

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HONDURAS
INSTITUTO HONDUREÑO DE CIENCIAS DE LA TIERRA
MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS ORIENTACIÓN EN HIDROGEOLOGÍA**



TESIS

***“ACTUALIZACIÓN PRELIMINAR DE LOS UMBRALES DE ALERTA POR
INUNDACIÓN DE RÍO CHAMELECÓN EN CIUDAD LA LIMA, CORTÉS, PARA
EL PERÍODO DE OBSERVACIONES 2010-2018”***

PRESENTA: CARLOS ROBERTO ABREGO SUÁREZ

**PREVIA OPCIÓN AL GRADO DE MASTER EN:
RECURSOS HÍDRICOS ORIENTACIÓN HIDROGEOLOGÍA**

ASESORES:

**MAYNOR ALBERTO RUIZ IVÁREZ
JOSÉ ANTONIO DE SAN ANTONIO ESCRIBANO**

TEGUCIGALPA, M.D.C.

HONDURAS, C.A.

FEBRERO, 2019

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HONDURAS
INSTITUTO HONDUREÑO DE CIENCIAS DE LA TIERRA
MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS ORIENTACIÓN HIDROGEOLOGÍA
Ciudad Universitaria, Tegucigalpa, Honduras.**



AUTORIDADES UNIVERSITARIAS:

MASTER: FRANCISCO HERRERA

RECTOR INTERINO

ABOGADA: ENMA VIRGINIA RIVERA MEJIA

SECRETARIA GENERAL

DOCTOR: ARMANDO EUCEDA

DIRECTOR DE POSTGRADOS

MASTER: MANUEL RODRIGUEZ

COORDINADOR DE LA MAESTRÍA

ABRIL, 2019

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE ABREVIATURAS	8
AGRADECIMIENTOS	9
RESUMEN	11
INTRODUCCIÓN	12
ÁREA DE ESTUDIO	13
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	14
Situación Problemática	14
Formulación del problema de investigación	14
Preguntas de Investigación	14
Objetivos de la investigación	15
<i>Objetivo general:</i>	15
<i>Objetivos específicos:</i>	15
Justificación de la Investigación	15
Hipótesis de la Investigación	16
MARCO TEÓRICO	17
1.1 El ciclo hidrológico.....	17
1.2 La superficie de aportación.....	18
1.2.1 Delimitación de la superficie de aportación.....	18
1.2.2 Características morfométricas de la corriente principal.....	19
1.3 Análisis estadístico de eventos fluviales extremos.....	21
1.3.1 Frecuencia de las crecidas y su probabilidad de ocurrencia.....	21
1.3.2 Período de retorno	21
1.3.3 Riesgo.....	22
1.3.4 Función de distribución de valores extremos Log-Pearson tipo III	22
1.4 Tránsito hidráulico de caudales de avenida	24
1.4.1 Principios de conservación de masa y energía	24
1.4.2 Ecuaciones de Saint-Venant.....	25
1.5 Coeficiente de rugosidad de Manning	25
1.6 La capa límite.....	26
1.7 Curva de descarga.....	26
1.8 Vertedores.....	27

METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.....	28
2.1 Tipo de investigación realizada	28
2.2 Variables e indicadores	28
2.3 Recolección y organización de información secundaria.....	28
2.3.1 Registros climáticos disponibles	28
2.3.2 Registros de los caudales máximos observados	28
2.3.3 Registros de los caudales máximos observados	29
2.3.4 Curvas de descarga.....	29
2.3.5 Levantamiento LiDAR en el Valle de Sula.....	29
2.4 Análisis y descripción de los productos finales	30
2.4.1 Distribución espacial de los registros climáticos disponibles en la superficie de aportación y sus inmediaciones.....	30
2.4.2 Análisis de frecuencia de los caudales máximos observados en río Chamelecón en la Estación Hidrométrica Puente Chamelecón	30
2.4.3 Análisis hidráulico de los caudales de avenida de río Chamelecón	31
2.4.3.1 Modelo hidráulico conceptual de río Chamelecón.....	31
2.4.3.2 Estimación del coeficiente de rugosidad de Manning.....	31
2.4.3.3 Calibración del modelo hidráulico conceptual.....	32
2.4.4 Tránsito hidráulico de los caudales de avenida.....	32
2.4.5 Tiempos de arribo de los diversos caudales de avenida.....	32
2.4.6 Estimación de los caudales de avenida que representan un peligro para las estructuras de alivio	32
2.4.7 Estimación de los niveles de la corriente de agua, en la Estación Hidrométrica El Tablón, asociados a los caudales de avenida que exceden la capacidad hidráulica los alivios en el Valle de Sula	33
2.4.8 Análisis de frecuencia de valores extremos de los caudales críticos de río Chamelecón que afectan las estructuras de alivio.....	33
2.4.9 Evaluación del riesgo según la probabilidad de excedencia de los caudales críticos para las estructuras de alivio	33
RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	34
3.1 La superficie de aportación.....	34
3.1.1 Delimitación de la superficie de aportación.....	34
3.1.2 Características morfométricas de la superficie de aportación.....	34
3.2 Distribución espacial de los registros climáticos disponibles en la superficie de aportación y sus inmediaciones	36

3.3	Análisis de frecuencia de los caudales máximos observados en río Chamelecón en la Estación Hidrométrica Puente Chamelecón.....	39
3.4	Análisis hidráulico de diversos caudales de avenida en río Chamelecón.....	40
3.4.1	Modelo hidráulico conceptual de río Chamelecón	40
3.4.2	Estimación del coeficiente de rugosidad de Manning	41
3.4.3	Calibración del modelo hidráulico conceptual	43
3.5	Tránsito hidráulico de diversos caudales de avenida en río Chamelecón.....	44
3.6	Tiempos de arribo de los diversos caudales de avenida en río Chamelecón	46
3.7	Estimación de los caudales de alivio que representan un peligro para las estructuras de alivio	47
3.8	Estimación de niveles la corriente de agua, en la Estación Hidrométrica El Tablón, asociados a los caudales de avenida que exceden la capacidad hidráulica los alivios en el Valle de Sula.....	48
3.9	Análisis de frecuencia de valores extremos de los caudales críticos de río Chamelecón que afectan las estructuras de alivio.....	50
3.10	Evaluación del riesgo según la probabilidad de excedencia de los caudales críticos para las estructuras de alivio	51
3.11	Comprobación de la hipótesis de investigación.....	52
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
	GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	56
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Características morfométricas de río Chamelecón hasta el punto de control al inicio del Valle de Sula.....	34
Tabla 2. Registros pluviales promedio, a nivel mensual y anual, en las estaciones pluviométricas de interés.....	36
Tabla 3. Registros de temperatura promedio, a nivel anual y mensual, en las estaciones pluviométricas de interés.....	36
Tabla 4. Estimación del coeficiente de rugosidad de Manning a través del método de W.L. Cowan (1956).	41
Tabla 5. Tiempos de arribo estimados para las diversas ondas de crecida analizadas desde la E.H. El Tablón hasta la E.H. Puente Chamelecón, al inicio del Valle de Sula.	46
Tabla 6. Estimación del riesgo de que los caudales críticos en río Chamelecón, en las inmediaciones de las estructuras de alivio, se presenten en los siguientes 10 años.	51

LISTADO DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Riesgo asociado a la probabilidad de excedencia de una crecida y el intervalo de tiempo en el que se espera el evento se manifieste en al menos una ocasión.	22
Gráfico 2. Perfil longitudinal de río Chamelecón hasta su arribo al Valle de Sula y la ubicación de las estaciones hidrométricas en la corriente.	35
Gráfico 3. Histograma de frecuencia altitudinal y curva hipsométrica de río Chamelecón hasta su arribo al valle.....	35
Gráfico 4. Análisis de frecuencia de los caudales máximos observados recurriendo a la función de valores extremos Log-Pearson tipo III.....	39
Gráfico 5. Representación gráfica de los tiempos de arribo de la onda de crecida de río Chamelecón, desde la Estación Hidrométrica El Tablón hasta la Estación Hidrométrica Puente Chamelecón.	46
Gráfico 6. Atenuación de los hidrogramas de avenida simulados desde la Estación Hidrométrica El Tablón hasta la Estación Hidrométrica Puente Cha006Delecón en las inmediaciones de la CA-5.....	48
Gráfico 7. Lectura de escala en la Estación Hidrométrica El Tablón para los caudales críticos de los canales de alivio de río Chamelecón.	49
Gráfico 8. Lectura de escala en la Estación Hidrométrica Puente Chamelecón para los caudales críticos de los canales de alivio de río Chamelecón.....	49
Gráfico 9. Análisis de frecuencia de valores extremos Log-Pearson tipo III para los caudales críticos de las estructuras de alivio que representan los umbrales de alerta para río Chamelecón en la E. H. El Tablón.	50
Gráfico 10. Riesgo asociado a la probabilidad de excedencia de una crecida y el intervalo de tiempo en el que se espera el evento se manifieste en al menos una ocasión.	51

Gráfico 11. Comparación de los umbrales de alerta definidos en 2010 con respecto a la revisión del tránsito hidráulico de los caudales de avenida, y los resultados del comportamiento de estas en las estructuras de alivio de río Chamelecón. 52

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Localización del Municipio de La Lima, Departamento de Cortés.	13
Ilustración 2. Representación esquemática del ciclo hidrológico.	17
Ilustración 3. Distribución espacial de la precipitación media anual sobre la superficie de aportación.	34
Ilustración 4. Distribución espacial de la precipitación media anual sobre la superficie de aportación.	37
Ilustración 5. Distribución espacial de la temperatura media anual sobre la superficie de aportación.	37
Ilustración 6. Distribución espacial de la humedad relativa media anual sobre la superficie de aportación.	38
Ilustración 7. Esquema hidráulico conceptual en HEC-RAS. Se ha realizado el tránsito desde la Estación Hidrométrica El Tablón hasta aguas abajo de la confluencia de río Chamelecón con la reincorporación del canal de alivio Filopo. Abajo a la izquierda se detalla el recorrido sinuoso de la corriente en su arribo al valle y justo antes de la ciudad de La Lima. Abajo a la derecha se muestra el Aeropuerto Villeda Morales y la ciudad de La Lima, asimismo el Canal Maya que actúa a modo de alivio de los excesos que lleva río Chamelecón.	40
Ilustración 8. Distribución espacial de la cobertura forestal de la superficie de aportación, contenida en el Anuario Estadístico Forestal publicado en 2014.	42
Ilustración 9. Representación espacial del coeficiente de rugosidad de Manning para el área de análisis hidráulico en HEC-RAS, en su módulo bidimensional. Los valores estimados se encuentran desde 0.015 hasta 0.120.	42
Ilustración 10. Esquema hidráulico conceptual en HEC-RAS. El caudal de 2447 m ³ /s corresponde a la crecida máxima observada ante el paso del Huracán Mitch.	43
Ilustración 11. Detalle del recorrido del tránsito hidráulico de las crecidas desde la E.H. El Tablón hasta la E.H. Puente Chamelecón, con un total de 38 kilómetros, aproximadamente.	44
Ilustración 12. Simulación del tránsito hidráulico de la onda de avenida para un caudal de 2447 m ³ /s, correspondiente a la crecida máxima observada durante el paso del Huracán Mitch en la Estación Hidrométrica Puente Chamelecón.	45

LISTA DE ABREVIATURAS

CCIYS	Comisión para el Control de Inundaciones del Valle de Sula
CEDEX	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
CEPREDENAC	Centro de Coordinación para la Prevención de Desastres Naturales en Centroamérica
COPECO	Comisión Permanente de Contingencias
DIPECHO	Programa de Preparación ante Desastres de la Oficina de Ayuda Humanitaria de la Comunidad Europea
DGRH	Dirección General de Recursos Hídricos
ECHO	Oficina de Ayuda Humanitaria y Protección Civil de la Unión Europea
E.H.	Estación Hidrométrica
ENEE	Empresa Nacional de Energía Eléctrica
FHIS	Fondo Hondureño de Inversión Social
IGN	Instituto Geográfico Nacional
PGRD	Proyecto Gestión de Riesgo de Desastres
PMDN	Proyecto Mitigación de Desastres Naturales
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
SAT	Sistema de Alerta Temprana
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SERNA	Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente
ZCIT	Zona de Convergencia Intertropical

AGRADECIMIENTOS

Muchos han sido los desafíos enfrentados en esta nueva etapa de formación profesional, retos que fueron superados gracias al apoyo de todos aquellos que han contribuido en mi proceso de formación, así como los que han contribuido con valiosa información para el desarrollo de esta investigación.

Ante todo, mi mayor gratitud a la Universidad de Calgary, la Universidad de Waterloo y la Universidad Nacional Autónoma de Honduras, entidades que contribuyeron a hacer posible la concepción y desarrollo del programa.

Agradezco el apoyo y confianza de mis asesores, José Antonio de San Antonio Escribano y Maynor Alberto Ruiz Ivárez, quienes a través de sus consejos y conocimiento, lograron motivar y orientar nuestros esfuerzos de forma oportuna.

A Manuel Rodríguez, quien a través de su invaluable gestión como coordinador, hizo posible la culminación de este proceso formativo.

A la ingeniera Gladys Flores Solórzano, quien desde el inicio confió en nuestra inquietud por conocer más, y poner ese conocimiento a disposición de nuestro país sin compromisos. Su paciencia, motivación y entusiasmo resultó ser una invaluable fuente de inspiración.

Al ingeniero Ramón Paz Barahona, que entregó su conocimiento de forma desinteresada, mejorando nuestra comprensión de los fenómenos que rigen el comportamiento del recurso hídrico en forma superficial.

A mis compañeros de maestría, que a través del intercambio de experiencias y su buena disposición, hicieron de este recorrido una experiencia que atesoro.

A mi familia, amigos y todos aquellos que me motivaron con cariño a seguir adelante en este proceso, a todos ellos les agradezco infinitamente.

Finalmente, reconozco que la finalización de este proyecto ha sido posible gracias a nuestro Señor, que me ha brindado de la voluntad para culminar esta investigación. Gracias por la vida, y a quienes me acompañan en ella.

“Todos los ríos van al mar y el mar nunca se llena; a su origen vuelven los ríos, para de allí volver a fluir...”
- **Eclesiastés 1:7**

RESUMEN

Las inundaciones fluviales de río Chamelecón, en el Valle de Sula, han ocasionado cuantiosos daños en la ciudad de La Lima, cabecera del municipio del mismo nombre. El Huracán Fifi y el Huracán Mitch son algunos de los eventos más recordados por sus moradores, por la magnitud de las crecidas y la extensión de sus planicies de inundación.

Con el propósito de actualizar los umbrales de alerta de río Chamelecón, se ha considerado el tránsito hidráulico de los caudales de avenida, por sobre el tránsito hidrológico, en vista que este último no considera la influencia de la geometría a lo largo de la corriente de agua.

Para la simulación hidráulica de caudales de avenida, se recurrió al software de modelización hidráulica HEC-RAS en estado bidimensional, recurriendo a una simulación de una crecida observada para su calibración. Posteriormente, se realizó una observación del comportamiento de los caudales de avenida a través de los canales de alivio Filopo y Maya, tratando de determinar la capacidad hidráulica de estos según las condiciones evidenciadas en campo.

Los resultados de esta evaluación del desempeño hidráulico de los canales de alivio, permitió definir los caudales que río Chamelecón debe transportar, inmediatamente aguas arriba de la derivación, para que estos canales se encuentren al límite de su capacidad de evacuación.

Posteriormente, los caudales antes definidos fueron trasladados mediante una relación de atenuación de la máxima ordenada de las crecidas, hasta la Estación Hidrométrica El Tablón, localizada a aproximadamente 20 kilómetros aguas arriba del arribo de la corriente de agua al Valle de Sula.

Finalmente, la máxima ordenada de los caudales estimados aguas arriba, en la estación hidrométrica, es relacionada con los niveles de las lecturas de escala, y definir así los niveles críticos del nivel de la superficie del agua, así como sus tiempos de arribo.

INTRODUCCIÓN

El asentamiento de los pueblos sobre las vegas de las corrientes de agua ha constituido una de las razones de su desarrollo económico y social desde las primeras civilizaciones, con el propósito de beneficiarse de los recursos que estas proveen. La ciudad de La Lima, ubicada en el Departamento de Cortés, Honduras, no es la excepción, y la presión por el desarrollo de nuevos emplazamientos obliga a que los planificadores urbanos conozcan los dominios, el comportamiento y la frecuencia de los flujos de las corrientes de agua vecinas.

Río Chamelecón, es la corriente de mayor interés, discurriendo a través de ciudad de La Lima, resguardada, provisionalmente, de los desbordamientos de la corriente a través de bordos, cuando los flujos no pueden ser contenidos por su cauce natural.

La Lima ha sido escenario de diversos eventos fluviales, y en ocasiones, los flujos acarreados por río Chamelecón logran vencer las barreras que conforman los bordos, reclamando así sus vegas, el alivio natural de la corriente. Actualmente, los bordos se encuentran deteriorados y con poco mantenimiento, por lo que estos trasladan una falsa percepción de seguridad a los pobladores.

La relación creciente y sucesiva de los niveles de una corriente se representa mediante hidrogramas de avenida, constituyendo la huella dactilar de una cuenca como respuesta ante un evento hidrometeorológico, encontrándose asociada a diversos factores, destacándose la distribución espacial y temporal del evento pluvial, la condición de humedad antecedente de los suelos, y los tiempos de concentración de las diferentes unidades de respuesta hidrológica, por mencionar algunos.

En general, el comportamiento de las crecidas en nuestro país es de tipo torrencial, limitando el tiempo de respuesta de quienes pueden encontrarse en las áreas que conforman las planicies de inundación, siendo necesario buscar mecanismos que permitan anticiparse al desarrollo del evento de crecida ante un evento pluvial.

El análisis de los registros de los niveles de la corriente en diversas secciones de control, permite conocer de primera mano el comportamiento de la corriente y obtener información esencial, que permita asociar los tiempos de arribo de diferentes ondas de crecida desde una sección de control aguas arriba a otra, localizada aguas abajo, sobre la corriente.

Conocer los diferentes umbrales de la lámina de lluvia, que posteriormente se incorporan a la corriente en forma de escorrentía directa incrementando sus niveles y ocasionando daños, para diversas probabilidades de ocurrencia, forma parte de los alcances de esta investigación.

ÁREA DE ESTUDIO

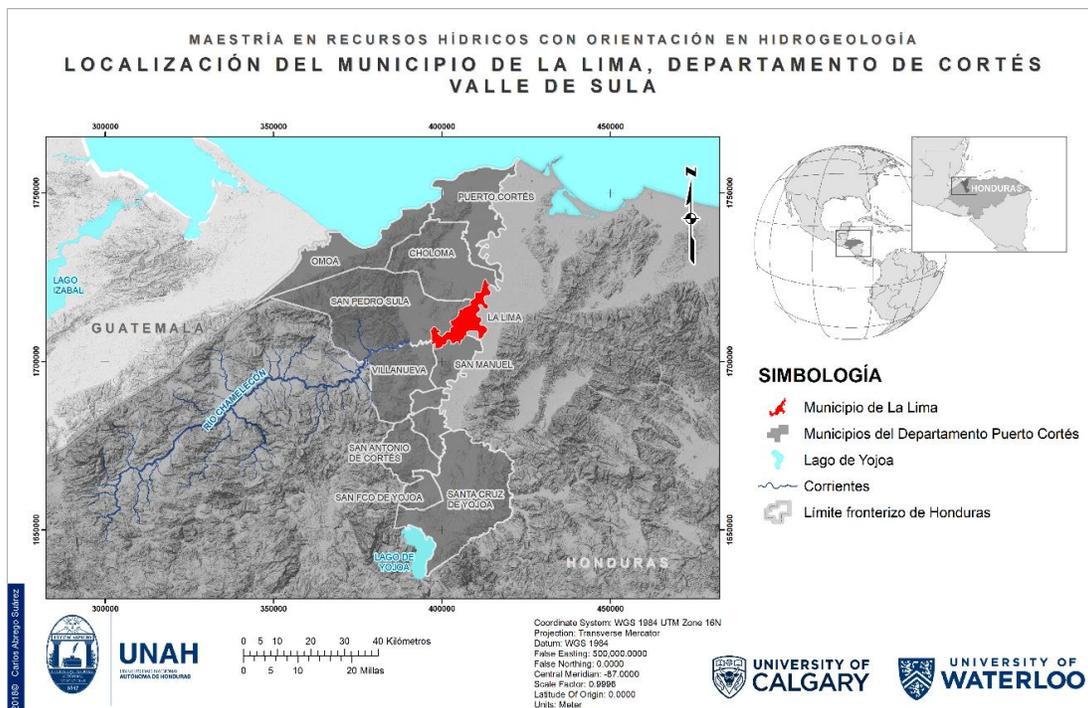
La ciudad de La Lima es la cabecera del municipio del mismo nombre y forma parte del Departamento de Cortés, localizado al noroeste del territorio hondureño, en el Litoral Norte. El municipio también forma parte del Valle de Sula, por donde discurren diversas corrientes, destacándose río Chamelecón y río Ulúa, por su magnitud.

En el Valle de Sula se localiza el mayor sector productivo del país, en donde San Pedro Sula y Puerto Cortés representan las urbes más desarrolladas. La Lima se encuentra en conurbación con San Pedro Sula, aportando una gran cantidad de mano de obra que viaja diariamente a desarrollar sus actividades a la gran ciudad.

De las dos corrientes antes mencionadas, es río Chamelecón la que afecta directamente a la ciudad de La Lima, en vista que esta corriente atraviesa su casco urbano, encontrándose este en lo que puede ser considerado como zonas de alivio de las avenidas. Dos estructuras de alivio han sido construidas aguas arriba de la ciudad, con el propósito de atenuar la ordenada máxima de crecidas atípicas, que puedan poner en riesgo la vida y bienes de quienes habitan la zona.

La influencia de río Ulúa se manifiesta en la franja noreste del municipio, alejada del casco urbano; no obstante, se tiene conocimiento que los excesos de río Ulúa interactúan con los de río Chamelecón en límites de los municipios de Choloma y Puerto Cortés, al noreste de La Lima. Las comunidades de Ticamaya, El Remolino, Kele Kele, Nola y Finca Tibombo, por mencionar algunas, representan algunos de los caseríos que han reportado mayor afectación durante los últimos años.

Ilustración 1. Localización del Municipio de La Lima, Departamento de Cortés.



PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Situación Problemática

La ciudad de La Lima está emplazada en lo que podrían considerarse las vegas de río Chamelecón, y a consecuencia de ello, sus habitantes se encuentran expuestos al desbordamiento de la corriente, superando los bordos que tienen como propósito contener los flujos de las crecidas, cuando el canal principal es incapaz de transportarlos.

En río Chamelecón, algunos esfuerzos para anticiparse a estos desbordamientos han sido realizados anteriormente, a través de la estimación de umbrales de alerta por inundación, no obstante, esta labor no ha sido atendida desde 2011, ocasión en la que se lograron definir umbrales para la corriente en la Estación Hidrométrica El Tablón (Silva Rotela, 2011).

Frente a ello, se pretende brindar una herramienta que permita actualizar la anterior estimación de umbrales, de forma que permita la adecuada toma de decisiones a los entes de respuesta y la Comisión para el Control de Inundaciones del Valle de Sula, en lo que concierne a las inundaciones provocadas por río Chamelecón en las inmediaciones de la ciudad de La Lima.

Formulación del problema de investigación

Frente al problema de inundación fluvial recurrente en la ciudad de La Lima, a causa del desbordamiento de río Chamelecón, se busca brindar una herramienta que facilite la toma de decisiones por las autoridades a través del establecimiento de umbrales de alerta por inundación fluvial, asociados a los niveles de las escalas limnimétricas de la Estación Hidrométrica El Tablón.

Preguntas de Investigación

¿Es posible asociar los caudales críticos de los alivios de río Chamelecón, en las inmediaciones de la ciudad de La Lima, según los niveles de la Estación Hidrométrica El Tablón?

¿Es posible obtener una relación entre los niveles de la corriente y los tiempos de arribo de la onda de crecida en río Chamelecón, desde la Estación Hidrométrica El Tablón hasta la ciudad de La Lima?

¿Cómo contribuirían las mediciones y controles establecidos para apoyar en la mitigación del riesgo por inundación fluvial en la ciudad de La Lima?

Objetivos de la investigación

Objetivo general:

Anticipar el desarrollo de las crecidas del río Chamelecón en la ciudad de La Lima, conociendo los niveles observados en la Estación Hidrométrica El Tablón, alertando de las potenciales inundaciones.

Objetivos específicos:

Estimar los niveles de río Chamelecón, en una sección de control aguas arriba, que representen un peligro de desbordamiento en la ciudad de La Lima.

Determinar una relación de los tiempos de arribo de la corriente entre la Estación Hidrométrica El Tablón y la Estación Hidrométrica Puente Chamelecón.

Justificación de la Investigación

Desde antaño, la ciudad de La Lima ha sido afectada por diversos eventos fluviales, como respuesta de la superficie de aportación a eventos hidrometeorológicos extraordinarios, entre los que se destacan el Huracán Francelia en agosto de 1969, el Huracán Fifi en septiembre de 1974, la tormenta tropical Mike en noviembre de 1990, la tormenta tropical Gert en septiembre de 1993, el Huracán Mitch en octubre de 1998, el Huracán Félix en septiembre de 2007, la tormenta tropical Mathew en septiembre de 2010 y el frente frío de octubre de 2017, por mencionar algunos, todos ellos afectando directamente varios sectores de la ciudad.

Además, la frecuencia de los desbordamientos de las corrientes a consecuencia de eventos que no podrían considerarse como atípicos, regularmente ocasionan cuantiosas pérdidas a las comunidades. Esta recurrencia puede ser atribuible al progresivo deterioro de la cuenca, reduciendo la capacidad de esta para retener en el subsuelo una importante fracción de la lluvia directa, provocando mayor escurrimiento que antaño y modificando consecuentemente la sección del cauce ante el incremento de material de arrastre de los flujos.

La Comisión para el Control de Inundaciones del Valle de Sula (CCIIVS) es el ente estatal encargado de la política orientada a la gestión para mitigar los impactos de las inundaciones ocasionadas por los ríos Ulúa y Chamelecón, en el Valle de Sula. Labores de mantenimiento de bordos, canalizaciones y construcción de obras estructurales de protección, forman parte de algunas de las actividades que la CCIIVS desarrolla.

Con el propósito de tener un registro de los flujos que discurren por las dos corrientes antes detalladas, y a su vez un monitoreo de los niveles de estas, años atrás, la Dirección general de Recursos Hídricos (DGRH) tuvo a bien la instalación de una red hidrométrica, con campañas de observación y calibración de las relaciones tirante-caudal sistemáticas, en sus inicios, posteriormente trabajando en conjunto con la CCIIVS para mejorar las campanas de observación y calibración de las relaciones tirante-caudal.

Posterior al paso del Huracán Mitch, muchas estaciones fueron afectadas por las crecidas, impidiendo continuidad y consistencia en las observaciones (Electricité de France, 2003), situación que aún no ha sido superada en su totalidad. A consecuencia de ello, las observaciones poseen numerosos vacíos, y las curvas de descarga no son actualizadas anualmente, tal como lo sugiere la literatura.

No obstante, en 2011, una colaboración entre el Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales en América Central (CEPREDENAC), la Comisión Permanente de Contingencias (COPECO) y la otrora Comisión Ejecutiva del Valle de Sula (CEVS), con el financiamiento de la Oficina de Ayuda Humanitaria y Protección Civil de la Unión Europea (ECHO), estableció una actualización de los umbrales de alerta para río Chamelecón, asociados a los niveles observados en las estaciones hidrométricas La Vegona, El Tablón y Puente Chamelecón (Silva Rotela, 2011).

Frente a ello, una actualización de los umbrales de alerta es necesaria para poder brindar elementos que permitan anticiparse a los eventos fluviales adversos que puedan desarrollarse en río Chamelecón.

Hipótesis de la Investigación

Los umbrales de alerta en río Chamelecón, en la Estación Hidrométrica El Tablón, han cambiado debido a la modificación de la sección hidráulica de la corriente.

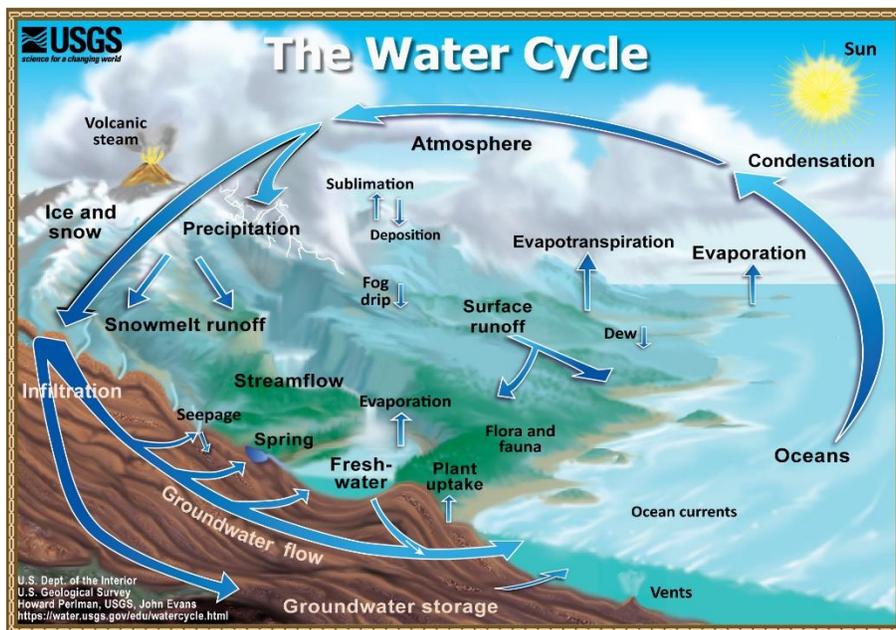
MARCO TEÓRICO

1.1 El ciclo hidrológico

El agua es considerada como el recurso imprescindible para el sostenimiento de la vida en nuestro planeta y la fuerza motriz de su circulación se deriva de la energía radiante recibida del sol. La mayor parte del agua de la Tierra se almacena en la superficie en los océanos y por lo tanto es lógico considerar que el ciclo hidrológico comienza con el efecto directo de la radiación del sol nuestro más grande reservorio (Chow, Applied Hydrology, 1988).

El calentamiento de la superficie del mar provoca la evaporación, la transferencia de agua del líquido al estado gaseoso, para formar parte de la atmósfera. Permanece principalmente invisible en el almacenamiento atmosférico por un promedio de 10 días (Shaw, 1994).

Ilustración 2. Representación esquemática del ciclo hidrológico.



En las regiones tropicales, en específico el Mar Caribe, los vientos alisios provenientes del noreste, en el hemisferio norte, son los encargados de gran parte de los transportes de humedad del océano, provocando importantes aportes pluviales a la masa continental en la franja de contacto conocida como Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT).

En la franja que representa el Litoral Norte hondureño, las perturbaciones atmosféricas que desencadenan en precipitación se pueden atribuir a la ZCIT y los frentes fríos provenientes del hemisferio norte, estos últimos originan gran pluviosidad al entrar en contacto con las masas calientes de aire más húmedo.

Asimismo, la orografía representada por las cordilleras del Merendón y Nombre de Dios constituye un importante factor que desencadena en procesos pluviales de tipo convectivo, en donde las pequeñas cuencas son muy sensibles a estos.

1.2 La superficie de aportación

En Honduras, las cuencas han sido objeto de diferentes aproximaciones orientadas a obtener la divisoria de aguas que sirve de límite a la superficie de aportación. Las primeras aproximaciones fueron obtenidas de la cartografía oficial contenidas en las Hojas Cartográficas del Instituto Geográfico Nacional de Honduras (IGN, 1972). Sin embargo, los avances en la obtención de información espacial mediante sensores remotos ha permitido la obtención de modelos numéricos de terreno que permiten mayor detalle que los procedimientos convencionales, que por su escala, estos últimos poseen ciertas restricciones para su uso.

A inicios de la década pasada, la otrora Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente (SERNA) a través de un convenio firmado con la Agencia Española de Cooperación (AECID) encomendó al Centro de Estudios Experimentales (CEDEX) la revisión y delimitación de las cuencas a nivel nacional como parte del Balance Hídrico de Honduras (AECID & CEDEX, 2003), utilizando modelos digitales de terreno con una resolución de 1 km.

Como plataforma para la estimación de la divisoria de aguas, y las características físicas del área de aportación, a través de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), se recurrió a un modelo digital de terreno generado con información recolectada por la *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*, en su segunda versión, desarrollado por la National Aeronautics and Space Administration en colaboración con el Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) (NASA & METI, 2011), con una resolución aproximada de pixel de 38.2 m, y un modelo digital de terreno con una resolución de 5 m obtenido por la COPECO a través del PGRD, para los municipios colindantes con el Valle de Sula, ambos en proyección Universal Transversal Mercator y Dátum WGS84.

La combinación de estos modelos numéricos de terreno permiten la estimación de los patrones de drenaje de cada unidad hidrológica, así como la derivación de parámetros relevantes para la estimación de avenidas, a través de un modelo conceptual lluvia-escorrentía que podría servir en un futuro para su implementación.

1.2.1 Delimitación de la superficie de aportación

Tener identificada la superficie de aportación constituye uno de los primeros pasos para poder llevar a cabo un estudio hidrológico, por lo que la delimitación de la cuenca debe ser cuidadosamente definida. La delimitación de la divisoria de aguas de la superficie de aportación se origina con la identificación de un punto de desagüe, también conocido como control (Chow, Applied Hydrology, 1988).

Inicialmente, esta delimitación se realiza en base a cartas topográficas, con la mayor precisión posible. Si existe alguna incertidumbre sobre la confiabilidad de estas cartas, debe iniciarse un proceso de investigación de campo, prestando la debida atención a los cursos de agua hechos por el hombre, como canales de riego. Normalmente, la complejidad

para definir el área de drenaje se incrementa en zonas pantanosas o con muy baja pendiente, donde el escurrimiento varía según la estacionalidad del ciclo hidrológico (Shaw, 1994).

En la actualidad, los modelos digitales de terreno, a través de sensores remotos, han permitido una mejor representación de la topografía terrestre, facilitando la identificación de la divisoria de aguas mediante software especializado en procesamiento de información espacial georreferenciada.

Siempre debe recordarse que la determinación del área de captación puede ser una posible fuente de error, en vista que no siempre la división topográfica puede ser el límite verdadero del parteaguas.

1.2.2 Características morfométricas de la corriente principal

Los aguaceros con potencial de producir escorrentía directa eventualmente culminan en avenidas, siendo éstas la huella dactilar de la cuenca, como respuesta ante estos eventos atmosféricos, vinculada directamente a las características morfométricas de la superficie de aportación, el proceso de transformación de la lámina de lluvia en lluvia efectiva, el tiempo de concentración, entre otros.

Al tiempo requerido para que la precipitación en el punto más alejado de la cuenca pase por la sección de control o desagüe de la cuenca, se le conoce como tiempo de concentración (Shaw, 1994). De esta forma, después de un tiempo T_c del comienzo de la tormenta, se considera que la totalidad de la cuenca contribuye al flujo, por lo que el caudal máximo de la crecida se da después de transcurrido el tiempo de concentración.

Las corrientes de montaña se caracterizan por sostener bajos caudales, sin embargo, estos se incrementan súbitamente ante tormentas de corta duración, como consecuencia de las fuertes pendientes y tiempos de concentración cortos que caracterizan las estribaciones montañosas de nuestro país, en donde la capacidad erosiva de los flujos es alta.

Los ríos, por su parte, presentan un incremento gradual de sus flujos, y en donde la energía de la avenida se ve atenuada en las vegas y bancos de desbordamiento, a lo largo del cauce por donde transita la crecida, representando los alivios naturales de la corriente. A esta relación creciente y sucesiva de los niveles de la corriente, se le conoce como hidrograma de avenida¹.

En general, los parámetros físicos de una cuenca permiten deducir una aproximación al comportamiento del hidrograma de avenida en términos generales (Chow, Handbook of

¹ Cuando se dispone de observaciones de niveles de la corriente, que puedan ser asociadas a una relación tirante-caudal previamente establecida en la sección de observación hidrométrica, en conjunto con el espesor total de la precipitación que originó esa respuesta de la superficie de aportación, es posible determinar un tipo de hidrograma conocido como hidrograma unitario. El hidrograma unitario representa la respuesta unitaria de la superficie de contribución ante una precipitación de 1 milímetro, y es muy utilizado con propósitos de diseño, en vista que si conocemos el espesor total de la tormenta de diseño, las ordenadas del hidrograma unitario pueden escalarse en proporción a la lluvia efectiva del evento.

Applied Hydrology, 1964). Asimismo, conocer las pendientes y perfiles de la corriente analizada admite la valoración del potencial erosivo de la misma.

Un resumen de las características morfométricas más relevantes se describe a continuación:

Perfil longitudinal: es la representación gráfica de la elevación de la invertida del cauce en su discurrir hasta el punto de desagüe.

Curva hipsométrica: constituye la representación gráfica de la frecuencia acumulada de las áreas de aportación para un intervalo de elevación de la corriente (Chow, Handbook of Applied Hydrology, 1964).

Histograma de frecuencia altitudinal: representa la frecuencia relativa de las áreas de aportación para un intervalo de elevación de la corriente (Chow, Handbook of Applied Hydrology, 1964).

Pendiente: puede referirse a la pendiente de la cuenca y la pendiente de la corriente principal. Esta última puede ser estimada aritméticamente con la diferencia de elevaciones entre el desagüe y el punto más alto, o de forma ponderada, a través de segmentos equivalentes para una mejor representación.

La pendiente ponderada de la corriente principal se puede representar a través de la siguiente expresión:

$$\bar{S} = \sum_{i=1}^n \frac{S_1 \cdot L_1 + S_2 \cdot L_2 + \dots + S_n \cdot L_n}{L_T}$$

, en donde \bar{S} representa la pendiente ponderada en m/m, S_1 la pendiente promedio del tramo L_1 y L_T representa la longitud total de la corriente.

Índice de compacidad: también conocido como índice de Gravelius, es la relación existente entre el perímetro de la cuenca y la longitud de la circunferencia de un círculo con un área igual a la misma (Gravelius, 1914).

$$I_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi \cdot A}}$$

, en donde I_c representa el índice de Gravelius, P es el perímetro de la cuenca en kilómetros y A su área en kilómetros cuadrados.

Factor de circularidad: relaciona el área de la cuenca y el área de un círculo de igual perímetro (Miller, 1953).

$$R_c = \frac{4\pi A}{P^2}$$

, en donde R_c es el factor de circularidad, A el área de la cuenca en kilómetros cuadrados y P su perímetro en kilómetros.

Razón de elongación: es la relación entre el diámetro de un círculo con igual área que la de la cuenca y la longitud máxima de la misma (López Bermúdez, 1988).

$$R_e = \frac{1.1294 \cdot A^{0.5}}{L}$$

, en donde R_e es la razón de elongación, A el área de la cuenca en kilómetros cuadrados y P su perímetro en kilómetros.

1.3 Análisis estadístico de eventos fluviales extremos

En ocasiones, los sistemas hidrológicos se ven afectados por eventos extremos, tales como tormentas, crecidas y sequías. La magnitud de un evento extremo está inversamente relacionado a la frecuencia de su ocurrencia, en otras palabras, eventos muy severos o atípicos son asociados a menor frecuencia que los eventos moderados (Chow, Applied Hydrology, 1988).

El análisis estadístico de estos caudales, con el propósito de obtener elementos de diseño, ha sido objeto de mucha discusión desde antaño. Además, el nivel de precisión requerido para los diversos análisis hidrológicos depende de las particularidades de cada proyecto o sitio en específico.

1.3.1 Frecuencia de las crecidas y su probabilidad de ocurrencia

La reducción de daños causados por una crecida puede reducirse a través del pronóstico de eventos fluviales, por lo que el análisis de su frecuencia, permite el diseño de estructuras que mitiguen sus impactos (Kite, 1974).

La frecuencia de un evento fluvial puede ser definida como el número de veces que ocurre un evento, en un determinado período de tiempo. También puede definirse como la proporción del rango de una variable aleatoria que toma un valor dado o se encuentra en un intervalo en específico (Chow, Applied Hydrology, 1988).

La probabilidad de ocurrencia, por su parte, es obtenida a través de distribuciones de densidad de valores extremos, que permiten asociar la probabilidad a través de una función sintética de probabilidad.

1.3.2 Período de retorno

El intervalo de recurrencia con el que un evento con la misma magnitud se repita, en términos promedio, se le conoce como período de retorno. Un período de retorno significa que para cualquier año en particular, el evento posee una probabilidad de ocurrencia de:

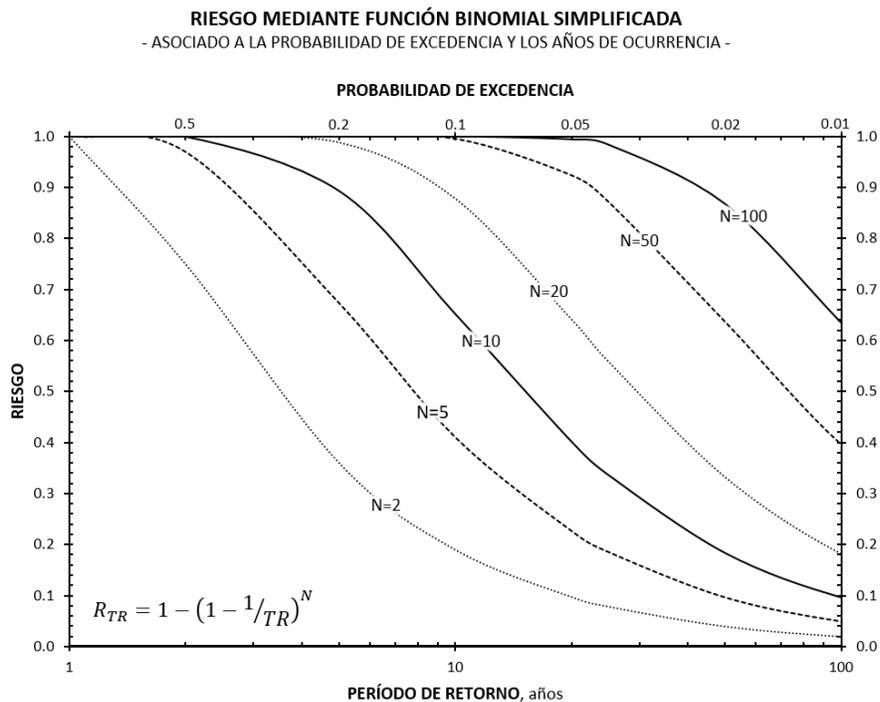
$$P = \frac{1}{T_r}$$

1.3.3 Riesgo

La probabilidad R de que uno o más eventos, con probabilidad de ocurrencia P conocida, excedan una magnitud en particular, dentro de un intervalo de años n , es conocida como riesgo. El riesgo es calculado mediante una distribución binomial, brindada en forma simplificada a continuación:

$$R_P = 1 - (1 - P)^n = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)^n$$

Gráfico 1. Riesgo asociado a la probabilidad de excedencia de una crecida y el intervalo de tiempo en el que se espera el evento se manifieste en al menos una ocasión.



1.3.4 Función de distribución de valores extremos Log-Pearson tipo III

Existen diversas aproximaciones para asociar la recurrencia de las observaciones a una función de distribución de valores extremos. La función de distribución de valores extremos Log-Pearson Tipo III se utiliza en el análisis de crecidas naturales y es la función de distribución de caudales picos de más amplia aceptación en Estados Unidos de Norteamérica (National Resources Conservation Service, 2007).

Su adopción fue recomendada, por sobre otros métodos de análisis de frecuencia, por el grupo de trabajo del *Water Resources Council (WRC)*, encargado de revisar diversos métodos estadísticos para ajustar caudales extremos a una función de densidad (Benson M., 1968).

$$\log Q_y = \overline{\log Q} + K_y \cdot \sigma_{\log Q}$$

, en donde $\log Q_y$ representa el logaritmo del caudal objetivo, $\overline{\log Q}$ es la media de los logaritmos de los caudales máximos anuales, $\sigma_{\log Q}$ es la desviación estándar de los logaritmos de los caudales máximos anuales y K_y es el factor de frecuencia de la función de la probabilidad anual de excedencia (Haan, 1977).

$$\overline{\log Q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log Q_i \rightarrow \lambda$$

$$\sigma_{\log Q} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\log Q_i - \overline{\log Q})^2}{n-1}} \rightarrow \beta$$

$$C_s = \frac{n \sum (x_i - \bar{x})^3}{(n-1)(n-2)s^3} \rightarrow \varepsilon$$

El factor de frecuencia K_y puede ser estimado con las expresiones siguientes:

$$K_y = z + (z^2 - 1) \cdot k + \frac{1}{3} (z^3 - 6z) \cdot k^2 - (z^2 - 1) \cdot k^3 + z \cdot k^4 + \frac{1}{3} k^5$$

$$k = \frac{C_s}{6}$$

$$z = w - \frac{2.516 + 0.8029w + 0.01033w^2}{1 + 1.4328w + 0.1893w^2 + 0.00131w^3}$$

$$w = \left[\ln \left(\frac{1}{P^2} \right) \right]^{0.5}$$

$$P = \frac{1}{T_r}$$

1.4 Tránsito hidráulico de caudales de avenida

El discurrir de las crecidas a lo largo de las corrientes que conforman el drenaje es un proceso distribuido debido a que la tasa de flujo, velocidad y profundidad varían espacialmente. La estimación de la razón de flujo, o el nivel de la superficie del agua, en secciones de gran interés en la corriente, como las estaciones hidrométricas, puede ser obtenida utilizando un modelo distribuido de tránsito de crecidas.

Este tipo de modelo se basa en ecuaciones diferenciales parciales, derivadas de la ecuación de Saint-Venant para flujo unidimensional, permitiendo la estimación de la razón de flujo y los niveles de la superficie del agua como funciones del espacio y tiempo, a diferencia de los modelos agrupados que únicamente consideran el tiempo como variable independiente (Chow, Applied Hydrology, 1988).

La estimación del nivel de la superficie del agua es importante ya que permite definir la extensión de la planicie inundable y determina la elevación de estructuras de drenaje o protección, tales como puentes y bordos.

La ventaja de un modelo distribuido, para conocer el comportamiento del flujo, consiste en la estimación del caudal y el nivel de la superficie del agua de forma simultánea, a diferencia de un modelo agrupado que lo realiza de forma independiente, por lo que el primero se aproxima más a la naturaleza inestable y no uniforme de la propagación del flujo en un canal (Chow, Open Channel Hydraulics, 1994).

1.4.1 Principios de conservación de masa y energía

Para el tránsito hidráulico de las crecidas, dentro del modelo hidráulico se consideran los principios de conservación de masa y energía, despreciando cualquier aportación lateral de los tributarios y el flujo base.

En este sentido, si asumimos que el flujo posee una densidad constante, entonces podemos representar la ecuación de continuidad como una representación del cambio del volumen (*c. v.*) y el cambio de almacenamiento (*c. s.*).

$$\frac{d}{dt} \iiint_{c.v.} dV + \iint_{c.s.} V \cdot dA = 0$$

Si asociamos el cambio del almacenamiento como una variación del flujo en la entrada y la salida:

$$\iint V \cdot dA = \iint_{outlet} V \cdot dA + \iint_{inlet} V \cdot dA = Q(t) - I(t)$$

Finalmente, la ecuación de continuidad puede resumirse con la siguiente expresión:

$$\frac{dS}{dt} + Q(t) - I(t) = 0$$

1.4.2 Ecuaciones de Saint-Venant

En términos generales, las soluciones que planteó Saint-Venant para describir el comportamiento del agua a través de secciones de control puede resumirse en dos: ecuaciones de continuidad y de momento.

La ecuación de continuidad, en su esquema de conservación de masa:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

La ecuación de continuidad, en su esquema de no conservación de masa:

$$V \frac{\partial y}{\partial x} + y \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = 0$$

La ecuación de momento, en su esquema de conservación de momento:

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0$$

La ecuación de momento, en su esquema de no conservación de momento:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \left(\frac{\partial y}{\partial x} - S_0 + S_f \right) = 0$$

, en todas ellas despreciando las contribuciones laterales del flujo, la tensión del viento y las pérdidas energéticas de los remolinos. Asimismo, se ha considerado que el coeficiente de momento o coeficiente de Boussinesq, que representa la distribución no uniforme de la velocidad en una sección transversal del canal como $\beta = 1$.

1.5 Coeficiente de rugosidad de Manning

Las pérdidas energéticas que una corriente experimenta a través de un tramo en particular comúnmente se resumen a través del coeficiente de rugosidad de Manning. Si bien se entiende que este valor varía considerablemente con la magnitud de la descarga, y la condición de la vegetación en el lecho, por mencionar algunos factores, una aproximación al mismo permite representar los cambios reflejados en el nivel de la superficie del agua, en respuesta a la pérdida energética por fricción (Hicks & Mason, 1998).

Existen varios métodos para lograr una estimación del coeficiente, sin embargo, un procedimiento que goza de mucha aceptación se representa a través de la ecuación de W.L. Cowan (Cowan, 1956), detallada a continuación:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m_5$$

, en donde n_0 es un valor básico de n para un canal recto, uniforme y liso con los materiales naturales involucrados, n_1 es un valor que debe agregarse al n_0 para corregir el efecto de las rugosidades superficiales; n_2 considera las variaciones de forma y tamaño de las sección transversal del canal, n_3 considera las obstrucciones, n_4 considera la vegetación y las condiciones de flujo, y m_5 es un factor de corrección de los efectos de meandros² (Chow, Open Channel Hydraulics, 1994).

1.6 La capa límite

La *capa límite* es un concepto hidráulico que puede definirse como el espesor δ cuya magnitud es la distancia normal desde la superficie del contorno para la cual la velocidad v_1 es igual al 99% de la velocidad límite v_0 , hacia la cual la curva de distribución de velocidades en la capa límite se aproxima asintóticamente (Chow, Open Channel Hydraulics, 1994). Se resume a través de la siguiente expresión:

$$\delta = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{v}{v_1}\right) dy$$

, en donde v es una velocidad a una distancia y desde la superficie del canal, y v_1 es la velocidad en el borde de la capa límite.

El concepto de capa límite permite comprender la variación de las rugosidades en el lecho de la corriente, en la medida que el caudal se incrementa.

1.7 Curva de descarga

La generación de series históricas de registros fluviales de una corriente de agua inicia con la identificación de una sección transversal en un punto de control, y con ello, brindar las facilidades para la medición de un amplio rango de valores. Algunas mediciones del caudal que discurre por una sección de control pueden realizarse mediante vadeo; otras, cuando los niveles y velocidades que desarrolla la corriente no permiten la medición por vadeo, es necesario disponer de una estructura que permita al hidromensor³ realizar la mediación sin necesidad de exponerse a la corriente de forma directa (World Meteorological Organization, 2010).

No obstante, si bien pueden existir las facilidades para realizar los aforos que permitan inferir los caudales que lleva la corriente en el intervalo que dure la medición, resultaría imposible detallar la evolución de las avenidas a pasos de tiempo convenientes. Ante ello, ha sido práctica común el medir los niveles de la corriente, por lo simple y rápido de la actividad, y posteriormente un especialista en hidráulica fluvial, busca una relación *tirante-*

² Según la morfología del canal, los ríos pueden ser rectilíneos, meandriformes, anastomosados y trenzados. Los ríos meandriformes son ríos con alta sinuosidad, siendo esta última la relación entre la longitud del canal y la del valle fluvial. Se considera a un río como meandriforme cuando su sinuosidad supera el valor de 1.5 (Arche, 2010).

³ El hidromensor puede ser definido como un técnico capacitado para realizar observaciones hidrométricas mediante aforos, ya sea por vadeo, suspensión, u otros métodos admitidos.

caudal que permita asociar los niveles de escala limnimétrica⁴ a los caudales que discurren por la sección de control.

En términos generales, la expresión que relaciona los caudales en función de la lectura de escala se detalla a continuación:

$$Q = C \cdot (H - h_0)^n$$

, en donde Q es el caudal, H es la altura de la superficie del agua, medida en las escalas limnimétricas, h_0 representa la altura para la cual no existe flujo y n es la pendiente de la curva, que en escala logarítmica representa una línea recta.

1.8 Vertedores

Para la descripción del comportamiento del flujo sobre estructuras de alivio, considerado como crítico, se han desarrollado muchas ecuaciones experimentales (Chow, Open Channel Hydraulics, 1994), sin embargo, la mayor parte de las ecuaciones pueden expresarse en la forma general:

$$Q = CLH_e^{3/2}$$

, siendo C el coeficiente de descarga, L la longitud efectiva de la cresta del vertedor y H es la altura total de energía sobre la cresta, incluida la altura de velocidad.

⁴ La escala limnimétrica es una regla graduada que sirve de referencia del nivel de la corriente de agua. Normalmente, en una sección transversal de un río, es necesario colocar diversas escalas limnimétricas, de modo que entre todas, se puedan conocer tanto los niveles bajos de los flujos, así como los altos.

METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

2.1 Tipo de investigación realizada

El enfoque de la investigación es de tipo cuantitativo, recurriendo a registros del comportamiento de los niveles de la corriente, asociarlos a una distribución estadística de valores extremos, y frente a ello, estimar los niveles de la corriente que puedan representar un peligro, de forma objetiva.

2.2 Variables e indicadores

La investigación ha requerido de la modelización hidráulica para determinar la respuesta de la corriente en su discurrir hasta el Valle de Sula, recurriendo a la identificación de la variable independiente, los registros fluviales de interés; la variable dependiente, por su parte, está determinada por el comportamiento hidráulico de los niveles de la corriente, hasta su arribo a la zona de interés.

Como indicador de los umbrales de alerta, se ha recurrido a la corroboración a través de los resultados de la modelización hidráulica, de la capacidad hidráulica que poseen los canales de alivio.

2.3 Recolección y organización de información secundaria

Muchas fueron las fuentes de información que sirvieron de sustento a la conceptualización del modelo hidráulico que permitiera realizar el tránsito hidrológico de los volúmenes de las diversas crecidas de interés.

2.3.1 Registros climáticos disponibles

Los registros climáticos en la superficie de aportación, y sus inmediaciones, corresponden a diversas estaciones climatológicas de Honduras⁵ (SERNA & UNAH, 2014), en su mayoría, y dos de Guatemala⁶ (Sales Rodríguez, 2012).

Para la superficie de aportación definida, se realizaron varios procesos de interpolación a través de Sistemas de Información geográfica, para poder estimar la distribución de las variables climatológicas en forma espacialmente continua, facilitando la estimación en la totalidad de la cuenca.

2.3.2 Registros de los caudales máximos observados

Durante la investigación, fue posible obtener algunos registros fluviales de la Estación Hidrométrica Puente Chamelecón, en forma de caudal máximo anual, gracias a representantes de la CCIVS y la DGRH. Esta serie consta de aproximadamente 24 registros que principian desde 1966 hasta 1998, que fue cuando las observaciones cesaron una vez

⁵ Los registros de pluviométricos utilizados corresponden a un período de 1975 a 2010.

⁶ Las bandas pluviográficas analizadas, así como las observaciones de precipitación media mensual, corresponden a un período de 1991 hasta 2010.

que la crecida, en respuesta al paso del Huracán Mitch, dejó fuera de servicio las instalaciones.

Asimismo, se brindaron las ecuaciones de descarga para las estaciones hidrométricas de El Tablón y Puente Chamelecón, que sirvieron de apoyo para el traslado de caudales máximos a niveles de escala limnimétrica.

2.3.3 Registros de los caudales máximos observados

La representación numérica del terreno, para la estimación de la superficie de aportación, se apoya en el modelo digital de terreno de la *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (NASA & METI, 2011), en su segunda versión, así como el modelo digital de terreno con una resolución de 5 m obtenido por la COPECO a través del PGRD, para los municipios colindantes con el Valle de Sula, en su parte baja, ambos en proyección Universal Transversal Mercator y Dátum WGS84.

El modelo numérico del terreno permitió la determinación de los patrones de drenaje de cada subcuenca, a través de herramientas de Sistemas de Información Geográfica, así como la derivación de parámetros relevantes para una posterior estimación de las avenidas mediante un modelo conceptual lluvia-escorrentía, si en un futuro se desea realizar la labor de orientar los umbrales a pronósticos hidrometeorológicos.

2.3.4 Curvas de descarga

La CCIVS, a través del Jefe de Planificación, proporcionó las curvas de descarga vigentes para las estaciones hidrométricas El Tablón, especificando que su representación es válida para el período de 1992 a 2010.

La curva de descarga vigente para Puente Chamelecón fue obtenida de los registros de la serie histórica de 1996 a 2005, atendida por la Dirección General de Recursos Hídricos. No obstante, se conoce que la sección de control posee un lecho inestable y muy arenoso (Electricité de France, 2003).

2.3.5 Levantamiento LiDAR en el Valle de Sula

En 2015, el Gobierno de la República de Honduras a través de la Comisión Permanente de Contingencias (COPECO), mediante el Proyecto Gestión de Riesgos de Desastres (PGRD), realizó la adquisición de un levantamiento topográfico mediante tecnología LiDAR en la mayor parte del Valle de Sula, con una extensión aproximada de 2 420 kilómetros cuadrados.

Esta representación numérica del terreno posee una resolución espacial de 1 metro por píxel, permitiendo definir geoméricamente el intrincado sistema de drenaje del Valle de Sula, que en términos generales, podría categorizarse en tres tipos: corrientes naturales, canales de alivio y sistemas de riego.

2.4 Análisis y descripción de los productos finales

2.4.1 Distribución espacial de los registros climáticos disponibles en la superficie de aportación y sus inmediaciones

Las variables hidrometeorológicas de interés corresponden a la precipitación, humedad relativa y la temperatura, todas a nivel medio anual. Se han analizado un total de 12 estaciones de observación que poseen estas variables hidrometeorológicas.

Para poder representar la distribución espacial de los registros climáticos de interés, se ha recurrido a las herramientas de interpolación⁷ contenidas en software especializado para el manejo de información espacial. Los resultados de estos procesos, brindan la información en formato ráster⁸, permitiendo estimar los valores promedios cómodamente.

En el caso de la temperatura, se recurrió a la estimación del gradiente adiabático⁹ de la atmósfera, en su desarrollo vertical (Petterssen, 1941), como primera aproximación. Posteriormente, se trasladó la temperatura media anual de cada estación hidrometeorológica a una elevación de referencia, atendiendo el gradiente adiabático estimado, permitiendo la representación de las condiciones climáticas de carácter local, sin la influencia de la elevación.

Con lo anterior, mediante un proceso de álgebra de mapas¹⁰, el ráster de temperatura a nivel de referencia incorpora una interpolación bivariada, representada por la distribución espacial de la data, así como la influencia de la elevación sobre los registros.

En el caso de la humedad relativa media anual, ésta fue obtenida en formato ráster del informe *Evaluación del recurso hídrico en su régimen natural, Honduras, C.A.* (UNAH, SERNA, & DGRH, 2014).

2.4.2 Análisis de frecuencia de los caudales máximos observados en río Chamelecón en la Estación Hidrométrica Puente Chamelecón

Los registros de caudales sobre río Chamelecón, en su arribo al Valle de Sula, han sido observados en la Estación Hidrométrica Puente Chamelecón, sin embargo, con el paso del Huracán Mitch, las observaciones para representar la relación tirante-caudal no mantuvieron la constancia con la que se venían desarrollando, después de ocurrido este evento natural (Electricité de France, 2003).

⁷ El procedimiento de inferir información en puntos sin muestreo, buscando la predicción de la variable, es conocido como interpolación (ESRI, 2016).

⁸ En su forma más simple, un ráster consta de una matriz de celdas (o píxeles) organizadas en filas y columnas (o una cuadrícula) en la que cada celda contiene un valor que representa información, como la precipitación. Los rústers son fotografías aéreas digitales, imágenes de satélite, imágenes digitales o incluso mapas escaneados (ESRI, 2016).

⁹ El gradiente adiabático es la razón de cambio de temperatura, experimentada por las masas de aire, en su desarrollo vertical.

¹⁰ Herramienta que permite operaciones algebraicas entre capas de formato ráster, permitiendo expresiones aritméticas y hasta asignar condicionantes.

La función de distribución de valores extremos Log-Pearson Tipo III se utilizó en el análisis de crecidas máximas observadas a nivel anual, en vista que es la función de distribución de caudales picos sugerida para su adopción según el *Water Resources Council* (Benson M. , 1968).

Asimismo, bajo los lineamientos del WRC, se realizó un ajuste de los datos considerados como atípicos, para su tratamiento, y procurar una mayor desviación entre los datos observados y la función de densidad adoptada. También fueron definidos los límites entre los cuales fue considerado un 95 % de confiabilidad de los resultados de la distribución.

2.4.3 Análisis hidráulico de los caudales de avenida de río Chamelecón

2.4.3.1 Modelo hidráulico conceptual de río Chamelecón

Para la estimación del comportamiento de los flujos de la avenida se ha recurrido a la utilización del modelo hidráulico HEC-RAS en su versión 5.0.6. La simulación de los hidrogramas de avenida se ha realizado en condiciones de flujo no permanente¹¹, incorporando diversos hidrogramas estimados para río Chamelecón, recurriendo al módulo de simulación de flujo bidimensional, en condición inestable.

La simulación fue realizada desde aguas arriba de la E.H. El Tablón hasta aguas abajo de la confluencia de río Chamelecón con el Canal de Chotepe, en las cercanías de la comunidad Campo Copén Viejo, que incorpora los flujos del alivio de Filopo. El tamaño de las celdas de análisis varía de 50 metros, hasta 2 metros en donde la geometría se vuelve más intrincada, teniendo un total de 87 474 celdas de procesamiento hidráulico.

La representación hidráulica de los canales de alivio, por su parte, responde a las soluciones brindadas por el software para un vertedor de demasía, con su base a nivel del lecho. Únicamente se tiene conocimiento, por conversaciones con consultores que apoyaron a la CCIVS en el diseño de estos canales, de la capacidad con la que fueron concebidos.

Con respecto a la simulación de los diversos escenarios de crecidas, se incorporó un amplio rango de hidrogramas de crecida, recurriendo a crecidas con una duración de doce horas, permitiendo brindar las bases para un futuro mejoramiento de la herramienta y evaluar su desempeño a través de la observación de eventos posteriores.

2.4.3.2 Estimación del coeficiente de rugosidad de Manning

De las visitas de campo, se pudo obtener una valiosa apreciación de las condiciones en las que se encuentra río Chamelecón, así como sus canales de alivio. Esto último motivó a realizar una primera aproximación a través de la interpretación fotográfica y posteriormente, confirmar la estimación con el método de Cowan, tal como se detalló anteriormente.

¹¹ La condición de flujo no permanente se considera cuando la profundidad del flujo cambia a lo largo del tiempo, esto es primordial cuando los volúmenes que acarrea la crecida a través del tiempo determinan la extensión y calado de los desbordamientos, especialmente en zonas llanas.

2.4.3.3 Calibración del modelo hidráulico conceptual

La verificación de la representación hidráulica del modelo, conceptualizado para describir el comportamiento de los niveles de río Chamelecón, fue logrado a través de la incorporación de la crecida correspondiente al paso del Huracán Mitch. El proceso de inspección de la representatividad hidráulica de la planicie inundable fue corroborado con la identificación de los sectores afectados durante el Huracán Mitch.

2.4.4 Tránsito hidráulico de los caudales de avenida

El hidrograma de avenida desde la E.H. El Tablón fue transitado hidráulicamente hasta la parte baja de la ciudad de La Lima, aguas abajo de la confluencia de río Chamelecón con el Canal de Chotepe, cerca de la comunidad Campo Copén Viejo, recurriendo al flujo bidimensional enteramente.

2.4.5 Tiempos de arribo de los diversos caudales de avenida

La búsqueda de una relación entre la magnitud de la crecida y los tiempos de arribo a Valle de Sula, desde la estación hidrométrica aguas arriba ha sido posible a través de diversas simulaciones hidráulicas para diferentes magnitudes del caudal de avenida.

Los coeficientes de rugosidad de Manning han sido incorporados espacialmente, para poder representar la oposición al flujo que constituyen las vegas de alivio, actuando estas a modo de amortiguamiento temporal de los volúmenes que el canal principal no puede acarrear. Lo anterior ha permitido obtener diferentes tiempos de arribo de la onda de crecida para diversas magnitudes del caudal, deduciendo una relación matemática que brinda estos tiempos en función de las lecturas de escala o los caudales.

2.4.6 Estimación de los caudales de avenida que representan un peligro para las estructuras de alivio

La simulación del comportamiento de las avenidas ha permitido estimar los desempeños hidráulicos de los canales de alivio, y revisar los sitios donde los niveles de la corona de los bordos resultan críticos para poder contener los flujos. A partir de ello, se consideraron los caudales que debía llevar la corriente de agua, inmediatamente aguas arriba de la sección de ingreso del alivio, para provocar que los niveles de la superficie del agua a lo largo de las estructuras de alivio fuesen superados.

Identificados estos caudales críticos en río Chamelecón, se procedió a estimar el caudal en la sección de control de la estación hidrométrica aguas arriba, que permitiera la generación de los flujos en las inmediaciones de los alivios; y con estos los niveles de escala limnimétrica.

2.4.7 Estimación de los niveles de la corriente de agua, en la Estación Hidrométrica El Tablón, asociados a los caudales de avenida que exceden la capacidad hidráulica los alivios en el Valle de Sula

Para poder estimar los niveles en las lecturas de escala en la E.H. El Tablón, fue necesario deducir un factor de atenuación de las crecidas aguas arriba hasta su arribo al Valle de Sula, y realizar una estimación inversa; esto es, calcular los caudales aguas arriba, conociendo como se atenúan al llegar al inicio del valle.

Posteriormente, conociendo los caudales trasladados, se recurrió a la curva de descarga proporcionada por la CCIVS correspondiente a la estación hidrométrica aguas arriba, buscando el nivel de lectura de escala conociendo el caudal que transita por la sección de control.

2.4.8 Análisis de frecuencia de valores extremos de los caudales críticos de río Chamelecón que afectan las estructuras de alivio

La estimación de los caudales que debe transportar río Chamelecón para que los canales de alivio se vean superados permitió ajustarlos a la función de distribución de valores extremos Log-Pearson tipo III, asociándoles una probabilidad de excedencia. Conociendo la probabilidad de excedencia, podemos inferir el intervalo de recurrencia o período de retorno, y con ello analizar el dimensionamiento de obras, sean estas estructurales o no.

2.4.9 Evaluación del riesgo según la probabilidad de excedencia de los caudales críticos para las estructuras de alivio

La estimación del riesgo, en un intervalo de tiempo definido, puede servir de apoyo a la pronta toma de decisiones. Frente a ello, se ha considerado como recurso, la estimación del riesgo asociado a la probabilidad de excedencia de los eventos, y la posibilidad de que estos acontezcan en un determinado período de tiempo.

Se tiene conocimiento que las estructuras de alivio fueron diseñadas para un período de retorno de 10 años, según información brindada por la Comisión para el Control de Inundaciones del Valle de Sula, por lo que sería natural pensar en probabilidades de excedencia para un período de ocurrencia de similar intervalo.

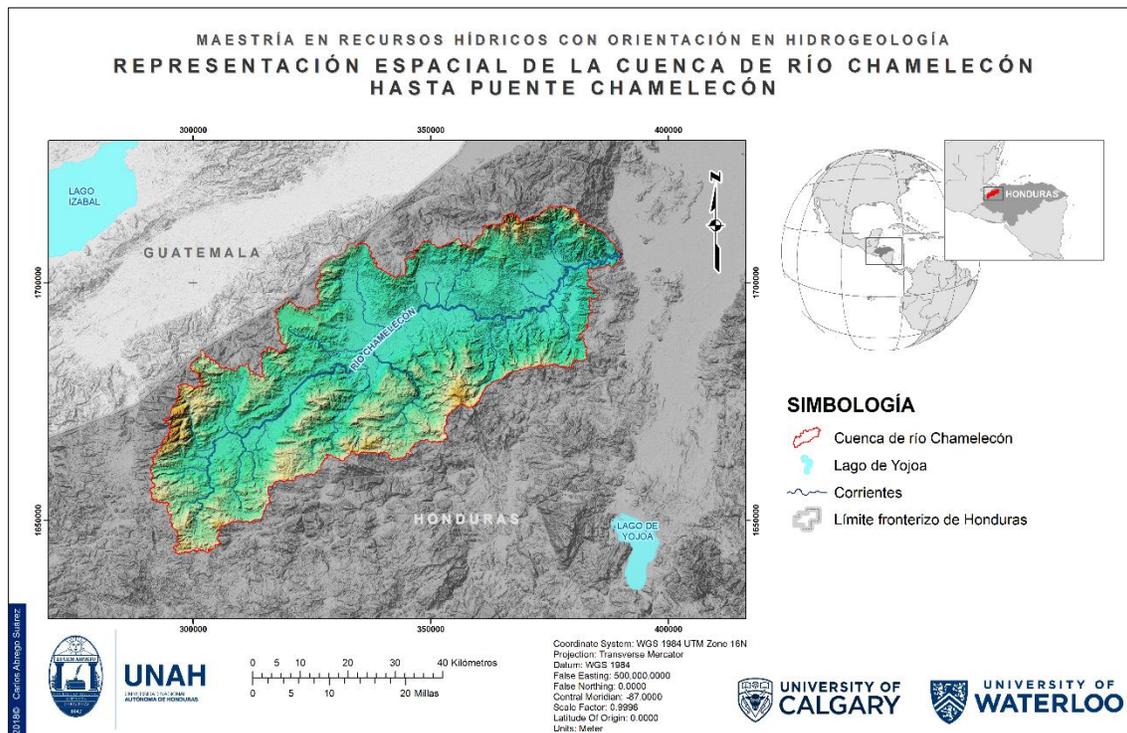
RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 La superficie de aportación

3.1.1 Delimitación de la superficie de aportación

El área de contribución de la subcuenca fue estimada en $3\,256.5\text{ km}^2$ hasta el sitio definido como control¹². La delimitación de la subcuenca se proporciona a través de la siguiente ilustración:

Ilustración 3. Distribución espacial de la precipitación media anual sobre la superficie de aportación.



3.1.2 Características morfométricas de la superficie de aportación

Algunas de las características morfométricas de la subcuenca se detallan a continuación:

Tabla 1. Características morfométricas de río Chamelecón hasta el punto de control al inicio del Valle de Sula.

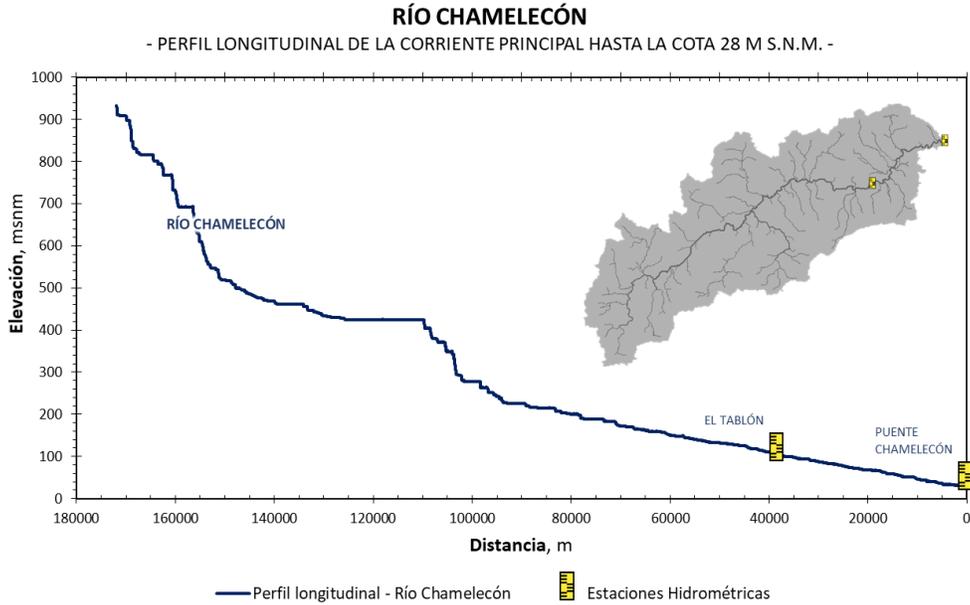
CORRIENTE	COORDENADAS DEL CONTROL			LONGITUD, km	ÁREA, km ²	PERÍMETRO, km	S, m/m	I _C	R _C	R _e
	X, m	Y, m	Z, msnm							
Chamelecón	390 468	1 705 908	28	172.1	3 256.5	420.0	0.005	2.08	0.23	0.57

Las razones de compacidad, circularidad y elongación nos evidencian una subcuenca de tipo alargada, por lo que podemos prever hidrogramas con un desarrollo menos abrupto y

¹² El control fue considerado en la Estación Hidrométrica Puente Chamelecón, con coordenadas UTM WGS84 390468 m E, 1705908 m N y una elevación de 28 m s. n. m., aproximadamente.

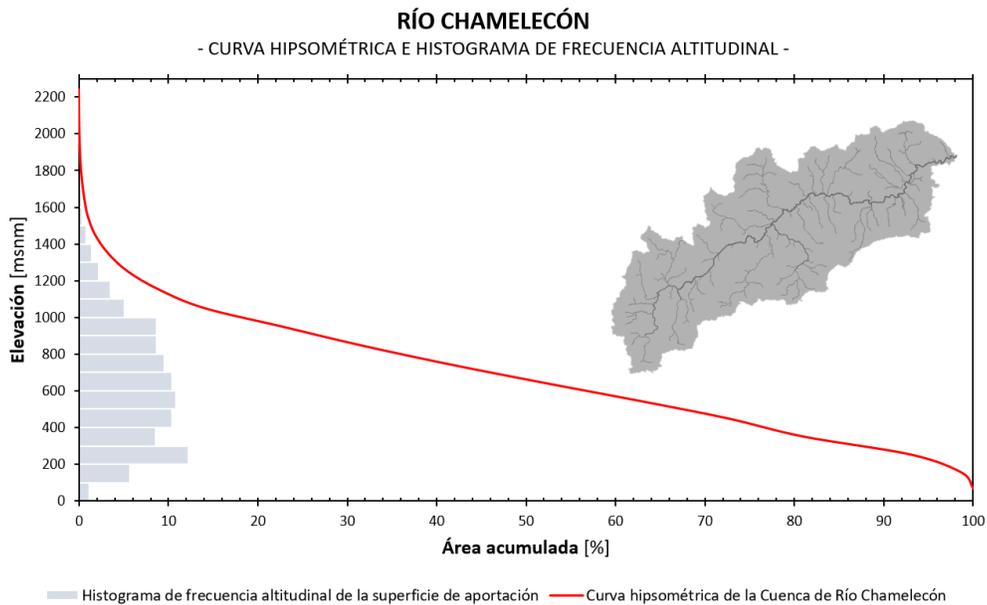
más sostenidos en el tiempo. Por su parte, el perfil longitudinal de la corriente principal se detalla a través del siguiente gráfico:

Gráfico 2. Perfil longitudinal de río Chamelecón hasta su arribo al Valle de Sula y la ubicación de las estaciones hidrométricas en la corriente.



Asimismo, un análisis posterior al perfil longitudinal y la evolución de la superficie de contribución nos ha permitido estimar la curva hipsométrica de la corriente y el histograma de frecuencia altitudinal, donde se evidencia un incremento gradual de las áreas de contribución.

Gráfico 3. Histograma de frecuencia altitudinal y curva hipsométrica de río Chamelecón hasta su arribo al valle.



3.2 Distribución espacial de los registros climáticos disponibles en la superficie de aportación y sus inmediaciones

Las variables hidrometeorológicas de interés están representadas por registros pluviales de corta duración, y a nivel medio anual, la precipitación, humedad relativa y la temperatura, tal como se detallan a través de las siguientes tablas:

Tabla 2. Registros pluviales promedio, a nivel mensual y anual, en las estaciones pluviométricas de interés.

ESTACIÓN	ELEVACIÓN	PRECIPITACIÓN ANUAL												
		MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	TOTAL
Chumbagua	215	88	230	181	164	204	131	105	82	51	43	30	35	1 344
El Jaral	638	193	378	445	411	443	315	197	148	122	91	62	71	2 876
El Modelo	31	75	159	131	120	170	179	152	126	80	61	43	40	1 336
La Entrada	448	122	264	176	200	230	127	77	63	36	30	23	41	1 389
La Unión	940	138	242	198	208	243	138	54	36	24	17	18	40	1 356
Quimistán	182	84	214	163	153	199	133	105	83	52	47	25	39	1 297
Santa Rita	43	89	205	182	160	199	137	116	93	62	52	30	43	1 368
Santa Rosa de Copán	943	157	234	166	170	238	139	66	47	33	23	23	50	1 346
Tela	10	86	150	210	203	216	343	367	342	242	176	111	71	2 517
Ulapa	334	134	294	203	233	250	135	64	34	18	13	11	23	1 411
Puerto Barrios GT*	22	150	271	422	340	295	300	291	233	205	117	100	124	2 848
La Unión GT*	943	104	230	196	217	250	187	83	62	36	35	30	28	1 458

* Estas estaciones corresponden a las localizadas en la República de Guatemala. Fuente: Evaluación de los recursos hídricos en su régimen natural a nivel nacional, UNAH-SERNA 2014.

Tabla 3. Registros de temperatura promedio, a nivel anual y mensual, en las estaciones pluviométricas de interés.

ESTACIÓN	ELEVACIÓN	TEMPERATURA MEDIA ANUAL												
		MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MEDIA
Chumbagua	215	27.4	27.1	26.3	26.5	26.6	25.3	24.2	23	22.8	23.5	25.3	26.4	25.4
El Jaral	638	25	24.3	23.7	23.8	23.8	22.9	21.8	20.9	20.8	21.6	23.3	24.5	23.0
El Modelo	31	28.9	28.6	27.9	27.9	28.1	27.1	25.9	25	24.7	25.3	26.7	27.8	27.0
La Entrada	448	26.1	25.6	24.8	24.8	25.1	23.8	22.6	21.6	21.5	22.3	24.2	25.5	24.0
La Unión	940	24.7	24	23.6	23.6	23.5	22.6	21.5	20.3	20.7	21.6	23.4	24.6	22.8
Quimistán	182	27.6	27.2	26.5	26.7	26.7	25.3	24.2	23.2	23.1	23.6	25.4	26.7	25.5
Santa Rita	43	28.4	27.8	27.3	27.2	27.5	26.3	25.4	24.7	24.3	25	26.6	27.7	26.5
Santa Rosa de Copán	943	22.1	21.6	20.8	21.1	21	19.9	18.7	17.4	17.5	18.5	20.6	21.9	20.1
Tela	10	27.4	27.7	27.1	27.3	27.6	26.3	25	24	23.8	24.2	25.8	26.8	26.1
Ulapa	334	28.5	27.7	26.7	26.7	26.9	25.9	24.7	23.6	23.3	24.2	26.3	28	26.0
Puerto Barrios GT*	22	29.2	29	28.5	28.6	28.6	27.5	25.9	25	24.6	25.3	27.3	28.5	27.3
La Unión GT*	943	24.3	23.3	22.8	23.1	22.7	22	21	20.2	20.4	21.4	23.1	24.3	22.4

* Estas estaciones corresponden a las localizadas en la República de Guatemala. Fuente: Evaluación de los recursos hídricos en su régimen natural a nivel nacional, UNAH-SERNA 2014.

En el caso de la humedad relativa media anual, esta ha sido obtenida de un producto¹³ en formato ráster, estimando un valor promedio de 77.8 % a nivel anual, para la totalidad de la superficie de aportación. La precipitación media anual ha sido estimada en 1 350 milímetros, aproximadamente, para obtener un volumen total de escurrimiento de 4 396 millones de metros cúbicos anuales.

La representación espacial de la precipitación media, la temperatura media y la humedad relativa promedio, todas a nivel anual, se proporcionan a través de las siguientes ilustraciones:

¹³ Obtenido como resultado de los análisis realizados a la información climática disponible durante la elaboración de la *Evaluación del Recurso Hídrico en su régimen natural* (UNAH, SERNA, & DGRH, 2014).

Ilustración 4. Distribución espacial de la precipitación media anual sobre la superficie de aportación.

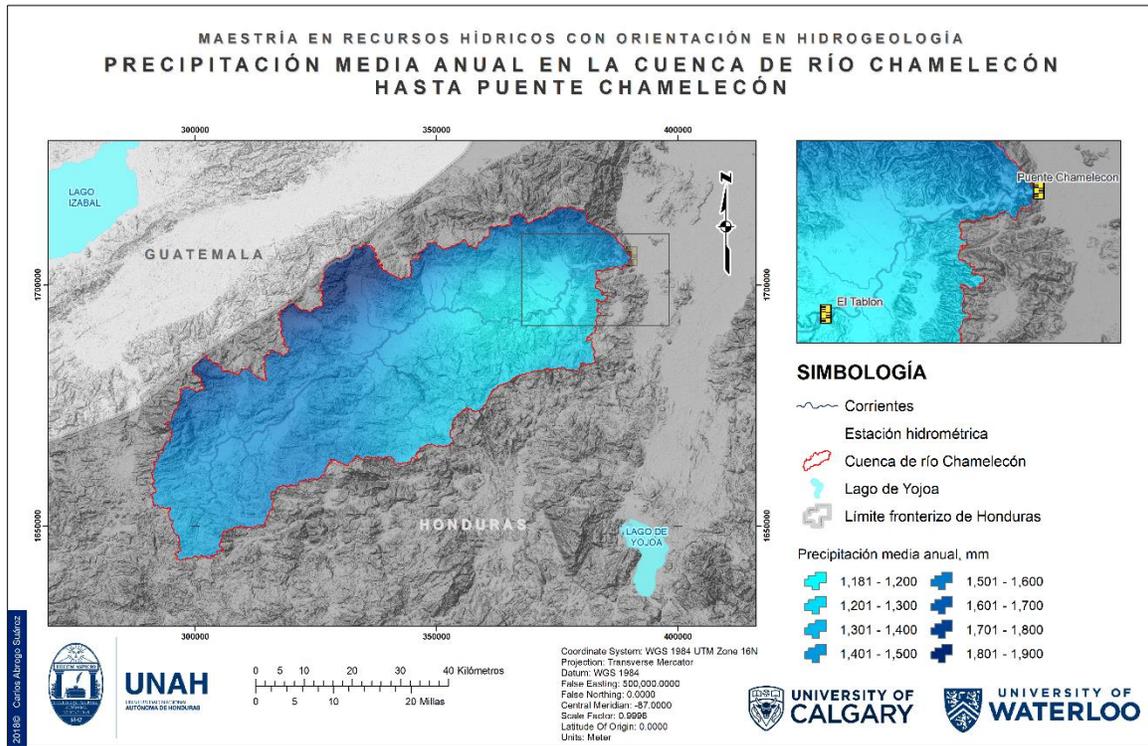


Ilustración 5. Distribución espacial de la temperatura media anual sobre la superficie de aportación.

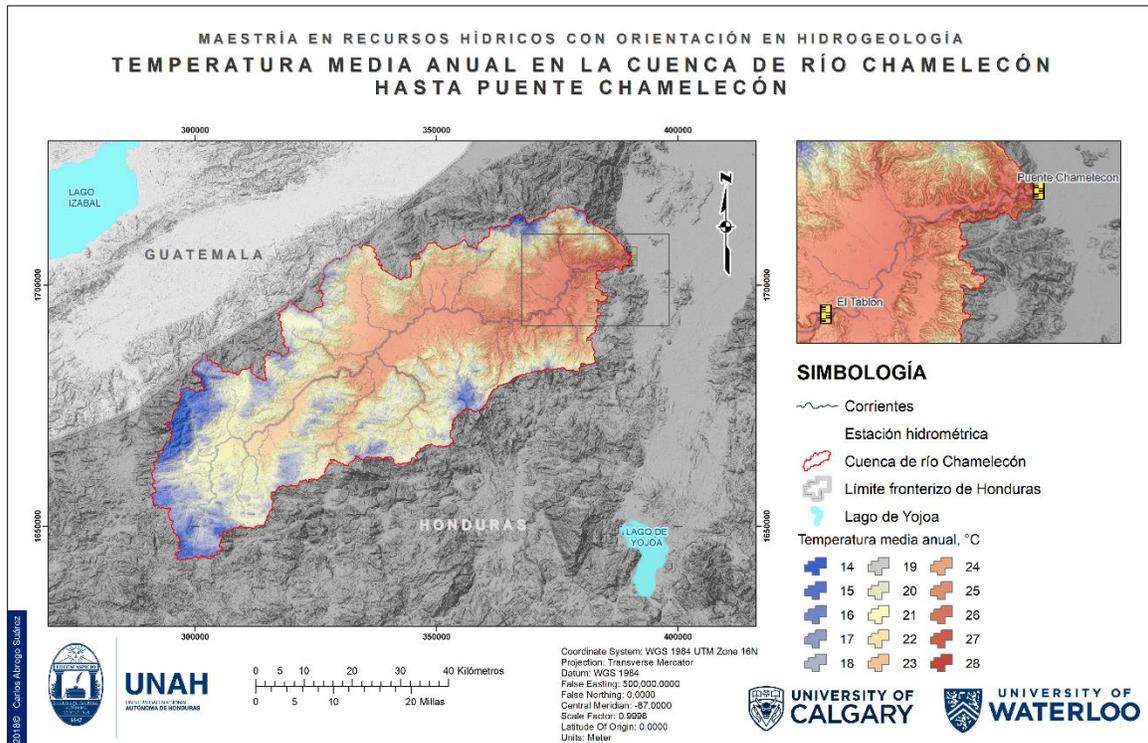
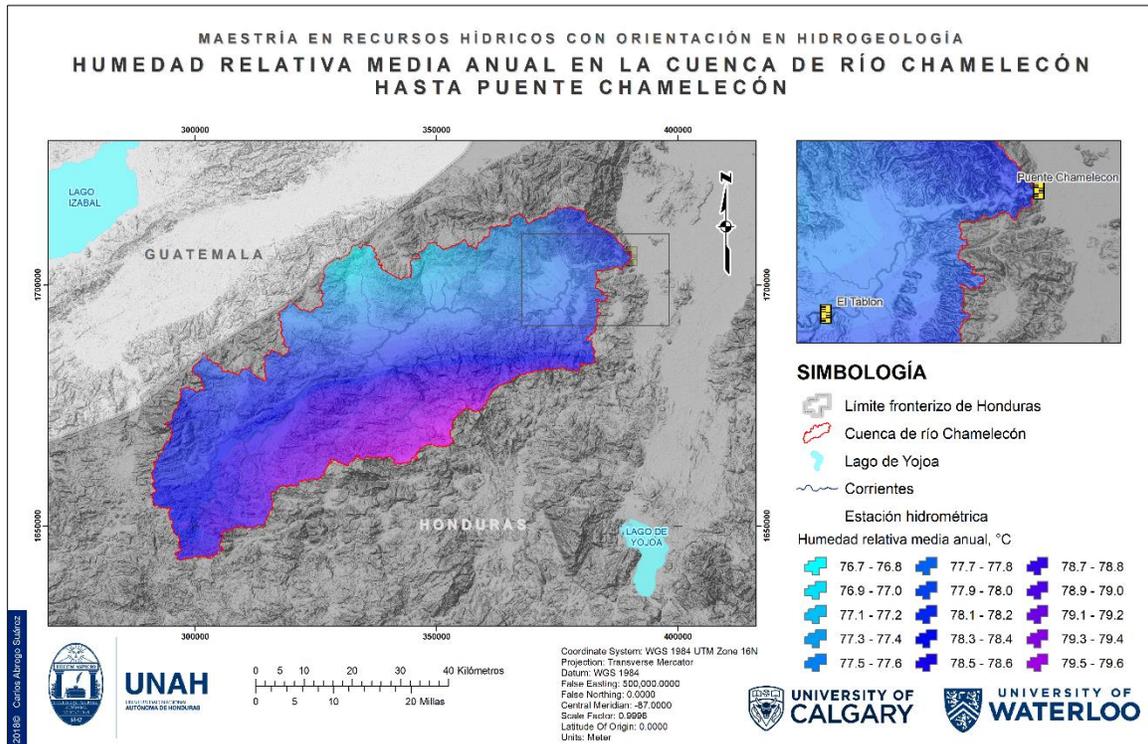


Ilustración 6. Distribución espacial de la humedad relativa media anual sobre la superficie de aportación.



Con respecto a la temperatura media sobre la superficie de aportación, un breve análisis del ráster generado, a través de herramientas de SIG, ha permitido su estimación en 23.1 °C, con un gradiente adiabático de aproximadamente -0.54 grados Celsius por cada 100 metros de elevación.

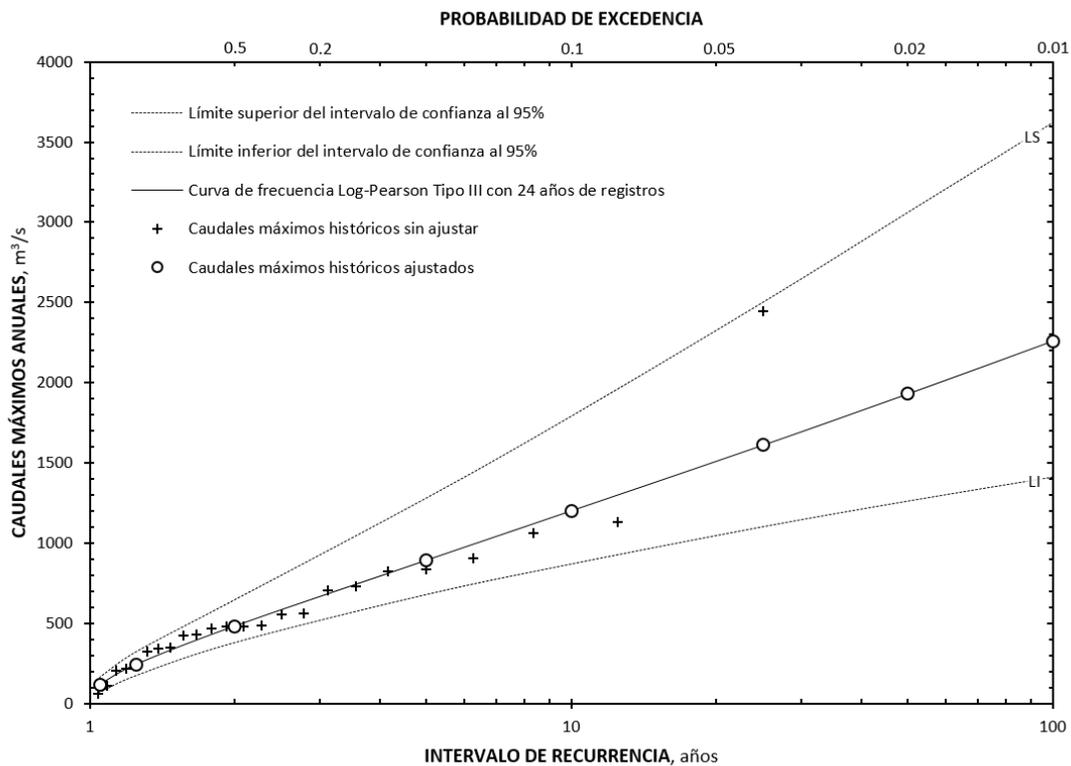
De la relación de temperatura en función de la elevación, incorporando el factor local de temperatura, se han revisado los valores máximos y mínimos, estimados en 27.1 °C y 13.3 °C, respectivamente, este último, localizándose en la cima de la Montaña Cerro Azul, en la Sierra del Espíritu Santo, ubicada en la zona núcleo del Parque Nacional Cerro Azul, con una elevación de 2 285 m s. n. m. para su cúspide.

La mayor temperatura, en términos promedio, ha sido estimada en el inicio del Valle de Sula, con una elevación aproximada de 28 m s. n. m.

3.3 Análisis de frecuencia de los caudales máximos observados en río Chamelecón en la Estación Hidrométrica Puente Chamelecón

El ajuste de los registros fluviales máximos anuales en una distribución de valores extremos Log-Pearson tipo III, en la Estación Hidrométrica Puente Chamelecón, se detalla a través del siguiente gráfico:

Gráfico 4. Análisis de frecuencia de los caudales máximos observados recurriendo a la función de valores extremos Log-Pearson tipo III.



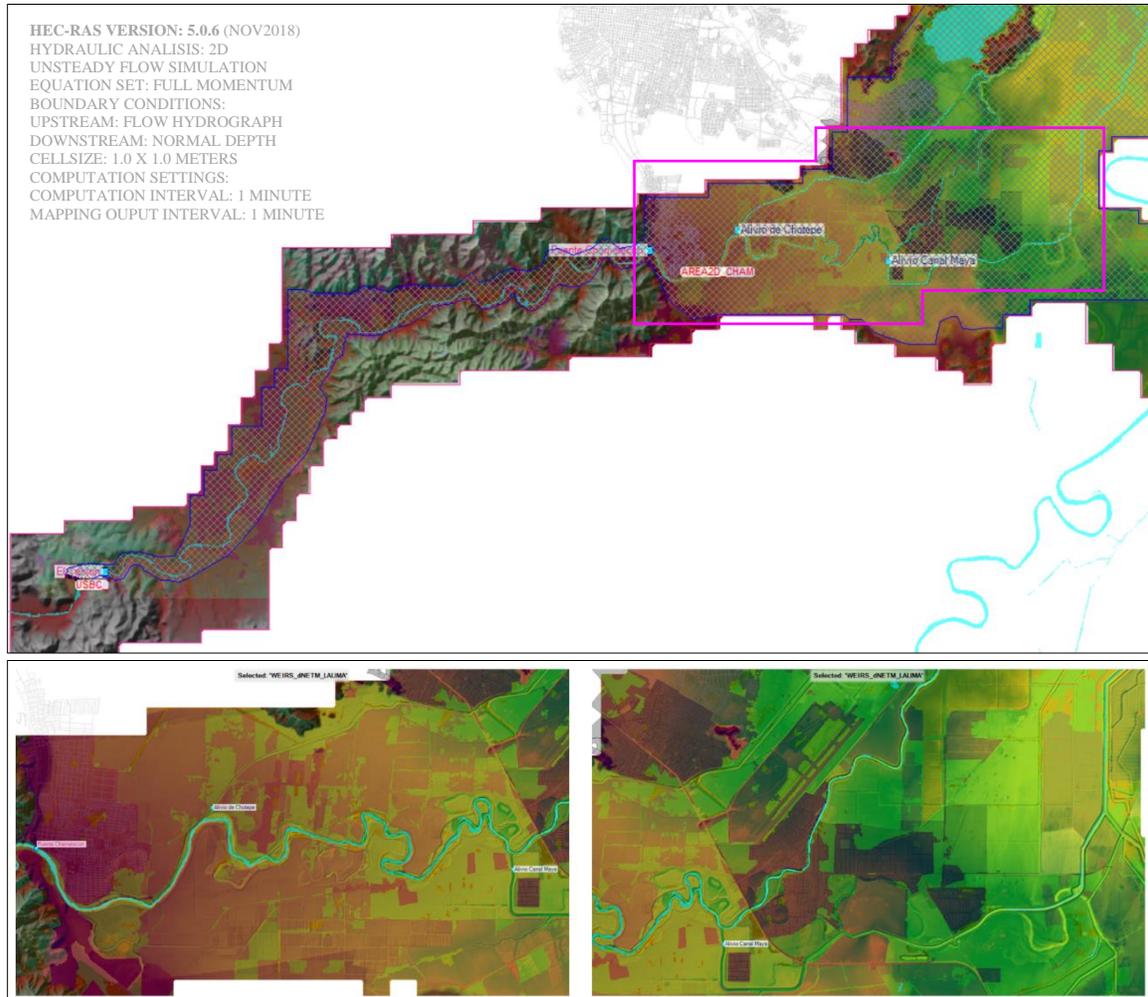
Una breve inspección a los registros fluviales máximos a nivel anual, en contraste con la función de distribución, permite observar que el valor atípico de $2447 m^3/s$ se aparta de la función adoptada, pudiendo interpretarse como una necesidad de tener más registros fluviales que incorporen más información para lograr un mejor ajuste. Esto último brinda elementos para sugerir que los resultados deben ser utilizados con cautela, a la espera de nueva información que pueda ser incorporada en un futuro análisis.

3.4 Análisis hidráulico de diversos caudales de avenida en río Chamelecón

3.4.1 Modelo hidráulico conceptual de río Chamelecón

Para la estimación del comportamiento de los flujos de la avenida se ha recurrido a la utilización del modelo hidráulico HEC-RAS en su versión 5.0.6. La simulación de los hidrogramas de avenida se ha realizado en condiciones de flujo no permanente, incorporando la totalidad de los hidrogramas estimados para río Chamelecón, recurriendo al módulo de simulación de flujo en condición inestable de forma bidimensional.

Ilustración 7. Esquema hidráulico conceptual en HEC-RAS. Se ha realizado el tránsito desde la Estación Hidrométrica El Tablón hasta aguas abajo de la confluencia de río Chamelecón con la reincorporación del canal de alivio Filopo. Abajo a la izquierda se detalla el recorrido sinuoso de la corriente en su arribo al valle y justo antes de la ciudad de La Lima. Abajo a la derecha se muestra el Aeropuerto Villeda Morales y la ciudad de La Lima, asimismo el Canal Maya que actúa a modo de alivio de los excesos que lleva río Chamelecón.



3.4.2 Estimación del coeficiente de rugosidad de Manning

La estimación del coeficiente de rugosidad en la sección de control representada por la Estación Hidrométrica El Tablón, a través del procedimiento conceptualizado por Cowan, es detallado mediante la siguiente tabla:

Tabla 4. Estimación del coeficiente de rugosidad de Manning a través del método de W.L. Cowan (1956).

n_i	Condición de cauce		n	Estimación	Observaciones
n_0	Material del cauce	Tierra	0.020	0.023	Gravas de pequeño tamaño, en conjunto con arenas.
		Rocas	0.025		
		Gravas Finas	0.024		
		Gravas Gruesas	0.028		
n_1	Grado de irregularidad	Suave	0.000	0.003	Irregularidades menores del lecho.
		Menor	0.005		
		Moderada	0.010		
		Severa	0.020		
n_2	Variación de las secciones transversales	Gradual	0.000	0.005	La transición entre secciones no presenta cambios bruscos.
		Alternadas ocasionalmente	0.005		
		Alternadas frecuentemente	0.010-0.015		
		Despreciable	0.000		
n_3	Efecto relativo de las obstrucciones	Menor	0.010-0.015	0.000	No se aprecia.
		Significativo	0.020-0.030		
		Severo	0.040-0.050		
		Baja	0.005-0.010		
n_4	Vegetación	Media	0.010-0.025	0.005	Poca o nula vegetación en lo que representa el cauce menor de la corriente
		Alta	0.025-0.050		
		Muy alta	0.050-0.100		
		Menor	1.000		
m	Grado de meandricidad	Apreciable	1.150	1.000	Despreciables.
		Severo	1.300		
		n	Coeficiente de rugosidad de Manning*		

* Coordenadas de la sección en la Estación Hidrométrica El Tablón: WGS84 370468 m E y 1694110 m N.

Las características de rugosidad en los bancos de desbordamiento han sido estimadas a través de una evaluación fotogramétrica con el manual *Roughness Characteristics of New Zealand Rivers* (Hicks & Mason, 1998), esto apoyado en las inspecciones realizadas en algunos sectores contiguos a la corriente. La distribución espacial de la rugosidad ha sido incorporada en el modelo hidráulico conceptual, obtenida de la cobertura forestal proporcionada en el *Anuario Estadístico Forestal* (Instituto Nacional de Conservación Forestal, 2014), tal como se detalla en las siguientes ilustraciones:

Ilustración 8. Distribución espacial de la cobertura forestal de la superficie de aportación, contenida en el Anuario Estadístico Forestal publicado en 2014.

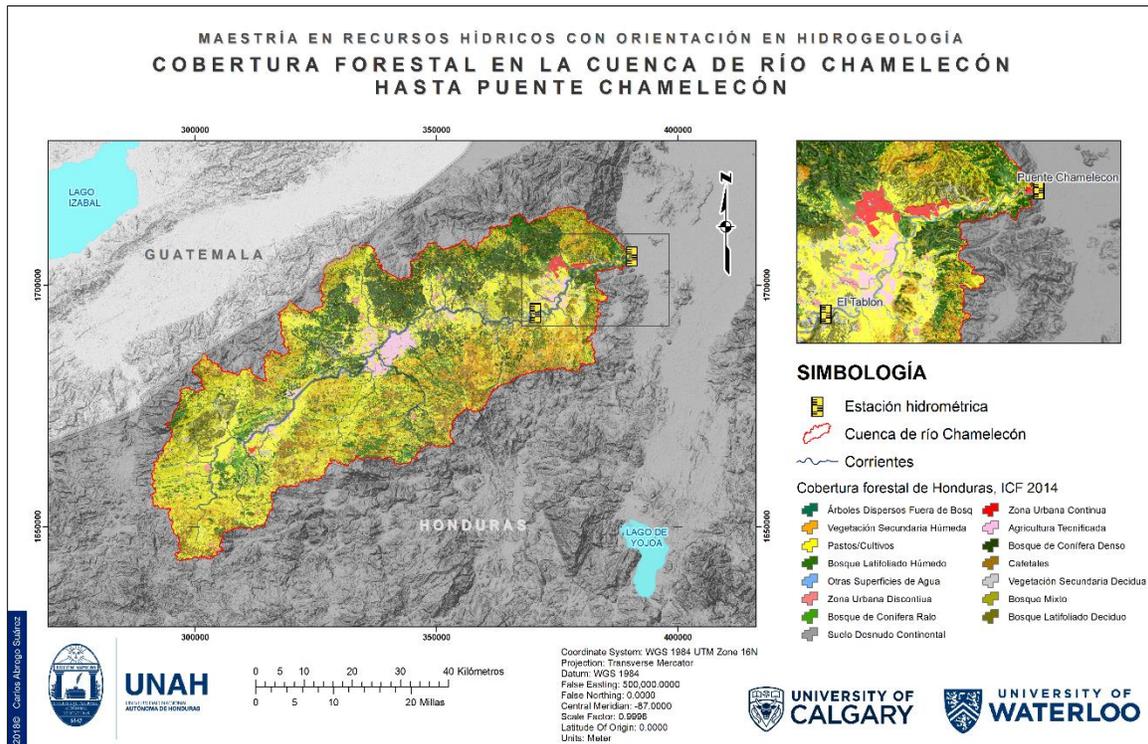
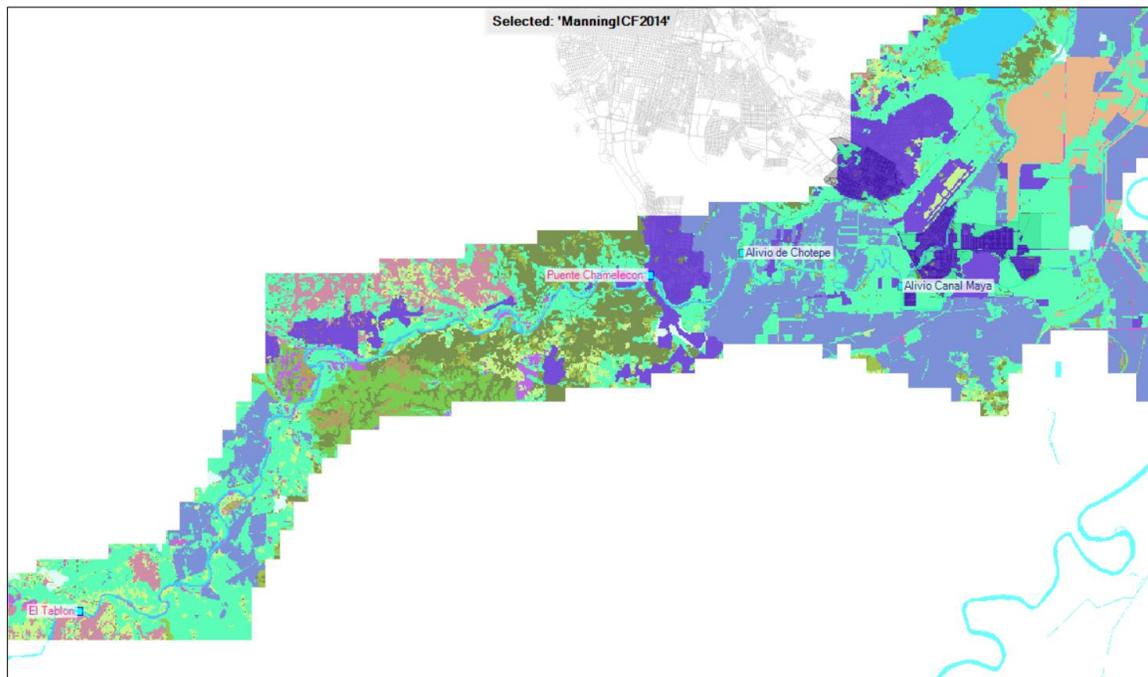


Ilustración 9. Representación espacial del coeficiente de rugosidad de Manning para el área de análisis hidráulico en HEC-RAS, en su módulo bidimensional. Los valores estimados se encuentran desde 0.015 hasta 0.120.

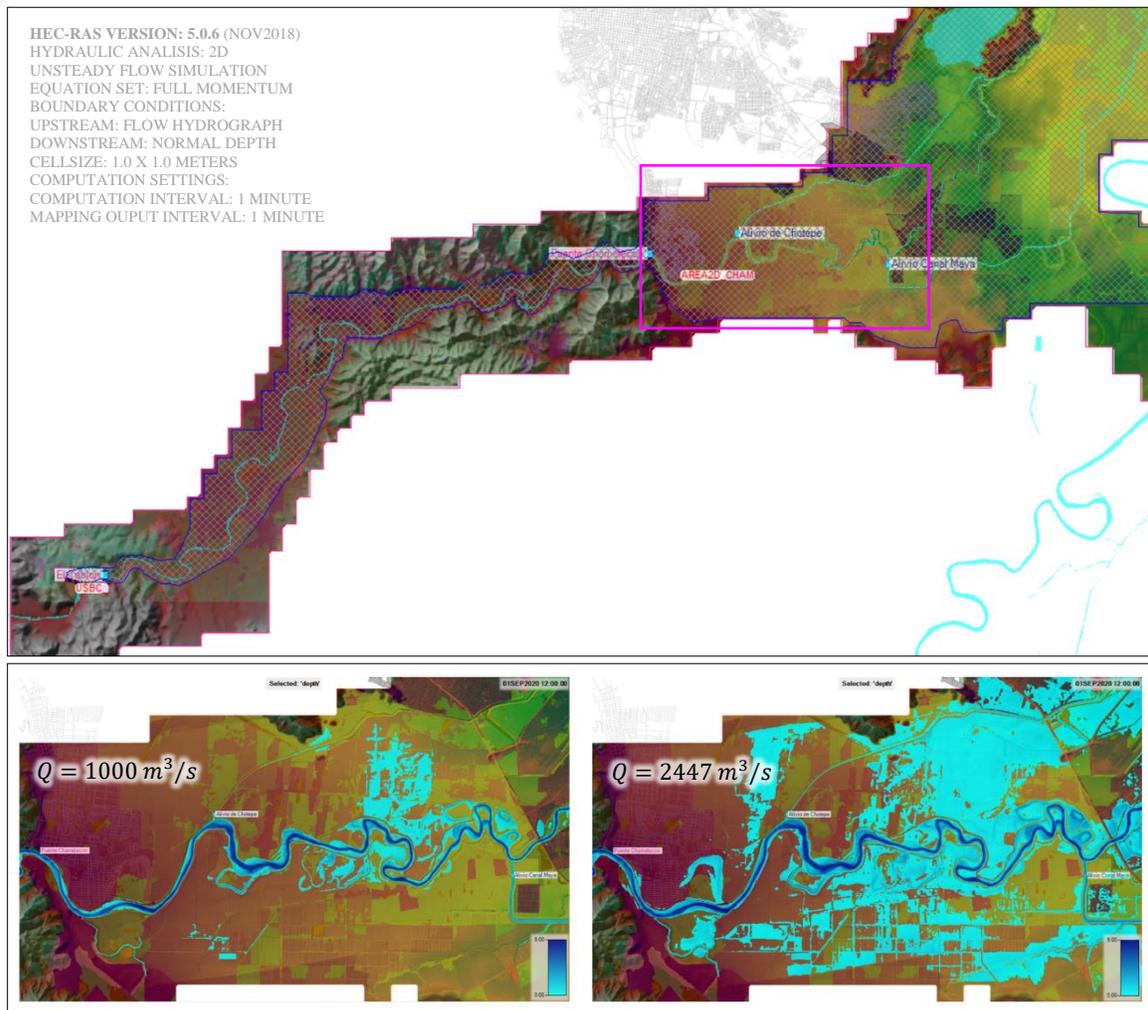


3.4.3 Calibración del modelo hidráulico conceptual

Tal como se discutió anteriormente, la serie histórica de crecidas máximas anuales aún puede considerarse con limitaciones¹⁴, e infortunadamente no se dispone de profundidades ni extensiones de los eventos más allá que por relatos y fotografías, que si bien son un recurso valioso, se necesita de un arduo trabajo de inspección en campo para poder tener una idea aproximada de la extensión de las inundaciones.

Los resultados de la modelización hidráulica para la crecida máxima observada en octubre de 1998, como respuesta de la cuenca al paso del Huracán Mitch, se asemejan a lo detallado por representantes de la CCIVS y algunos reportes de zonas afectadas.

Ilustración 10. Esquema hidráulico conceptual en HEC-RAS. El caudal de 2447 m³/s corresponde a la crecida máxima observada ante el paso del Huracán Mitch.



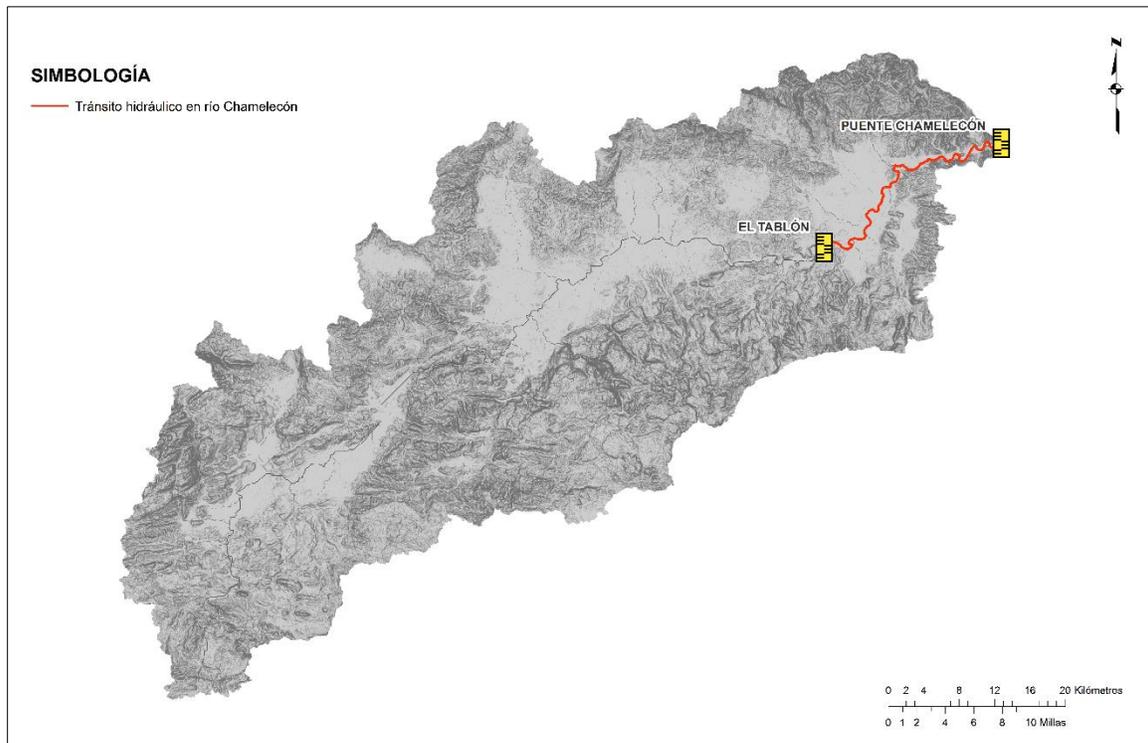
¹⁴ Las limitaciones no sólo corresponden a la longitud de la serie de caudales observados, también existe una fuente de error al pretender una calibración del modelo hidráulico si no se dispone de caudales máximos instantáneos, en vista que los caudales máximos observados pudieron haber sido atribuidos a un nivel de escala en el momento preciso de la observación y no necesariamente al nivel máximo de forma instantánea.

Aún no se dispone de información suficiente para poder brindar una valoración cuantitativa del desempeño del modelo hidráulico al momento de simular avenidas. Será necesario evaluar futuras avenidas y corroborarlas con elevaciones de la superficie del agua y georreferenciación de los límites de la inundación.

3.5 Tránsito hidráulico de diversos caudales de avenida en río Chamelecón

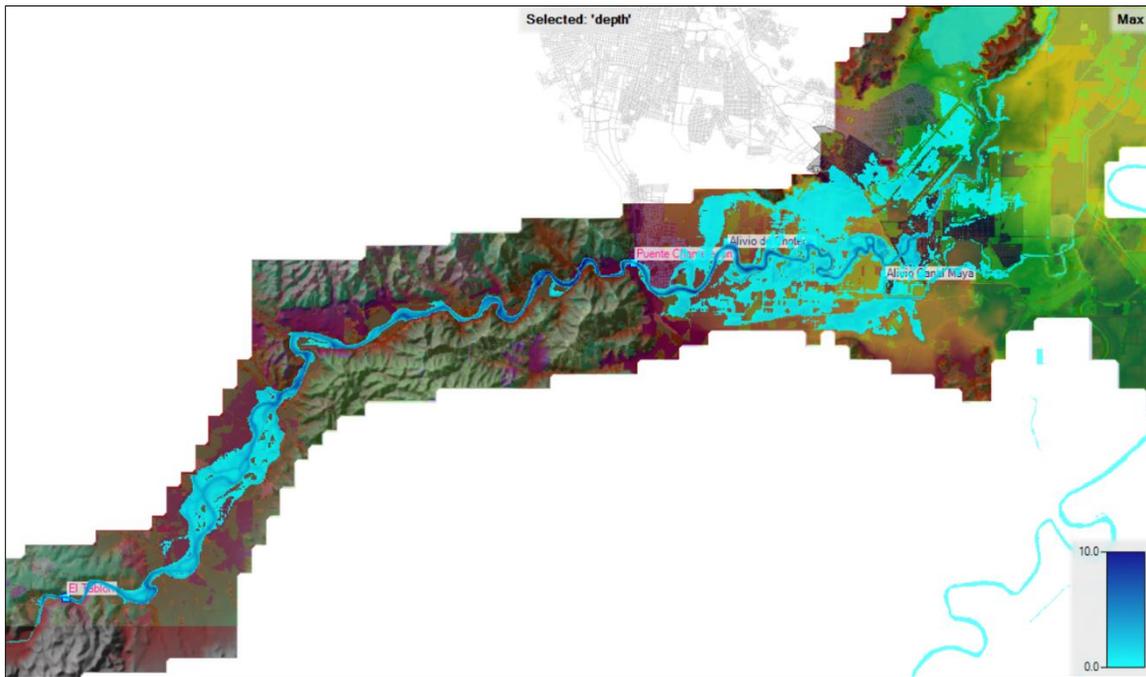
En el discurrir de los caudales de avenida de río Chamelecón, desde la Estación Hidrométrica El Tablón hasta el ingreso al Valle de Sula en Puente Chamelecón, sobre la CA-5, inicialmente la corriente dispone de amplias vegas que sirven de alivio temporal de los excesos que el cauce menor no puede transportar; posteriormente, existe un tramo de la corriente, antes de su arribo al valle, que la corriente fluye por un estrechamiento montañoso, limitando la atenuación del hidrograma en este tramo de casi 20 kilómetros.

Ilustración 11. Detalle del recorrido del tránsito hidráulico de las crecidas desde la E.H. El Tablón hasta la E.H. Puente Chamelecón, con un total de 38 kilómetros, aproximadamente.



En vista que es natural suponer que en la medida que la corriente recurre al cauce mayor, los tiempos de arribo se prolongan ya que existe mayor pérdida energética (Arche, 2010), se han realizado diversas simulaciones con diferentes caudales de avenida para poder disponer de un amplio rango de tiempos de arribo y con ello buscar una relación matemática que permita asociarlos a los caudales simulados.

Ilustración 12. Simulación del tránsito hidráulico de la onda de avenida para un caudal de $2447 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondiente a la crecida máxima observada durante el paso del Huracán Mitch en la Estación Hidrométrica Puente Chamelecón.



Finalmente, otra razón que podría dar explicación a la variación de los tiempos de arribo según los caudales simulados, es por el principio hidráulico de *capa límite*¹⁵, reduciendo los valores de rugosidad de la sección hidráulica en la medida que los caudales se incrementan.

¹⁵ La *capa límite* es un concepto hidráulico que puede definirse como el espesor δ cuya magnitud es la distancia normal desde la superficie del contorno para la cual la velocidad v_1 es igual al 99% de la velocidad límite v_0 , hacia la cual la curva de distribución de velocidades en la capa límite se aproxima asintóticamente (Chow, Open Channel Hydraulics, 1994).

3.6 Tiempos de arribo de los diversos caudales de avenida en río Chamelecón

Los resultados de los ejercicios de tránsito hidráulico para diversos caudales de avenida se resumen a través de la siguiente tabla:

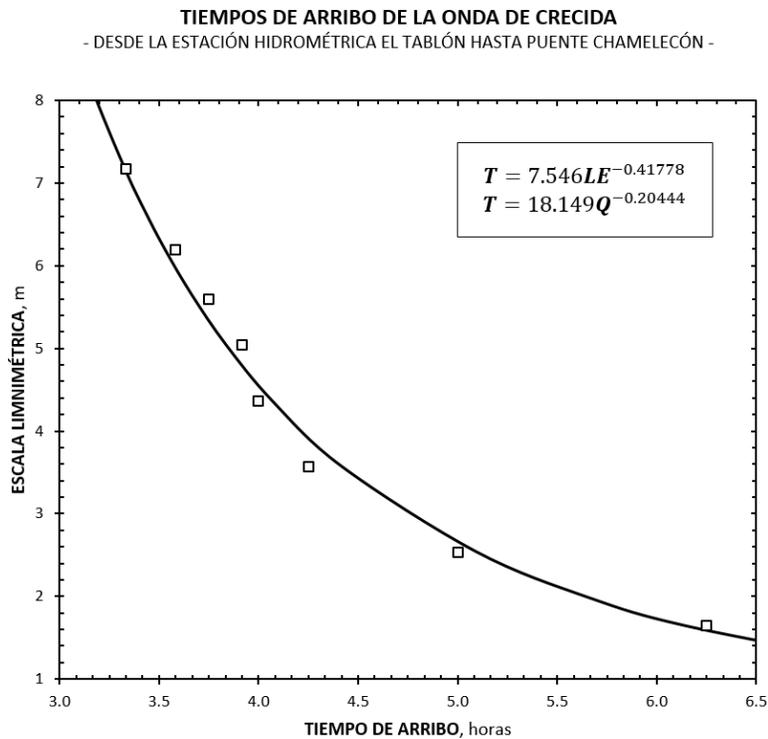
Tabla 5. Tiempos de arribo estimados para las diversas ondas de crecida analizadas desde la E.H. El Tablón hasta la E.H. Puente Chamelecón, al inicio del Valle de Sula.

Q, m ³ /s	200	500	1000	1500	2000	2450	3000	4000	5000
T, h:m	6:15	5:00	4:15	4:00	3:55	3:45	3:35	3:20	3:13
V, m/s	1.69	2.11	2.49	2.64	2.70	2.82	2.95	3.17	3.29

* Resultados de la modelización del tránsito hidráulico de caudales de avenida en HEC-RAS v5.0.6. La velocidad ha sido estimada en términos promedio, a lo largo de los 35 kilómetros que separan ambas estaciones de observación, aproximadamente.

Asimismo, se ha elaborado una relación matemática que permita obtener el tiempo de arribo, asociado a las lecturas de escala, o bien los caudales observados en caso de actualizar la curva de descarga, en la Estación Hidrométrica El Tablón, detallada a continuación:

Gráfico 5. Representación gráfica de los tiempos de arribo de la onda de crecida de río Chamelecón, desde la Estación Hidrométrica El Tablón hasta la Estación Hidrométrica Puente Chamelecón.



El gráfico anterior detalla la relación existente entre los niveles de la corriente y los tiempos de desplazamiento de la avenida. Un análisis de regresión ha permitido encontrar una expresión matemática que facilite la estimación del tiempo de tránsito de la crecida con la lectura de escala en la Estación Hidrométrica El Tablón, o bien con un caudal máximo observado, si en un futuro, la relación tirante-caudal es actualizada.

3.7 Estimación de los caudales de alivio que representan un peligro para las estructuras de alivio

Las estructuras de bordos construidas a lo largo de río Chamelecón, así como en sus dos principales alivios, evidencian signos de deterioro a causa del poco mantenimiento brindado. Asimismo, a través del levantamiento LiDAR ha sido posible observar secciones en estos canales de alivio donde la geometría de estos se reduce considerablemente, en comparación con sus inicios.

La modelización hidráulica nos ha brindado importantes elementos para estimar que cuando río Chamelecón lleva $1540 \text{ m}^3/\text{s}$ justo en la derivación del alivio en su margen izquierda, el nivel de la superficie del agua alcanza los 33.9 msnm , activando el Canal de Filopo con un caudal estimado en $12\text{-}15 \text{ m}^3/\text{s}$. Si existe un incremento en los niveles de la corriente por sobre los 33.9 msnm , se espera un desbordamiento de los flujos del canal en las inmediaciones de la confluencia con río Chotepe.

El Canal Maya, por su parte, evidencia una condición de rugosidad muy elevada en vista que en su interior se encuentran mucha vegetación, y es común encontrar árboles de considerable tamaño a lo largo de la estructura. Se tiene conocimiento que el Canal Maya fue diseñado para evacuar entre $650\text{-}700 \text{ m}^3/\text{s}$, no obstante, con la condición actual de obstrucciones al flujo, el modelo hidráulico nos muestra una capacidad de evacuación entre $325\text{-}360 \text{ m}^3/\text{s}$.

En vista de lo anterior, los resultados de la modelización nos permiten estimar que la capacidad del Canal Maya se encuentra comprometida, cuando por río Chamelecón discurren en $760 \text{ m}^3/\text{s}$, equivalente a un nivel de la superficie del agua de 29.5 msnm .

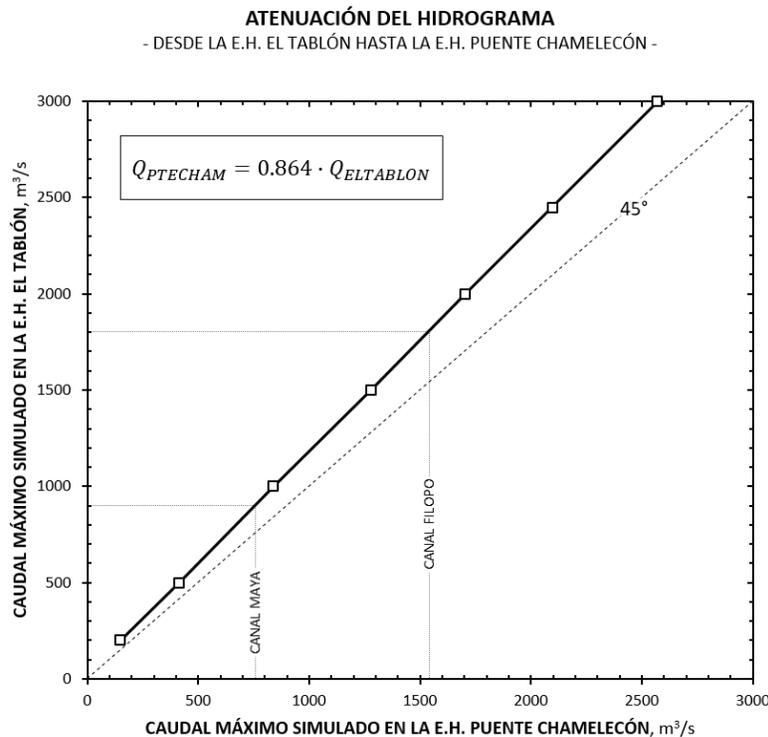
Con respecto a la localización de sitios críticos para esta estructura de alivio, se han identificado dos en particular: el primero localizado a aproximadamente 200 metros aguas arriba del puente sobre la carretera CA-13, cuando por el alivio discurren $330 \text{ m}^3/\text{s}$; el otro se ubica en las inmediaciones de la Colonia Pineda No. 2.

3.8 Estimación de niveles la corriente de agua, en la Estación Hidrométrica El Tablón, asociados a los caudales de avenida que exceden la capacidad hidráulica los alivios en el Valle de Sula

Conociendo la capacidad de los alivios, se ha recurrido a la estimación de la relación que permita identificar la atenuación del hidrograma en su discurrir hasta el inicio del Valle de Sula, y con ello, estimar el caudal máximo que debería observarse aguas arriba de la corriente, en la Estación Hidrométrica El Tablón.

Es importante mencionar que no se ha considerado una disminución significativa del caudal máximo de la avenida entre las estructuras de alivio y la Estación Puente Chamelecón, en vista que la corriente se encuentra confinada por los bordos. El siguiente gráfico detalla la relación encontrada:

Gráfico 6. Atenuación de los hidrogramas de avenida simulados desde la Estación Hidrométrica El Tablón hasta la Estación Hidrométrica Puente Cha006Delecón en las inmediaciones de la CA-5.



Conociendo la relación entre el caudal máximo en la estación hidrométrica en el inicio del valle, y la localizada aguas arriba, se procedió a estimar el nivel que desarrolla la corriente mediante la curva de descarga de la E.H. El Tablón, verificándose a través de las escalas limnimétricas en la sección de control de la corriente.

Gráfico 7. Lectura de escala en la Estación Hidrométrica El Tablón para los caudales críticos de los canales de alivio de río Chamelecón.

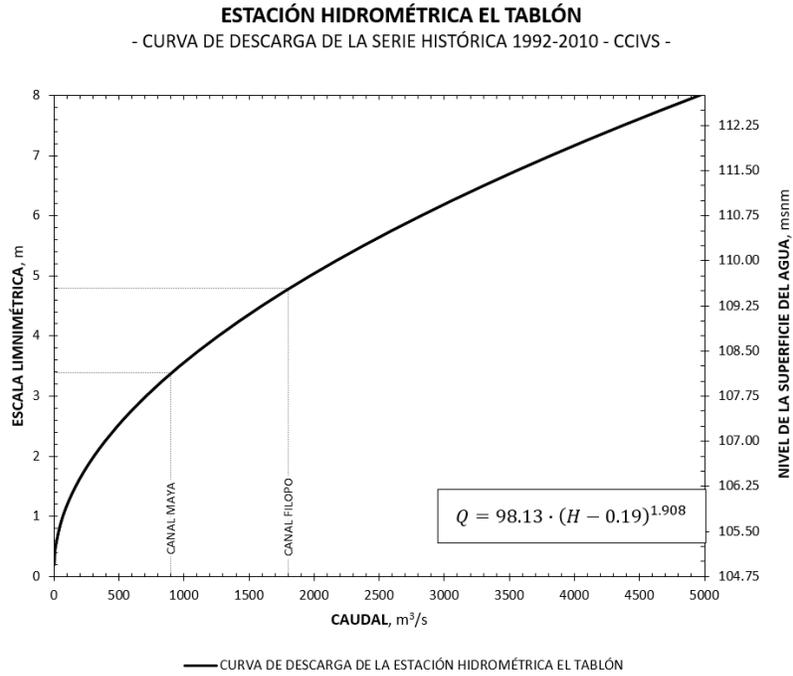
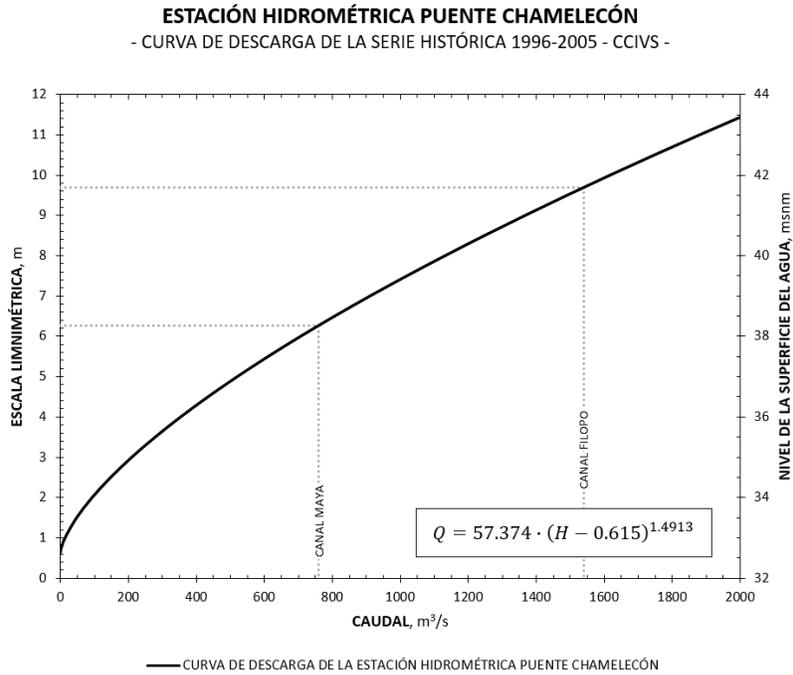


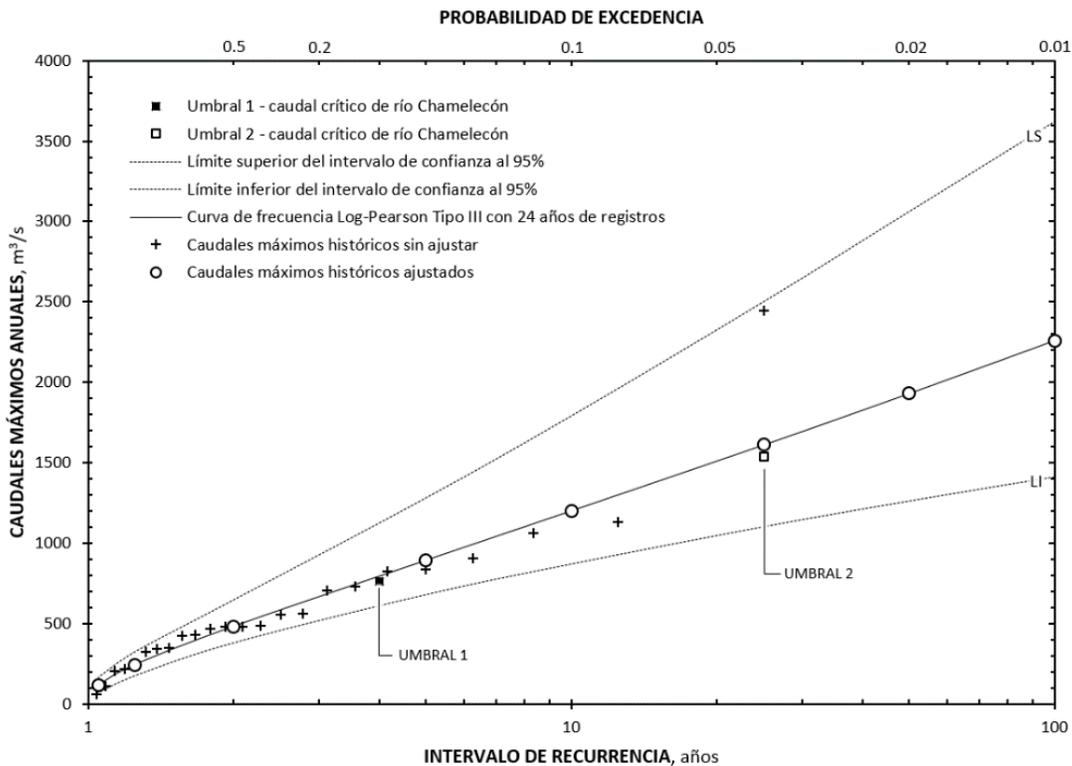
Gráfico 8. Lectura de escala en la Estación Hidrométrica Puente Chamelecón para los caudales críticos de los canales de alivio de río Chamelecón.



3.9 Análisis de frecuencia de valores extremos de los caudales críticos de río Chamelecón que afectan las estructuras de alivio

Los caudales considerados como críticos para las estructuras de alivio de río Chamelecón han sido asociados a la distribución de frecuencia antes considerada para los registros máximos observados, tal como se detalla en el siguiente gráfico:

Gráfico 9. Análisis de frecuencia de valores extremos Log-Pearson tipo III para los caudales críticos de las estructuras de alivio que representan los umbrales de alerta para río Chamelecón en la E. H. El Tablón.

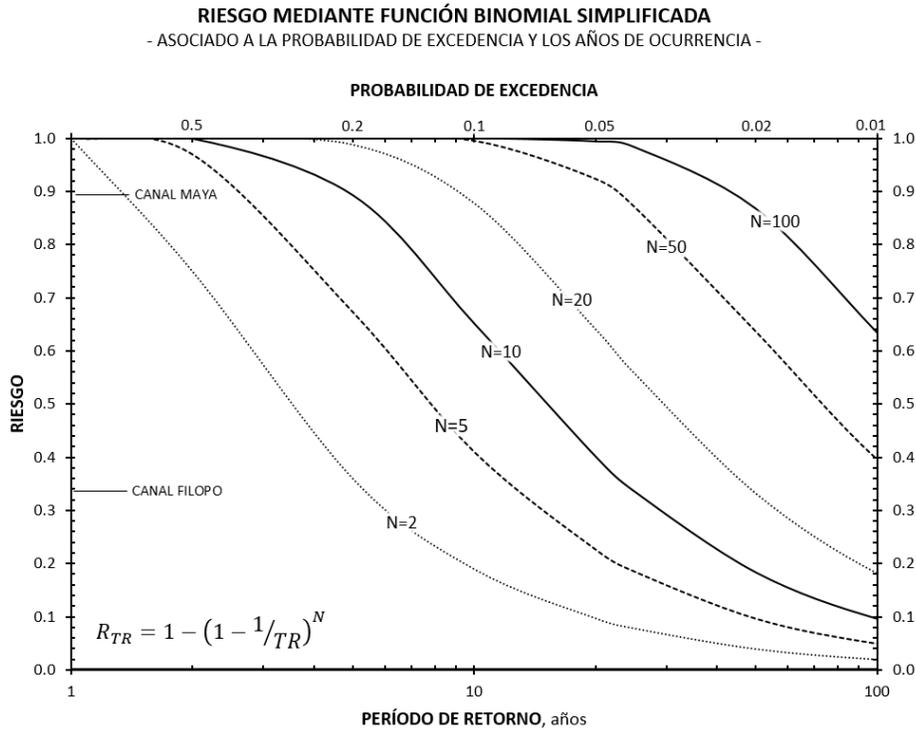


El análisis de distribución de frecuencias Log-Pearson tipo III nos sugiere que el caudal de 760 m³/s y 1 540 m³/s, asociados al primer y segundo umbral, pueden atribuirse a una probabilidad de excedencia de 0.2 y 0.04, respectivamente.

3.10 Evaluación del riesgo según la probabilidad de excedencia de los caudales críticos para las estructuras de alivio

Atendiendo las probabilidades de excedencia de los umbrales críticos para las estructuras de alivio, se ha realizado la estimación del riesgo de que estas canalizaciones presenten inconvenientes en los próximos diez años.

Gráfico 10. Riesgo asociado a la probabilidad de excedencia de una crecida y el intervalo de tiempo en el que se espera el evento se manifieste en al menos una ocasión.



Con la representación gráfica anterior, podemos conocer el riesgo asociado a las crecidas correspondientes a las probabilidades de excedencia de 0.2 y 0.04, bajo el supuesto que ocurran en la siguiente década, detallados a través de la siguiente tabla:

Tabla 6. Estimación del riesgo de que los caudales críticos en río Chamelecón, en las inmediaciones de las estructuras de alivio, se presenten en los siguientes 10 años.

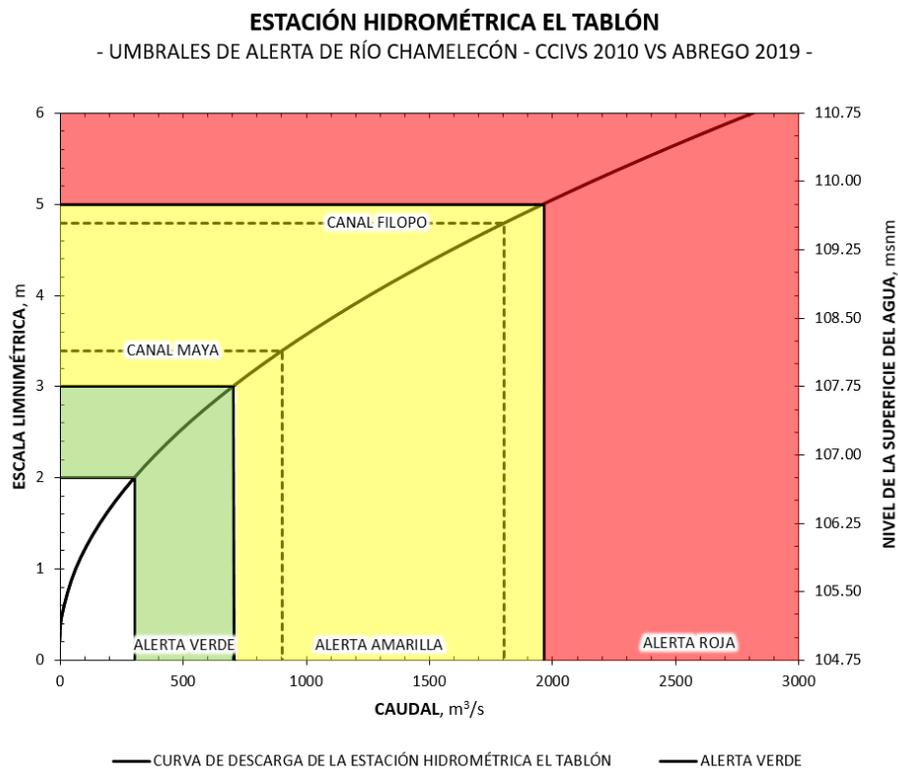
Estructura de alivio de río Chamelecón	Caudal crítico en río Chamelecón próximo a las estructuras de alivio	Riesgo asociado a que se dé el evento en los próximos 10 años
Canal Filopo	1540 m ³ /s	34 %
Canal Maya	760 m ³ /s	89 %

La anterior estimación permite reconocer la importancia de atender las actividades de limpieza y mantenimiento en el Canal Maya, en vista que existe un 89 % de posibilidad de que la avenida crítica sea igualada o superada, exponiendo los bienes e integridad física de quienes residen dentro de las zonas de desbordamiento.

3.11 Comprobación de la hipótesis de investigación

Los umbrales de alerta en la Estación Hidrométrica El Tablón, establecidos en 2010, a casi una década de haberse concebido mediante un sistema de tipo semafórico¹⁶ para la ejecución de acciones ante ellos, presentan variaciones, considerando la capacidad de los canales de alivio de río Chamelecón en las inmediaciones de la ciudad de La Lima. El siguiente gráfico detalla los umbrales de alerta vigentes, para río Chamelecón en El Tablón, en contraste con los niveles asociados a los caudales críticos para cada estructura de alivio:

Gráfico 11. Comparación de los umbrales de alerta definidos en 2010 con respecto a la revisión del tránsito hidráulico de los caudales de avenida, y los resultados del comportamiento de estas en las estructuras de alivio de río Chamelecón.



¹⁶ Consideramos que el sistema semafórico, si bien resulta familiar para las comunidades que reciben las alertas, su aplicación conlleva un punto débil, a nuestro entender: la alerta verde no traslada a la percepción comunitaria la necesidad de realizar alguna actividad, según lo que en un semáforo se interpreta el significado de este color.

En atención al anterior gráfico, podemos suponer que una disminución del nivel de alerta roja, podría atribuirse al estado en el que se encuentra el Canal Filopo en su confluencia con el río Chotepe; el incremento en los niveles para la alerta amarilla, atribuidos a la condición del Canal Maya, podría vincularse a una modificación en el lecho en la estación hidrométrica.

Lo anterior nos brinda elementos para aceptar la hipótesis de la investigación que suponía que los umbrales de alerta en río Chamelecón en la Estación Hidrométrica El Tablón han cambiado debido a la modificación de la sección hidráulica de la corriente.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En vista de la información proporcionada por el modelo hidráulico, que es coincidente con algunos testimonios de técnicos que han experimentado algunos eventos fluviales en los que la corriente de agua se ha desbordado, se dispone de elementos suficientes para poder identificar la capacidad máxima de evacuación de cada canal de alivio, en la condición encontrada al momento de realizar esta investigación.

En el caso del Canal Maya, el desempeño hidráulico de esta obra, mostrado en la simulación hidráulica, nos permite estimar un caudal de $760 \text{ m}^3/\text{s}$ en río Chamelecón, aguas arriba de la entrada a la estructura de alivio, como flujo crítico que, de verse superado, no podría ser evacuado de forma segura por la estructura de alivio, mostrando un primer escenario de desbordamiento a 200 metros aguas arriba del puente sobre el Canal Maya, en la carretera CA-13.

El Canal Filopo, por su parte, muestra inconvenientes para evacuar de forma segura los caudales de río Chamelecón cuando estos superan los $1540 \text{ m}^3/\text{s}$, en la sección inmediatamente aguas arriba de la entrada a la estructura de alivio.

Frente a ello, se asociaron estos caudales de río Chamelecón, en las inmediaciones a las estructuras de alivio, con los flujos que deberían observarse en la Estación Hidrométrica El Tablón, y consecuentemente, los niveles correspondientes a estos flujos, según la siguiente disposición:

- La lectura de escala correspondiente a 3.4 m, constituye el nivel de alerta para comprometer la capacidad de desagüe¹⁷ del Canal Maya¹⁸.
- La lectura de escala de 4.8 m puede atribuirse al nivel de alerta para comprometer el Canal Filopo, en su capacidad hidráulica.

Lo anterior, permite sugerir una revisión del desempeño de esta actualización de los umbrales de alerta a través de la observación de crecidas, obteniendo valiosa información para calibrar el modelo hidráulico conceptualizado en esta investigación. Asimismo, en lo inmediato, es primordial la realización de actividades de limpieza en el Canal Maya, en donde se encuentran hasta árboles de considerable tamaño que reducen significativamente el discurrir de los excesos de río Chamelecón a través de esta estructura.

Con respecto a las simulaciones para obtener el tránsito hidráulico de las ondas de avenida, desde la E.H. El Tablón hasta la E.H. Puente Chamelecón, se lograron dos relaciones de tipo exponencial; una atribuida a los tiempos de arribo según las lecturas de escala, y la otra asociada los caudales observados.

¹⁷ Según la condición observada al momento de realizar las visitas de campo para el desarrollo de esta investigación, siendo las últimas inspecciones en la última semana de octubre de 2017.

¹⁸ El Canal Maya, según representantes de la CCIVS fue diseñado para poder evacuar $700 \text{ m}^3/\text{s}$.

La relación que asocia los tiempos de arribo, según los caudales observados, fue obtenida bajo la consideración que, se confía en que en un futuro se harán las actividades correspondientes para actualizar la curva de descarga en la sección de aforo de El Tablón, dejando sujeta a un nuevo ajuste la relación de los tiempos de arribo con las lecturas de escala, recurriendo momentáneamente a la relación con los caudales observados.

La implementación de los tiempos de arribo, como función de las lecturas de escala, o del caudal máximo observado en caso de actualizarse la curva de descarga, permitiría priorizar acciones en atención a la magnitud de la crecida por parte de los cuerpos de socorro. Estos tiempos han sido definidos entre 4:00 – 5:45 horas.

Lo anterior nos brinda elementos para recomendar a la Comisión para el Control de Inundaciones del Valle de Sula el retomar las actividades de hidrometría de forma sistemática y consistente, con el fin primordial que los registros históricos de caudales puedan gozar de la calidad, consistencia y continuidad temporal que los estándares mundiales indican, en vista que esta información representa el sustento de los diseños de obras que sirven para salvar vidas y proteger bienes.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

A

AFORO – medición del caudal de una corriente en una sección en particular.

ALERTA – es el estado declarado, con el fin de tomar las precauciones debidas dado a la cercanía de un evento adverso que puede afectar directa o indirectamente.

ALUVIAL – proceso donde el material se transporta principalmente por agua.

ANCHO DE BANCO (WBKF) – ancho del canal en descarga de Bankfull.

ANCHURA DE INUNDACIÓN (PMA) – ancho de la corriente a un nivel de descarga definido como el doble de la profundidad máxima de la batería.

AÑO HIDROLÓGICO – Período de doce meses que comprende un ciclo hidrológico completo, partiendo del mes en que se observa el inicio de la temporada lluviosa. En Honduras el año hidrológico comprende de mayo a abril.

APTITUD – capacidad de arroyos para transportar sedimentos. El diámetro del grano de sedimento más grande transportado.

ÁREA INUNDABLE – una llanura relativamente plana que bordea una corriente y está cubierta por sus aguas en la fase de la inundación de dos veces la profundidad máxima de Bankfull.

B

BANKFULL – etapa delineada por el punto de elevación de la inundación incipiente, indicada por los depósitos de arena o limo en la marca de fregado activo, la rotura en la pendiente de la Ribera de la Ribera, el límite de vegetación perenne, la decoloración de la roca y la exposición al pelo de ratz.

C

CAUDAL – volumen de agua que pasa por una sección en particular durante un período de tiempo.

CAUDAL MEDIO DIARIO – volumen de agua que pasa por una sección en particular durante un día, dividido por el número de segundos del día.

CAUDAL MEDIO MENSUAL – media aritmética de los caudales medios diarios de un mes.

CAUDAL MEDIO ANUAL – media aritmética de los caudales medios diarios de un año hidrológico.

CAUDAL MÁXIMO INSTANTÁNEO – valor máximo que alcanza una corriente durante una crecida.

CAUDAL SÓLIDO – cantidad de sedimento que pasa por una sección transversal de una corriente en un período

de tiempo determinado. Se expresa en toneladas por unidad de tiempo.

CAUDAL UNITARIO – representa el rendimiento o caudal por unidad de área de una superficie de aportación.

CONFLUENCIA – lugar donde se unen los flujos de dos o más corrientes.

COLUVIÓN – material transportado principalmente por gravedad y sin clasificación. Puede viajar dentro del agua.

CORRIENTE – un cuerpo de agua encontrado en la superficie de la Tierra y confinado a una estrecha depresión topográfica, por la que fluye y transporta partículas de roca, sedimentos y partículas disueltas. Ríos, arroyos, arroyos, y corridas son todas las corrientes.

CUENCA – área que comprende la totalidad de la superficie de drenaje hasta un punto de interés conocido como control.

CUMULONIMBUS – nube amazcotada y densa, con un desarrollo vertical considerable en forma de montaña o una enorme torre, con la cima normalmente aplastada.

D

DATO – elevación arbitraria desde la cual se toman todas las mediciones verticales en un diseño.

DATUM – se construye sobre un elipsoide de referencia, y puede incorporar variaciones locales de elevación.

DEGRADACIÓN – proceso por el cual el gradiente de un arroyo se hace menos empinado, debido a la erosión del sedimento del lecho del arroyo. Tal Erosión generalmente sigue a una fuerte reducción en la cantidad de sedimento que entra en la corriente.

DEPOSICIÓN – en términos de erosión, es el asentamiento de partículas.

E

ELEVACIÓN – medida de longitud vertical relativa a un Datum.

ELIPSOIDE – forma tridimensional generada a partir de una elipse bidimensional.

EROSIÓN – el proceso por el cual las partículas de la roca y el suelo se aflojan, como por la intemperie, y después se transportan en otra parte, como por el viento, el agua, el hielo, o la gravedad.

ESCORRENTÍA – volumen de agua que pasa por una sección en particular durante un período de tiempo. Volumen de agua como fracción de la lámina de lluvia que no se infiltra.

ESTACIÓN HIDROMÉTRICA – estructura de observación y registro de los niveles de la corriente constituida primordialmente por escalas

limnimétricas, y en algunos casos, sensores digitales de nivel de la corriente.

ESTACIÓN PLUVIOGRÁFICA – facilidad construida con el propósito de realizar observaciones de la precipitación de forma continua. Convencionalmente, los registros pluviográficos son registrados mediante papel destinado para tal fin, de forma que se obtiene la evolución de la lluvia sin necesidad de recurrir a intervalos de tiempo para su representación, permitiendo realizar análisis de la lluvia de corta duración con fines de diseño. En la actualidad, es frecuente el uso de sensores digitales para la captura de esta información por la facilidad en el manejo de los datos.

ESTACIÓN PLUVIOMÉTRICA – facilidad construida con el propósito de realizar observaciones de la precipitación de forma discreta. Convencionalmente, los registros pluviométricos son anotados por un observador en una libreta, de forma que se obtienen acumulados diarios de lluvia.

F

FLUJO BAJO – flujo alimentado con agua subterránea.

FLUJO BASE – Etapa en el flujo bajo promedio.

G

GEOIDE – se define como la superficie del campo de gravedad de La Tierra, que es aproximadamente igual que el nivel medio del mar, perpendicular a la dirección de atracción gravitatoria.

H

HEC-HMS – software de libre distribución para la modelización hidrológica de caudales desarrollado por el U.S. Army Corp of Engineers.

HEC-RAS – software de libre distribución para el análisis hidráulico de caudales sobre corrientes naturales.

HIDROGRAMA – respuesta de una cuenca en particular en forma de volúmenes por unidad de tiempo, producto de un evento pluvial con capacidad de generar escurrimiento, hasta un punto conocido como control. Gráfica que muestra la variación del caudal de una corriente a través del tiempo, para un punto en particular.

HIDROGRAMA UNITARIO – respuesta unitaria de la cuenca ante un evento pluvial de 1 milímetro de precipitación efectiva, hasta un punto en particular conocido como control.

HIETOGRAMA – histograma de precipitación a paso de tiempo definido.

I

INUNDACIÓN – ocupación temporal de las aguas de una corriente a consecuencia del incremento de los volúmenes que esta transporta.

ISOYETAS – líneas de contorno de igual espesor de precipitación.

L

LIMNIGRAMA – gráfico que muestra la variación de los niveles de la corriente a través del tiempo para un punto en particular.

LLANURA INUNDABLE – tierra que está activamente (inundada más allá de Bankfull una vez cada 1-2 años), generalmente amplia, suavemente inclinada del suelo del Valle, a menudo limitada por una terraza (llanura de inundación abandonada) o ladera lateral que invade.

LLUVIA EFECTIVA – componente de la precipitación que es considerada como la lámina de lluvia con potencial de convertirse en escorrentía directa.

M

MEANDRO – curvas que se desvían de un curso lineal. Los componentes de la geometría del meandro incluyen longitud, amplitud y anchura de la correa.

MUSKINGUM-CUNGE – procedimiento por el cual se realiza el tránsito hidrológico de un hidrograma sobre un tramo de interés.

N

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration.

O

OMM – Organización Meteorológica Mundial.

ONDA CINEMÁTICA – simplificación del avance del hidrograma de avenida

simplificando geometría del cauce, despreciando inercia y momentum. Movimiento de la crecida sobre el cauce de la corriente sin considerar la influencia de la masa y fuerza del fluido.

ONDA DINÁMICA – simplificación del avance del hidrograma de avenida considerando inercia y momentum del fluido.

P

PENDIENTE DE CANAL – cambio de elevación dividido por la longitud del canal a lo largo de una distancia de canal de 20-30 secuencias de rápidos / remansos o 2 longitudes de meandros. Pendiente del valle / sinuosidad.

PROFUNDIDAD DEL BANKFULL (DBKF) – profundidad media medida en descarga bancaria.

R

RÁSTER – formato de presentación de información espacial representada por pixeles.

RUGOSIDAD – en términos hidráulicos, es la característica propia de la superficie que ocasiona la resistencia al flujo de una corriente. Esta es variable, depende de diversos factores dependientes entre sí.

S

SINUOSIDAD – relación entre la longitud del canal y la longitud del valle. Relación entre la pendiente del valle y la pendiente del canal.

SEDIMENTO – material fragmentado que es transportado por el agua desde el lugar de origen hasta su zona de deposición.

SAT – Sistema de Alerta Temprana

T

TERRAZA FLUVIAL – una llanura de inundación abandonada, debido a la incisión o descenso del río, etc.

THALWEG – esquema longitudinal / traza / prospección de una parte más profunda del lecho del río de la fuente a la boca (aguas arriba / aguas abajo). Línea de pendiente más empinada a lo largo del arroyo.

TIEMPO DE CONCENTRACIÓN – estimación del periodo de tiempo en el que la totalidad de la unidad hidrológica de interés concentra la escorrentía desde su punto más remoto, hidrológicamente hablando.

TRAMO – unidad de longitud de tipo de canal con el mismo tipo de canal existente para una longitud superior a veinte anchos de canal Bankfull (Rosgen). La longitud del canal es uniforme con respecto a la descarga, profundidad, área y pendiente. La longitud de un canal para el cual una sola galga proporciona una medida satisfactoria de la etapa y descarga. La longitud de un río entre dos estaciones de medición. Más generalmente, cualquier longitud de un río.

TRIBUTARIO – corriente que vierte sus flujos a otro considerado principal o de primer orden.

U

UNIDAD HIDROLÓGICA – idealización de las superficies de aportación que conforman la cuenca de interés, atendiendo criterios de morfología, pendiente de la corriente principal, tipo de suelo, cobertura forestal, por mencionar algunas.

V

VALLE – depresión en la superficie terrestre drenada por, y cuya forma es cambiada por, el agua bajo la fuerza atractiva de la gravedad, entre dos tierras altas adyacentes.

W

WMO – World Meteorological Organization.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 AECID, A., & CEDEX, C. (2003). *Balance Hídrico de Honduras*. Tegucigalpa.
- 3 Arche, A. (2010). *Sedimentología del proceso físico a la cuenca sedimentaria*. Madrid: Consejo superior de investigaciones científicas.
- 4 Benson, M. (1968). *Uniform Flood-Frequency Estimating Methods for Federal Agencies*. Washington: USGS.
- 5 Benson, M. A., & Carter, R. W. (1973). *A National Study of the Streamflow Data-Collection Program*. Washington: USGS.
- 6 Chow, V. T. (1964). *Handbook of Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill.
- 7 Chow, V. T. (1988). *Applied Hydrology*. Washington: McGraw-Hill.
- 8 Chow, V. T. (1994). *Open Channel Hydraulics*. Illinois: McGraw-Hill.
- 9 Electricité de France. (2003). *Inventario, analisis y diagnóstico de la red hidrometeorológica de Honduras*. Toulouse.
- 10 ESRI. (2016). *ArcGIS for Desktop*. Obtenido de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/datatypes/about-geographic-data-formats.htm>
- 11 Federal Highway Administration, U. D. (2012). *Hydraulic Design of Highway Culverts, Third Edition*. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. Washington: FHWA.
- 12 FEMA. (2014). *Guidance for Flood Risk Analysis and Mapping*.
- 13 FHIS; INTEMA. (2002). *Manual de Referencias Hidrológicas*. Tegucigalpa.
- 14 Gravelius, H. (1914). *Morphometry of Drainage Bassins*. Amsterdam.
- 15 Gregory, K., & Walling, D. (1973). *Drainage basin form and processes. A geomorphological approach*. London.
- 16 Haan, C. (1977). *Statistical Methods in Hydrology*. Iowa: Iowa State.
- 17 HEC. (2009). *HEC-RAS User's Manual*.
- 18 Hicks, D. M., & Mason, P. D. (1998). *Roughness Characteristics of New Zealand Rivers*. Christchurch, New Zealand: National Institute of Water and Atmospheric Research Ltd.

- 19 Horton, R. E. (1945). *Erosional development of streams and their drainage basin: Hydrophysical approach to quantitative morphology*.
- 20 Instituto Nacional de Conservación Forestal, Á. P. (2014). *Anuario Estadístico Forestal*. Comayagüela, M.D.C.: Centro de Información y Patrimonio Forestal.
- 21 Kite, G. (1974). *Flood Frequency and Risk*. Ottawa: Inland Waters Directorate.
- 22 López Bermúdez, F. (1988). *Geometría de cuencas fluviales: las redes de drenaje del alto Guadalentín*. Madrid: ICONA.
- 23 Martín Vide, J. P. (2001). *Ingeniería de ríos*. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.
- 24 Miller, V. (1953). *A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee*. Columbia University: Office of Naval Research.
- 25 Musy, A. (2005). *Watershed Characteristic*. Switzerland: Institute of Soil and Water Management.
- 26 NASA & METI. (Octubre de 2011). *ASTER GDEM v2*. Obtenido de <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>
- 27 National Engineering Handbook. (2007). *Part 654 Stream Restoration Design: Stream Hydrology*. Washington: National Resources Conservation Service.
- 28 National Resources Conservation Service. (2007). *Stream Hydrology*. Washington: National Engineering Handbook.
- 29 Petterssen, S. (1941). *Introduction to Meteorology*. New York & London: McGraw Hill.
- 30 Sales Rodríguez, M. (2012). *Comparación del modelo estándar y modelo Wenzel para curvas Intensidad-Duración-Frecuencia en la cuenca del río Motagua*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- 31 Salinas Nuñez, A., Sanchez, M., Zúniga Andrade, E., & Funez, J. (2002). *Manual de Referencias Hidrológicas*. Tegucigalpa: Fondo Hondureño de Inversión Social.
- 32 SERNA, S., & UNAH, U. (2014). *Evaluación del Recurso Hídrico en su Régimen Natural, Honduras, C.A*. Tegucigalpa.
- 33 Shaw, E. (1994). *Hydrology in Practice*. London: Chapman & Hall.

- 34 Silva Rotela, E. (2011). *Inventario y caracterización SAT. Informe de Honduras*. Tegucigalpa.
- 35 Singh, S., & Singh. (1997). *Morphometric analysis of Kanhar river basin*.
- 36 UNAH, SERNA, & DGRH. (2014). *Evaluación del recurso hídrico en su régimen natural, Honduras, C.A.* Tegucigalpa.
- 37 USAID, U. . (2002). *Flood-Hazard Mapping in Honduras in Response to Huracan Mitch*. Tacoma, Washington: USGS.
- 38 Warner, J. C., Brunner, W. G., Wolfe, B. C., & Piper, S. S. (2008). *HEC - RAS River Analysis System*. Davis, California: US ARMY Corps Engineers.