

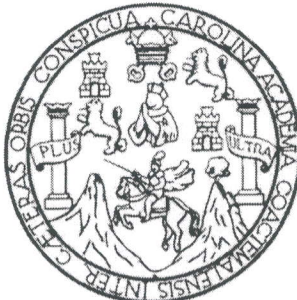
Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN PARA ESTIMACIÓN DE CAUDALES DE
CRECIDA EN EL VALLE DE LA CIUDAD DE GUATEMALA**

Aldo Marco Aurelio Orozco Ramírez
Asesorado por el MSc. Ing. Joram Matías Gil Larroj

Guatemala, marzo de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN PARA ESTIMACIÓN DE CAUDALES DE
CRECIDA EN EL VALLE DE LA CIUDAD DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ALDO MARCO AURELIO OROZCO RAMÍREZ

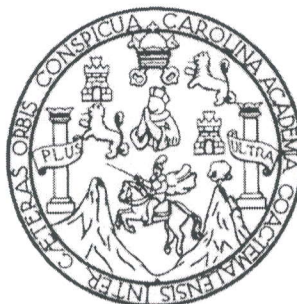
ASESORADO POR EL MSc. ING. JORAM MATÍAS GIL LAROJ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, MARZO DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
EXAMINADOR	Ing. Alan Geovani Cosillo Pinto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN PARA ESTIMACIÓN DE CAUDALES DE CRECIDA EN EL VALLE DE LA CIUDAD DE GUATEMALA

Tema que me fuera autorizado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), con fecha del 19 de agosto de 2013.



Aldo Marco Aurelio Orozco Ramirez

Guatemala, 20 de agosto de 2013
Ref.ERIS.83-13

UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS DE GUATEMALA



Facultad de Ingeniería
Escuela Regional de Ingeniería
Sanitaria y Recursos Hidráulicos
ERIS

Edificio de ERIS
Área de Prefabricados
Ciudad Universitaria zona 12
Ciudad de Guatemala 01012
Guatemala, C.A.

Tel. (502) 2418 8000,
Ext. 86212, 86213 y 86239
(502) 2418 9140

Ingeniero Civil
Aldo Marco Aurelio Orozco Ramírez
Maestría en Ingeniería en Recursos Hidráulicos
Opción Hidrología
ERIS

Ingeniero Civil Orozco Ramírez:

Por este medio, me permito informarle que según Acta No. 006-2013, celebrada el 19 de agosto del presente año, la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado (CAyOG), acordó APROBAR el tema de Estudio Especial I, siendo: "ESTIMACION DE CAUDALES DE CRECIDA EN EL VALLE DE LA CIUDAD DE GUATEMALA", y se le ha asignado la terna siguiente:

Asesor: MSc. Ing. Joram Gil Laroj
Terna: Msc. Ing. Juan José Sandoval
Terna: MSc. Inga. Marta Lidia Samayoa

Agradeciendo la atención y sin otro particular, me es grato suscribirme de ustedes.

Cordialmente,

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


MSc. Ing. Pedro Saravia Celis

Director

**Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria
y Recursos Hidráulicos, ERIS**



C.C.: MSc. Ing. Joram Matías Gil Laroj, MSc. Ing. Juan José Sandoval,
MSc. Inga. Marta Lidia Samayoa
archivo

Guatemala, 28 de noviembre de 2013

MSc, Ing. Elfego Orozco
Coordinador de la Maestría en Recursos Hidráulicos
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos
Facultad de Ingeniería, USAC

UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS DE GUATEMALA



Facultad de Ingeniería
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria
y Recursos Hidráulicos

Edificio de ERIS,
Instalaciones de prefabricados, CII
Ciudad Universitaria zona 12
Ciudad de Guatemala 01012
Guatemala, C.A.

Tel. (502) 2418 8000,
Ext. 86213 y 86212
(502) 2418 9138

Telfax (502) 2418 9124

www.ingenieria-usac.edu.gt

Habiendo revisado el documento denominado **Diseño de investigación "Estimación de caudales de crecida en el valle de la Ciudad de Guatemala"**, que fuera elaborado por el estudiante de Maestría en Ciencias, **Aldo Marco Aurelio Orozco Ramírez**, como parte de su Estudio Especial, y como requisito para optar obtener dos créditos académicos, correspondiente a un avance del 33 % de su trabajo de investigación al grado académico de Maestro en Recursos Hidráulicos, mediante la presente me permito informarle mi satisfacción con su contenido y por lo tanto, le comunico que dicho documento cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo la atención prestada a la presente, me suscribo de usted,

Atentamente,

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Joram Matias Gil Laroj', written over a circular stamp or watermark.

MSc. Ing. Joram Matias Gil Laroj
Asesor del Estudio

Guatemala, 29 de noviembre de 2013

Señores
Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos
Facultad de Ingeniería, USAC

Respetuosamente les comunico que he revisado la versión corregida, en mi calidad de Coordinador de la Maestría en Ciencias en Recursos Hidráulicos, el documento titulado:

Diseño de investigación: “Estimación de caudales de crecida en el valle de la Ciudad de Guatemala”

presentado por el estudiante,

Aldo Marco Aurelio Orozco Ramírez

Así mismo se tiene a la vista el acta de “Evaluación de Estudio Especial I” firmada por la terna examinadora: MSc. Ing. Juan Carlos Fuentes, MSc. Ing. Juan José Sandoval y MSc. Joram Matías Gil. Dicha acta se especifica que el estudiante desarrollo satisfactoriamente la etapa correspondiente, por lo cual el estudiante se hace acreedor de 2 (dos) créditos académicos de la Maestría en Ciencias de Recursos Hidráulicos.

Por lo anterior, les manifiesto que el estudiante ha cumplido con los requisitos exigidos por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS) y la Universidad de San Carlos de Guatemala, en la realización del avance del 33% del trabajo de investigación, por lo que esta coordinación aprueba dicho documento.

Agradeciéndoles la atención a la presente, se suscribe de ustedes,

Atentamente.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

MSc. Ing. Elfego Orozco
Coordinador Maestría en Recursos Hidráulicos

UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS DE GUATEMALA



Facultad de Ingeniería
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria
y Recursos Hidráulicos

Edificio de ERIS,
Instalaciones de prefabricados, C/1
Ciudad Universitaria zona 12
Ciudad de Guatemala 01012
Guatemala, C.A.

Tel. (502) 2418 8000,
Ext. 86213 y 86212
(502) 2418 9138

Telfax (502) 2418 9140

www.ingenieria-usac.edu.gt

UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS DE GUATEMALA



Facultad de Ingeniería
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria
y Recursos Hidráulicos

Edificio de ERIS,
Instalaciones de prefabricados, CII
Ciudad Universitaria zona 12
Ciudad de Guatemala 01012
Guatemala, C.A.

Tel. (502) 2418 8000,
Ext. 86213 y 86212
(502) 2418 9138

Telfax (502) 2418 9140

www.ingenienira-usac.edu.gt

El Director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos -ERIS- después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los profesores siguientes: MSc. Ing. Juan Carlos Fuentes, MSc. Ing. Juan José Sandoval y MSc. Ing. Joram Matías Gil; así como el visto bueno del Coordinador de la Maestría en Ciencias en Recursos Hidráulicos, MSc. Ing. Elfego Odvin Orozco Fuentes; al trabajo de investigación del estudiante: Aldo Marco Aurelio Orozco Ramírez, titulado **Diseño de investigación: "Estimación de caudales de crecida en el valle de la Ciudad de Guatemala"**, en representación de la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la aprobación del mismo, en Guatemala a los 29 días del mes de noviembre de 2013.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Pedro Saravia Celis".

MSc. Ing. Pedro Saravia Celis
DIRECTOR

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y
Recursos Hidráulicos





USAC
TRICENTENARIA
 Universidad de San Carlos de Guatemala

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



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

Guatemala,

19 de marzo de 2014

Ref. IC. 016.14

Ingeniero

Hugo Humberto Rivera Pérez

Secretario Académico

Facultad de Ingeniería

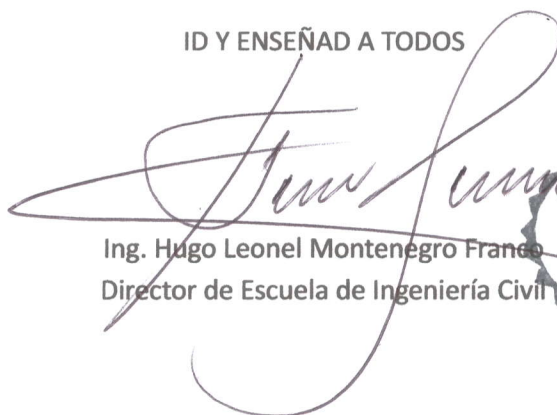
Guatemala

Ingeniero Rivera.

De manera atenta informo a usted que el estudiante Aldo Marco Aurelio Orozco Ramírez, Carnet No. 200611534, ha cumplido con el proceso de graduación de Licenciatura mediante la modalidad "Estudio de Postgrado", presentando a esta Dirección de Escuela el DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN PARA ESTIMACIÓN DE CAUDALES DE CRECIDA EN EL VALLE DE LA CIUDAD DE GUATEMALA, asesorado por el Msc. Ing. Joram Matías Gil Laroj, debidamente aprobado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado, por lo que en calidad de Director de la Escuela de Ingeniería Civil, doy mi visto bueno para continuar con el procedimiento correspondiente.

Sin otro particular me suscribo de usted.

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco
 Director de Escuela de Ingeniería Civil



/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN PARA ESTIMACIÓN DE CAUDALES DE CRECIDA EN EL VALLE DE LA CIUDAD DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario: **Aldo Marco Aurelio Orozco Ramírez** autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE

Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
Decano



Guatemala, marzo de 2014

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por permitirme llegar hasta aquí, acompañándome en todo momento y enseñándome el camino correcto a seguir. Este logro es para Él.

Mis padres y hermanos

Por su apoyo constante para poder alcanzar mis metas; por el cariño con que me enseñaron a trabajar para ser mejor cada día y aguantarme por tanto tiempo.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por ser mi guía y apoyo cuando más los necesito. Gracias por las constantes bendiciones para mí y familia.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por formarme como profesional.
Mis padres	Por sus sacrificios constantes; este logro es suyo, a ustedes les debo todo lo que soy.
Mis hermanos	Por su apoyo incondicional; porque juntos hemos enorgullecido a nuestros padres.
Mis amigos	A los compañeros de estudio; hermanos de desvelos y mis compañeros de trabajo, quienes me brindaron una nueva visión de la vida. Gracias por compartir su conocimiento para poder disfrutar de una mejor manera, cada trabajo que se me encomendaba.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
LISTA DE SÍMBOLOS	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN.....	IX
1. ASPECTOS INTRODUCTORIOS.....	1
1.1. Generalidades.....	1
1.2. Antecedentes	3
1.3. Planteamiento del problema	5
1.4. Justificación	6
1.5. Limitantes.....	6
1.6. Objetivos	7
2. MARCO TEÓRICO	9
2.1. Ciclo hidrológico.....	9
2.2. Análisis de eventos extremos	11
2.2.1. Conceptos básicos.....	12
2.2.1.1. Eventos extremos.....	12
2.2.1.2. Frecuencia y probabilidad.	12
2.2.1.3. Período de retorno.	13
2.2.1.4. Tiempo de concentración	14
2.2.1.5. Crecidas.....	14
2.2.1.5.1. Coeficiente de escorrentía	15

	2.2.1.5.2.	Daños causados por las crecidas	16
	2.2.2.	Fenómenos naturales, tormentas y huracanes	16
	2.2.2.1.	Tormenta tropical Ágatha.	17
2.3.		Conceptos probabilísticos.....	18
	2.3.1.	Análisis de frecuencia.....	18
	2.3.2.	Distribuciones teóricas de frecuencia extremas	21
	2.3.3.	Caudales máximos	21
	2.3.4.	Lluvias máximas	22
	2.3.5.	Relación lluvia - escorrentía	23
	2.3.6.	Modelos de traslado de lluvia a caudal.....	24
	2.3.6.1.	Hidrograma unitario.....	24
	2.3.6.2.	Hidrograma unitario sintético.....	25
3.		CONTENIDO.....	27
4.		MÉTODOS Y TÉCNICAS.....	31
5.		RESULTADOS ESPERADOS.....	33
6.		CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	35
7.		RECURSOS	37
	7.1.	Humanos	37
	7.2.	Materiales	37
8.		BIBLIOGRAFÍA	39

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figuras

1.	Diagrama de Gantt	36
----	-------------------------	----

Tablas

I.	Tareas programadas	35
II.	Costos del proyecto	37

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Ha	Hectárea
km	Kilómetro
km ²	Kilómetro cuadrado
m ³ /s	Metro cúbico por segundo
msnm	Metros sobre el nivel del mar
mm	Milímetros
%	Porcentaje

GLOSARIO

Análisis de frecuencia	También llamado de no excedencia; es la frecuencia de ocurrencia de valores de un fenómeno, menores que un valor de referencia. El fenómeno puede ser una variable aleatoria que varía en el tiempo o en el espacio.
ERIS	Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos.
INDE	Instituto Nacional de Electrificación
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
Método racional	Se utiliza en hidrología para determinar el caudal instantáneo máximo de descarga de una cuenca hidrográfica.
Modelo de escorrentía	Es una representación que forma parte del ciclo hidrológico en cuanto al fenómeno de la escorrentía superficial de una cuenca hidrográfica.

Modelos estadísticos Se basan en el análisis de frecuencia acumulada de las escorrentías. Los pronósticos con base en el período de retorno sirven para evaluar la frecuencia de escasez o de exceso de agua, con el propósito de regularizar el uso del agua o diseñar obras hidráulicas para el control de inundaciones.

Período de retorno También llamado período de recurrencia; el período de retorno es un concepto estadístico que intenta proporcionar una idea de hasta qué punto un suceso puede considerarse raro.

RESUMEN

El agua es un recurso fundamental para la vida y un factor esencial para el sector productivo, por lo que la determinación de los caudales en una región, tiene especial importancia debido al predominio de las actividades relacionadas con el aprovechamiento de los recursos hídricos. Por otro lado, como parte de una gestión integrada del recurso hídrico, es muy importante el conocimiento de los caudales extremos, tanto mínimos como máximos.

Un conocimiento apropiado de la magnitud de caudales máximos que pueden ocurrir en ciertos puntos de una cuenca es esencial para el diseño de obras e infraestructura dentro del cauce de un río, tales como puentes, bóvedas, canalizaciones, obras de protección de cauces, bordas de protección contra inundaciones, etc.; así como en las cercanías de los cauces, las vías de comunicación, urbanizaciones, instalaciones públicas y privadas, etc., en la planicie de inundación de los cauces.

La determinación de caudales máximos se realiza mediante la aplicación de análisis de frecuencia a series de caudales máximos observados en el sitio de aplicación. En un país como Guatemala, sin embargo, la disponibilidad de registros de caudales máximos es muy escasa, especialmente para cuencas pequeñas. Por lo que la estimación de caudales máximos se hace aplicando otros métodos.

En virtud de que la fuente primaria de los caudales en una cuenca lo constituyen las lluvias, su conocimiento, tanto temporal, espacial, como de frecuencia, es primordial.

La lluvia, como variable hidrológica, se puede caracterizar a través de la intensidad, su distribución en el espacio y en el tiempo, y su frecuencia o probabilidad de ocurrencia; para poder caracterizarla es necesario un gran número de observaciones, extraídas de series pluviográficas, con el objeto de deducir el patrón de comportamiento en una zona determinada y permitir un análisis o uso posterior; como la estimación del régimen de caudales en una cuenca.

La familia de métodos de estimación de caudales máximos, denominados lluvia-escorrentía, se basan en la lluvia observada sobre la cuenca, para estimar la magnitud del caudal en el sitio de control, como respuesta de la cuenca al evento de lluvia.

Debido a que en el medio guatemalteco se dispone de mayor información de lluvia que de caudales, se propone en este trabajo utilizar un modelo tipo lluvia-escorrentía para la estimación de caudales máximos.

Actualmente, en áreas urbanas, es común utilizar el método racional para la estimación de caudales máximos; sin embargo, esta metodología es aplicable para áreas tributarias menores a 1 km^2 (Orozco, 2000); por lo tanto, para áreas mayores es necesario aplicar otras metodologías.

En este trabajo se propone la metodología del hidrograma unitario sintético para la estimación de caudales máximos en áreas urbanas para cuencas mayores de 1 km^2 , usándose como ejemplo de aplicación, el valle de la ciudad de Guatemala.

1. ASPECTOS INTRODUCTORIOS

1.1. Generalidades

Guatemala tiene una extensión superficial aproximada de 108 889 km², y se encuentra localizada casi en el centro geográfico de América, entre los paralelos 13° 44' a 18° 30' latitud norte y meridianos 87° 30' a 92° 13' al oeste de Greenwich. La más septentrional de las repúblicas de América Central; limita al oeste y al norte con México; al este, con el océano Atlántico, Honduras y El Salvador y al sur, con el océano Pacífico (IGN, 1975).

Guatemala posee cambios variados en cuanto al clima se refiere, con temperaturas medias que oscilan entre 8 y 28 °C. El régimen de lluvias también es muy variado, con precipitaciones medias anuales en zonas áridas de 400 mm/año hasta 6 000 mm/año en las zonas muy húmedas. Observándose gran diversidad de microclimas, y por lo tanto, de vegetación en todo el país. Con una precipitación media anual de 2 000 mm, la cual genera un caudal medio anual de 3 207 m³/s, de los cuales el 22 % drena hacia el océano Pacífico; el 31 % hacia el mar de las Antillas y el 47 %, hacia el Golfo de México (NOVIB, 2001).

La divisoria de las aguas lo constituye un sistema montañoso que atraviesa el país de oeste hacia este, con alturas hasta de 5 000 metros sobre el nivel del mar, lo cual da lugar a múltiples microclimas e imprime rasgos especiales a las cuencas y subcuencas y al comportamiento de las aguas superficiales y subterráneas (NOVIB, 2001).

La ciudad de Guatemala, cuyo nombre oficial es Nueva Guatemala de la Asunción, es la capital y sede de los poderes gubernamentales de la República de Guatemala, así como sede del Parlamento Centroamericano. La ciudad se encuentra localizada en el área sur-centro del país y cuenta con una gran cantidad de áreas verdes. De acuerdo con el último censo realizado por el Instituto Nacional de Estadística, en la ciudad alcanza un estimado de 3, 306,616 habitantes (INE, 2014).

La hidrografía del departamento de Guatemala denota dos vertientes principales: la del Pacífico y la del Caribe. La divisoria de aguas parte el valle de la ciudad de Guatemala transversalmente en dirección aproximada este-oeste, dando al valle características particulares en las dos vertientes.

La subcuenca del río Villalobos, delimitada hasta el sitio donde desemboca en el lago de Amatitlán, constituye un área de la parte alta de la cuenca del río María Linda, que drena hacia el océano Pacífico, ubicada en la planicie de la meseta central. La subcuenca en mención, se caracteriza por aumento continuo de las áreas urbanizadas, dado a que parte de la ciudad capital de Guatemala y municipios periféricos se encuentran asentados en el área de drenaje de la misma.

La subcuenca del río Las Vacas, delimitada hasta la confluencia del río Chinautla, constituye un área de la parte baja de la cuenca del río Motagua, que drena hacia el mar Caribe. La subcuenca en mención, al igual que la subcuenca del río Villalobos, se caracteriza por aumento continuo de las áreas urbanizadas, dado a que parte de la ciudad capital de Guatemala y municipios periféricos se encuentran asentados en el área de drenaje de la misma.

1.2. Antecedentes

En la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS) se han realizado varios estudios sobre crecidas entre los cuales se pueden mencionar:

González Jaén, Diego Alturo, en su trabajo de graduación de Ingeniería Sanitaria denominado “*Cálculo de caudales de crecida, caso de estudio cuenca del río Cabra, Panamá*”; asesorado por el MSc. Ing. Elfego Odvin Orozco Fuentes, como parte del programa de investigación sobre reducción de la vulnerabilidad y degradación ambiental (PREVDA), hace un análisis de los caudales de la cuenca de dicho río y los factores que internienen en los mismos.

Robleto Molina, Jamil Antonio, elaboró una “*Metodología para el diseño e implementación de sistemas de alerta temprana ante inundaciones con aplicación de hidrología e hidráulica*”, como trabajo de graduación en la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria, asesorado por el MSc. Ing. Elfego Odvin Orozco Fuentes, como una propuesta para la prevención de desastres, aplicando elementos técnicos de la ingeniería hidráulica.

Pérez Loarca, Karla Giovanna Judith, como trabajo de graduación de maestría en Ingeniería Sanitaria, realizó una “*Estimación de caudales promedio en cuencas seleccionadas de la República de Guatemala que drenan hacia la República de México*”. Dicho trabajo fue asesorado por el MSc. Ing. Joram Matías Gil Laroj.

Aguilera Sierra, Elvin Geovany, en el 2010, realizó su trabajo de graduación en la Escuela de Ingeniería Sanitaria llamado: “*Análisis regional de*

crecidas máximas para Honduras". Dicho trabajo fue asesorado por el MSc. Ing. Elfego Odvin Orozco Fuentes y el Programa de Reducción de la Vulnerabilidad y Degradación Ambiental (PREVDA), Guatemala.

Collado Sandino, Carlos Ramón, en el 2010, realizó un estudio denominado: "*Modelación hidrológica e hidráulica para la estimación de caudales máximos en el área urbana de Matagalpa, Nicaragua*", asesorado por el MSc. Ing. Elfego Odvin Orozco Fuentes, en el cual propone un nuevo método para la estimación de caudales.

Zamora Leandro, Ericka Patricia, realizó su trabajo de graduación de maestría en Ingeniería Sanitaria, en el 2008, desarrollando el tema: "*Evaluación de un sistema de alerta temprana para inundaciones en la parte baja de la cuenca del río Achiguate*". Dicho trabajo fue asesorado por el MSc. Ing. Elfego Odvin Orozco Fuentes y en el mismo se describen las medidas que deben tomarse como actividad preventiva de inundaciones en las partes bajas de una cuenca.

Fuentes Montepeque, Juan Carlos, también en el 2008, enfocó también su trabajo de graduación en la "*Evaluación del sistema de alerta temprana para inundaciones en la cuenca del río Coyolate*", quien proporciona información importante en relación con la prevención de inundaciones en una cuenca determinada.

Existen varios trabajos de investigación sobre inundaciones, modelos matemáticos, así como modelos de curvas IDF y propuestas de nuevas curvas, pero hay que tomar en cuenta que son trabajos que no están actualizados.

Se cuenta con un estudio en la subcuenca del río Villalobos realizado en la Universidad de Costa Rica por el MSc. Ing Juan Carlos Fuentes, pero este es un estudio de impacto hidrológico asociado al proceso de urbanización.

Muchos de estos trabajos antes enlistados brindan un dato de caudales para las cuencas mencionadas pero no constituyen una herramienta para estimar caudales dentro de las cuencas analizadas como lo que se pretende con este trabajo.

1.3. Planteamiento del problema

La planificación y diseño de obras e infraestructura dentro de y cerca de cauces de ríos en el área urbana, se basa en análisis simples como la aplicación de la fórmula racional para la estimación de caudales de crecidas. La aplicación de dicha fórmula es razonablemente confiable para cuencas con área tributaria menor a 1 km², no así para áreas mayores.

En otros casos se aplican metodologías más complejas, que normalmente ingenieros no suelen manejar, requiriendo del trabajo de profesionales como hidrólogos, con el consecuente encarecimiento de los estudios.

Muchas obras de infraestructura ubicada en las cercanías de cuerpos de agua se realizan sin un previo conocimiento hidrológico ni hidráulico del área o en ocasiones se han realizado estudios pero sin darle la importancia suficiente lo que conlleva al fallo o colapso de obras de infraestructura y muchas de ellas de un grado alto de importancia para la economía del país o en casos extremos, la pérdida de vidas humanas.

1.4. Justificación

Actualmente en Guatemala se carece de relaciones matemáticas o gráficas simples para estimar caudales de crecida asociados a diferentes períodos de retorno, que permitan a cualquier ingeniero civil obtener de forma rápida, práctica y confiable, información de caudales de crecida para la planificación, diseño, construcción, mantenimiento, operación y vigilancia de infraestructura dentro de o cerca de cauces de ríos, en el valle de la ciudad de Guatemala.

De no contar con un estudio de análisis de caudales de crecida para la ciudad de Guatemala, los problemas de inundación en algunas áreas propensas de la ciudad, la erosión de suelos en las márgenes de los ríos y falla de obras de infraestructura, continuarán afectando a la población en eventos extremos.

1.5. Limitantes

Este trabajo pretende brindar una herramienta de fácil acceso y que cualquier ingeniero civil pueda utilizar para la estimación de caudales de crecida, para los cuales, las limitantes son:

- La estimación de caudales es aplicable solamente a las subcuencas del río Villa Lobos, delimitada hasta el sitio donde desemboca en el Lago de Amatitlán, y el río Las Vacas, delimitado hasta la confluencia con el río Chinautla.

- Los ríos analizados son los afluentes principales de las subcuencas antes mencionadas con áreas tributarias mayores a 1 km^2 , pero el estudio aplica para áreas tributarias iguales o menores a 1 km^2 .
- El estudio final brindará una gráfica en donde se relaciona el área tributaria y el periodo de retorno para obtener un caudal de crecida para el punto deseado dentro de las subcuencas mencionadas con datos actualizados.

1.6. Objetivos

General

Estimar los caudales de crecidas asociados a diferentes períodos de retorno, en función del área tributaria, para en el valle de la ciudad de Guatemala.

Específicos

1. Realizar un análisis de frecuencia de series anuales de lluvia máxima en 24 horas, para las series disponibles.
2. Aplicar el modelo tipo lluvia-escorrentía: hidrograma unitario sintético, para la estimación de caudales en diferentes subcuencas en el valle de Guatemala.
3. Aplicar un análisis de regresión para la obtención de relaciones matemáticas simples entre el caudal máximo y el área tributaria.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Ciclo hidrológico

Se puede admitir que la cantidad total de agua que existe en la Tierra, en sus tres fases: sólida, líquida y gaseosa, se ha mantenido constante desde la aparición de la humanidad. El agua de la Tierra, que constituye la hidrósfera, se distribuye en tres reservorios principales: los océanos, los continentes y la atmósfera, entre los cuales existe una circulación continua (ciclo del agua o ciclo hidrológico). El movimiento del agua en el ciclo hidrológico es mantenido por la energía radiante del sol y por la fuerza de la gravedad.

El ciclo hidrológico se define como la secuencia de fenómenos por medio de los cuales el agua pasa de la superficie terrestre, en la fase de vapor, a la atmósfera y regresa en sus fases líquida y sólida. La transferencia de agua desde la superficie de la Tierra hacia la atmósfera, en forma de vapor de agua, se debe a la evaporación directa, a la transpiración por las plantas y animales y por sublimación (paso directo del agua sólida a vapor de agua).

El vapor de agua es transportado por la circulación atmosférica y se condensa luego de haber recorrido distancias que pueden sobrepasar los 1 000 km. El agua condensada da lugar a la formación de nieblas y nubes y, posteriormente, a precipitación. La precipitación puede ocurrir en la fase líquida (lluvia) o en la fase sólida (granizo). El agua precipitada en la fase sólida se presenta con una estructura granular, regular en capas, en el caso del granizo.

La precipitación incluye también el agua que pasa de la atmósfera a la superficie terrestre por condensación del vapor de agua (rocío) o por congelación del vapor (helada) y por intercepción de las gotas de agua de las nieblas (nubes que tocan el suelo o el mar).

El agua que precipita en tierra puede tener varios destinos. Una parte es devuelta directamente a la atmósfera por evaporación; otra parte escurre por la superficie del terreno (escorrentía superficial), que se concentra en surcos y va a originar las líneas de agua. El agua restante se infiltra, esto es que penetra en el interior del suelo; esta agua infiltrada puede volver a la atmósfera por evapotranspiración, o profundizarse hasta alcanzar las capas freáticas. Tanto el escurrimiento superficial como el subterráneo van a alimentar los cursos de agua que desaguan en lagos y en océanos.

La escorrentía superficial se presenta siempre que hay precipitación y termina poco después de haber terminado la precipitación. Por otro lado, el escurrimiento subterráneo, especialmente cuando se da a través de medios porosos, ocurre con gran lentitud y sigue alimentando los cursos de agua mucho después de haber terminado la precipitación que le dio origen. Así, los cursos de agua alimentados por capas freáticas presentan unos caudales más regulares.

El agua que precipita sobre los suelos va a repartirse, a su vez, en tres grupos: una que es devuelta a la atmósfera por evapotranspiración y dos que producen escurrimiento superficial y subterráneo. Esta división está condicionada por varios factores, unos de orden climático y otros dependientes de las características físicas del lugar donde ocurre la precipitación.

La precipitación, al encontrar una zona impermeable, origina escurrimiento superficial o escorrentía, el cual es el agente que durante los eventos intensos y/o duraderos provoca mayores complicaciones debido a los daños que puede provocar. Si ocurre en un suelo permeable, poco espeso y localizado sobre una formación geológica impermeable, se produce entonces escurrimiento superficial, evaporación del agua que permanece en la superficie y aún evapotranspiración del agua que fue retenida por la cubierta vegetal. En ambos casos, no hay escurrimiento subterráneo; este ocurre en el caso de una formación geológica subyacente permeable y espesa.

La fuerza de gravedad da lugar a la precipitación y al escurrimiento. El ciclo hidrológico es un agente modelador de la corteza terrestre debido a la erosión y al transporte y deposición de sedimentos por vía hidráulica. Condiciona la cobertura vegetal y, de una forma más general, la vida en la Tierra.

Por tanto, se debe dar por entendido que las crecidas han sucedido desde que existe el ciclo hidrológico en la Tierra, pero que el impacto de las mismas, en las comunidades ha aumentado con el paso del tiempo debido al deterioro ambiental y a las variaciones en las condiciones propias de los cauces de los ríos, entre otras.

2.2. Análisis de eventos extremos

Se llama evento extremo, en el ámbito de las ciencias de la tierra, a eventos que, por su magnitud, no se repiten con frecuencia. En otras palabras, son eventos que tienen períodos de retorno elevados.

2.2.1. Conceptos básicos

A continuación se describen los diferentes elementos que es conveniente conocer, en relación con las crecidas de los ríos debido a las intensas lluvias.

2.2.1.1. Eventos extremos

Tal como lo indica el Ing. Orozco (2002), los principales eventos extremos de interés para el hidrólogo son las crecidas y lluvias extremas (precipitaciones intensas).

2.2.1.2. Frecuencia y probabilidad

Uno de los problemas más importantes en hidrología es la interpretación de registros pasados de eventos hidrológicos, en términos de obtener probabilidades de ocurrencia futuras. Este problema se extiende a la estimación de frecuencias de crecidas, sequías, precipitación, calidad de agua y oleajes, entre otros.

La frecuencia es el número de casos en una clase cuando los eventos son clasificados de acuerdo con diferencias en uno o más atributos (Linsley, 1988).

Según Linsley (1988), la probabilidad es una base matemática para la predicción, la cual, para un conjunto exhaustivo de resultados, es la relación entre el número de resultados que produce un evento particular y el número posible de resultados. Orozco (2006), la define como la frecuencia de su ocurrencia durante la repetición de un número de observaciones.

Eventos hidrológicos de poca magnitud tienen mayor probabilidad de ocurrencia que eventos con mayor magnitud, por ejemplo, pequeñas lloviznas son más frecuentes que precipitaciones intensas.

2.2.1.3. Período de retorno

Villón (2001), define el período de retorno como el intervalo promedio de tiempo en años, dentro del cual un evento de magnitud X puede ser igualado o excedido, por lo menos una vez en promedio. Linsley (1988), le denomina intervalo de recurrencia y lo define como el número de años que transcurren en promedio para que un evento sea igualado o excedido.

Matemáticamente, el período de retorno se define como el recíproco de la probabilidad de excedencia (Villón, 2004).

Orozco (2002), de acuerdo a los conceptos descritos anteriormente, menciona 2 términos que son de importancia en el análisis de eventos extremos, los cuales son:

- Probabilidad de excedencia $P(Q \geq q_0)$: probabilidad que un evento sea excedido o igualado.
- Probabilidad de no excedencia $P(Q < q_0)$: probabilidad que un evento no sea excedido ni igualado.

Desde el punto de vista estadístico, a mayor magnitud de una crecida, mayor es el período de retorno y menor es la probabilidad de que ese evento ocurra en cualquier año.

2. 2.1.4. Tiempo de concentración

Monsalve (1999), define el tiempo de concentración (t_c) como el tiempo que la lluvia que cae en el punto más distante de la corriente de una cuenca toma para llegar a una sección determinada de dicha corriente. El tiempo de concentración mide el tiempo que se necesita para que toda la cuenca contribuya con escorrentía superficial en una sección considerada; se mide en minutos u horas. El tiempo de concentración es función de ciertas características geográficas y topográficas de la cuenca, debe incluir los escurrimientos sobre terrenos, canales y los recorridos sobre la misma estructura que se diseña (Villón, 2004).

2.2.1.5. Crecidas

Una crecida se define como una elevación normal del nivel de agua dentro del lecho de la corriente. En general, es un fenómeno de ocurrencia de caudales relativamente grandes. Lluvias muy intensas provocan crecidas en pequeñas cuencas, las lluvias de menor intensidad pero de duración y cubrimiento grande provocan crecidas en grandes cuencas (Monsalve, 1999). De acuerdo con Orozco (2006), los factores que afectan el escurrimiento y por ende la formación de crecidas son los siguientes:

- Factores climáticos:
 - Comportamiento de la precipitación: intensidad, duración, magnitud, distribución temporal y espacial.
 - Comportamiento del viento: dirección y velocidad.

- Estación: lluvia antecedente, época lluviosa y época de tormentas tropicales.
- Evapotranspiración
- Factores relacionados con la cuenca tributaria:
 - Morfología: área, forma, rugosidad y relieve de la cuenca.
 - Características de la red de drenaje: longitud, densidad, pendientes y rugosidades.
 - Uso del suelo: porcentaje de área boscosa, área impermeable, área de agua estancada, área agrícola y condiciones de laboreo, tipo, densidad y grado de desarrollo de la cobertura vegetal.
 - Posición geográfica: latitud, altitud, distancia hacia el mar y orientación respecto a la dirección del viento (sotavento y barlovento) debido a la topografía.
 - Suelo: tipo, estructura, textura, contenido de humus, estratificación, espesor, conductividad hidráulica, porosidad y estabilidad.

2.2.1.5.1. Coeficiente de escorrentía

Cada tipo de terreno, debido a los factores anteriormente reseñados, retendrá una mayor o menor cantidad de agua de forma superficial, por infiltración al terreno, retención en la vegetación o evaporación directa.

La relación entre el agua evacuada por un río y el agua caída en forma de lluvia, constituye el coeficiente de escorrentía. Con el conocimiento de los caudales que llegan en función del tiempo, se construirá el hidrograma de la crecida, que será el gráfico que indique dicha relación.

2.2.1.5.2. Daños causados por las crecidas

Durante las crecidas, el caudal y la velocidad de la masa líquida aumentan en forma considerable la fuerza erosiva del agua y su capacidad de transporte. Así, un corto período de tiempo basta para provocar cambios sensibles en la morfología de los márgenes y del lecho del río, ocasionando desbordes significativos.

2.2.2. Fenómenos naturales, tormentas y huracanes

La ciudad de Guatemala ha sido embestida por estos fenómenos meteorológicos en diversas ocasiones, pero unos de los peores daños causados han sido provocados por el huracán Mitch en noviembre de 1998 y el huracán Stan, en octubre de 2005.

En el 2010 la ciudad sufrió daños nuevamente por la tormenta tropical Ágatha, por la gran cantidad de lluvia en un corto periodo; el sistema de drenajes sufrió un colapso, causando un gran socavón en uno de los recorridos en la zona norte¹.

¹ Internacional.elpais.com. Consulta: 31 de mayo de 2010

2.2.2.1. Tormenta tropical Ágatha

La tormenta tropical Ágatha fue un débil aunque destructor ciclón tropical en el este del océano Pacífico. Primera tormenta de la temporada de huracanes en el Pacífico oriental de 2010 y la más mortal desde el huracán Paulina de 1997. Ágatha se originó en la zona de convergencia intertropical (ZCIT), región ecuatorial donde convergen la humedad tropical y se desarrollan numerosas tormentas eléctricas.

El sistema se organizó en las primeras horas del 29 de mayo, convirtiéndose en depresión tropical y se disipó al día siguiente, con vientos que alcanzaron los 75 km/h y una presión mínima de 1000 hPa.

Incluso antes de convertirse en depresión, la perturbación había afectado los países de América Central con lluvias torrenciales. Al tocar tierra con intensidad de tormenta tropical, causó deslizamientos e innumerables ríos desbordados, cobró la vida de varias decenas de personas, desplazando a cientos de miles y provocando la destrucción de miles de hogares e infraestructura.

En Guatemala, el volcán de Pacaya, a unos 25 km al sur de la ciudad de Guatemala, hizo erupción el 27 de mayo, forzando a unas 2 000 a abandonar sus hogares debido a la lluvia de ceniza y la lava provocada por la erupción.

La excesiva lluvia causada por Ágatha empeoró la situación y disparó numerosos lahares. Sin embargo, en los cafetales se consideró esta lluvia como beneficiosa, ya que quitó las cenizas de los árboles de café. Varios deslizamientos bloquearon carreteras en el sur del país, impidiendo el tránsito.

En la población de Almolonga, los deslizamientos causados por la tormenta mataron a cuatro personas luego de destruir sus hogares. Las autoridades declararon el estado de emergencia durante la tarde del día 29, ya que las condiciones parecían empeorar. Muchos ríos del país se inundaron y desbordaron.

La tormenta tropical Ágatha tocó tierra en las costas de Guatemala alrededor de las 3:40 pm PDT del 29 de mayo, provocando fuertes vientos e intensas lluvias, así como gran oleaje de hasta 4 y 5 metros de altura. A causa de estas lluvias se produjo un gran socavón en la ciudad de Guatemala. Además, debido a la tormenta Ágatha, más de 300 puentes alrededor del país se destruyeron, lo cual dejó a varios pueblos y comunidades aisladas por no tener acceso a ellas.

Este evento ha sido uno de los más importantes en los 86 años jamás registrado, y por esta razón es importante tomarla en cuenta para el estudio.

2.3. Conceptos probabilísticos

Es necesario conocer los diferentes métodos probabilísticos, para inferir determinados hechos, con base en las frecuencias de algunos fenómenos naturales.

2.3.1. Análisis de frecuencia

El análisis de frecuencia es una herramienta utilizada para predecir el comportamiento futuro de los caudales en un sitio de interés, a partir de la información histórica de caudales.

Es un método basado en procedimientos estadísticos que permite calcular la magnitud del caudal asociado a un período de retorno. Su confiabilidad depende de la longitud y calidad de la serie histórica, además de la incertidumbre propia de la distribución de probabilidades seleccionada.

Cuando se pretende realizar extrapolaciones, período de retorno mayor que la longitud de la serie disponible, el error relativo asociado a la distribución de probabilidades utilizada es más importante, mientras que en interpolaciones, la incertidumbre está asociada principalmente a la calidad de los datos a modelar; en ambos casos la incertidumbre es alta dependiendo de la cantidad de datos disponibles (Ashkar, et al. 1994). La extrapolación de frecuencias extremas en una distribución empírica de crecientes es extremadamente riesgosa (Garcon, 1994).

Para determinar la magnitud de eventos extremos cuando la distribución de probabilidades no es una función fácilmente invertible, se requiere conocer la variación de la variable respecto de la media.

Chow, en 1951, propuso determinar esta variación a partir de un factor de frecuencia K_T que puede ser expresado así:

$$X_T = \mu + K_T \sigma$$

y se puede estimar a partir de los datos x :

$$X_T = \chi + K_T s$$

Para una distribución dada, puede determinarse una relación entre K y el período de retorno, Tr .

Esta relación puede expresarse en términos matemáticos o por medio del uso de una tabla. El análisis de frecuencia consiste en identificar los parámetros de las distribuciones de probabilidad y determinar con el factor de frecuencia, la magnitud del evento para un período de retorno dado. Los requisitos que debe cumplir la información hidrológica (eventos extremos) es que:

- Debe ser independiente.
- Está idénticamente distribuida (por ejemplo, precipitación diaria máxima anual).
- El sistema hidrológico que la produce (por ejemplo, un sistema de tormenta) sea aleatorio, Independiente del espacio y del tiempo.

La información hidrológica empleada debe ser seleccionada cuidadosamente, de manera tal que se satisfagan las suposiciones de independencia y de distribución idéntica. En la práctica, esto se lleva a cabo usualmente seleccionando el máximo anual de la variable bajo análisis (por ejemplo, el caudal máximo anual, que puede corresponder al flujo pico instantáneo máximo o al medio diario máximo, que se haya producido en cualquier momento o en cualquier día durante el aforo) con la expectativa de que observaciones sucesivas de esta variable de un año a otro sean independientes.

Los resultados del análisis de frecuencia de los caudales de crecida pueden utilizarse para muchos propósitos en ingeniería:

- Diseño de presas, puentes, cauces evacuadores y estructuras de control de crecidas.

- Determinar el beneficio económico de proyectos de atenuación de crecidas.
- Delimitar planicies de inundación y determinar el efecto de ocupaciones o construcciones en las mismas.

2.3.2. Distribuciones teóricas de frecuencia extremas

Uno de los principales problemas derivado del estudio de los eventos extremos es la medición de la frecuencia, que se produce en este tipo de siniestralidad. En la estadística clásica, el recuento o frecuencia de las observaciones se modela a través de distribuciones discretas como la distribución binomial, de Poisson, geométrica o hipergeométrica. Sin embargo, en el campo de los valores extremos. Asumiendo la hipótesis de independencia entre las observaciones, la estadística que mide su frecuencia es la no paramétrica o de distribución libre. Para esto se dispone de las distribuciones teóricas para casos extremos entre las cuales se pueden mencionar: binomial, normal, log-normal, Gumbel, Pearson, Gamma, etc.

2.3.3. Caudales máximos

La estimación de caudales máximos asociados a determinados periodos de retorno de diseño es fundamental en muchas aplicaciones de la ingeniería hidráulica. En la determinación de valores extremos, normalmente se estará en alguno de los siguientes escenarios:

- Caso de un río con registros de $Q_{\text{máx}}$
- Caso de un río sin información de $Q_{\text{máx}}$

En el segundo caso, al no contarse con estaciones de aforo que proporcionen registros de descargas máximas, se tendrá que acudir a métodos alternativos, basados la mayoría de ellos en datos de precipitación máxima en 24 horas y en las características físicas de la cuenca, para así inferir los caudales máximos asociados a un cierto periodo de retorno, que podrían presentarse en la zona de interés de un proyecto en estudio.

2.3.4. Lluvias máximas

El estudio de los episodios pluviométricos extremos tiene una larga tradición en hidrología y geomorfología.

Es durante estos eventos cuando tiene lugar una gran parte del trabajo geomorfológico, activándose procesos de erosión superficial, arroyamiento torrencial, movimientos en masa, cambios en los cauces y en las llanuras aluviales, etc.

Comúnmente, el análisis de frecuencia de precipitaciones extremas y la ejecución de inferencias son realizados mediante la aplicación de distribuciones estadísticas de valores máximos, donde la función Gumbel, conocida como distribución doble exponencial, primera asíntota de Fisher–Tippet o función de distribución biparamétrica, es la más empleada (Garrido, 1992; Koutsoyiannis, 2003); aunque como se menciona con anterioridad, se pueden aplicar distintas distribuciones para la determinación de eventos máximos.

Son numerosos los trabajos en los que se ha utilizado dichas distribuciones y en ocasiones muy ambiciosos en cuanto a cobertura territorial y variables de eventos extremos.

En este sentido, cabe destacar que diversos autores indican que en la deducción de cualquier función de probabilidad, se admite fundamentalmente que las observaciones de donde se toma el máximo, son muy numerosas e independientes y que se organizan de acuerdo con una distribución de tipo exponencial (Pielke et al., 2000; Lazcano, 2004; Simiu et al., 2001; Clarke, 2002; Kulathinal y Gasbarra, 2002; Garrido, 1992).

2.3.5. Relación lluvia-escorrentía

Uno de los objetivos principales de la hidrología superficial es calcular la escorrentía que se va a generar, si se produce una precipitación determinada. El tema es muy complejo y se plantean actuaciones diversas:

- Un evento concreto o el proceso continuo: se estudia qué caudales generará cierta precipitación o se desea conocer el proceso de un modo continuo, por ejemplo, el funcionamiento de la cuenca a lo largo de un año.
- Precipitaciones reales o supuestas: se pueden calcular los caudales generados por unas precipitaciones reales o bien se puede trabajar con una tormenta de diseño para calcular el hidrograma de diseño. Si se va a construir una obra (canal, presa, etc.) debe hacerse sobre caudales teóricos que se calculan mediante precipitaciones teóricas en diferentes periodos de retorno.

En el estudio de una cuenca real con datos reales es necesario utilizar un modelo en el que se puedan tomar en cuenta las características físicas de una cuenca y para esto se puede utilizar varios métodos como el método de

conservación de suelos, SCS (Soil Conservation Service, por sus siglas en inglés), método racional, hidrogramas sintéticos, etc.

2.3.6. Modelos de traslado de lluvia a caudal

Existen diversos modelos de traslado de lluvia a caudal, los cuales se describen a continuación:

2.3.6.1. Hidrograma unitario

El método del hidrograma unitario es uno de los métodos utilizados en hidrología, para la determinación del caudal producido por una precipitación, en una determinada cuenca hidrográfica.

Si fuera posible que se produjeran dos lluvias idénticas sobre una cuenca hidrográfica, cuyas condiciones antes de la precipitación también fueran idénticas, sería de esperarse que los hidrogramas correspondientes a las dos lluvias también fueran iguales. Esta es la base del concepto de hidrograma unitario.

En la realidad es muy difícil que ocurran lluvias idénticas; estas pueden variar su duración, el volumen precipitado, su distribución espacial y su intensidad.

Un hidrograma unitario es un hidrograma resultante de un escurrimiento correspondiente a un volumen unitario ($Q = f(t)$); (1 cm, mm, plg, etc., de lluvia por la cuenca) proveniente de una lluvia con una determinada duración y determinadas características de distribución en la cuenca hidrográfica.

Se admite que los hidrogramas de otras lluvias de duración y distribución semejantes presentarán el mismo tiempo de base, y con ordenadas de caudales proporcionales al volumen de fluido.

2.3.6.2. Hidrograma unitario sintético

Los hidrogramas unitarios sintéticos se han desarrollado a lo largo de dos tendencias; una asume que cada cuenca tiene un hidrograma unitario único y la otra tendencia supone que todos los hidrogramas unitarios pueden ser representados por una familia única de curvas o una ecuación única.

La primera categoría de desarrollo está basada en el método racional modificado para incluir las curvas de tiempo-área para una cuenca en particular. Clark (1945), supuso que la respuesta de la cuenca sería producida por el tránsito de las curvas de tiempo-área a través de un elemento de almacenamiento lineal, el cual tiende a atenuar el caudal máximo y a retrasar el hidrograma. Cada hidrograma unitario sería único para la cuenca, por consiguiente, esta técnica representa una mejora sobre el método o del hidrograma de tiempo-área.

En general se requieren expresiones empíricas para transformar los métodos de Clark, en técnicas útiles para desarrollar hidrogramas unitarios para cuencas reales. La segunda metodología para el desarrollo de hidrogramas unitarios asume representaciones matemáticas para la forma de hidrograma unitario; el método más popular fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos, SCS (Soil Conservation Service, por sus siglas en inglés).

La mayoría de las investigaciones han señalado que existen varios parámetros importantes para determinar la forma y los tiempos del hidrograma unitario de una cuenca. Entre los parámetros utilizados más a menudo se tiene el tiempo de retraso, de ascenso y de concentración.

El tiempo base también se incluye para definir la duración de la escorrentía directa. Estos parámetros de tiempo deben estar relacionados con las características de la cuenca para el desarrollo satisfactorio de hidrogramas unitarios sintéticos. Otros parámetros de importancia incluyen el caudal máximo y el área de la cuenca. La mayoría de los métodos para derivar hidrogramas unitarios sintéticos asumen que un hidrograma unitario de una cuenca representa los efectos combinados del tamaño, pendiente, forma y características de almacenamiento.

Bajo estas condiciones, si los factores entre dos cuencas son iguales y permanecen constantes con el tiempo, la respuesta será idéntica para ambas cuencas. Para dos cuencas del mismo tamaño, si la pendiente de una es mayor que la otra o si la forma de la cuenca es más concentrada (la razón entre la longitud y el ancho es menos), la forma del hidrograma cambiará del tipo A (cuenca natural) al tipo B (cuenca parcialmente desarrollada).

3. CONTENIDO

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

OBJETIVOS

INTRODUCCIÓN

1. ASPECTOS INTRODUCTORIOS

- 1.1. Generalidades
- 1.2. Antecedentes
- 1.3. Planteamiento del problema
- 1.4. Justificación
- 1.5. Limitantes
- 1.6. Objetivos

2. MARCO TEÓRICO

- 2.1. Ciclo hidrológico
- 2.2. Análisis de eventos extremos
- 2.3. Conceptos básicos
 - 2.3.1. Eventos extremos
 - 2.3.2. Frecuencia y probabilidad
 - 2.3.3. Período de retorno
 - 2.3.4. Tiempo de concentración
 - 2.3.5. Crecidas
 - 2.3.5.1. Coeficiente de escorrentía

- 2.3.5.2. Daños causados por las crecidas
 - 2.3.6. Fenómenos naturales, tormentas y huracanes
 - 2.3.6.1. Tormenta tropical Ágatha
 - 2.4. Conceptos probabilísticos
 - 2.4.1. Análisis de frecuencia
 - 2.4.2. Distribuciones teóricas de frecuencia extremas
 - 2.4.3. Caudales máximos
 - 2.4.4. Lluvias máximas
 - 2.4.5. Relación lluvia - escorrentía
 - 2.4.6. Modelos de traslado de lluvia a caudal
 - 2.4.6.1. Hidrograma unitario
 - 2.4.6.2. Hidrograma unitario sintético
- 3. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO
 - 3.1. Cuencas de los ríos Villalobos y las Vacas
 - 3.2. Sistema de subcuencas
 - 3.3. Aspectos geológicos
 - 3.4. Suelos
 - 3.5. Cobertura
 - 3.6. Parámetros morfométricos
 - 3.6.1. Área tributaria
 - 3.6.2. Longitud del cauce más largo
 - 3.6.3. Elevaciones
 - 3.7. Tiempo de concentración
 - 3.8. Curva número
 - 3.9. Red meteorológica
- 4. ANÁLISIS DE LA LLUVIA
 - 4.1. Información disponible

- 4.2. Lluvia máxima diaria
- 4.3. Lluvia máxima en 24 horas
- 4.4. Análisis de frecuencia de lluvia máxima en 24 horas
- 4.5. Patrón espacial de la lluvia máxima en 24 horas
- 4.6. Histograma

5. CAUDALES MÁXIMOS

6. RELACIÓN ÁREA TRIBUTARIA *VERSUS* CAUDALES MÁXIMOS

- 6.1. Análisis de regresión
- 6.2. Ecuaciones para caudales con diferente período de retorno en función del área
- 6.3. Familia de curvas para caudales en función del área tributaria

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

APÉNDICES

4. MÉTODOS Y TÉCNICAS

Para satisfacer los objetivos del presente trabajo, la metodología a seguir es la siguiente: se investigará la información disponible de la red meteorológica del valle de la ciudad de Guatemala y su área de influencia; siendo las fuentes de información el departamento de Climatología del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) y el Departamento de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación (INDE).

De las estaciones con información se extraerán las series de lluvia máxima diaria, a las que se les aplicará un análisis de frecuencia, para obtener magnitudes de lluvia con diferentes períodos de retorno.

Por otro lado, la cuenca del río Villalobos, que drena la parte sur del valle de la ciudad de Guatemala hacia el lago de Amatitlán, y la de Las Vacas, que drena la parte norte de la ciudad de Guatemala hacia el río Motagua, se subdividirán en diferentes subcuencas, con base en la cartografía oficial, escala 1:50,000 y escala 1:15,000.

Se estimarán los diferentes parámetros morfométricos significativos necesarios en la transformación de la lluvia a escorrentía, tales como el área de la cuenca, la longitud del cauce más largo, y las elevaciones máxima y mínima.

Sobre el mapa de subcuencas se dibujarán isoyetas o polígonos de Thiessen para estimar la lluvia media, con 24 horas de duración, sobre cada una de las subcuencas, para eventos de diferente período de retorno.

Asimismo, se investigarán eventos importantes de lluvia continua registrada (pluviogramas) en las estaciones existentes en el valle, para obtener un hietograma característico de lluvia intensa.

Luego, para la lluvia sobre cada subcuenca y para cada período de retorno se obtendrá el hietograma respectivo.

Con el hietograma y los parámetros morfométricos de cada subcuenca, se estimarán los hidrogramas, mediante la aplicación de un modelo lluvia-escorrentía: hidrograma unitario sintético del Servicio de Conservación de Suelos, de los Estados Unidos de América.

Finalmente, los caudales pico de cada hidrograma se relacionarán con el área tributaria de cada subcuenca; y mediante análisis de regresión se obtendrán fórmulas matemáticas para calcular el caudal máximo con diferente período de retorno en función del área tributaria.

5. RESULTADOS ESPERADOS

Obtener relaciones matemáticas simples entre caudal máximo y el área tributaria, junto a una serie de curvas para los diferentes períodos de retorno, que permitan a cualquier ingeniero civil obtener información de forma rápida, práctica y confiable de caudales máximos para determinado tipo de estudio que se quiera realizar.

6. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

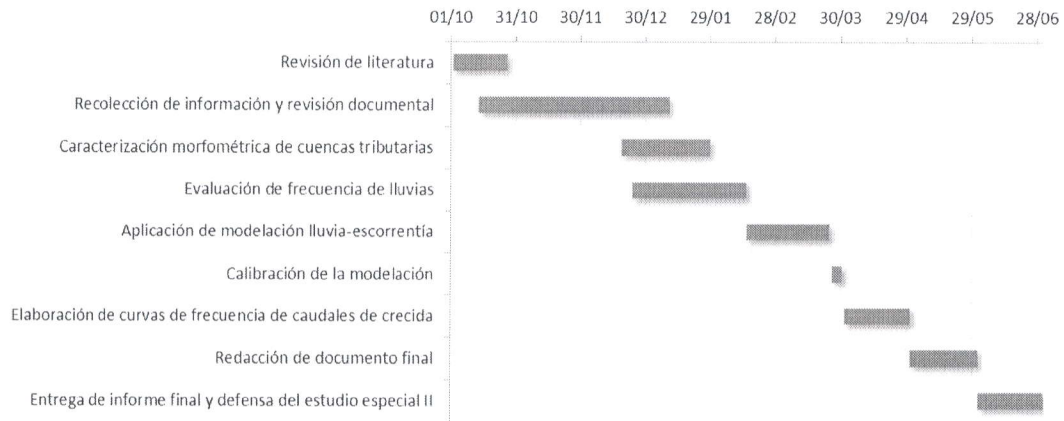
A continuación se presentan las actividades que abarca este estudio especial de graduación, desde su propuesta inicial y revisión de literatura, hasta la entrega del informe final.

Tabla I. Tareas programadas

Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin
Revisión de literatura	25 días	mie 02/10/13	sáb 26/10/13
Recolección de información y revisión documental	88 días	lun 14/10/13	sáb 28/12/13
Caracterización morfométrica de cuencas tributarias	41 días	jue 19/12/13	mar 28/01/14
Evaluación de frecuencia de lluvias	53 días	mar 24/12/13	vie 14/02/14
Aplicación de modelación lluvia-escorrentía	38 día	vie 15/02/14	mar 25/03/14
Calibración de la modelación	5 días	mié 26/03/14	lun 31/03/14
Elaboración de curvas de frecuencia de caudales de crecida	30 días	mar 01/04/14	mié 30/04/14
Redacción de documento final	31 días	jue 01/05/14	sáb 31/05/14
Entrega de informe final y defensa del estudio especial II	30 días	lun 01/06/14	jue 30/06/14

Fuente: elaboración propia.

Figura 1. Diagrama de Gantt



Fuente: elaboración propia.

7. RECURSOS

7.1. Humanos

- Técnicos para el trabajo de campo
- Investigador

7.2. Materiales

- Software para interpretar de una mejor manera los resultados obtenidos después de realizar el estudio.
- Computadoras, mapas y ortofotos

Tabla II. Costos del proyecto

Gastos	Costos subtotales		Costos totales	
Recolección de información	Q12,000.00	Único	Q12,000.00	Único
Procesamiento de información e interpretación	Q7,000.00	Único	Q7,000.00	Único
Modelación hidrológica	Q20,000.00	Único	Q20,000.00	Único
Compra de mapas (ortofotos y cartografías)	Q11,000.00	Único	Q15,000.00	Único
Trabajo de campo para la calibración de modelo hidráulico	Q3,000.00	Único	Q3,000.00	Único
Otros gastos	Q2,000.00	Único	Q2,000.00	Único
Total de gastos			Q60,000.00	

Fuente: elaboración propia.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. AGUILERA SIERRA, Elvin Geovany. *Análisis regional de crecidas máxims para Honduras*. Trabajo de graduación de maestría en Ingeniería Sanitaria, Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 2010. 54 p.
2. CHOW, Ven; MAIDMENT, David; MAYS, Larry. *Applied hydrology*. New York: McGraw Hill, 1996. 400 p.
3. COLLADO SANDINO, Carlos Ramón. *Modelación hidrológico e hidráulica para la estimación e caudales máximos en el área urbana de Matagalpa, Nicaragua*. Trabajo de graduación de maestría en Ingeniería Sanitaria, Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 2010. 63 p.
4. FUENTES MONTEPEQUE, Juan Carlos. *Evaluación del sistema de alerta temprana para inundaciones en la cuenca del río Coyolate*. Trabajo de graduación de maestría en Ingeniería Sanitaria, Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 2008. 109 p.
5. _____. *Impacto hidrológico asociado al proceso de urbanización en la subcuenca del río Villalobos, Guatemala*. Trabajo de graduación de maestría en Hidrología, Universidad de Costa Rica. 2013. 163 p.
6. GONZÁLEZ JAÉN, Diego Alturo. *Calculo de caudales de crecida, caso de estudio cuenca del río Cabra, Panamá*. Trabajo de graduación de

maestría en Ingeniería Sanitaria, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2010. 89 p.

7. HROMADKA, Theodore; McCUEN, Richard; YEN, Chung-Cheng. *Computational hydrology in flood control design and planning*. Mission Viejo: Lighthouse Pub., 1987. 502 p.
8. Institute of Water Resources, Department of The Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. *HEC-HMS, Technical reference manual*. United States of America, 2000. 149 p.
9. _____. *HEC-RAS, Hydraulic reference manual*. United States of America, 2010. 292 p.
10. KOTTEGODA, Nathabandu; ROSSO, Renzo. *Applied statistics for civil and environmental engineering*. Blackwell Pub., United States of America, 2008. 718 p.
11. LINSLEY, Ray; KOHLER Max; PAULUS, Joseph. *Hidrología para ingenieros*. USA: McGraw Hill, 1977. 386 p.
12. LLAMAS, José. *Hidrología general, principios y aplicaciones*. México: UNAM, 1989. 630 p.
13. McCUEN, Richard; SNYDER, William. *Hydrologic modeling: statistical methods and applications*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1986. 556 p.
14. OROZCO FUENTES, Elfego Odvin. *Notas de curso de estadística*. Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos,

Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería,
2001. 62 p.

15. _____. *Notas de curso de hidrología*. Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2002. 50 p.
16. PÉREZ LOARCA, Karla Giovanna Judith. *Estimación de caudales promedio en cuencas seleccionadas de la República de Guatemala que drenan hacia la República de México*. Trabajo de graduación de maestría en Ingeniería Sanitaria, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2010. 109 p.
17. PETTS, Geoff; AMOROS, C. *Fluvial hydrosystems*. London: Chapman & Hall, 1996. 322 p.
18. RICE, John. *Mathematical statistics and data analysis*. California: Wadsworth & Brooks, 1988. 560 p.
19. ROBLETO MOLINA, Jamil Antonio. *Metodología para el diseño e implementación de sistemas de alerta temprana ante inundaciones con aplicación de hidrología e hidráulica*. Trabajo de graduación de maestría en ingeniería sanitaria, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2010. 134 p.
20. WARD, Andy; ELLIOT, William. *Environmental hydrology*. Boca Ratón: Lewis Pub., 1995. 462 p.
21. World Vision. *Manual de manejo de cuencas*. Canadá, 2004. 104 p.

22. ZAMORA LEANDRO, Ericka Patricia. *Evaluación de un sistema de alerta temprana para inundaciones en la parte baja de la cuenca del río Achiguate*. Trabajo de graduación de maestría en Ingeniería Sanitaria, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2008. 154 p.