.

| Estación                      | El Recuerdo | Peña Plata | Santa Cruz Balanya | Camantulul |
|-------------------------------|-------------|------------|--------------------|------------|
| Elevación (msnm)              | 2240        | 620        | 2060               | 280        |
| Distribución Pd/P24           | INSIVUMEH   | Camantulul | INSIVUMEH          | Camantulul |
| Pd T10 (mm)                   | 112         | 173        | 76                 | 173        |
| Pd T25 (mm)                   | 141         | 204        | 90                 | 203        |
| Pd T50 (mm)                   | 163         | 227        | 100                | 226        |
| Superficie (km <sup>2</sup> ) | 285         | 364        | 78                 | 403        |
| Coef. Simultaneidad           | 0.836       | 0.829      | 0.874              | 0.826      |
| Pd' T10 (mm)                  | 94          | 144        | 66                 | 143        |
| Pd' T25 (mm)                  | 118         | 169        | 78                 | 168        |
| Pd' T50 (mm)                  | 137         | 189        | 88                 | 187        |



## 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 zona de estudio (1048 km<sup>2</sup>). 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 4).

Cuadro 4. Criterios de clasificación del tipo de suelo según el NRCS.

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

En el caso del Coyolate, por motivos de disponibilidad de datos, no se ha determinado este parámetro en función del tipo de suelo sino según la litología. De los cuatro grupos geológicos presentes en la cuenca, tres pertenecen al grupo A, con tasas de infiltración muy elevadas y uno pertenece al grupo B, con tasas de infiltración moderadas (figura 11).

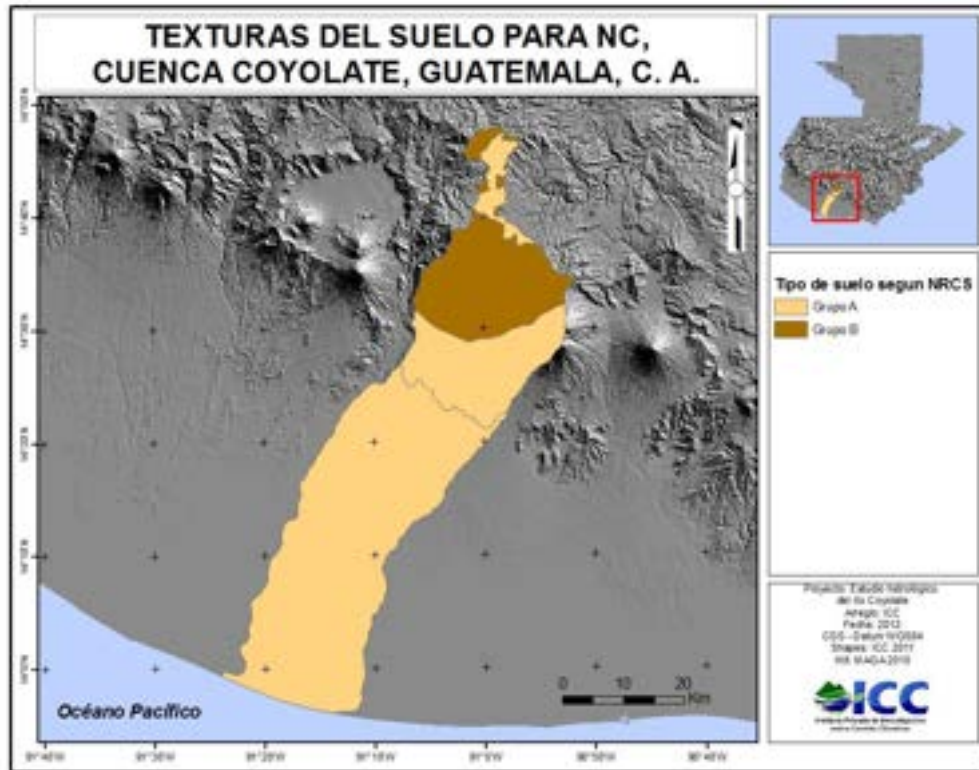


Figura 11. Mapa de tipo de suelo según clasificación NRCS.

### 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 26 categorías de suelo, se han obtenido un total de 15 (cuadro 5).



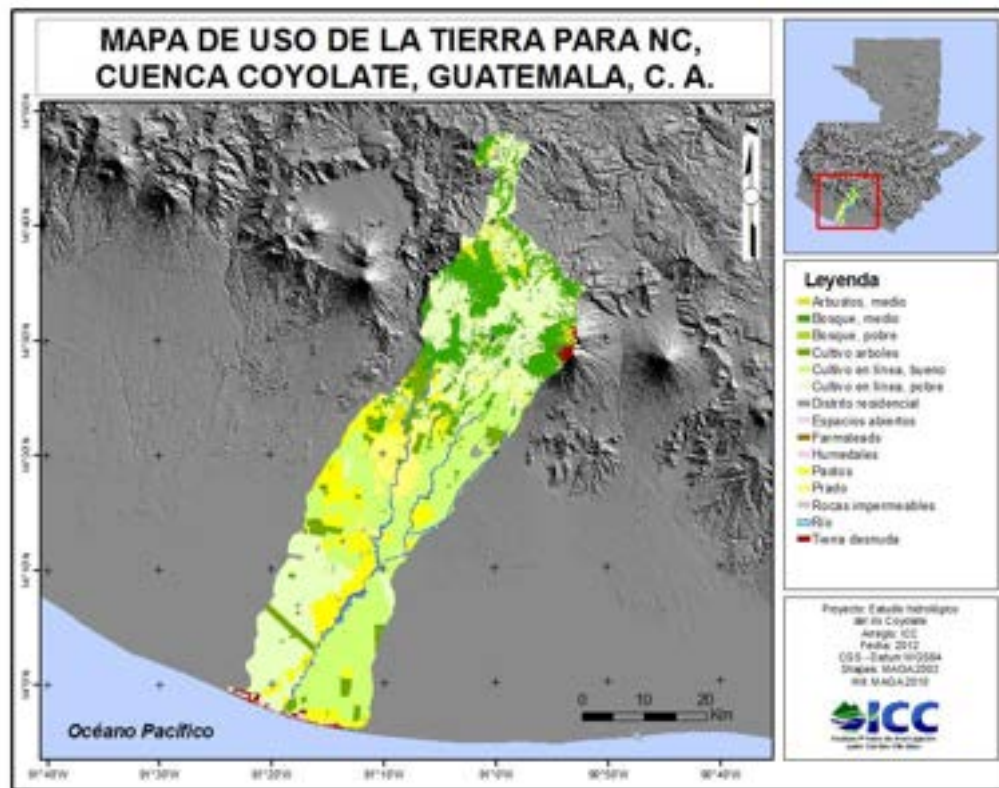


Figura 12. Mapa de uso de la tierra según clasificación NRCS. Los términos "pobre, medio y bueno" se refieren a la cobertura vegetal, SR corresponde a cultivos en línea (Straight Row) y CR a la cobertura del suelo (Crop Residue).

### 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 5. 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.

**Cuadro 5. Clasificación de los usos de la tierra según el criterio del NRCS y número de curva correspondiente a cada uso de la tierra 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  |
| 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   | 100 | 100 | 100 | 100 |

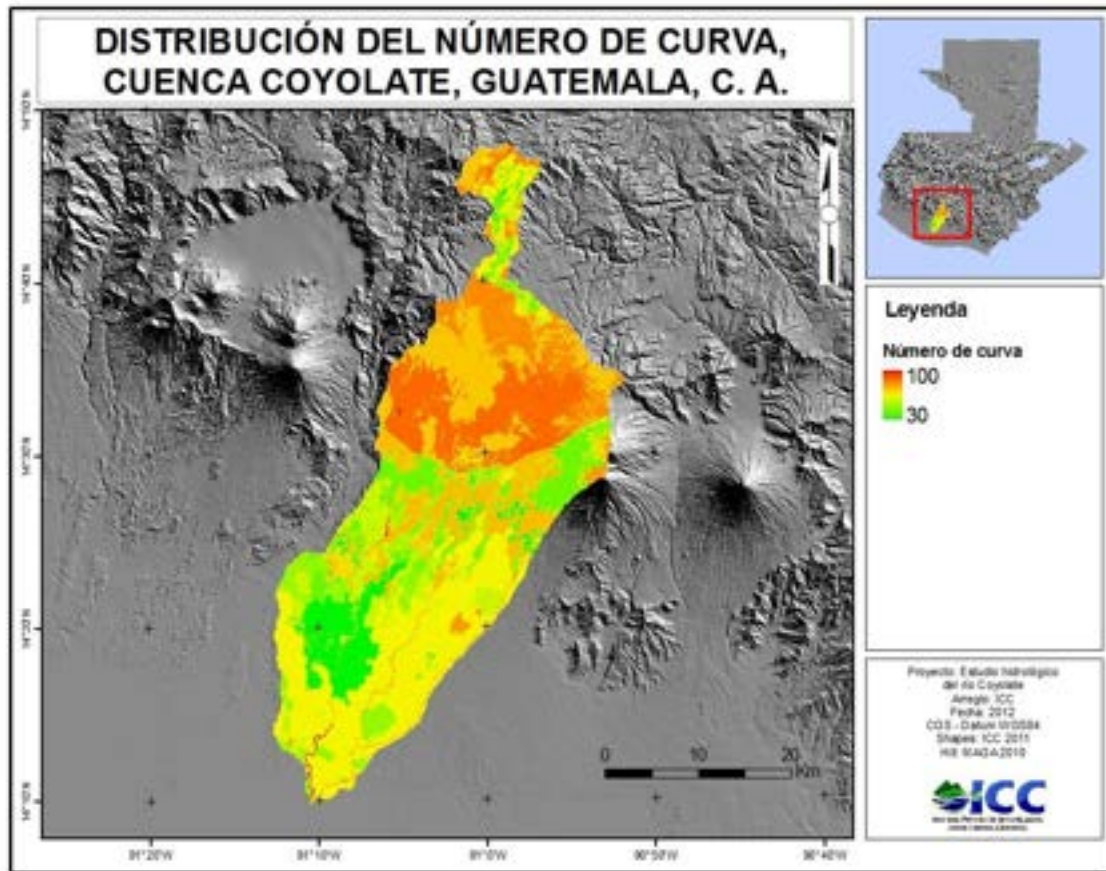


Figura 13. Mapa de distribución del parámetro de número de curva.

## 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 Coyolate se encuentra entre las regiones hidrológicas I y III (Altiplano occidental y 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 6).

El método regional desarrollado por INSIVUMEH parte de 7 distribuciones teóricas de frecuencia. Las que mejor se ajustan para proporcionar resultados correctos son Log-normal y Gumbel, presentadas en el cuadro 6. Asimismo también se determinaron los valores de caudal según la curva envolvente.

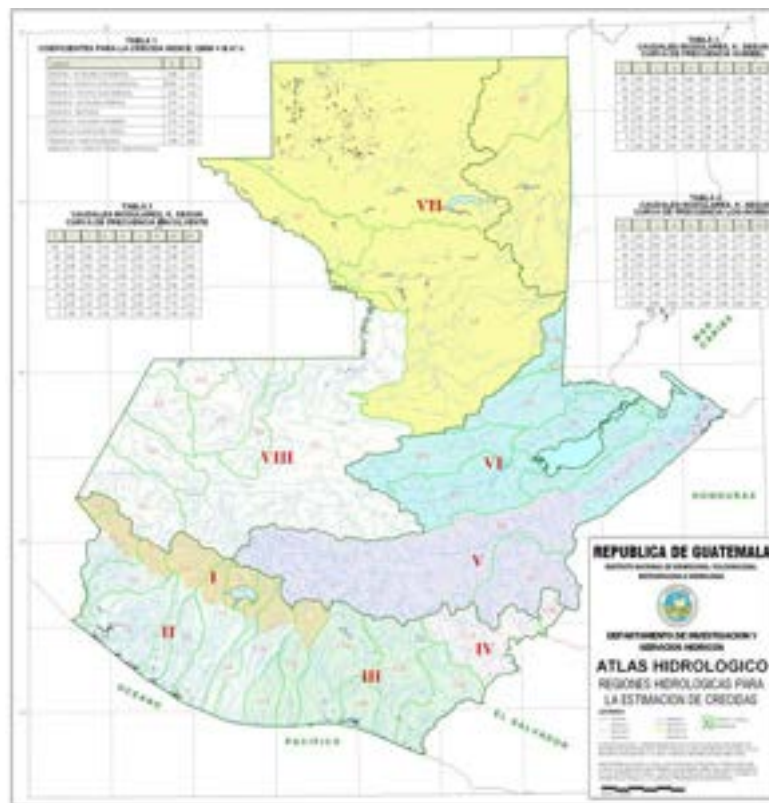


Figura 14. Regiones hidrológicas para la estimación de crecidas en Guatemala. INSIVUMEH, 2004.

Cuadro 6. Caudales máximos calculados con el método de la crecida índice.

| Subcuenca                          | La Presa | Puente Coyolate | Cerro Colorado | Pantaleón |                  |
|------------------------------------|----------|-----------------|----------------|-----------|------------------|
| Superficie (km <sup>2</sup> )      | 75       | 502             | 1123           | 131       |                  |
| Crecida índice (m <sup>3</sup> /s) | 8        | 167             | 387            | 41        |                  |
| Caudal T10 (m <sup>3</sup> /s)     | 21       | 417             | 963            | 103       |                  |
| Caudal T25 (m <sup>3</sup> /s)     | 27       | 551             | 1272           | 136       | Gumbel           |
| Caudal T50 (m <sup>3</sup> /s)     | 32       | 651             | 1504           | 161       |                  |
| Caudal T10 (m <sup>3</sup> /s)     | 14       | 293             | 677            | 72        |                  |
| Caudal T25 (m <sup>3</sup> /s)     | 22       | 447             | 1032           | 111       | Log-normal       |
| Caudal T50 (m <sup>3</sup> /s)     | 33       | 680             | 1570           | 168       |                  |
| Caudal T10 (m <sup>3</sup> /s)     | 23       | 477             | 1102           | 118       |                  |
| Caudal T25 (m <sup>3</sup> /s)     | 28       | 623             | 1439           | 154       | Curva envolvente |
| Caudal T50 (m <sup>3</sup> /s)     | 33       | 730             | 1686           | 180       |                  |

### 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 hidrogramas 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 Coyolate se ha dividido en un total de 7 subcuencas (figura 15). La nomenclatura de estas subcuencas se compone de un número múltiplo de diez para cada subcuenca precedido por la letra W, procedente del inglés *Watershed*.

La subcuenca del Coyolate se divide en 3 tramos, divididos por las estaciones de aforo de La Presa y Puente Coyolate. La subcuenca de Pantaleón se divide en 2 en el punto de la estación de aforo en operación automática digital Pantaleón. Finalmente, la cuenca del Cristóbal también se divide en dos, en el punto de unión con la subcuenca del Pantaleón.

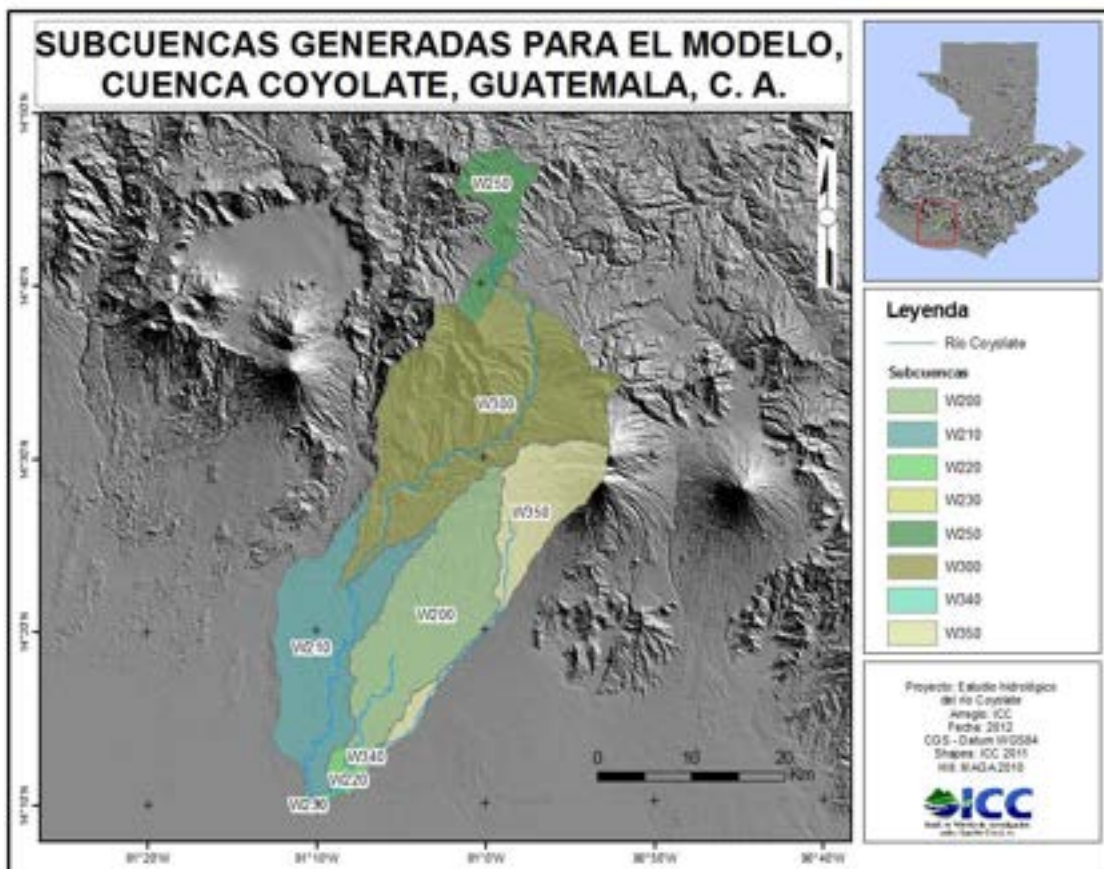


Figura 15. División de la cuenca del Coyolate en subcuencas para la generación del modelo hidrológico.

### 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 estos, 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 Coyolate no se dispone de registros de caudal de este tipo todavía, excepto en la subcuenca de Pantaleón, dónde INSIVUMEH construyó una estación de aforo, con registros de caudal cada 10 minutos, a principios de 2011. Estos datos de caudal se han contrastado con datos de la estación pluviográfica ubicada en el mismo lugar, que también consta de registros cada 10 minutos. No obstante, la comparación de resultados no ha permitido establecer correctamente el tiempo de concentración de ésta subcuenca. A lo largo del registro algunos picos de precipitación presentan su correspondiente crecida aguas abajo, mientras existen algunos picos de precipitación que apenas modifican el caudal y picos de caudal que no corresponden a ninguna precipitación (figura 16). Se ha concluido que estas disparidades pueden estar originadas por la gran irregularidad en la distribución espacial de las precipitaciones o por la falta exactitud en los registros, ya que las estaciones todavía se encuentran en período de calibración.

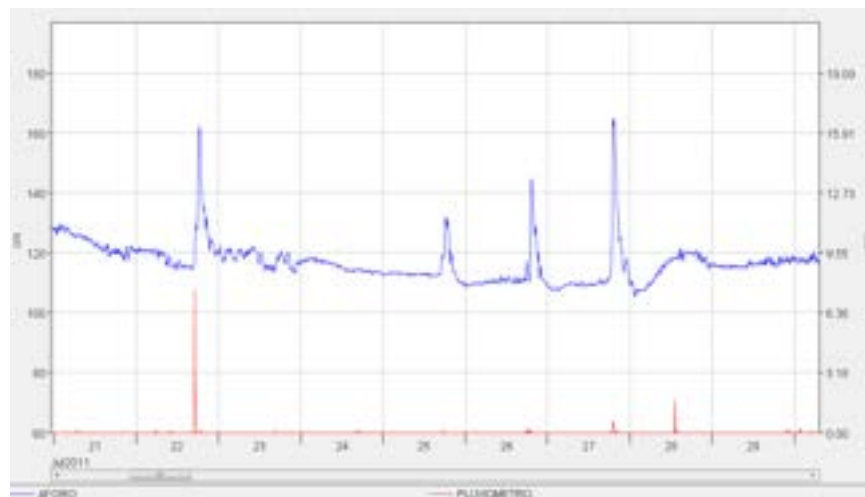


Figura 16. Registros de caudal (azul) y lluvia (rojo) en la estación Pantaleón.

El tiempo de concentración también 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:

$T_c$  = Tiempo de concentración, en horas

$L$  = Longitud del recorrido más largo del agua en la subcuenca, en kilómetros

$H_{\text{máx}}$  = 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:

$T_c$  = Tiempo de concentración de la cuenca, en horas

$L$  = Longitud del cauce principal, en kilómetros

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

$A$  = Área de la cuenca, 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 se ha utilizado en la modelación es el promedio de los resultados de ambos métodos (cuadro 7).



**Cuadro 7. Determinación del tiempo de retardo con los métodos de Kirpich y Giandotti. Tc indica el tiempo de concentración y Tlag tiempo de retardo.**

| Kirpich              | W200 | W210 | W220 | W230 | W250 | W300  | W340 | W350  |
|----------------------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|
| L (km)               | 45.5 | 34.3 | 9.19 | 0.32 | 20.1 | 57.75 | 4.63 | 52.54 |
| H <sub>máx</sub> (m) | 1320 | 190  | 22   | 1    | 675  | 1866  | 737  | 3619  |
| Tc (h)               | 4.91 | 7.48 | 3.75 | 0.25 | 2.48 | 5.66  | 0.44 | 3.93  |
| Tlag (h)             | 2.95 | 4.49 | 2.25 | 0.15 | 1.49 | 3.40  | 0.26 | 2.36  |

| Giandotti            | W200   | W210   | W220  | W230 | W250  | W300   | W340 | W350   |
|----------------------|--------|--------|-------|------|-------|--------|------|--------|
| L (km)               | 45.5   | 34.3   | 9.19  | 0.32 | 20.1  | 57.75  | 4.63 | 52.54  |
| Hg (m)               | 285    | 49     | 13    | 1    | 185   | 1037   | 17   | 807    |
| A (km <sup>2</sup> ) | 245.66 | 224.55 | 16.30 | 0.11 | 74.95 | 427.02 | 3.06 | 131.38 |
| Tc (h)               | 9.70   | 19.89  | 10.38 | 2.29 | 5.95  | 6.57   | 4.23 | 5.49   |
| Tlag (h)             | 5.82   | 11.93  | 6.23  | 1.37 | 3.57  | 3.94   | 2.54 | 3.29   |
| Tlag promedio (h)    | 4.38   | 8.21   | 4.24  | 0.76 | 2.53  | 3.67   | 1.40 | 2.83   |

### 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 17).

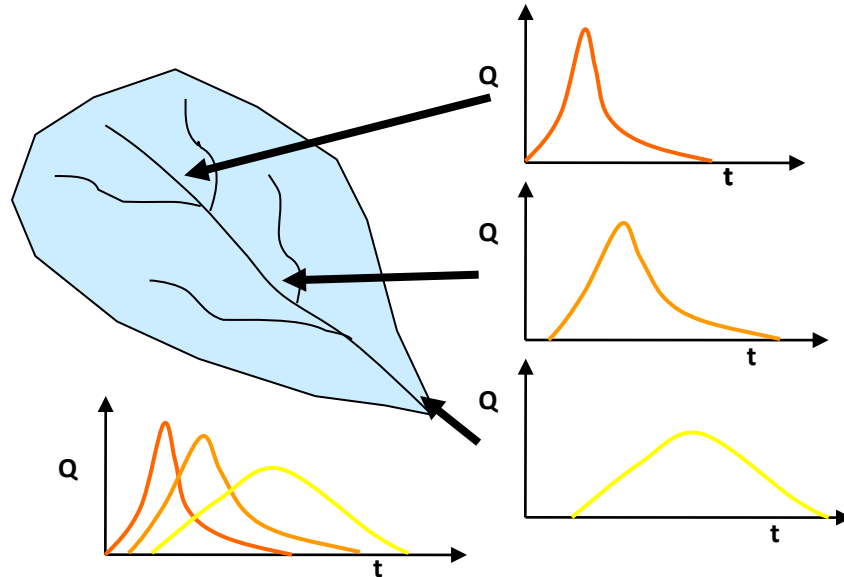


Figura 17. Ejemplo de los efectos de la propagación de la crecida aguas abajo en un hidrograma. Se observa tanto el retardo como la atenuación del caudal máximo.

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 y 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 Coyolate, al no disponer de hidrogramas reales se intentó calcular el  $T_{lag}$  mediante datos calculados por el Sistema de Alerta Temprana actualmente en funcionamiento. No obstante, los datos obtenidos no se consideraron concluyentes, de manera que se utilizó 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 estimaron para cada uno de los tramos donde se propagan las crecidas en el modelo del río Coyolate (figura 18), a partir de los ortofotomapas (cuadro 8).

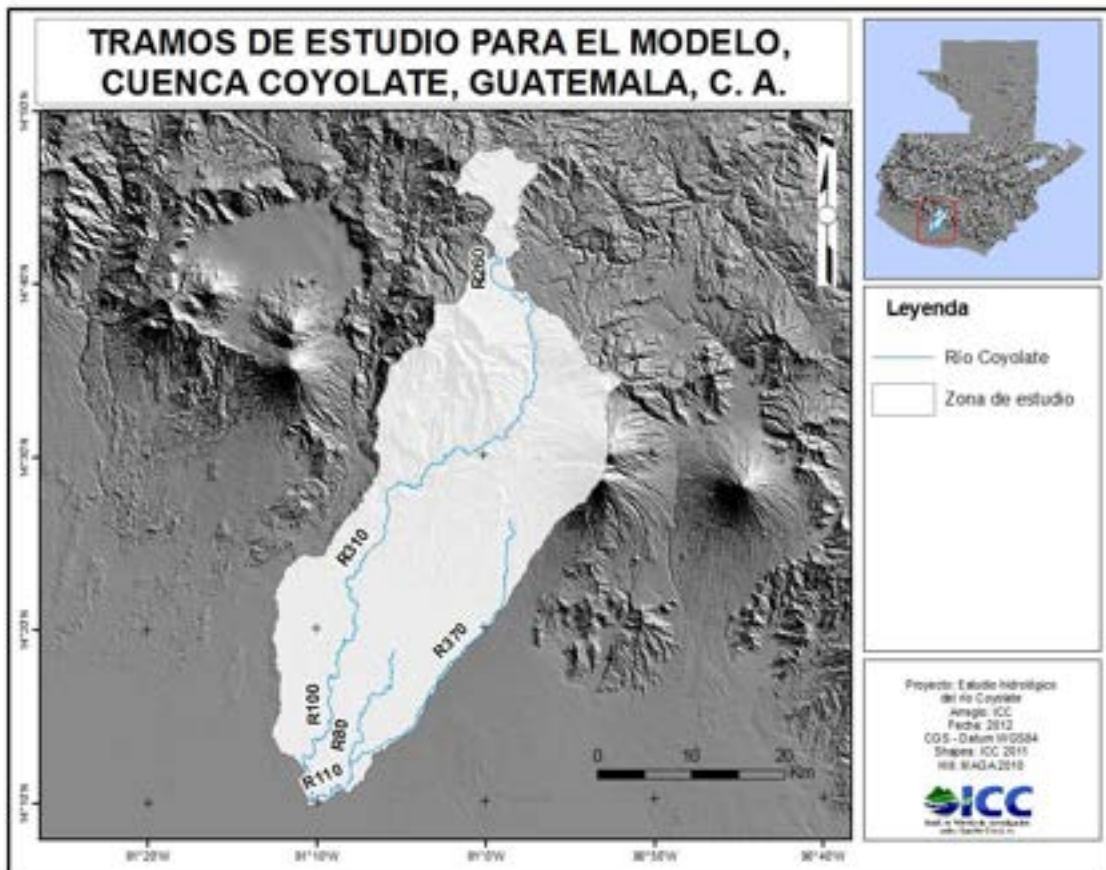


Figura 18. Tramos de estudio en el modelo del Coyolate. Nótese que el método de Muskingum-Cunge únicamente se ha aplicado en los tramos donde la crecida se propaga aguas abajo. En la nomenclatura utilizada, la letra “R” indica cada uno de los tramos (Reaches) que conforman el río. Cada uno de éstos se ha numerado durante la generación del modelo. Nótese que únicamente los tramos R100, R110 y R310 propagan crecidas, al recibir el caudal procedente de tramos anteriores.

Cuadro 8. Parámetros calculados para la metodología Muskingum-Cunge.

| Tramo | Forma       | Longitud (m) | Inclinación<br>(m/m) | Ancho<br>promedio | Manning<br>promedio |
|-------|-------------|--------------|----------------------|-------------------|---------------------|
| R310  | Rectangular | 57755        | 0.032                | 19.45             | 0.0425              |
| R100  | Rectangular | 34276        | 0.006                | 49.62             | 0.04                |
| R110  | Rectangular | 9191         | 0.002                | 149.4             | 0.048               |
| R90   | Rectangular | 4628         | 0.008                | 44.525            | 0.0415              |
| R120  | Rectangular | 316          | 0.001                | 61.84             | 0.035               |

## 6.4. Modelo hidráulico

### 6.4.1. Secciones

Las secciones transversales son la piedra angular para la generación de modelos hidráulicos unidimensionales. Éstas representan la topografía del cauce del río y sus márgenes. A partir de las secciones y el caudal obtenido en el modelo hidrológico se puede determinar la altura del nivel de agua y, por tanto, el alcance de la inundación. En la zona de estudio del río Coyolate se ha partido de una serie de 77 secciones tomadas por Acción Contra el Hambre (ACH) en el entorno de Cerro Colorado (figura 19). Los resultados de las primeras simulaciones con dichas secciones han mostrado que estas estaban demasiado distantes para representar la topografía del terreno. La distancia entre las secciones, de hasta 1.000 metros, provoca que algunos tramos del río, especialmente algunos meandros, no queden bien representados en la simulación. Por este motivo se ha optado por extraer una nueva serie de secciones a partir del Modelo Digital de Elevaciones (DEM). El tramo de estudio elegido es un meandro situado justo antes de la unión entre el río Coyolate y su afluente San Cristóbal (figura 19).

### 6.4.2. Coeficiente de Manning

El coeficiente de Manning indica la resistencia que tiene el agua a fluir en un determinado terreno y por tanto influye en la velocidad y la altura del nivel de agua. El coeficiente se debe determinar en cada sección, para el lecho del río y los márgenes izquierdo y derecho. Ante la dificultad que representa la asignación de un valor preciso del coeficiente de Manning se han realizado los cálculos dentro de un rango con valor máximo de 0.07 y mínimo de 0.04 para

obtener una serie de valores entre los cuales se puede situar el nivel real del agua y su velocidad.



Figura 19. Secciones generadas a partir del Modelo de Elevaciones del Terreno.

#### 6.4.3. Tipo de flujo

Según la relación entre las fuerzas inerciales y gravitacionales en el fluido, se puede clasificar el tipo flujo. Cuando las fuerzas inerciales son mayores que las gravitacionales se trata de flujo supercrítico, mientras que si las fuerzas gravitacionales son mayores que las inerciales será flujo subcrítico (ACA, 2003). Según las observaciones de campo realizadas en varias crecidas y observando la morfología del terreno, el flujo en el río Coyolate se podrá determinar, generalmente, como supercrítico, debido a la velocidad de la crecida y la turbulencia del flujo. No obstante, en la generación del modelo se ha determinado flujo mixto, para que el mismo software determine el tipo de flujo en cada una de las secciones.

## 7. Resultados

### 7.1. Modelo hidrológico

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 se ha calculado en base a episodios de precipitación correspondientes a periodos de retorno de 10, 25 y 50 años. Se han determinado los hietogramas correspondientes a las estaciones meteorológicas de Camantulul, El recuerdo, Peña Plata y Santa Cruz Balanya para estos períodos de retorno, utilizando la metodología propuesta en (Gil, 2012). Los hietogramas de diseño se han introducido junto con los siguientes 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   | W250   | W300   | W340   | W350   |        |
|-------------------------|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Área (km <sup>2</sup> ) | 246                                   | 225    | 16     | 0.1    | 75     | 427    | 3      | 131    |        |
| Área (tanto por uno)    | 0,22                                  | 0,20   | 0,01   | 0,00   | 0,07   | 0,38   | 0,00   | 0,12   |        |
| T10                     | Lluvia bruta (mm)                     | 147,7  | 147,8  | 147,4  | 147,4  | 64,2   | 116,2  | 147,4  | 126,4  |
|                         | Lluvia neta (mm)                      | 47,2   | 32,1   | 53,4   | 72,1   | 9,35   | 50,3   | 51,8   | 35,1   |
|                         | Pérdidas (mm)                         | 100,5  | 115,7  | 94,0   | 75,4   | 54,83  | 65,9   | 95,6   | 91,3   |
|                         | % lluvia neta (mmneta/mmbruta)        | 0,32   | 0,22   | 0,36   | 0,49   | 0,15   | 0,43   | 0,35   | 0,28   |
|                         | Lluvia neta/lluvia bruta <sup>2</sup> | 0,0022 | 0,0015 | 0,0025 | 0,0033 | 0,0023 | 0,0037 | 0,0024 | 0,0022 |
| T25                     | Lluvia bruta (mm)                     | 173,5  | 173,6  | 173,1  | 173,1  | 74,1   | 138,8  | 173,1  | 150,1  |
|                         | Lluvia neta (mm)                      | 64,7   | 46,4   | 71,9   | 93,3   | 13,7   | 68,1   | 70,1   | 50,2   |
|                         | Pérdidas (mm)                         | 108,8  | 127,2  | 101,9  | 79,8   | 60,3   | 70,7   | 103,0  | 100,0  |
|                         | % lluvia neta (mmneta/mmbruta)        | 0,37   | 0,27   | 0,42   | 0,54   | 0,18   | 0,49   | 0,40   | 0,33   |
|                         | Lluvia neta/lluvia bruta <sup>2</sup> | 0,0021 | 0,0015 | 0,0024 | 0,0031 | 0,0025 | 0,0035 | 0,0023 | 0,0022 |
| T50                     | Lluvia bruta (mm)                     | 192,9  | 193,1  | 192,5  | 192,5  | 80,1   | 154,7  | 192,5  | 167,2  |
|                         | Lluvia neta (mm)                      | 78,8   | 58,3   | 86,7   | 109,9  | 16,7   | 81,1   | 84,7   | 61,8   |

|  |        |        |        |        |        |        |        |        |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Pérdidas (mm)                            | 114,2  | 134,8  | 105,8  | 82,6   | 63,4   | 73,5   | 107,8  | 105,3  |
| % lluvia neta<br>(mmneta/mmbruta)        | 0,41   | 0,30   | 0,45   | 0,57   | 0,21   | 0,52   | 0,44   | 0,37   |
| Lluvia neta/lluvia<br>bruta <sup>2</sup> | 0,0021 | 0,0016 | 0,0023 | 0,0030 | 0,0026 | 0,0034 | 0,0023 | 0,0022 |

**Parámetros:**

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

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

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

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

**Lluvia neta/lluvia bruta<sup>2</sup>**

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, por ejemplo, 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 determina 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 Coyolate.

**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 | W250 | W300 | W340 | W350 |
|-----------------------------|------|-------|------|------|------|------|------|------|
| Tiempo de concentración (h) | 7,38 | 11,19 | 8,11 | 1,36 | 5,76 | 5,95 | 2,84 | 4,65 |
| Tiempo de retardo (h)       | 4,43 | 6,71  | 4,87 | 0,82 | 3,46 | 3,57 | 1,71 | 2,79 |

La subcuenca con mayor tiempo de retardo es W210. A pesar de no ser una de las subcuencas con mayor longitud de cauce (46km frente a 61km en la subcuenca W300) ocupa una zona con relieve relativamente suave en la cuenca, con un desnivel máximo de 571m frente a desniveles de 2000 y 3000 metros en otras cuencas. El tiempo de retardo depende, principalmente de longitud y desnivel del cauce, por eso resulta coherente que ésta sea la subcuenca con un valor mayor, de 11 horas y 11 minutos, prácticamente triplicando el tiempo de retardo de la cuenca con mayor longitud (W300) ya que ésta presenta un desnivel mucho mayor (3723m).

Se puede apreciar el valor que aporta la combinación de los métodos de Giandotti y Kirpich analizando los resultados obtenidos para la subcuenca W200. La fórmula de Kirpich determina un tiempo de concentración de 4,95 horas mientras que con el método de Giandotti el resultado se duplica obteniendo un tiempo de 9,70 horas. Esto se debe a que la primera considera el desnivel absoluto de la cuenca (1320m) mientras que la segunda evalúa el desnivel desde el centro de la subcuenca hasta el final de ésta (285m). 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 por los tramos R90, R100, R110, R120 y R310. Se ha calculado mediante la fórmula de Muskingum-Cunge. Los valores de Manning asignados han sido de 0.04.

| Tramo | Subcuenca | Longitud tramo (m) | Inclinación tramo (m/m) | Amplitud promedio del cauce (m) | Tiempo de propagación |
|-------|-----------|--------------------|-------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| R90   | W340      | 4,6                | 0.008                   | 44.5                            | 15 min                |
| R100  | W210      | 34,3               | 0.006                   | 49.6                            | 1 h 19 min            |
| R110  | W220      | 9,2                | 0.002                   | 149.4                           | 55 min                |
| R120  | W230      | 316                | 0.001                   | 61.8                            | 1 min                 |
| R310  | W300      | 57,8               | 0.032                   | 19.5                            | 3 h 29 min            |



El tramo que presenta un mayor tiempo de propagación de la crecida es R310. A pesar de salvar un desnivel importante, que le atribuye una inclinación promedio de 0.032, es el tramo más largo del modelo con diferencia. Esta longitud de casi 58 km le otorga el elevado tiempo de propagación de 3 horas 29 minutos.

El coeficiente de Manning promedio utilizado ha sido de 0.04, con valores que oscilan entre 0.035 y 0.048. De este modo, tramos con valores de Manning superiores, grandes 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 Cerro Colorado la crecida causada por un episodio de lluvia extremo concentrado en la subcuenca del Cristóbal, se debería sumar el tiempo de concentración de la subcuenca del Cristóbal (W200) al tiempo de propagación de la crecida hasta Cerro Colorado (R110). De este modo se podría estimar que desde el máximo de precipitación se dispone de unas 6 horas y 10 minutos para alertar a las poblaciones asentadas en las proximidades de Cerro Colorado.

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 20). El tiempo estimado entre el valor de precipitación máxima en la zona de estudio y el valor de caudal máximo en el punto de drenaje del modelo (Cerro Colorado) es de unas 5 horas. Se ha determinado, además, este tiempo para cada una de las subcuencas.

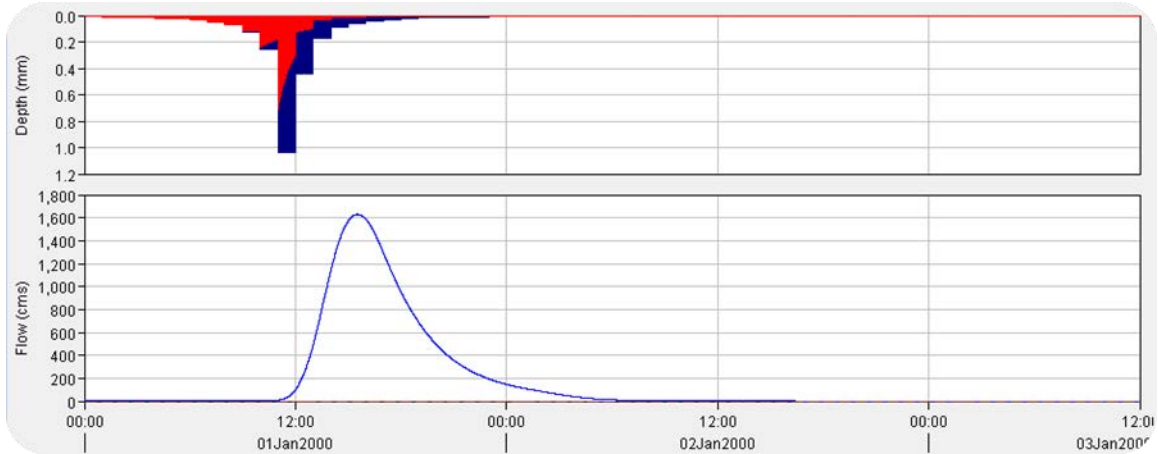


Figura 20. Hietograma calculado en la subcuena Coyolate 2 (arriba) y hidrograma generado por dicha precipitación (abajo). Nótese que la precipitación neta (azul) se diferencia de las pérdidas hidrológicas (rojo) a partir del parámetro del número de curva.

Se han generado hidrogramas para diferentes puntos de interés (figura 21) y se han determinado los caudales máximos para los períodos de retorno de 10, 25 y 50 años, en los puntos de La Presa, la estación de aforo Pantaleón, Puente Coyolate y Cerro Colorado (cuadro 12).

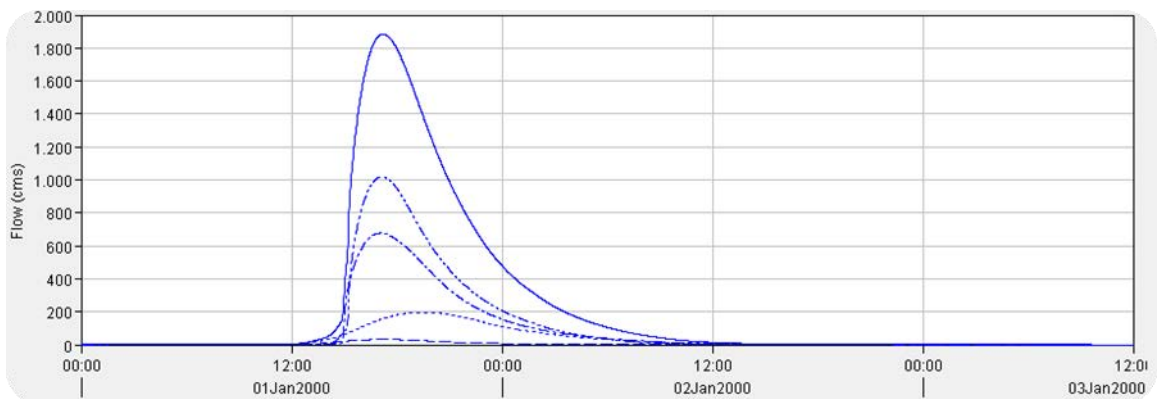


Figura 21. Hidrograma generado en el modelo hidrológico para el punto de Cerro Colorado, correspondiente a un periodo de retorno de 10 años. Nótese que este hidrograma es la suma de todos los hidrogramas procedentes de las subcuenas situadas río arriba (hidrogramas discontinuos).

Cuadro 12. Caudales máximos estimados (en m<sup>3</sup>/s) para los períodos de retorno de 10, 25 y 50 años.

|                 | T10  | T25  | T50  |
|-----------------|------|------|------|
| La Presa        | 32   | 43   | 48   |
| Pantaleón       | 259  | 365  | 442  |
| Puente Coyolate | 1021 | 1332 | 1530 |
| Cerro Colorado  | 1883 | 2537 | 3008 |

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. Se observa que los valores obtenidos con las dos metodologías presentan diferencias de entre el 35 y el 59% (cuadro 13). Debido a esto se recomienda utilizar estos datos de caudal con precaución hasta la validación del 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  |                  |
| La Presa        | 23              | 28   | 33   | 32                        | 43   | 48   | 35%              |
| Pantaleón       | 118             | 154  | 180  | 259                       | 365  | 442  | 59%              |
| Puente Coyolate | 477             | 623  | 730  | 1021                      | 1332 | 1530 | 53%              |
| Cerro Colorado  | 1102            | 1439 | 1686 | 1883                      | 2537 | 3008 | 44%              |

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:

- Las características del tipo de suelo se han extraído a partir de la cartografía geológica. Esta generalización puede dar lugar a un cierto margen de error. Se ha realizado de este modo ante la falta de tiempo para caracterizar cada una de las clases de suelo presentes en la región.
- 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. Los datos del Sistema de Alerta Temprana cedidos por Acción Contra el Hambre no han sido concluyentes.
- 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. Los datos del Sistema de Alerta Temprana cedidos por Acción Contra el Hambre no han sido concluyentes.

- 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.

## 7.2. Modelo hidráulico

El modelo hidráulico se ha generado con el software HEC-RAS 4.2. Introduciendo las características del lecho del río (topografía, coeficiente de rugosidad de Manning y tipo de flujo) y partiendo de los datos de caudal obtenidos en el modelo hidrológico. De esta manera se ha determinado, para cada una de las secciones transversales, la altura del nivel del agua en el momento de caudal máximo para los periodos de retorno de 10, 25 y 50 años (figura 22).

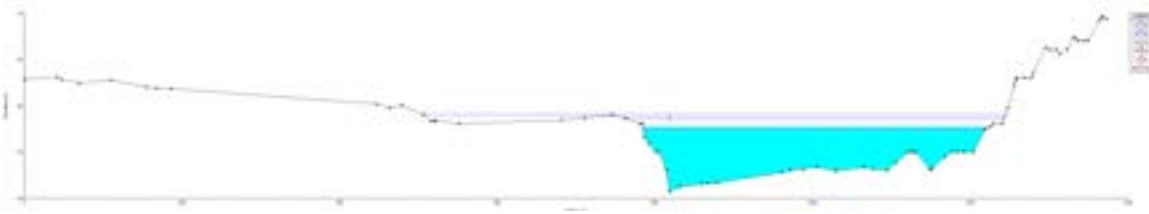


Figura 22. Niveles de crecida para los periodos de retorno 10, 25 y 50 años estimados en HEC-RAS para una sección del tramo estudiado.

A partir de la interpolación de la zona de inundación calculada en las diferentes secciones se ha generado un mapa donde se muestra la superficie inundada para los diferentes periodos de retorno considerados (figura 23).

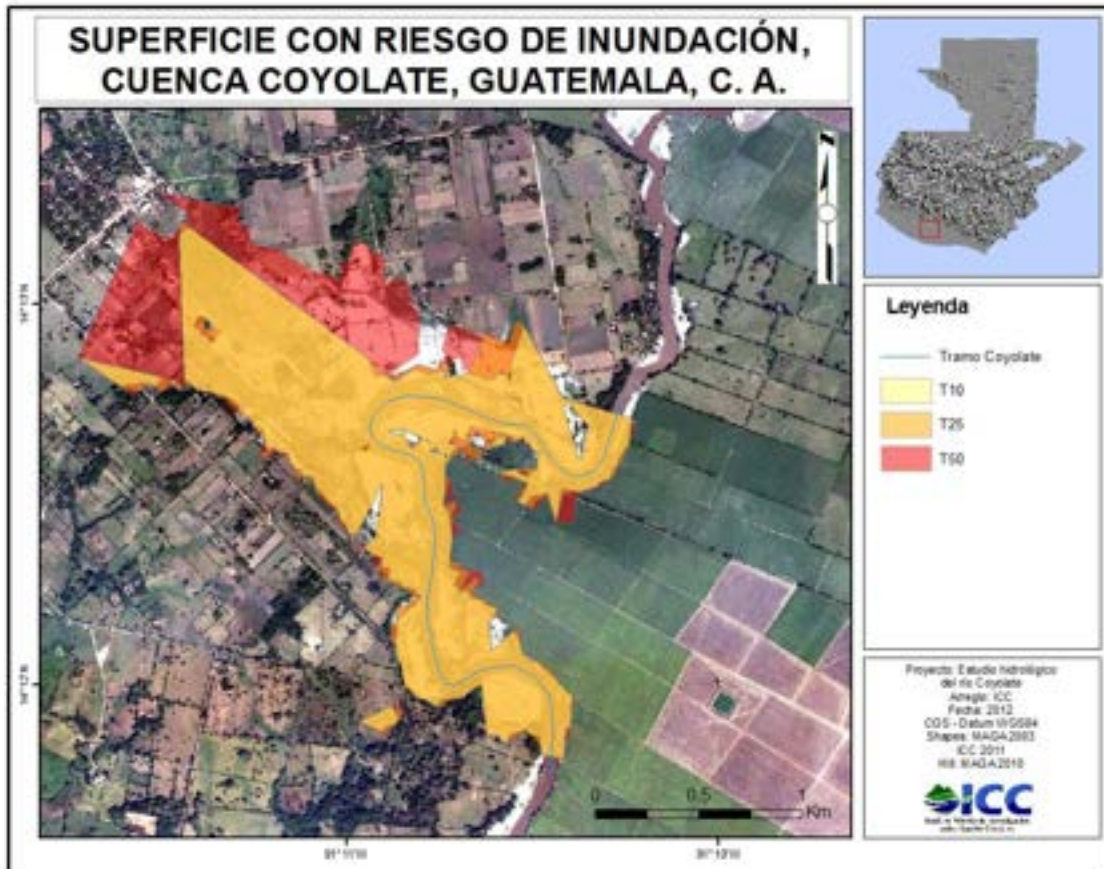


Figura 23. Superficie con riesgo de inundación para períodos de retorno de 10, 25 y 50 años en un meandro cercano a Cerro Colorado.

El software calcula la profundidad de la crecida en cada punto y estima la velocidad de la misma. La distribución de la velocidad es importante puesto que es una variable a tener en cuenta en el análisis de estabilidad de diques longitudinales. En el meandro estudiado se observan velocidades de hasta 5.3, 5.5 y 5.8 m/s para los períodos de retorno de 10, 25 y 50 años respectivamente. La velocidad en el cauce principal disminuye cuando el río se desborda, mientras que cuando el río se mantiene encauzado la velocidad es significativamente mayor, como se puede observar en la figura 24. Se debe tener en cuenta que se trata de una estimación obtenida a partir de la ecuación de Manning, por eso la precisión de los resultados está directamente relacionada con los valores de Manning que se hayan introducido.

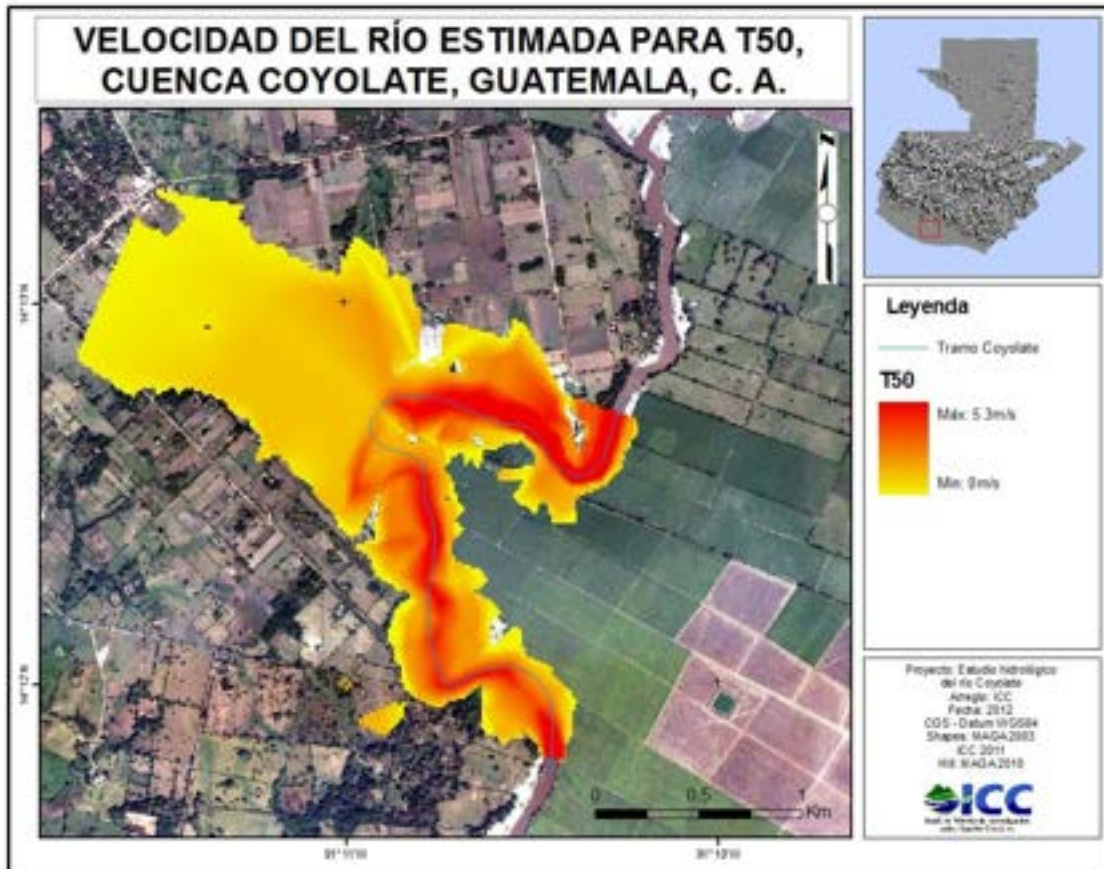


Figura 24. Perfil de velocidades del río estimado para un episodio con período de retorno de 50 años.

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

- El coeficiente de rugosidad de Manning ha sido estimado a partir de valores estándar de cuencas naturales. Para determinar con mayor precisión la velocidad y altura de la crecida se debería determinar el coeficiente real para cada sección a partir del uso de la tierra o, a ser posible, mediante observaciones *in situ*.
- Falta de validación del modelo hidráulico debido a la inexistencia de curvas de gastos en la zona de estudio. Resulta muy útil establecer algunas secciones de control, por ejemplo debajo de puentes donde la sección es más estable. Esto permite determinar la relación existente entre caudal y altura para generar una curva de gastos muy útil en la calibración del modelo en ese punto. De este modo se puede comprobar que los resultados del modelo son coherentes con datos reales. Asimismo, para la calibración del modelo se puede contrastar la superficie real inundada por un episodio con precipitación o caudal conocidos con la superficie



de inundación prevista para dicha precipitación o caudal de crecida. Tampoco se dispone de datos de este tipo para calibrar el modelo.

- Los datos topográficos de las secciones se han extraído del Modelo de Elevaciones del Terreno, que tiene una resolución 15m x 15m. Esta resolución no es suficiente para generar un estudio hidráulico de calidad, especialmente en terrenos con inclinaciones suaves. La resolución determina el margen de error que cabe esperar de los mapas de inundación. Se recomienda utilizar, al menos, un DEM de 5m x 5m (ACA, 2003).

- El modelo utilizado es unidimensional. Un modelo bidimensional podría proporcionar datos más fiables, dada la amplitud del río en los tramos bajos, donde los flujos laterales pueden ser significativos. Un modelo bidimensional también contribuye a definir mejor la distribución de velocidades y, por tanto las zonas de mayor riesgo (PONCE, 1989).

## 8. Conclusiones

En el presente estudio se ha desarrollado un modelo hidrológico lluvia-escorrentía para obtener estimaciones de caudal en la cuenca del río Coyolate. A diferencia de los métodos regionales utilizados hasta la fecha en la región, el modelo generado incorpora características hidrológicas de la cuenca: estima cómo se distribuye el agua de lluvia en la cuenca, determinando cuanta pasará a formar parte de la escorrentía a partir del método del número de curva (cuadro 9). Posteriormente, se estima el comportamiento de dicha escorrentía a partir de los parámetros de tiempo de concentración y tiempo de propagación de la crecida, valores calculados 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 los resultados del modelo regional de la crecida índice (cuadro 13). La comparación muestra diferencias significativas (entorno al 40%). Esto puede indicar que el método de la crecida índice presenta una capacidad limitada de predicción debido a las diferentes características hidrológicas de las cuencas de la región III (Pacífico sur-oriental), o que el modelo hidrológico lluvia-escorrentía presenta una desviación importante hasta que sea calibrado y validado. En cualquiera de los casos los datos obtenidos en este estudio se deben tratar con cautela puesto que se podrían cometer errores significativos con cualquiera de las metodologías.

En futuros estudios del río Coyolate, y hasta que se calibre y valide el modelo hidrológico, se recomienda utilizar una horquilla utilizando los valores obtenidos por los dos métodos (cuadro 13). De esta manera se puede obtener un rango de valores donde será probable que se sitúe el caudal real que se pretende estimar.

Por tanto, en el punto de Cerro Colorado, se proponen las siguientes estimaciones de caudal:

T10: 477-1021m<sup>3</sup>/s; T25: 623-1332m<sup>3</sup>/s; T50: 730-1530m<sup>3</sup>/s.

Con los resultados de caudal obtenidos con el modelo hidrológico se ha generado un modelo hidráulico en un meandro del río Coyolate ubicado unas decenas de metros aguas arriba de Cerro Colorado.



Las secciones para la construcción del modelo se han extraído del DEM 15m x 15m, y se han asignado valores estándar del coeficiente de rugosidad de Manning (0.04 para el lecho y 0.07 para los márgenes). El modelo se ha ejecutado en régimen de flujo mixto.

El riesgo por inundación es muy elevado para el margen exterior del meandro, dónde la inundación se extiende más de un kilómetro desde el lecho del río, para todos los periodos de retorno analizados. La parte interna del meandro, presenta un riesgo menor de inundación según los resultados del modelo, aunque también cabe la posibilidad de desbordamiento dada la velocidad de la crecida (5m/s) en la primera curva del meandro (figura 15). El principal problema en este caso es, probablemente la reducida amplitud del cauce del río que es de sólo unos 50 metros, mientras que en la cuenca adyacente el Achiguate tiene una amplitud del cauce de unos 235 metros a la misma elevación.

Respecto a la resolución del DEM 15m x 15m utilizado en el estudio hidráulico se puede concluir que presenta unos resultados aceptables a nivel cualitativo, pero si se quiere realizar una modelación con mayor precisión se debe utilizar una resolución mayor. Teniendo en cuenta que la amplitud del cauce en el tramo de estudio es de unos 50 metros, la topografía del lecho del río quedaría representada únicamente por tres puntos con el DEM utilizado. Esto no es suficiente para modelar el cauce con precisión, y puede generar un margen de error significativo.

## 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.
- **Datos topográficos estudio hidráulico:** Para la zona donde se desea determinar la superficie de inundación se requiere una mayor resolución del DEM. Para obtener resultados fiables se recomienda utilizar, un DEM de 5m x 5m (ACA, 2003).
- **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 tránsito 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.

- En el caso de instalar nuevas estaciones de aforo, de acuerdo con la recomendación del punto anterior, sería conveniente recalcular la curva de calibración en éstas después de episodios de gran magnitud, o con una periodicidad determinada, puesto que la deposición de sedimento puede modificar la sección invalidando la curva de calibración. Asimismo, se puede dar mantenimiento durante la estación seca para mantener la sección constante.

- 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.

- Coeficiente de rugosidad de Manning: Existen dos maneras de determinar el coeficiente de Manning. Se puede determinar a partir de la cartografía de uso de la tierra, estableciendo previamente un valor de Manning a cada uso en base a observaciones de campo. Otra opción es determinar el valor de Manning *in Situ* en cada una de las secciones (Anexo II). A la hora de realizar estudios hidráulicos sería bueno establecer valores de Manning para los diferentes usos de la tierra.

## 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.
- BATES P.D., De Roo, A. P. G., 2000. A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of hydrology* 236, 54-77.
- 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 de la cuenca del Coyolate. Unidad de Manejo de Ríos y Canales. 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 maniejo de ríos y

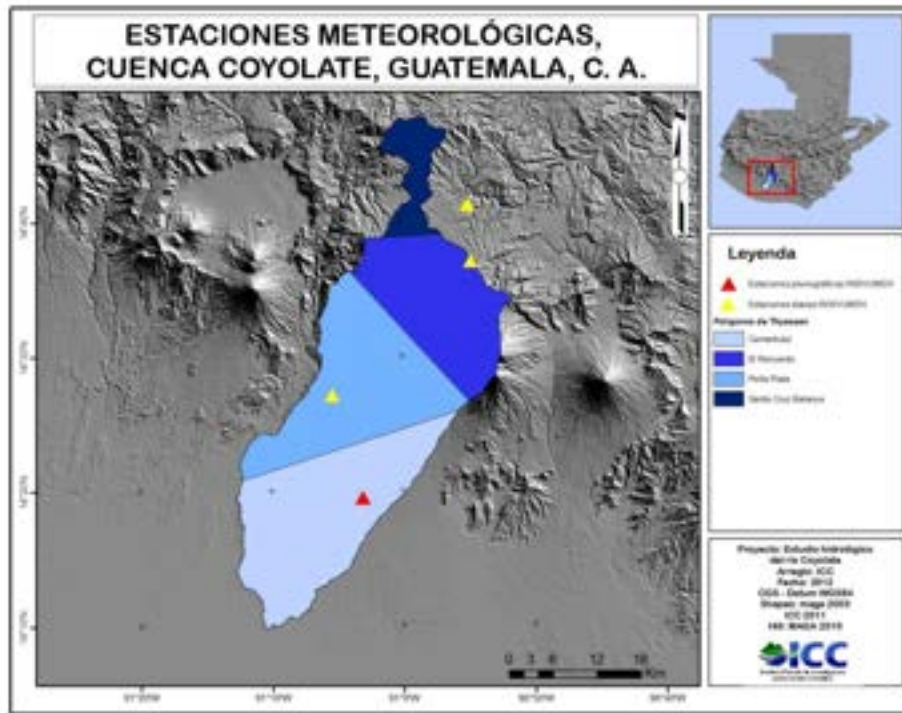
- canales, Dirección General de Caminos. Ministerio de Comunicaciones, infraestructura y vivienda. Guatemala.
- Feldhaus R., Höttges J., Brockhaus T., Rouvé G., 1992. Finite element simulation of flow and pollution transport applied to a part of the river Rhine.
- Guerra, A., 2010. Climate-related disaster risk in mountain areas: the Guatemalan highlands at the start of the 21<sup>st</sup> 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.
- Horrit M. S., Bates P. D., 2001. Predicting floodplain inundation; rastered-based modelling versus the finite-element approach. *Hydrol. Process.* 15 (5), 825-842.
- Horrit M.S., Bates P. D., 2002. Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation.
- IGN, 1974. Estudio integral de los Recursos Hidráulicos del Departamento de Escuintla. Instituto Geográfico Nacional de Guatemala.
- Jovel R. y R. Zapata (1993), Macroeconomic effects of natural disasters in Latin America and the Caribbean, ponencia presentada a la 40<sup>a</sup> 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.**
- 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.**
- 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.**

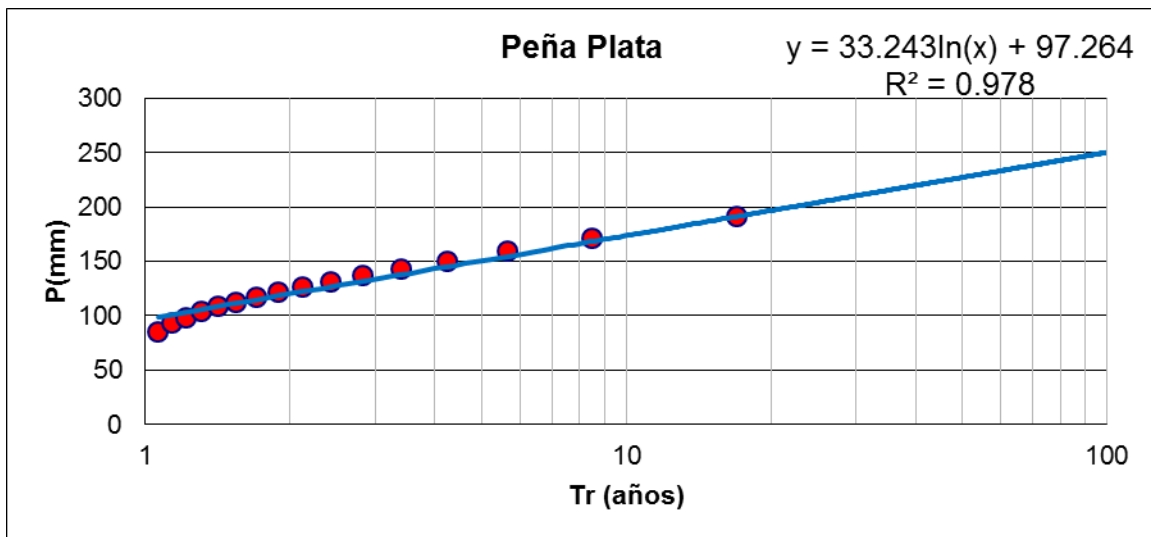
## **ANEXO I. DATOS PLUVIOMÉTRICOS**

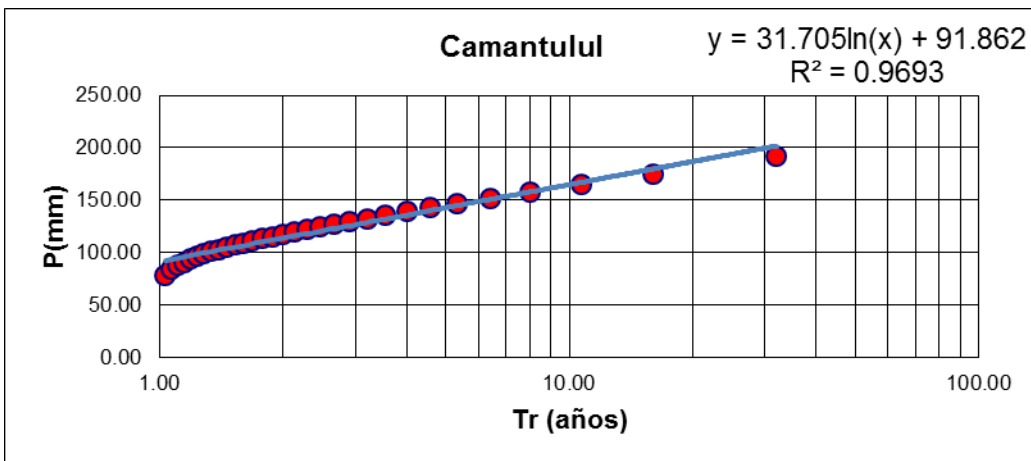
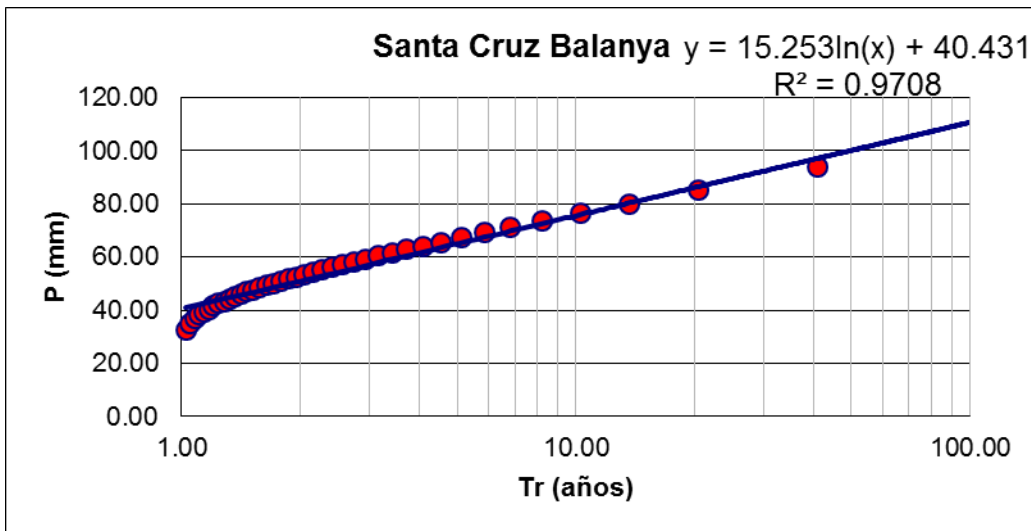
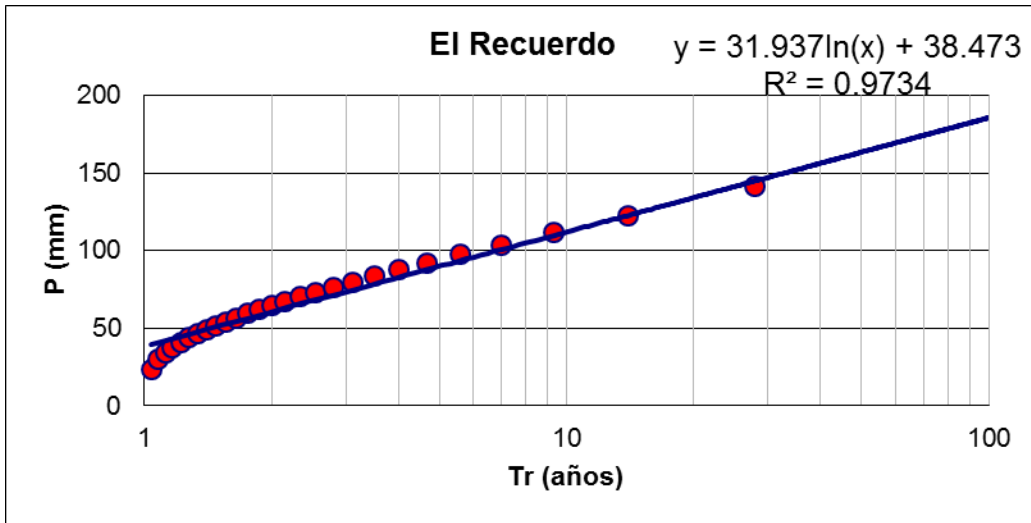


Los datos pluviométricos utilizados para la generación del estudio hidrológico proceden de las estaciones de Santa Cruz Balanya, El Recuerdo, Peña Plata y Camantulul. Se ha determinado su área de influencia a partir de polígonos de Thiessen, tal y como se muestra en el siguiente mapa:



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:





Los cuadros 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            | Santa Cruz Balanya | El Recuerdo | Peña Plata | Camantulul |
|---------------------|--------------------|-------------|------------|------------|
| Elevación (msnm)    | 2240               | 620         | 2060       | 280        |
| Distribución Pd/P24 | INSIVUMEH          | INSIVUMEH   | Camantulul | Camantulul |
| Pd T10 (mm)         | 112                | 173         | 76         | 173        |
| Pd T25 (mm)         | 141                | 204         | 90         | 203        |
| Pd T50 (mm)         | 163                | 227         | 100        | 226        |
| Superficie (km2)    | 285                | 364         | 78         | 403        |
| Coef. Simultaneidad | 0.84               | 0.83        | 0.87       | 0.83       |
| Pd' T10 (mm)        | 94                 | 144         | 66         | 143        |
| Pd' T25 (mm)        | 118                | 169         | 78         | 168        |
| Pd' T50 (mm)        | 137                | 189         | 88         | 187        |

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   |
|--------------------|--------------------|--|
| Santa Cruz Balanya | INSIVUMEH          | $\frac{P_d}{P_{24}} = \frac{d}{17.39 \cdot T^{0.588} + d}$             |
| El Recuerdo        | INSIVUMEH          |  |
| Peña Plata         | Camantulul         | $\frac{P_d}{P_{24}} = \frac{d}{23.36 \cdot T^{0.386} + 0.991 \cdot d}$ |
| Camantulul         | Camantulul         |  |

Los hietogramas generados se recogen en el siguiente cuadro:

| Horas | Sta. Cruz Balanya |      |      | El Recuerdo |      |      | Peña Plata |      |       | Camantulul |      |      |
|-------|-------------------|------|------|-------------|------|------|------------|------|-------|------------|------|------|
|       | T10               | T25  | T50  | T10         | T25  | T50  | T10        | T25  | T50   | T10        | T25  | T50  |
| 1     | 0.1               | 0.2  | 0.4  | 0.2         | 0.4  | 0.6  | 0.3        | 0.3  | 0.4   | 0.3        | 0.7  | 0.4  |
| 2     | 0.2               | 0.3  | 0.5  | 0.2         | 0.4  | 0.7  | 0.3        | 0.4  | 0.4   | 0.4        | 0.8  | 0.4  |
| 3     | 0.2               | 0.4  | 0.5  | 0.3         | 0.5  | 0.8  | 0.4        | 0.5  | 0.5   | 0.5        | 1.0  | 0.5  |
| 4     | 0.2               | 0.4  | 0.7  | 0.3         | 0.7  | 1.0  | 0.5        | 0.6  | 0.7   | 0.6        | 1.3  | 0.7  |
| 5     | 0.3               | 0.5  | 0.8  | 0.4         | 0.8  | 1.3  | 0.7        | 0.8  | 0.9   | 0.8        | 1.6  | 0.8  |
| 6     | 0.4               | 0.7  | 1.0  | 0.6         | 1.1  | 1.6  | 0.9        | 1.0  | 1.1   | 1.0        | 2.1  | 1.1  |
| 7     | 0.5               | 1.0  | 1.4  | 0.8         | 1.4  | 2.2  | 1.2        | 1.4  | 1.6   | 1.4        | 2.8  | 1.5  |
| 8     | 0.8               | 1.4  | 1.9  | 1.1         | 2.1  | 3.0  | 1.7        | 2.1  | 2.3   | 2.0        | 4.0  | 2.3  |
| 9     | 1.3               | 2.1  | 2.8  | 1.8         | 3.2  | 4.4  | 2.8        | 3.3  | 3.7   | 3.3        | 6.2  | 3.6  |
| 10    | 2.3               | 3.6  | 4.6  | 3.3         | 5.5  | 7.2  | 5.2        | 6.1  | 6.8   | 6.1        | 11.0 | 6.8  |
| 11    | 5.7               | 7.8  | 8.8  | 8.1         | 11.7 | 13.7 | 13.0       | 15.3 | 17.0  | 15.1       | 24.2 | 16.8 |
| 12    | 31.4              | 27.2 | 23.0 | 44.6        | 41.1 | 35.9 | 76.8       | 90.2 | 100.4 | 89.4       | 92.9 | 99.4 |
| 13    | 11.2              | 13.2 | 13.4 | 15.8        | 19.9 | 21.0 | 25.9       | 30.4 | 33.9  | 30.2       | 42.3 | 33.5 |
| 14    | 3.5               | 5.1  | 6.2  | 4.9         | 7.7  | 9.7  | 7.8        | 9.2  | 10.2  | 9.1        | 15.7 | 10.1 |
| 15    | 1.7               | 2.7  | 3.6  | 2.4         | 4.1  | 5.6  | 3.7        | 4.4  | 4.9   | 4.3        | 8.1  | 4.8  |
| 16    | 1.0               | 1.7  | 2.3  | 1.4         | 2.5  | 3.6  | 2.2        | 2.6  | 2.9   | 2.5        | 5.0  | 2.8  |
| 17    | 0.6               | 1.1  | 1.6  | 0.9         | 1.7  | 2.5  | 1.4        | 1.7  | 1.9   | 1.7        | 3.3  | 1.9  |
| 18    | 0.5               | 0.8  | 1.2  | 0.7         | 1.2  | 1.9  | 1.0        | 1.2  | 1.3   | 1.2        | 2.4  | 1.3  |
| 19    | 0.3               | 0.6  | 0.9  | 0.5         | 0.9  | 1.4  | 0.7        | 0.9  | 1.0   | 0.9        | 1.8  | 1.0  |
| 20    | 0.3               | 0.5  | 0.7  | 0.4         | 0.7  | 1.1  | 0.6        | 0.7  | 0.8   | 0.7        | 1.4  | 0.7  |
| 21    | 0.2               | 0.4  | 0.6  | 0.3         | 0.6  | 0.9  | 0.5        | 0.5  | 0.6   | 0.5        | 1.1  | 0.6  |
| 22    | 0.2               | 0.3  | 0.5  | 0.2         | 0.5  | 0.8  | 0.4        | 0.4  | 0.5   | 0.4        | 0.9  | 0.5  |
| 23    | 0.1               | 0.3  | 0.4  | 0.2         | 0.4  | 0.6  | 0.3        | 0.4  | 0.4   | 0.4        | 0.8  | 0.4  |
| 24    | 0.1               | 0.2  | 0.4  | 0.2         | 0.3  | 0.6  | 0.3        | 0.3  | 0.3   | 0.3        | 0.7  | 0.3  |

## **ANEXO II. TABLAS PARA LA DETERMINACIÓN DE MANNING**

| <b>Lecho del río</b>  | <b>Valor de Manning</b> |
|---|-------------------------|
| 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                   |
| <b>Lecho excavado o dragado</b>   | <b>Valor de Manning</b> |
| <b>a. Tierra, recto y uniforme</b>  |                         |
| 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>b. Tierra, devanado y lento</b>  |                         |
| 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                   |
| <b>c. Canal excavado</b>  |                         |
| c.1 Sin vegetación  | 0.028                   |
| c.2 Pequeños arbustos en márgenes   | 0.050                   |
| <b>Llanuras de inundación</b>   | <b>Valor de Manning</b> |
| <b>a. Pasto sin arbustos</b>  |                         |
| a.1. Hierba alta  | 0.030                   |
| a.2. Hierba baja  | 0.035                   |
| <b>b. Áreas cultivadas</b>  |                         |
| b.1. Sin cosechar   | 0.030                   |
| b.2. Cosechas en hilera   | 0.035                   |
| b.3. Campos cosechados  | 0.040                   |
| <b>c. Arbustos</b>  |                         |
| 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                   |
| <b>d. Árboles</b>   |                         |
| 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<br>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                   |
| <b>Ríos de montaña, sin vegetación en el lecho, grandes pendientes</b>                              |                         |
| 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, el punto de drenaje de la zona de estudio y algunos puntos determinados.

| Elementos hidrológicos | Área de drenaje (km <sup>2</sup> ) | Caudal máximo (m <sup>3</sup> /s) | Hora del máximo  |
|------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------|
| W300                   | 427.0                              | 1092.5                            | 01ene2000, 15:30 |
| W350                   | 131.4                              | 293.9                             | 01ene2000, 14:39 |
| W250                   | 74.9                               | 57                                | 01ene2000, 13:48 |
| W230                   | 0.1                                | 1.5                               | 01ene2000, 12:03 |
| W220                   | 16.3                               | 74                                | 01ene2000, 13:39 |
| W210                   | 224.5                              | 275.4                             | 01ene2000, 17:04 |
| W200                   | 245.7                              | 639.3                             | 01ene2000, 15:12 |
| W340                   | 3.1                                | 17.9                              | 01ene2000, 12:45 |
| Cerro Colorado         | 1123.0                             | 2232.2                            | 01ene2000, 16:27 |
| La Presa               | 74.9                               | 57                                | 01ene2000, 13:48 |
| Puente Coyolate        | 502.0                              | 1092.8                            | 01ene2000, 15:31 |
| Pantaleón              | 131.4                              | 293.9                             | 01ene2000, 14:39 |

### 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, el punto de drenaje de la zona de estudio y algunos puntos determinados.

| Elementos hidrológicos | Área de drenaje (km <sup>2</sup> ) | Caudal máximo (m <sup>3</sup> /s) | Hora del máximo  |
|------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------|
| W300                   | 427.0                              | 1421.5                            | 01ene2000, 15:31 |
| W350                   | 131.4                              | 413.1                             | 01ene2000, 14:36 |
| W250                   | 74.9                               | 72.3                              | 01ene2000, 13:53 |
| W230                   | 0.1                                | 2                                 | 01ene2000, 12:02 |
| W220                   | 16.3                               | 100.6                             | 01ene2000, 13:36 |
| W210                   | 224.5                              | 402.3                             | 01ene2000, 16:59 |
| W200                   | 245.7                              | 883.8                             | 01ene2000, 15:09 |
| W340                   | 3.1                                | 24.7                              | 01ene2000, 12:42 |
| Cerro Colorado         | 1123.0                             | 3013.9                            | 01ene2000, 16:19 |
| La Presa               | 74.9                               | 72.3                              | 01ene2000, 13:53 |
| Puente Coyolate        | 502.0                              | 1440.7                            | 01ene2000, 16:05 |
| Pantaleón              | 131.4                              | 413.1                             | 01ene2000, 14:36 |

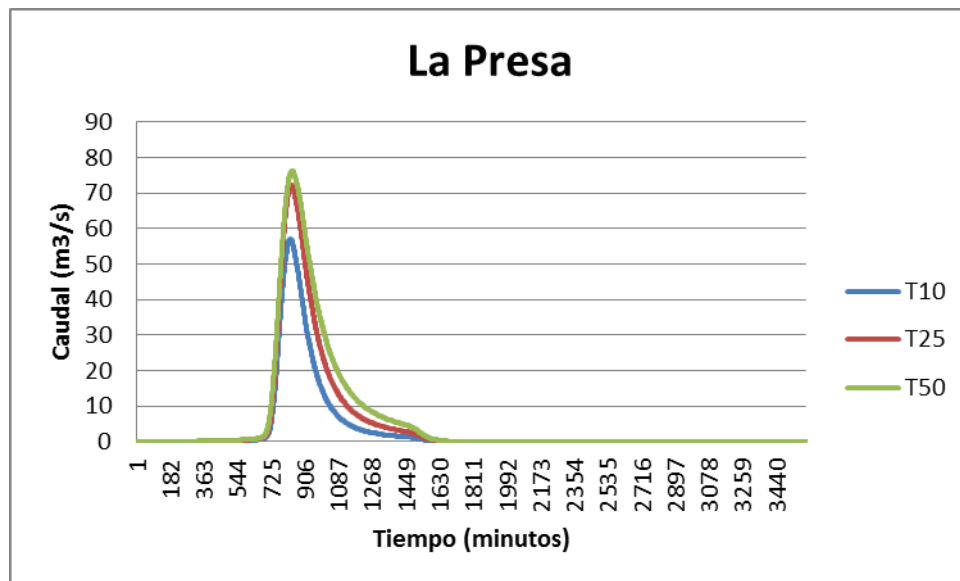


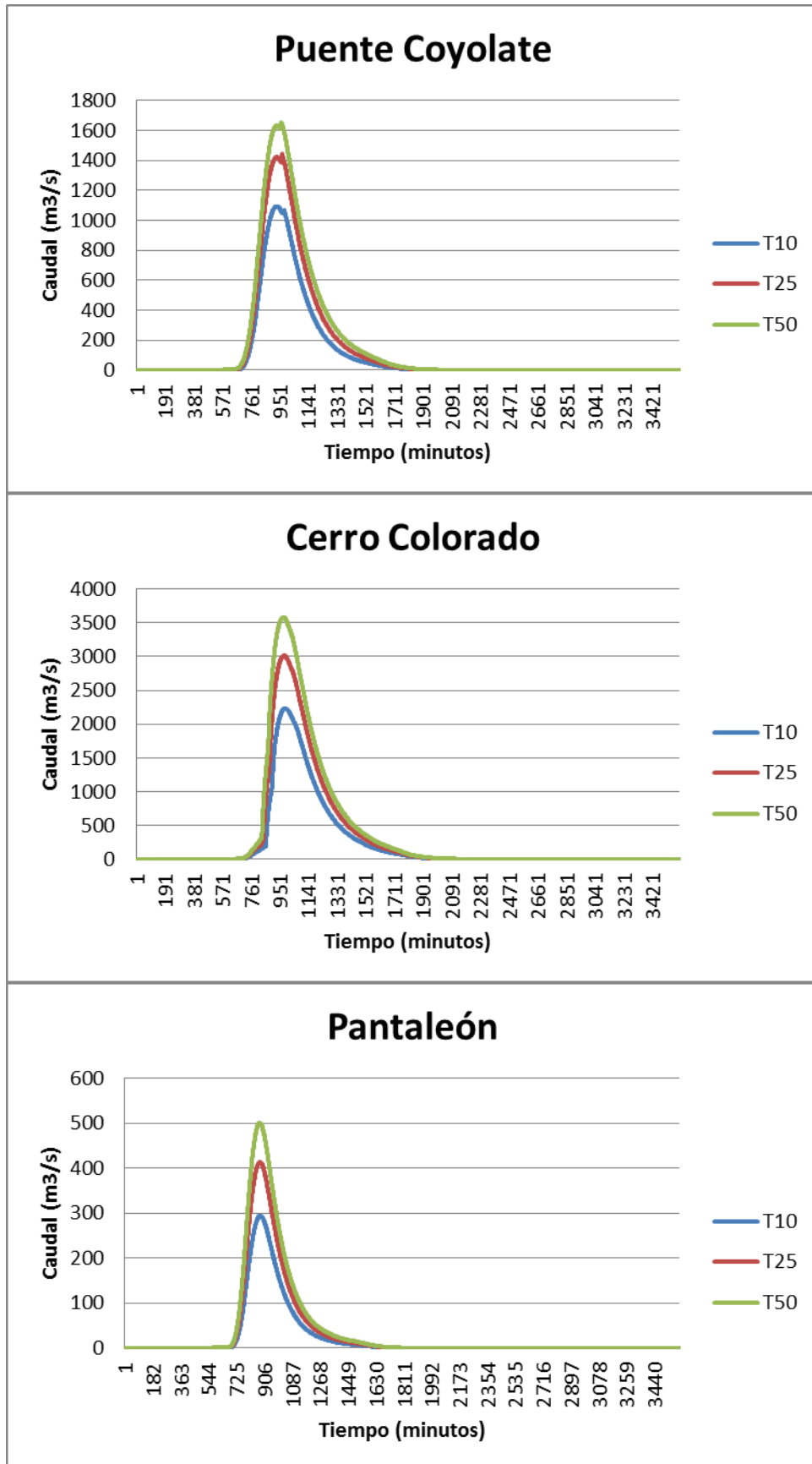
## Período de retorno: 50 años

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

| Elementos hidrológicos | Área de drenaje (km <sup>2</sup> ) | Caudal máximo (m <sup>3</sup> /s) | Hora del máximo  |
|------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------|
| W300                   | 427.0                              | 1629.1                            | 01ene2000, 15:31 |
| W350                   | 131.4                              | 500.4                             | 01ene2000, 14:35 |
| W250                   | 74.9                               | 76.2                              | 01ene2000, 13:57 |
| W230                   | 0.1                                | 2.3                               | 01ene2000, 12:02 |
| W220                   | 16.3                               | 122                               | 01ene2000, 13:34 |
| W210                   | 224.5                              | 508                               | 01ene2000, 16:56 |
| W200                   | 245.7                              | 1081.7                            | 01ene2000, 15:07 |
| W340                   | 3.1                                | 30.1                              | 01ene2000, 12:41 |
| Cerro Colorado         | 1123.0                             | 3583.9                            | 01ene2000, 16:14 |
| La Presa               | 74.9                               | 76.2                              | 01ene2000, 13:57 |
| Puente Coyolate        | 502.0                              | 1651.8                            | 01ene2000, 16:01 |
| Pantaleón              | 131.4                              | 500.4                             | 01ene2000, 14:35 |

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**