



**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA
Y RECURSOS HIDRÁULICOS**

**EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA
PARA INUNDACIONES, EN LA CUENCA DEL RÍO COYOLATE**

ING. JUAN CARLOS FUENTES MONTEPEQUE

ASESORADO POR EL M.Sc. ING. ELFEGO ODVIN OROZCO FUENTES

GUATEMALA, MAYO DE 2008.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA
Y RECURSOS HIDRÁULICOS -ERIS-
A NIVEL DE POSTGRADO**

**EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA
PARA INUNDACIONES, EN LA CUENCA DEL RÍO COYOLATE**

ESTUDIO ESPECIAL

**PRESENTADO A LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA
Y RECURSOS HIDRÁULICOS -ERIS-**

POR:

ING. JUAN CARLOS FUENTES MONTEPEQUE

ASESORADO POR EL M.Sc. ING. ELFEGO ODVIN OROZCO FUENTES

COMO REQUISITO PREVIO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE:

**MAGISTER SCIENTIFICAE / MAESTRO EN CIENCIAS
EN RECURSOS HIDRÁULICOS, OPCIÓN HIDROLOGÍA**

GUATEMALA, MAYO DE 2008.

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA**



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paíz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DIRECTOR ERIS	M.Sc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis
EXAMINADOR	M.Sc. Ing. Elfego Odvin Orozco Fuentes
EXAMINADOR	M.Sc. Ing. Juan José Sandoval
EXAMINADOR	Esp. Ing. Teófilo Álvarez Marroquín
SECRETARIO	Esp. Ing. Teófilo Álvarez Marroquín

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR



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

**EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA PARA
INUNDACIONES, EN LA CUENCA DEL RÍO COYOLATE,**

tema que me fuera aprobado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, el 05 de junio de 2007.

Atentamente,

ING. JUAN CARLOS FUENTES MONTEPEQUE

ACTO QUE DEDICO A:

DIOS

Todopoderoso, por haberme dado vida, salud y sabiduría para alcanzar de manera satisfactoria esta meta.

MIS PADRES

Carlos Rodolfo Fuentes Reyes y Gloria Elizabeth Montepeque de Fuentes, como un reconocimiento por su incondicional apoyo, que Dios los bendiga y proteja siempre.

MIS ABUELOS

A la memoria de mis abuelos, que siempre serán un ejemplo en mi vida.

MIS HERMANOS

Fernando y Manolo, con cariño especial.

MIS HIJOS

Luis Carlos y María Fernanda, como un ejemplo para que lo superen y sean personas de bien con Dios, su familia y la patria.

MI CUÑADA

María del Pilar de Fuentes, como muestra de estima.

MI SOBRINA

Gabriela Fernanda, que Dios te guíe y te proteja siempre.

MIS TÍOS Y PRIMOS

Como muestra de cariño y respeto.

MIS AMIGOS

Como recuerdo de experiencias vividas y compartidas.

LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y RECURSOS HIDRÁULICOS

LAS FACULTADES DE AGRONOMÍA E INGENIERÍA

LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

MI PATRIA GUATEMALA

AGRADECIMIENTOS:

Al M.Sc. Ing. Elfego Orozco, por la valiosa y acertada asesoría brindada en todo momento en la formulación y ejecución de la presente investigación.

Al personal docente de la Maestría en Ciencias en Recursos Hidráulicos, Opción Hidrología: M.Sc. Ing. Juan José Sandoval, M.Sc. Ing. Pedro Saravia Celis, M.Sc. Ing. Elfego Orozco, Esp. Ing. Teófilo Álvarez, M.Sc. Ing. Zenón Múch, M.Sc. Ing. Jorám Gil y M.Sc. Ing. Julián Duarte, por compartir sus valiosos conocimientos.

Al personal docente y administrativo de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos: M.Sc. Ing. Pedro Saravia Celis, M.Sc. Ing. Rafael García, M.Sc. Inga. Marta Lidia Samayoa, Licda. Dora María Cardoza, Sra. Frida Faggioly de Cáceres, Sra. Jeannette Alegría de Mejía y Sr. César Rojas.

A mis compañeros y amigos de promoción: Inga. Mónica Cueto, Inga. Ericka Zamora, Inga. Janania Viana, Ing. Luis Sandoval, Ing. Isaí Sevilla, Ing. Claudio Castañón, Ing. Luis Valerio Mácz e Ing. Alfredo Mirón. Además a los compañeros de las Maestrías en Ciencias en Ingeniería Sanitaria y Gestión Integrada de Recursos Hídricos.

Al Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología: Ing. Eddy Sánchez, Ing. Victor Manuel Pérez, M.Sc. Ing. Pedro Tax, Ing. Luis Santos, M.Sc. Ing. Fulgencio Garavito, M.Sc. Inga. Claudia Cordero, Ing. Mario Bautista, Sr. Jorge Mario Izaguirre, Sr. Mario Pierri, Sr. Juan Carlos Ramos, Sr. Mario Rosales, Sr. Augusto Lastro, Sr. Mónico Castañeda, Sr. Eduardo Peláez, Sr. William Hernández, Srita. Azucena Sánchez y Srita. Vilma Rodas, por su valiosa ayuda y colaboración brindada en la ejecución de la investigación, así como durante mi estancia en la Sección de Hidrología del Departamento de Investigación y Servicios Hídricos.

Al Instituto Federal de Geofísica y Recursos Naturales de Alemania: En especial al Sr. Mario Rodríguez, por su colaboración en lo que respecta a sistemas de información geográfica.

Al Instituto Nacional de Electrificación: Por su apoyo brindado en la culminación de mis estudios, así como por la oportunidad de desempeñarme en el Departamento de Hidrología.

Al personal docente y administrativo de la Sub-área de Manejo de Suelo y Agua de la Facultad de Agronomía, USAC: M.Sc. Ing. Tomás Padilla Cámbara, M.Sc. Ing. Marvin Salguero, M.Sc. Ing. Iván Dimitri Santos, M.Sc. Ing. Hugo Tobías, M.Sc. Ing. Guillermo Santos, M.Sc. Ing. Aníbal Sacbajá, M.Sc. Ing. Isaac Herrera, Inga. Celena Carías, P. Agr. Rogelio Pacheco, Sra. Elma de León, Ing. Norvin, Sr. Romael Alfaro y Sr. Ranferí, por su apoyo concreto e incondicional durante el tiempo que laboré como profesor en la Sub-área de Manejo de Suelo y Agua. Además a los auxiliares en su momento, Ing. Salvador García, P. Agr. José López Par y Maestro Bayron González.

A la Red Centroamericana de Manejo de Recursos Hídricos: Por la oportunidad que me brindaron para iniciarme en el área del manejo y planificación de los recursos hídricos.

A la familia Padilla Paredes, por compartir su sincera amistad, de la cual estaré siempre agradecido.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	iv
LISTADO DE ABREVIATURAS	viii
RESUMEN	ix
GLOSARIO	xi
 CAPÍTULO 1. ASPECTOS INTRODUCTORIOS	
1.1 Generalidades	1
1.2 Planteamiento del problema	3
1.3 Justificación	4
1.4 Objetivos	5
1.4.1 General	5
1.4.2 Específicos	5
 CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	
2.1 El ciclo hidrológico	7
2.2 El cambio climático	7
2.2.1 Definición e importancia	7
2.2.2 Causas y efectos	8
2.2.3 Vulnerabilidad de los recursos hídricos ante el cambio climático	10
2.3 Análisis de eventos extremos	11
2.3.1 Conceptos básicos	11
2.3.2 Distribuciones teóricas de frecuencia para eventos extremos	13
2.4 Componentes básicos del riesgo	13
2.4.1 Riesgo	13
2.4.2 Amenaza	14
2.4.3 Vulnerabilidad	15
2.4.4 Desastre	16
2.4.5 Inundaciones	17
2.5 Sistema de alerta temprana	21
2.5.1 Definiciones	21
2.5.2 Tipos de sistemas de alerta temprana	23
2.5.3 Aplicabilidad de los sistemas de alerta temprana	23
2.6 Simulaciones	24
2.6.1 Conceptos básicos	24
2.6.2 Simulación hidrológica	25
2.6.3 Simulación hidráulica	26
 CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO COYOLATE	
3.1 Aspectos biofísicos	27
3.1.1 Ubicación geográfica	27
3.1.2 División político-administrativa	27

3.1.3 Región fisiográfica	28
3.1.4 Hidrografía	28
3.1.5 Sistema fluvial	31
3.1.6 Relieve	32
3.1.7 Estimación del tiempo de concentración	34
4.1.8 Suelos	35
4.1.9 Uso de la tierra	36
3.2 Aspectos socioeconómicos	37

CAPÍTULO 4. RÉGIMEN DE LLUVIAS Y CRECIDAS

4.1 Régimen de lluvias	39
4.1.1 Generalidades	39
4.1.2 Lluvia multi-anual	39
4.1.3 Lluvia mensual	40
4.1.4 Lluvia diaria	41
4.1.5 Intensidad de las lluvias	42
4.1.6 Análisis estadístico de lluvia diaria máxima anual	44
4.2 Régimen de crecidas	45
4.2.1 Generalidades	45
4.2.2 Estaciones hidrométricas	46
4.2.3 Análisis estadístico de caudales máximos anuales en la estación hidrométrica Puente Coyolate	47
4.2.4 Análisis regional de crecidas	49
4.2.5 Simulación hidráulica	57
4.3 Descripción y análisis del ciclón tropical Stan	61
4.3.1 Antecedentes	61
4.3.2 Características	61
4.3.3 Efectos	62
4.3.4 Comportamiento de la lluvia	63
4.3.5 Comportamiento limnimétrico del río Coyolate	66
4.3.6 Interacción de la lluvia en el comportamiento limnimétrico del río Coyolate	69

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y PROPUESTA DEL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA, PARA INUNDACIONES DE LA CUENCA DEL RÍO COYOLATE

5.1 Antecedentes	73
5.2 Estudios de caso	73
5.2.1 SAT de la subcuenca del río Pensativo	74
5.2.2 SAT de la cuenca del río Samalá	75
5.2.3 SAT de la cuenca del río Achiguate	75
5.3 SAT de la cuenca del río Coyolate	76
5.3.1 Antecedentes de inundaciones en la cuenca del río Coyolate	76
5.3.2 Descripción	76
5.3.3 Análisis	78
5.3.4 Propuesta	83

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones	93
6.2 Recomendaciones	94

BIBLIOGRAFÍA	95
---------------------	----

ANEXO	103
--------------	-----

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

2.1	Estructura básica de un sistema de alerta temprana.	21
2.2	Esquema operativo de un sistema de alerta temprana.	22
3.1	Ubicación geográfica de la cuenca del río Coyolate.	29
3.2	Planta perfil de los principales afluentes de la cuenca del río Coyolate.	33
4.1	Lluvia anual en tres estaciones climáticas con influencia en la cuenca del río Coyolate.	40
4.2	Lluvia media mensual en tres estaciones climáticas con influencia en la cuenca del río Coyolate.	41
4.3	Lluvia diaria máxima anual en tres estaciones climáticas con influencia en la cuenca del río Coyolate.	42
4.4	Curvas duración-intensidad-frecuencia en la estación climática Camantulul.	43
4.5	Ajuste de registros históricos de lluvia diaria máxima anual a curvas teóricas de distribución de frecuencia en la estación climática Camantulul.	44
4.6	Ajuste de registros históricos de caudales máximos anuales a curvas teóricas de distribución de frecuencia en la estación hidrométrica Puente Coyolate.	47
4.7	Caudal índice vrs área de 12 cuencas hidrográficas.	51
4.8	Caudal específico vrs área de 12 cuencas hidrográficas.	52
4.9	Ajuste de series estandarizadas de caudales máximos anuales a curvas teóricas de distribución de frecuencia.	53
4.10	Lluvia diaria durante el ciclón tropical Stan del 01 al 10 de octubre del año 2005, en la estación climática Camantulul.	64
4.11	Comparativo del régimen de lluvia normal respecto al año 2005.	64
4.12	Hietograma con intervalos de 60 minutos los días 04 y 05 de octubre del año 2005, en la estación climática Camantulul.	65
4.13	Hietograma con intervalos de 15 minutos los días 04 y 05 de octubre del año 2005, en la estación climática Camantulul.	66

4.14	Nivel del río Coyolate del 01 al 10 de octubre del año 2005, en la estación hidrométrica Puente Coyolate.	67
4.15	Hidrograma del ciclón tropical Stan en la estación hidrométrica Puente Coyolate.	68
4.16	Nivel del río Coyolate vrs lluvia del 01 al 10 de octubre del año 2005, con intervalos de 15 minutos.	69
4.17	Comportamiento del nivel diario del río Coyolate durante el año hidrológico 2005 - 2006.	70
5.1	Sistema de alerta temprana de la cuenca del río Coyolate.	79
1A.	Ajuste de registros históricos de lluvia diaria máxima anual, en la estación climática Camantulul.	104
2A.	Ajuste de registros históricos de caudales máximos anuales, en la estación hidrométrica Puente Coyolate.	104
3A.	Comportamiento del nivel diario del río Coyolate durante el año hidrológico 2003 - 2004.	105
4A.	Comportamiento del nivel diario del río Coyolate durante el año hidrológico 2004 - 2005.	105
5A.	Inundaciones en áreas agrícolas en la parte baja de la cuenca del río Coyolate.	106
6A.	Acumulación de sedimentos en el río Coyolate al este de la aldea Canoguitas.	106
7A.	Estación hidrométrica localizada en el puente Coyolate.	107
8A.	Estación delta tres del sistema de alerta temprana en la cuenca del río Coyolate.	107

CUADROS

3.1	Orden, número y longitud media de corrientes de la cuenca del río Coyolate.	30
3.2	Aspectos de superficie de la cuenca del río Coyolate.	31
3.3	Tiempos de concentración estimados en la cuenca del río Coyolate.	34
3.4	Órdenes de suelos localizados en la cuenca del río Coyolate.	35
3.5	Uso de la tierra en la cuenca del río Coyolate.	36
3.6	Características socioeconómicas de la cuenca del río Coyolate.	37
3.7	Comunidades frecuentemente inundadas en la cuenca del río Coyolate.	38
4.1	Posición relativa del ajuste de 11 distribuciones teóricas de frecuencia utilizadas en el análisis de lluvia diaria máxima anual, en la estación climática Camantulul.	45
4.2	Características de las estaciones hidrométricas de la cuenca del río Coyolate.	46
4.3	Posición relativa del ajuste de 12 distribuciones teóricas de frecuencias utilizadas en el análisis de caudales máximos anuales, en la estación hidrométrica Puente Coyolate.	48
4.4	Períodos de retorno estimados para la crecida máxima durante el ciclón tropical Stan en la estación hidrométrica Puente Coyolate.	48
4.5	Características de las estaciones hidrométricas utilizadas en el análisis regional de crecidas.	50
4.6	Factores de frecuencia (K_{TR}) de distribuciones teóricas, donde los parámetros se estimaron con momentos convencionales.	54
4.7	Factores de frecuencia (K_{TR}) de distribuciones teóricas, donde los parámetros se estimaron con momentos lineales.	54
4.8	Caudales máximos anuales (m^3/s) estimados en diversos sitios de interés en la cuenca del río Coyolate.	56
4.9	Secciones representativas en el cauce principal de la cuenca del río Coyolate.	58
4.10	Velocidades simuladas mediante el programa HEC - RAS en el tramo en consideración.	59

4.11	Niveles simulados para diversos caudales en la estación hidrométrica Puente Coyolate.	60
4.12	Información relevante del ciclón tropical Stan.	62
5.1	Estaciones que conforman el sistema de alerta temprana para inundaciones en la cuenca del río Coyolate.	77
5.2	Niveles críticos de alerta y acciones a implementar en la cuenca del río Coyolate.	87
1A.	Registro de niveles de ríos.	108
2A.	Registro de lluvia.	109

LISTADO DE ABREVIATURAS

ASDI	Agencia Sueca para el Desarrollo
ERIS	Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos
CENGICAÑA	Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar
CEPAL	Comisión Económica para América Latina
CEPRENAC	Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales en América Central
CONE	Comité Nacional de Emergencia
CONRED	Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres en Guatemala
GMT	Hora del Meridiano de Greenwich
HEC - RAS	Hydrologic Engineering Center - River Analysis System
IGN	Instituto Geográfico Nacional
IICA	Instituto de Investigaciones de Ciencias Agrícolas
INAB	Instituto Nacional de Bosques
INE	Instituto Nacional de Estadística
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología
IPCC	Panel Inter - Gubernamental Sobre el Cambio Climático
MAGA	Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación
MARN	Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales
NOAA	Centro Nacional de Huracanes
NOVIB	Organización Holandesa Para la Cooperación Internacional al Desarrollo
OEA	Organización de los Estados Americanos
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
SAT	Sistema de Alerta Temprana
SEGEPLAN	Secretaría General de Planificación de la Presidencia de la República

RESUMEN

La república de Guatemala, dada sus características topográficas y climáticas es susceptible a la formación de eventos extremos, como precipitaciones intensas y crecidas, aunado a la degradación de los recursos naturales en la mayoría de las cuencas del país, aumentan la vulnerabilidad de la población ante este tipo de eventos. Se estima que un total de 4,470 km² son áreas susceptibles a ser inundadas, siendo la vertiente del océano Pacífico la que presenta la mayor ocurrencia de eventos. La preocupación en el país por el efecto de las inundaciones se incrementó posteriormente al ciclón tropical Mitch en el año de 1998, surgiendo la necesidad de adoptar e implementar sistemas de alerta temprana. En la cuenca del río Coyolate se implementó el primer sistema en el país, integrado por 14 estaciones, de las cuales en siete se monitorean condiciones hidroclimáticas y niveles del río, siendo el resto estaciones de respuesta en la parte baja de la cuenca. El objetivo principal del estudio fue la actualización del sistema, mediante la estimación de niveles de alerta, para lo que se realizó la caracterización pluviométrica e hidrométrica de la cuenca; así mismo se analizó el ciclón tropical Stan contrastando el efecto de la lluvia sobre el nivel del río Coyolate. Existen algunas ventajas del sistema como la participación comunitaria, infraestructura, interés institucional, que se convierten en un potencial para aumentar la eficiencia del mismo, sin embargo, se observó que existen limitantes, como la carencia de un sistema de almacenamiento, dificultando el análisis de eventos hidrometeorológicos. Se concluye que el monitoreo de las condiciones hidrometeorológicas en la parte media de la cuenca es de vital importancia, dado el régimen de las lluvias, caracterizado por ser de alta intensidad y de corta a moderada duración. Eventos como el ciclón tropical Stan, presentaron características de intensidad baja a moderada pero de prolongada duración, provocando la saturación de los suelos, disminuyendo su capacidad de almacenamiento y aumentando el volumen de escorrentía superficial, lo que repercutió directamente en la formación de crecidas. Los lineamientos de manejo incluidos en la propuesta están orientados a la instrumentación, registro y almacenamiento de datos, establecimiento de niveles de alerta, delimitación de áreas inundables y establecimiento de programas. En lo que respecta a los niveles de alerta se plantean tres, en donde se considera la lluvia acumulada en los días previos al evento, intensidades de lluvia y niveles en el río Coyolate. Además, se sugiere el monitoreo y almacenamiento de niveles en los ríos Cristóbal y Pantaleón en los respectivos puentes. Para lograr lo anterior, es indispensable fortalecer la participación comunitaria e involucrar a todos los actores en la cuenca, tanto de entidades privadas como del estado, con el objetivo de elevar la eficiencia del sistema lo cual se reflejaría en la disminución de la vulnerabilidad.

ABSTRACT

The republic of Guatemala, because of its topographical features and climate is susceptible to the formation of extreme events such as heavy rainfall and floods, coupled with the degradation of natural resources in most basins in the country, increase the vulnerability of the population to such events. It is estimated that a total of 4,470 km² area are likely to be flooded, with the slope of the Pacific ocean which has the highest occurrence of events. The concern in the country because of the effect of the floods was subsequently increased to tropical cyclone Mitch in the year 1998, emerging is the need to adopt to implement early warning systems for floods. At the river basin Coyolate the first system was implemented in the country, consisting of 14 stations, which are monitored at seven hydroclimatic conditions and levels of the river (Coyolate and Cristóbal), and the remainder stations answer in the bottom of basin. The main objective of this study was to update the system by the estimated levels of alert, which was conducted rainfall is hydrometric characterization of the watershed, we also analyzed the tropical cyclone Stan contrasting effect of the rain on the level Coyolate river. There are some advantages of the system as community involvement, infrastructure, institutional interest, which becomes a potential for increasing the efficiency of the same, however, it was noted that existing limitations, such as lack of a storage system, hampering analysis hydrometeorological events. It is concluded that monitoring of hydrometeorological conditions in the middle of the basin is of vital importance in the system, given the regime of the rains, being characterized by high intensity and short duration to moderate. Events such as the tropical cyclone town, presented characteristics of low to moderate intensity but prolonged duration, causing saturation of the soil, reducing its storage capacity and increasing the volume of runoff, which impacted directly on the formation of flooding. The guidelines for handling included in the proposal are aimed at the instrumentation, recording and storage of data, establishing alert levels, demarcation of flooded areas and establishment of programs. With regard to the raised alert levels tree, which is considered the accumulated rainfall in the days prior to the event (of vital importance because of the moisture content in the soil), and intensities of rainfall levels in the river Coyolate. In addition, it is suggested monitoring and storage levels in the rivers and Cristóbal, Pantaleón in the respective bridges, because they are major tributaries in the watershed. To achieve this, it is essential to strengthen community participation is to involve all stakeholders in the basin, both private entities such as the state, with the aim of improving the efficiency of the early warning system which would be reflected in the decline in reduced vulnerability.

GLOSARIO

Alerta:	Estado que se declara con anterioridad a la manifestación de un fenómeno peligroso, con el fin de que los organismos de emergencia activen procedimientos de acción preestablecidos y que la población tome precauciones específicas debido a la inminente ocurrencia del evento previsible.
Amenaza:	Posibilidad de que ocurra un riesgo frente al cual una comunidad en particular es vulnerable.
Análisis regional de crecidas:	Análisis realizado en regiones hidrológicamente homogéneas con el objetivo de estimar factores de frecuencia para ciertos períodos de retorno.
Caudal índice:	Promedio de los caudales máximos anuales de una serie correspondiente a una estación hidrométrica dada.
Humedad antecedente:	Contenido de humedad en el suelo producto de precipitaciones anteriores, generalmente se consideran la lluvia acumulada durante cinco días continuos.
Condición hidrológica:	Grado de cobertura de una determinada unidad de suelo dentro de una cuenca. La condición hidrológica se puede clasificar como buena, regular o mala.
Desastre:	Evento identificable en el tiempo y el espacio, en el cual una comunidad ve afectado su funcionamiento normal, con pérdidas de vidas y daños de magnitud en sus propiedades y servicios, que impiden el cumplimiento de las actividades esenciales y normales de la sociedad.
Distribución teórica de frecuencia:	Método estadístico de aplicabilidad en el análisis de eventos extremos hidrológicos para la predicción de la magnitud y período de retorno.
Escorrentía superficial:	Consiste en la ocurrencia y el transporte de agua en la superficie terrestre.
Inundación:	Elevación no usual del nivel del agua, que provoca desbordamientos y posibles perjuicios.
Limnigrama:	Gráfica que muestra el comportamiento del nivel de un cauce en función del tiempo.

Limnómetro:	Escala que permite efectuar la lectura de la altura de la superficie de un río o lago.
Lluvia diaria máxima anual:	Lluvia máxima registrada en una estación determinada durante un día específico para un año dado.
Lluvia máxima diaria:	Lluvia máxima registrada en una estación determinada durante un día específico.
Lluvia máxima en 24 horas:	Lluvia máxima registrada durante un período continuo de 24 horas.
Planicie de inundación:	Tierras que bordean un río y que están frecuentemente sujetas a inundaciones.
Región hidrológica:	Región geográfica donde los fenómenos que producen la lluvia son similares.
Riesgo:	Se concibe como el conjunto de factores que hacen proclive a una sociedad de ser afectada de manera severa por un fenómeno. Hidrológicamente se define como la posibilidad de que la avenida para la cual se diseña una obra hidráulica sea excedida.
Serie estandarizada:	Resultado de la división entre el caudal máximo anual y el caudal máximo medio correspondiente a una serie de registros históricos de una estación hidrométrica dada.
Simulación hidráulica:	Simulación de las condiciones geométricas e hidráulicas de un cauce bajo distintas condiciones de flujo.
Sistema de alerta temprana:	Medio de generación y comunicación de información que permite a una estructura comunitaria organizada tomar la decisión de una evacuación preventiva y a las autoridades municipales y del gobierno central, reaccionar para brindar los medios para albergar dignamente a las personas mientras permanecen las condiciones de inundación.
Tiempo de concentración:	Tiempo necesario para que toda la cuenca contribuya con escorrentía superficial en una sección considerada.
Vulnerabilidad:	Incapacidad o debilidad intrínseca de un elemento para absorber mediante el autoajuste, los efectos de un determinado cambio de su ambiente.

CAPÍTULO 1

ASPECTOS INTRODUCTORIOS

1.1 Generalidades

La república de Guatemala con una extensión superficial aproximada de 108,889 km², está 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' longitud oeste. 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% drena 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 msnm, lo cual da lugar a múltiples microclimas e imprime rasgos especiales a las cuencas, subcuencas y microcuencas, así como al comportamiento y ocurrencia de las aguas superficiales y subterráneas (NOVIB, 2001).

La respuesta de las cuencas a eventos climáticos e integrando las características biofísicas de Guatemala hacen del país una zona muy vulnerable a desastres naturales. Los desastres comunes en la región son terremotos y/o ciclones tropicales. Estos están acompañados por fenómenos como erupciones volcánicas, deslizamientos, derrumbes e inundaciones, los cuales son los fenómenos más letales de los desastres naturales (Santos, 2006).

La cuenca del río Coyolate es una de las 18 cuencas que conforman la vertiente del océano Pacífico. Los ríos de esta vertiente nacen en la parte alta de las montañas y recorren, a través de pendientes pronunciadas de terreno, distancias comprendidas entre 40 y 60 km antes de desembocar en el mar. En la parte baja de las cuencas el relieve es suave, con pendientes promedios menores al 1% (NOVIB, 2001). En la cuenca del río Coyolate, con frecuencia se

producen inundaciones en la planicie costera, cuyas causas se atribuyen en parte a la falta de un manejo integrado de la cuenca, principalmente en las partes alta y media. La deforestación es la principal causa de esto, con la consecuente pérdida de suelo y alteración del ciclo hidrológico, ocasionando que la mayor parte de la precipitación pluvial se constituya en escorrentía directa, disminuyendo la infiltración y por ende, la recarga hídrica. CEPREDENAC (2006), estima un total de 35 eventos de inundación en la cuenca a partir del año 1900.

Raymundo & Godínez (2005), mencionan que en la zona influye el diseño de obras de infraestructura para fines de riego (principalmente en cultivos extensivos), que requieren un conocimiento preciso de la hidrología, regímenes de precipitación, estructura del suelo y el relieve. Análisis de probabilidad de eventos de lluvia son necesarios pues estos permitirán prever la periodicidad de recurrencia de fenómenos de gran magnitud y entonces diseñar una obra capaz de mitigar el fenómeno, tanto desde la capacidad de la obra en sí misma como de estructuras relacionadas que tendrían la finalidad de drenar el agua que puede desbordarse del nuevo cauce, de manera que esto no afecte otras zonas no sujetas a fenómenos de inundación.

La preocupación en el país por el efecto de las inundaciones se incrementó posteriormente al ciclón tropical Mitch, en el año de 1998, al grado de reconocer que es quizás la única medida para el manejo de inundaciones que cuenta con un respaldo institucional real. Dentro de este renovado interés por los sistemas de alerta temprana, es importante analizar como nacieron y como se han desarrollado, partiendo precisamente del primero de estos, el cual nace de la mano del proyecto Coyolate (CEPREDENAC, 2006).

En Guatemala, las zonas inundadas e inundables del país, suman un total de 4,470 km² de superficie, equivalentes al 4.10% del total, siendo la vertiente del océano Pacífico la que presenta la mayor ocurrencia de eventos (60%), seguido de la vertiente del golfo de México. La mayor cantidad de eventos ocurren en la segunda mitad de la época lluviosa (65.60%), en los meses de agosto y noviembre, en donde las cuencas más afectadas son las del río María Linda, río Achiguate y río Coyolate (MAGA *et al.* 2002).

El presente estudio tiene como objetivo, realizar el análisis hidrológico de la cuenca del río Coyolate, además de evaluar el sistema de alerta temprana para inundaciones existente en la cuenca, y de ser necesario realizar las modificaciones que sean pertinentes.

1.2 Planteamiento del problema

La república de Guatemala es afectada periódicamente por el paso de depresiones, tormentas tropicales y huracanes, que provocan crecidas que causan daños al ambiente; la infraestructura, la economía y además provocan pérdida de vidas humanas. El costo del paso de estos fenómenos meteorológicos sobre el ambiente, la vida y la economía es muy elevado, por lo que el análisis de estos eventos es fundamental e importante para la planificación de estrategias, que permitan enfrentarlos de una manera adecuada. La degradación ambiental, así como el mal uso y manejo de los recursos naturales del país, incrementan la vulnerabilidad ante este tipo de eventos naturales. El ciclón tropical Mitch en el año de 1998 tuvo características de inusitada fuerza en la región centroamericana, causando desolación, pérdida de vidas humanas y daños económicos, sociales y ambientales de enorme magnitud. No fue solamente la excepcional fuerza que alcanzó el evento al tocar nuestras costas, sino también la extensión de su diámetro, la acumulación de humedad y lluvias que acarreó y la errática trayectoria que mantuvo durante varios días. Los daños ocasionados por el ciclón tropical Mitch, en Guatemala se estiman en 202 muertes y pérdidas económicas por \$748 millones (CEPAL & SEGEPLAN, 2007).

En el año 2005 el paso del ciclón tropical Stan ocasionó en varios poblados una ruptura extrema del funcionamiento de la sociedad, originando pérdidas de vidas humanas, materiales y daños medioambientales a gran escala, superando la capacidad de la sociedad afectada para hacer frente a la situación utilizando únicamente sus propios recursos. Los sucesos acontecidos por el ciclón tropical Stan, tales como desbordamientos de ríos, derrumbes y deslizamientos de tierra no se consideran, por sí mismos, como desastres, pero como afectó de forma adversa y gravemente a vidas humanas, así como sus bases de subsistencia (agricultura) y pertenencias (ERIS, 2006).

Durante el paso del ciclón tropical Stan, la vertiente más afectada fue la del océano Pacífico, entre ellas la cuenca del río Coyolate. En dicha cuenca, los efectos fueron la inundación de comunidades, trayendo consigo daños irreversibles a la economía de la región. Las pérdidas económicas ocasionadas por este fenómeno de acuerdo con CEPAL & SEGEPLAN (2007), se estiman en \$998.30 millones. Actualmente, en la cuenca existe un sistema de alerta temprana, integrado por 14 estaciones, siendo siete de vigilancia (ubicadas en la parte alta y media de la cuenca) y siete de respuesta (ubicada en la parte baja de la cuenca), existiendo la necesidad de evaluarlo y/o actualizarlo para lograr una mayor eficiencia en la emisión de las alarmas, repercutiendo en una disminución de la vulnerabilidad de las comunidades ante inundaciones.

1.3 Justificación

La república de Guatemala, dado el manejo de los recursos naturales es vulnerable a desastres, de acuerdo con Revolorio (2003). Actualmente, se estima que ocupa el tercer lugar a nivel latinoamericano con un 72% de suelos que presentan degradación severa y muy severa. El manejo inadecuado de los recursos naturales del país, principalmente bajo el enfoque de cuenca hidrográfica, aunado a los efectos climáticos que amenazan la región, aumentan la vulnerabilidad a los desastres naturales. Se prevé que en un futuro el calentamiento global a nivel de cuenca en la región centroamericana traerá efectos adversos como inundaciones, sequías, pérdidas de suelo (por erosión hídrica), con efectos posteriores, como catástrofes, pérdidas de vidas humanas, racionamiento de energía, daños a la infraestructura, escasez de alimentos y agua potable.

De acuerdo con NOBIV (2002), en Guatemala, en la vertiente del océano Pacífico son muy frecuentes los eventos de inundaciones cuyas causas se atribuyen en parte a la erosión causada por la deforestación en la parte alta de las cuencas y a la deposición de cenizas por actividad volcánica. Además, menciona que tampoco se ha formulado un plan general de prevención de desastres por crecidas e inundaciones en dicha vertiente.

La cuenca del río Coyolate, como se mencionó, forma parte de la vertiente del océano Pacífico de Guatemala, inundando constantemente comunidades de los municipios de La Gomera y La Nueva Concepción, ambos del departamento de Escuintla. Villagrán de León (2003), menciona que la población se encuentra dentro del estatus económico medio y bajo, como en muchas otras cuencas, son poblaciones situadas en las cercanías de las riberas de los ríos las que se ven afectadas por las inundaciones, sobretodo en las planicies. Además, de acuerdo con CEPREDENAC (2006), el área de inundación representa el 8.80% del total (aproximadamente 150 km²), donde se localizan 28 comunidades con una población estimada de 10,512 personas.

El estudio hidrológico de la cuenca del río Coyolate, así como la evaluación del sistema de alerta temprana, permitirán reducir en la cuenca los efectos adversos ocasionados principalmente a la población. Es importante destacar, que lo anterior debe ir acompañado de un manejo integral de los recursos naturales, tomando como unidad de gestión y planificación la cuenca hidrográfica, y considerando todos los actores involucrados. En la medida que se logre integrar el estudio de la cuenca con sus respectivos lineamientos de manejo, se reducirá la vulnerabilidad de las comunidades ante desastres naturales.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

Evaluar y proponer modificaciones al sistema de alerta temprana, para inundaciones en la cuenca del río Coyolate.

1.4.2 Específicos

1. Identificar y evaluar la información hidrometeorológica disponible en la cuenca y en el área de influencia hidrológica.
2. Realizar el estudio de crecidas en la cuenca del río Coyolate.
3. Evaluar el sistema de alerta temprana existente en la cuenca del río Coyolate.
4. Analizar el comportamiento hidrometeorológico del ciclón tropical Stan en la cuenca del río Coyolate.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 El ciclo hidrológico

El ciclo no tiene un principio y un fin, sin embargo, se puede partir que el agua se evapora del mar, cuerpos de agua y de la superficie terrestre. La cantidad de agua que puede evaporarse depende de insumo de energía. La mayor evaporación ocurre cerca del Ecuador, donde la radiación solar es más intensa. El vapor de agua llega a la atmósfera, transportado por las masas de aire en movimiento y bajo ciertas condiciones se condensa formando nubes que, a su vez, precipita de vuelta hacia la superficie de la tierra (Orozco, 2006).

En síntesis, los procesos básicos que incluyen el ciclo hidrológico son los de evapotranspiración, precipitación, infiltración, precolación y escorrentía. Es claro que los procesos descritos operan con diferente intensidad a muy distintas escalas espaciales y temporales, por lo que más que en un ciclo hidrológico unitario y mecanicista debe pensarse más bien en un conjunto interrelacionado de procesos que, operando a muy distintas escalas, configuran un resultado final agregado que es el que se observa simplificada como objeto de estudio y evaluación (López, 2001).

La acción del hombre va introduciendo cambios progresivamente importantes en el ciclo hidrológico de algunas regiones. Los drenajes extensivos han hecho descender el nivel de la zona saturada y, paralelamente, ha descendido la evapotranspiración y ha aumentado la aportación de la escorrentía subterránea a los ríos; la deforestación o la repoblación forestal pueden también modificar el régimen de crecidas de los ríos, pero no parece haber datos que permitan asegurar una modificación sustancial en su aportación media anual (Custodio y Llamas, 2001).

2.2 El cambio climático

2.2.1 Definición e importancia

De acuerdo con la ONU (Organización de las Naciones Unidas), citado por Beltetón (2007), se define como el cambio en el clima atribuible en forma directa o indirecta a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y el cual, tras adicionar la variabilidad natural, se observa en escalas mayores de tiempo. Su importancia radica en que es un fenómeno global que tiene gran impacto en la región latinoamericana. De acuerdo con los informes del Panel Intergubernamental de Científicos de la Convención Marco para el Cambio Climático de

las Naciones Unidas, América Latina se verá afectada severamente por sequías e inundaciones, así como huracanes y otros eventos extremos asociados al clima.

2.2.2 Causas y efectos

De acuerdo con el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (2007), existen factores que pueden producir cambios en el clima, los que se clasifican como:

- a. **Factores externos:** en los que el agente se encuentra fuera del sistema climático, como cambios en la energía solar, cambios debidos a la relación astronómica entre la tierra y el sol y cambios en la superficie terrestre como resultado de los movimientos de los continentes.
- b. **Factores internos:** en los que la alteración inicial se halla dentro del sistema climático. Aquí se encuentran causas naturales, como efecto natural de invernadero y erupciones volcánicas. También se mencionan causas antropogénicas, siendo la principal el uso de combustibles fósiles. Howard citado por Azurdia (2007), menciona que se estima que siete billones de toneladas de bióxido de carbono son emitidas a la atmósfera cada año.

El Panel Inter - Gubernamental sobre el cambio climático (IPCC) citado por Oliva (2007), en su informe en el año 2001, advirtió sobre posibles cambios en la atmósfera, clima y sistema biológico terrestre en el siglo XX, como son:

- La temperatura media mundial de la superficie aumento de 0.60 a 0.20 °C en el siglo XX.
- En la superficie del hemisferio norte la temperatura aumento durante el siglo XX más que en otro siglo de los últimos mil años, el decenio de 1990 fue el más cálido del milenio.
- La temperatura diurna disminuyó durante el período 1950 - 2000.

Las conclusiones finales del informe son las siguientes:

- Las concentraciones atmosféricas de los gases de efecto invernadero antropogénicos han aumentado en gran medida desde 1750.
- Gran parte del calentamiento observado durante los últimos 50 años se ha producido probablemente por un aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero.

De acuerdo al Panel Inter - Gubernamental sobre el cambio climático, Oficina del Cambio Climático para Guatemala, Trópico Verde citado por Ramírez (2006), los efectos del cambio climático son los siguientes:

- Trastornos: alteración en los patrones de lluvia, más sequía en lugares áridos, inundaciones y derrumbes, cambio de temperatura en suelo y aire, aumento del nivel de los mares.
- Ambiente: reducción de las fuentes de agua dulce, alteración de ecosistemas, pérdida de especies de flora y fauna, devastación por tormentas y huracanes.
- Impacto humano: inseguridad alimentaria, riesgo de enfermedades infecciosas, aumento de la pobreza, incumplimiento de las metas del milenio.

Castañon citado por Ramírez (2006), prevé que algunas áreas del país tendrán sequías más prolongadas, y otras, lluvias más copiosas que causarán inundaciones, mientras el agua podría escasear.

Sánchez citado por Quiroa (2007), estima que en el presente año existe una alta probabilidad de que se confirmen las condiciones ideales para la formación del fenómeno climático conocido como “La Niña”. Además, indicó que con la finalización del mes de abril concluyó la manifestación del fenómeno de “El Niño” que estuvo afectando la región de América del sur, pero también se ha dado el caso de un repentino enfriamiento de las aguas del océano Pacífico frente a las costas del cono sur, lo cual representa un claro indicio que se está formando La Niña. Como un pronóstico, se puede decir que si se llega a establecer La Niña en Guatemala, se podrían tener problemas de exceso de lluvia.

Es importante mencionar que en la declaración de Panamá (2006), se estableció un artículo relacionado con el cambio climático, el cual literalmente dice: “La necesidad de incorporar los principios del enfoque de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos dentro de las políticas, estrategias y marcos regulatorios, enfatizando en particular, la descentralización de la gestión a largo plazo, la participación equitativa de todos los sectores de la sociedad y las disciplinas científicas, el equilibrio entre la conservación y el uso de la diversidad biológica, la adopción de incentivos destinados a promover la conservación y el uso sostenible de ecosistemas, el mantenimiento de la calidad y cantidad de agua incluyendo los caudales ambientales, la gestión del riesgo y la vulnerabilidad social, ambiental y económica y la adaptación al cambio climático”.

2.2.3 Vulnerabilidad de los recursos hídricos ante el cambio climático

De acuerdo con el perfil ambiental de Guatemala (2004), los efectos de un aumento o disminución de escorrentía tienen impactos en los sistemas de suministro de agua y en la producción agrícola. Al aumentar la escorrentía superficial se ocasionarían inundaciones en la época lluviosa; el incremento de la escorrentía puede producir mayor degradación de suelos en las cuencas hidrográficas. Al ocurrir una disminución y consecuentemente una disminución de los caudales, se producirá mayor sedimentación y un proceso acelerado de asolvamiento en los respectivos cauces. También, al aumentar la temperatura y disminuir la precipitación y la escorrentía superficial habría una disminución de las fuentes de agua para consumo humano, animal y para riego, consecuentemente se vería afectada la salud de la población. Orozco (2006), menciona algunas alteraciones al ciclo hidrológico, como lo son:

- Cambios en duración, intensidad, cobertura y volumen de lluvias.
- Disminución de caudales en época seca.
- Cambios en la frecuencia de lluvias.
- Aumento de intensidades de lluvias.
- Impactos en sectores hidroeléctrico, agricultura, infraestructura y agua potable.

De acuerdo con el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) citado por Salguero (2003), en Guatemala, se definieron ciertos objetivos generales para evaluar y analizar el impacto climático, en el sector de recursos hidráulicos, y que se pueden resumir en los siguientes:

- Aplicar una metodología, basada en el modelo CLIRUN3 (*climate-runoff-model*), que modele y simule el comportamiento clima-escorrentía.
- Comprender los impactos del cambio climático en el escurrimiento superficial, en aspectos de demanda y oferta en cuencas consideradas críticas para el desarrollo socioeconómico de Guatemala.

En conclusión, en Guatemala, aún no se ha aprobado por parte del Congreso de la República la legislación específica de aguas, por lo que no se cuenta con políticas de mitigación, adaptación o control del recurso hídrico. Por lo tanto, se debe educar y concienciar sobre las causas y efectos del cambio climático, uso adecuado del recurso agua, etc, utilizando los medios

de comunicación para difundir la responsabilidad que todos tenemos en la explotación desmedida de los recursos naturales. La protección y reforestación de cuencas, la protección y mejoramiento del medio ambiente; son acciones paralelas que deben considerarse, para ello los organismos de ambiente y las instituciones de manejo de agua deben conjugar esfuerzos, y formular políticas dirigidas al sector de recursos naturales.

2.3 Análisis de eventos extremos

2.3.1 Conceptos básicos

A. Eventos extremos

De acuerdo con Orozco (2002), los principales eventos extremos de interés para el hidrólogo son las crecidas y lluvias extremas (precipitaciones intensas). Aunque también cabe mencionar, eventos como sequías y temperaturas extremas (máximas y mínimas).

B. Frecuencia y probabilidad

La frecuencia es el número de casos en una clase, cuando los eventos son clasificados de acuerdo a 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 producen 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.

C. Período de retorno

Villón (2001), define el período de retorno (T_r) 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:

- a. **Probabilidad de excedencia $P(Q \geq q_0)$:** probabilidad que un evento sea excedido o igualado.
- b. **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.

D. Riesgo y confiabilidad

El riesgo (R) se define como la probabilidad que la avenida para la cual se diseña la obra sea excedida. Se entiende que ésta es una situación de riesgo, pues la obra se diseña para soportar cierta avenida máxima y crecidas mayores le podrían hacer daño o incluso destruirla. El riesgo se denota matemáticamente como:

$$R = 1 - (1 - 1/Tr)^n \dots \dots \dots \text{Ecuación: 2.1}$$

Siendo n la vida útil de la obra. Por lo tanto, la confiabilidad (C) se define como el complemento del riesgo ($C = 1 - R$). Monsalve (1999), menciona que el riesgo es equivalente a la probabilidad de excedencia.

E. 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).

F. 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:

a. 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.

b. 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.

2.3.2 Distribuciones teóricas de frecuencia para eventos extremos

Orozco (2002), menciona que existe una gama de distribuciones teóricas de frecuencias que pueden utilizarse para el análisis de frecuencia de crecidas. Entre las que se pueden mencionar: Pearson III, Gumbel (valor extremo tipo I), Log Normal, Log Gumbel, Log Pearson III, Log Normal de tres parámetros, Valor Extremo Generalizado, Logística, Weibull (valor extremo tipo III), Wakeby, Valor Extremo de dos Componentes, Gama y Pareto. Es importante mencionar que a mayor cantidad de información se obtendrá mayor precisión en el análisis.

2.4 Componentes básicos del riesgo

2.4.1 Riesgo

A. Concepto de riesgo

El riesgo se concibe como el conjunto de factores que hacen proclive a una sociedad de ser afectada de manera severa por un fenómeno. Conceptualmente, se pueden definir los riesgos con base a tres componentes: amenazas, vulnerabilidades y deficiencias en las medidas de preparación (Villagrán de León, 2001). De acuerdo con Coburn *et al.* (1991), el riesgo refiere a las pérdidas esperadas a causa de una amenaza determinada en un elemento en riesgo, durante un

período específico en el futuro. Según la manera en que se defina el elemento en riesgo, el riesgo puede medirse según la pérdida económica esperada, o según el número de vidas perdidas o la extensión del daño físico a la propiedad.

B. Riesgo específico

El término riesgo específico se usa para referirse a riesgos o estimaciones de pérdidas de cualquier tipo que se exprese como proporción del total, los dos primeros ejemplos se pueden también expresar: “el 10% de la población muerta por amenazas naturales dentro de 30 años” o 50% de las casas dañadas gravemente o destruidas en los próximos 25 años” de la propiedad al costo de reemplazo total (Coburn *et al.* 1991).

C. Determinación del riesgo

Coburn *et al.* (1991), mencionan que en la determinación del riesgo existen tres componentes esenciales, cada uno de los cuales debe cuantificarse separadamente:

- a. La probabilidad de acontecer la amenaza:** la posibilidad de experimentar una amenaza natural o tecnológica en un lugar o región.
- b. Los elementos en riesgo:** identificación y preparación de un inventario de la gente o edificaciones u otros elementos que podrían verse afectados en caso de ocurrir la amenaza y, donde sea necesario, la estimación de su valor económico.
- c. La vulnerabilidad de los elementos en riesgo:** qué daño sufrirán la población y las construcciones u otros elementos si experimentan algún nivel de peligro.

2.4.2 Amenaza

De acuerdo con Miner (2002), las amenazas se clasifican en naturales y antroponaturales. Las amenazas naturales son consecuencia de la ocurrencia de un fenómeno de origen natural (huracanes, terremotos, etc.), los cuales pueden afectar al hombre y también las obras de infraestructura existentes en un sitio en donde actúe el fenómeno natural. Dentro las amenazas naturales se pueden mencionar los terremotos o sismos, actividad volcánica, huracanes, inundaciones, precipitación de granizo y ráfagas de viento. Los huracanes por las altas precipitaciones de lluvia asociadas y los sismos son los principales disparadores de los deslizamientos de laderas. Los deslizamientos pueden considerarse como una amenaza debido a

que pueden presentarse en épocas normales de lluvia y por la participación antrópica en las laderas donde se instalan los asentamientos.

Las amenazas antroponaturales son aquellas situaciones o procesos inducidos por el hombre en el medio geológico que suponen un riesgo para las comunidades (Miner, 2002). El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (1995), realiza la siguiente clasificación de amenazas:

- a. **Amenazas geológicas:** terremotos, tsunamis, erupciones volcánicas y deslizamientos de tierra.
- b. **Amenazas climáticas:** ciclones tropicales, inundaciones y sequías.
- c. **Amenazas ambientales:** contaminación ambiental, deforestación, desertización e infestación de plagas.

Buch & Turcios (2003), mencionan otro tipo de amenazas denominadas socionaturales, las cuales son la reacción de la naturaleza frente a la acción humana perjudicial hacia los ecosistemas, lo trascendental en este caso, es que quienes sufren los efectos de esas reacciones, no son siempre los mismos que las han provocado. El ejemplo típico en nuestro país es que las consecuencias de la deforestación y sobreexplotación de los suelos en las cabeceras de una cuenca hidrográfica, son padecidas en forma de inundaciones por las comunidades que habitan la parte baja de la misma cuenca.

2.4.3 Vulnerabilidad

Es la incapacidad o debilidad intrínseca de un elemento determinado para absorber mediante el auto ajuste, los efectos de un determinado cambio de su ambiente, o sea su “inflexibilidad” para adaptarse a ese cambio. Se dice que ser vulnerable significa ser susceptible de sufrir daño y tener dificultad para recuperarse ante la presencia de un fenómeno natural peligroso. El análisis de la vulnerabilidad es un proceso para determinar los componentes críticos, débiles o susceptibles de daño por la presencia de un evento, además de considerar las medidas de emergencia y mitigación a considerarse ante una amenaza específica o un grupo de ellas (Buch & Turcios, 2003).

Roze (2000), define como vulnerabilidad a las características de una persona o grupo desde el punto de vista de su capacidad para anticipar, sobrevivir, resistir y recuperarse del impacto de una amenaza natural. Además, menciona los siguientes tipos de vulnerabilidades: física, económica, social, política, técnica, ideológica, cultural, educativa, ecológica e institucional.

Guatemala es un país que presenta vulnerabilidad física y social frente a fenómenos climáticos, vulnerabilidad que aumenta debido a las políticas públicas vigentes, las cuales favorecen la destrucción de bosques, selvas y humedales costeros que servirían de protección frente a lluvias y huracanes. Es imposible evitar los fenómenos meteorológicos, sin embargo se puede reducir la vulnerabilidad frente al cambio climático y sus devastadores efectos con medidas concretas e inmediatas para evitar el deterioro del ambiente que se debe a factores como la deforestación, el pastoreo excesivo, las alteraciones de las riberas y el uso de métodos de cultivo inadecuados en las laderas. Los manglares, que confieren protección natural contra los huracanes están desapareciendo de las regiones costeras; con la erosión continua del suelo y la pérdida de cubierta vegetal en las áreas montañosas, la capacidad para absorber las lluvias torrenciales disminuye y la tierra se vuelve más susceptible a deslizamientos e inundaciones repentinas y violentas (Beltetón, 2007).

2.4.4 Desastre

De acuerdo a Wilches citado por Maskrey (1993), se define desastre como un “evento identificable en el tiempo y el espacio, en el cual una comunidad ve afectado su funcionamiento normal, con pérdidas de vidas y daños de magnitud en sus propiedades y servicios, que impiden el cumplimiento de las actividades esenciales y normales de la sociedad.” Otras definiciones, incluyen el número de personas muertas y heridas, así como el valor de las pérdidas materiales.

Normalmente se relaciona el concepto de “desastres naturales” con la ocurrencia de aquellos eventos climáticos que conllevan a la suspensión de servicios, daño o pérdida de bienes y vidas humanas. Sin embargo, algunos autores coinciden en que los desastres no son naturales, sino más bien son “desastres sociales” debido a que, en la mayoría de estos sucesos, la principal causa que los acrecienta, son los factores que tienen su origen en el comportamiento de una sociedad. Cabe resaltar que la degradación ambiental, el constante deterioro y sobreexplotación de los recursos naturales renovables, asociado a las condiciones socioeconómicas precarias de las

poblaciones, constituyen los principales alicientes para incrementar la vulnerabilidad a desastres (Buch & Turcios, 2003).

2.4.5 Inundaciones

A. Definición

Una inundación se define como una elevación no usual del nivel de agua, que provoca desbordamientos y posibles perjuicios. Se caracteriza por la ocurrencia de caudales grandes que se salen del canal de la corriente. Una crecida puede no causar inundación, especialmente si se construyen obras de control para tal fin. Por otro lado, aun no habiendo un aumento grande de escorrentía superficial, podrá suceder una inundación en el caso de que exista alguna obstrucción en el canal natural del río (Monsalve, 1999).

El desbordamiento de los ríos ocurre cuando se excede la capacidad de los canales para conducir el agua. Las inundaciones son fenómenos naturales y puede esperarse que ocurran a intervalos irregulares de tiempo en todos los cursos de agua. El establecimiento humano en un área cercana a planicies de inundación es una de las mayores causas de daños causados por inundaciones. Generalmente se categorizan de acuerdo a su frecuencia estadística. Por ejemplo, se denomina “planicie de inundación de 100 años” a aquellas planicies que bordean zonas de agua siempre que cuenten con un 1% de probabilidades de inundarse en un año determinado. Comúnmente se considera que una amenaza de esta magnitud, o mayor, es significativa (OEA, 1991).

Las inundaciones son un fenómeno natural en el ciclo hidrológico de una cuenca. Su función es fundamental en diversos procesos de renovación de los ecosistemas. En efecto, suelos muy fértiles y con gran facilidad de aprovechamiento agrícola se ubican en las planicies de inundación de los ríos. Por otra parte, las inundaciones tienen efectos positivos en el control de plagas, al producir una eliminación masiva de roedores, insectos y otros organismos patógenos. Las inundaciones se transforman en una amenaza cuando las actividades humanas ignoran las leyes naturales de la ocurrencia de las mismas, y construyen viviendas en las planicies de inundación, con lo cual irrespetan el uso adecuado del suelo, construyen puentes con secciones hidráulicas insuficientes o en bancos erosionables y desarrollan importantes proyectos agrícolas o industriales en zonas inundables (Fajardo, 2006).

B. Tipos de inundaciones

De acuerdo con el PNUD (1995), se define dos tipos de inundaciones, las cuales se detallan a continuación:

- a. **Inundación repentina:** normalmente, se definen como inundaciones que ocurren dentro de las primeras seis horas de lluvia intensa, y comúnmente están asociadas con nubes cúmulo, altas, tronadas, ciclones tropicales, o el paso de frentes de clima frío. Este tipo de inundación requiere advertencias localizadas rápidas y respuesta inmediata de las comunidades afectadas si se desea mitigar los daños. Las inundaciones repentinas suelen ser el resultado del flujo de una lluvia torrencial, particularmente si las pendientes de la cuenca tributaria no pueden absorber y retener una parte significativa del agua.
- b. **Inundaciones fluviales:** las inundaciones fluviales son causadas normalmente por precipitación sobre cuencas de captación extensas o por derretimiento de la acumulación invernal de nieve o, a veces, por ambos. Las inundaciones ocurren en sistemas de ríos con afluentes que descargan las aguas de áreas geográficas grandes e incluyen muchas cuencas fluviales independientes. Los factores que regulan la magnitud de la inundación incluyen las condiciones del terreno y el área de la cuenca tributaria.

C. Caracterización de una inundación

De acuerdo al Programa de Entrenamiento para el Manejo de Desastres (1992), los aspectos que caracterizan a una inundación son los siguientes:

- a. **Fenómenos causales:** inundaciones repentinas naturales, inundación de ríos y costas a causa de lluvias intensas o inundaciones asociadas con patrones climáticos estacionales. Manipulación del hombre de las cuencas, canales de drenaje y terrenos aluviales.
- b. **Características generales y efectos**
 - Inundaciones repentinas: afluencia acelerada y falla de represas.
 - Inundación de río: acumulación lenta, usualmente estacional en los sistemas fluviales.
 - Inundación de la costa: asociada con ciclones tropicales, olas de tsunami y oleaje de borrasca.
- c. **Factores que afectan el grado de peligro:** profundidad del agua, duración, velocidad de elevación, frecuencia del suceso y condición estacional.

- d. Posibilidad de pronóstico:** el pronóstico de las inundaciones depende de patrones estacionales, capacidad de drenaje de la cuenca, cartografía de inundación, reconocimientos aéreos y terrestres.
- e. Factores que contribuyen a la vulnerabilidad:** ubicación de asentamientos en terrenos de aluvión, falta de conocimiento de la amenaza de inundación, reducción de la capacidad de absorción de la tierra, construcciones y cimientos no resistentes, elementos de infraestructura de alto riesgo, barcas de pesca y la industria marítima.
- f. Medidas posibles para la reducción del riesgo:** control de la inundación, como canales, represas, embalses, manejo y conservación de suelos.
- g. Medidas específicas de preparativos:** sistemas de detección y alerta de inundación, participación y educación de la comunidad, desarrollo de planes maestros para manejo del terreno de aluvión, cartografía de terreno de aluvión y control del uso de la tierra.
- h. Necesidades típicas posteriores al rescate:** búsqueda y rescate, asistencia médica, evaluación del desastre, abastecimiento de alimento y agua a corto plazo, purificación del agua, supervisión epidemiológica y albergue temporal.
- i. Herramientas para evaluar el impacto:** formularios de estudio del daño y reconocimiento aéreo.

Según el PNUD (1995), las inundaciones pueden medirse y estudiarse de acuerdo con los siguientes criterios:

- a. Profundidad del agua:** los cimientos de las edificaciones y la vegetación tendrán distintos grados de tolerancia a ser inundados.
- b. Duración:** el daño o la gravedad del daño a estructuras, infraestructura y vegetación a menudo está asociado con el tiempo que permanecieron inundados.
- c. Velocidad:** las velocidades de flujo peligrosamente altas pueden crear fuerzas erosivas y presión hidrodinámica que pueden destruir o debilitar los cimientos.
- d. Tasa de ascenso:** la estimación de la tasa de ascenso y de la capacidad de descarga del río son bases importantes para decidir sobre la emisión de advertencias de inundación, la creación de planes de evacuación y códigos de reglamentación.
- e. Frecuencia de ocurrencia:** un registro de los efectos acumulados y la frecuencia con la que han ocurrido las inundaciones en un período largo determinará qué tipos de construcción o actividades agrícolas pueden permitirse en la tierra de aluvión.

- f. Estacionalidad:** las inundaciones que ocurren durante la temporada de cultivo pueden destruir completamente las cosechas.

Las prácticas de desarrollo pueden aumentar inconcientemente la amenaza de inundación, aumentando la cantidad de agua que debe ser transportada o disminuyendo el área disponible para absorberla. Los canales de drenaje y las acequias de irrigación, así como otras desviaciones de aguas, pueden alterar tanto la descarga hacia las planicies de inundación como la capacidad de un cauce de transportar dicha descarga. La deforestación o las prácticas de explotación forestal, pueden reducir la capacidad de absorción de agua de un bosque, aumentando la esorrentía en el área en cuestión. Las grandes represas afectan los canales, tanto río abajo como río arriba, el reservorio actúa como una trampa de sedimento y la corriente libre de sedimento que queda por debajo de la represa, socava el cauce. La urbanización de planicies de inundación o áreas adyacentes, resulta en la esorrentía ya que reduce la cantidad de superficie disponible para absorber las precipitaciones. En resumen, en la planificación del desarrollo integrado debe analizarse el efecto que puedan tener los cambios propuestos sobre las inundaciones, así como también se deben identificar las medidas de mitigación apropiadas, a fin de incluirlas en los proyectos de inversión (OEA, 1991).

D. Control de las inundaciones

CEPREDENAC (2006), menciona que las medidas aplicadas en Guatemala para el manejo y control de inundaciones son las siguientes:

- a. Presas:** el efecto de una presa sobre las inundaciones consiste en la laminación o reducción del pico de la crecida por medio del almacenamiento temporal. Aquí también se requiere de un cuidadoso diseño de ingeniería para anticipar los niveles máximos de inundación.
- b. Diques y bordas:** estas son junto con el dragado de cauces, la medida más ampliamente utilizada para fines de control de inundaciones en Guatemala.
- c. Mejoras en el cauce:** esta es otra de las categorías de medidas de control de inundaciones que gozan de popularidad en Guatemala, principalmente el dragado de cauces.
- d. Acequias:** son conocidas como quineles, las cuales tienen como propósito evitar la intrusión del agua de inundación en zonas de cultivos y evacuarla a zonas de poco interés productivo.
- e. Sistemas de bombeo:** son las acciones que menos se han implementado en Guatemala. De hecho más allá del bombeo de aguas de inundación de sitios puntuales o el traslado

esporádico de grupos poblacionales, no existe un esfuerzo sistemático para la aplicación de los mismos.

2.5 Sistema de alerta temprana -SAT-

2.5.1 Definiciones

A. Alerta

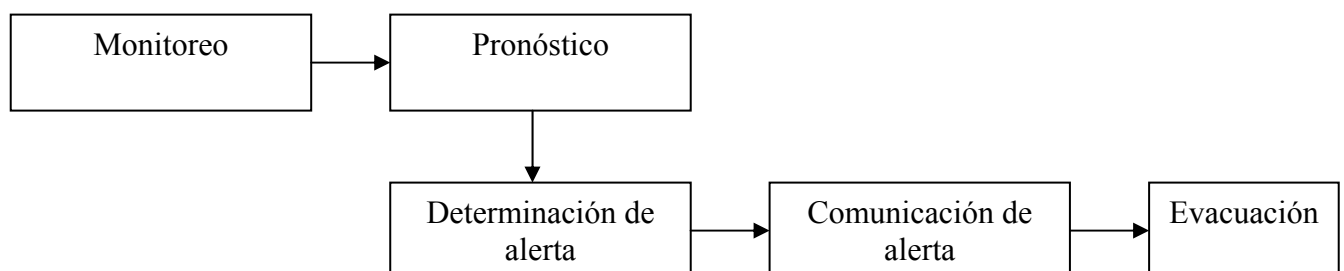
De acuerdo con Lavell (2000), se define como el estado que se declara, con anterioridad a la manifestación de un fenómeno peligroso, con el fin de que los organismos operativos de emergencia activen procedimientos de acción preestablecidos y para que la población tome precauciones específicas debido a la inminente ocurrencia del evento previsible.

Además de informar a la población acerca del peligro, los estados de alerta se declaran con el propósito que la población y las instituciones adopten una acción específica ante la situación que se presenta.

B. Sistema de alerta temprana

De acuerdo con CEPREDENAC (2006), los conceptos de sistema y temprano, conllevan la idea de un fin, un objetivo, y por consiguiente, se puede definir parcialmente a un sistema de alerta temprana en función de su objetivo “propiciar la evacuación oportuna de los habitantes de áreas que se prevé pueden ser afectadas por una crecida o inundación en el plazo inmediato”. El fin último del sistema de alerta temprana es la evacuación, a la cual se llega a través de un proceso de toma de decisiones, que como tal, requiere de un flujo de información pertinente y anticipada al paso de la crecida y/o ocurrencia de la inundación hacia los usuarios finales. En base a lo anterior se definen los siguientes componentes dentro del proceso de toma de decisiones y que definen otra parte del sistema, como se muestra a continuación:

Figura 2.1 Estructura básica de un sistema de alerta temprana.

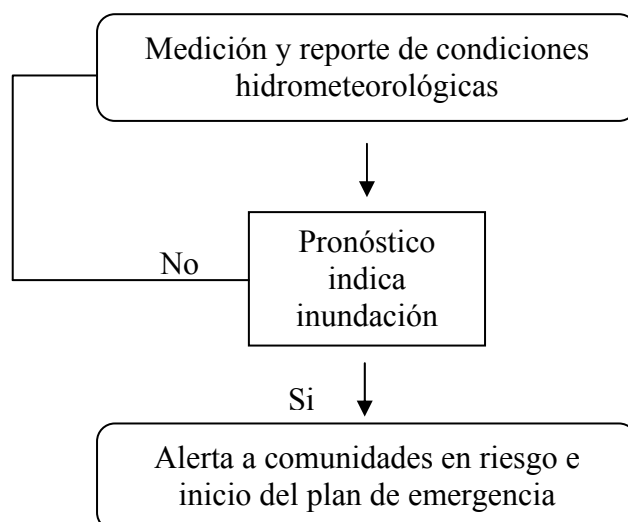


El último componente de la definición del sistema de alerta temprana está dado por las responsabilidades de aquellas instituciones creadas para la protección de las comunidades, (en este caso ante un posible desastre) así como aquellas que generan información pertinente para lograr esta protección. Específicamente las diferentes instancias de la Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres (CONRED). Considerando lo anterior, se define el SAT, como “un medio de generación y comunicación de información que permite a una estructura comunitaria organizada tomar la decisión de una evacuación preventiva y a las autoridades municipales y del gobierno central, reaccionar para brindar los medios para albergar dignamente a las personas mientras permanecen en las condiciones de inundación en sus comunidades”.

De acuerdo con Chow *et al.* (1994), el sistema de alerta temprana es útil para la recolección, transmisión y análisis de la información, para luego hacer pronósticos de inundación con el fin de maximizar el tiempo de aviso a las comunidades en riesgo ante estos eventos.

Villagrán de León (2003), menciona que los sistemas de alerta temprana tienen como objetivo alertar a la población en caso de un fenómeno natural de proporciones tales que pueda causar daños. Cualquier sistema de este tipo debe satisfacer el criterio operativo de brindar una alerta con suficiente anticipación para que la población pueda tomar las precauciones mínimas necesarias en relación al fenómeno que se aproxima. Estos sistemas se integran en base a tres componentes: monitoreo de condiciones relacionadas al fenómeno en cuestión, pronóstico de eventos y alerta. La integración operativa de dichos sistemas se muestra en la siguiente figura para el caso de inundaciones:

Figura 2.2 Esquema operativo de un sistema de alerta temprana.



En el monitoreo de condiciones hidrometeorológicas de forma telemétrica se utiliza equipo de medición automático, conectado a un sistema de radiocomunicación. Las condiciones hidrometeorológicas locales son monitoreadas en tiempo real y son transmitidas automáticamente a un centro de pronóstico, con el propósito de ser analizadas en cualquier momento.

2.5.2 Tipos de sistema de alerta temprana

De acuerdo con Villagrán de León (2003), los sistemas de alerta temprana pueden ser comunitarios o nacionales (centralizados).

A. Comunitario

Dependiendo del tipo de esquema de difusión puede ser:

- a. Alerta local usando instrumentos rústicos tales como rieles, campanas y aros:** difusión masiva, con coordinación y operación de voluntarios.
 - **Ventajas:** funciona a toda hora, sin baterías y sin fuente adicional de energía.
 - **Desventajas:** alcance limitado, pero se puede extender poniendo más instrumentos para difundir la alerta a mayor cobertura. Limitado en la medida en la cual la alerta no llega de un poblado a otro.
- b. Alerta local usando emisora de radiodifusión de tipo local**
 - Ventajas: funciona a toda hora, pero requiere voluntad de la emisora y control. Abarca múltiples comunidades simultáneamente.
 - Desventajas: se debe estar en sintonía de la emisora para escuchar alertas. Si no se está atento a la radio, pueden pasar desapercibidos los mensajes.

B. Nacional o centralizado

Alerta usando medios masivos de información.

- Ventajas: cobertura nacional con múltiples medios (radio, prensa y televisión).
- Desventajas: por lo general, no promueven la difusión de alertas locales, sino mayormente a nivel nacional. No se concibe para eventos o fenómenos locales, sino para eventos que pueden abarcar varios departamentos o regiones simultáneamente.

2.5.3 Aplicabilidad de los sistemas de alerta temprana

Para pensar en la implementación de sistemas de alerta temprana es necesario conocer con suficiente detalle los fenómenos naturales, los socionaturales y los antropogénicos, así como las

señales precursoras pertinentes que acompañan a cada tipo de fenómeno. Por ejemplo, antes de una inundación es necesario que se presenten fuertes lluvias. En general, la generación de conocimientos en torno a los fenómenos y sus precursores es una actividad que llevan a cabo las diversas instituciones y observatorios de carácter nacional o académico. Sin embargo, algunos de estos fenómenos son tan complejos, que no ha sido posible implementar sistemas de alerta temprana para ellos.

En América Central son frecuentes los terremotos, las inundaciones y las erupciones volcánicas. Reconociendo que muchas poblaciones se ubican en sitios de alta amenaza, se ha considerado como una estrategia en la temática de la gestión para la reducción del riesgo el iniciar los esfuerzos en las etapas de preparación, donde los sistemas de alerta temprana son un ejemplo típico. Esto debido a que no se cuenta en la actualidad con las capacidades, recursos y condiciones adecuadas para iniciar las etapas de prevención y mitigación (Villagrán de León, 2003).

2.6 Simulaciones

2.6.1 Conceptos básicos

A. Simulación

Linsley (1988), menciona que la simulación es la representación de un sistema (hidrológico o hidráulico) por otro matemático que pueda reproducir el comportamiento del sistema natural. Las aplicaciones de la simulación en hidrología son principalmente drenaje urbano, planicies de inundación, embalses, pronósticos y crecidas.

B. Modelo

De acuerdo con Sandoval (2007), se define como una representación matemática de un evento de la vida real, producto de un algoritmo que permite simular la realidad. Es una herramienta matemática que simula un fenómeno visto en la naturaleza. Así, también menciona que los modelos de mayor aplicación en el campo de los recursos hidráulicos, son los siguientes:

- a. Modelo hidrológico:** herramienta matemática que permite simular el comportamiento de la escorrentía bajo distintas condiciones de precipitación y evaporación.
- b. Modelo hidráulico:** modelo de procesos biofísicos que describen el flujo en ríos, inundaciones, entre otros.

- c. **Modelo de erosión:** simula producción de sedimentos bajo distintas condiciones de clima, relieve, suelos, vegetación y contenido de humedad.

C. Clasificación

Sandoval (2007), menciona que los modelos se pueden clasificar de la siguiente manera:

- a. **En el tiempo:** continuos (existe información continua) y discretos (solo existe información puntual).
- b. **En el espacio:** puntual o agregado (el flujo se estima como función del tiempo únicamente) y distribuido (el flujo se calcula como función del tiempo y el espacio a través del sistema).
- c. **Con base a la información disponible:** caja blanca (se conoce el algoritmo y se tiene toda la información), caja gris (se conoce el algoritmo pero no en su totalidad) y caja negra (no se conoce el algoritmo).

Además, Gárfias (2002), incluye las siguientes clasificaciones de modelos, las cuales son:

- a. **Con base al grado de precisión:** determinísticos (se conoce el algoritmo con sus funciones y únicamente existe un resultado posible) y estocásticos (basados en la teoría probabilística y asumen que cada realización es igualmente probable).
- b. **Con base a su análisis:** analíticos (incluyen ecuaciones simples, solución exacta en el punto de cálculo y no admite heterogeneidades) y numéricos (requiere discretización espacial y temporal, solución aproximada y soporta heterogeneidades).

2.6.2 Simulación hidrológica

La simulación hidrológica simula el escurrimiento superficial como una respuesta de la cuenca a la precipitación, la cuenca se representa como un sistema de componentes hidrológicos e hidráulicos. Cada componente modela el proceso lluvia-escurrimiento dentro de una porción de la cuenca llamado subcuenca. Un componente representa una entidad de escurrimiento, un tramo del cauce de un río o una presa. La representación de un componente requiere un conjunto de parámetros, los cuales especifican las características particulares del componente y relaciones matemáticas que describen el proceso físico. El resultado final del modelo son hidrogramas de escurrimientos en puntos especificados a lo largo y ancho de la cuenca. (Ibáñez *et al.* 2004)

2.6.3 Simulación hidráulica

Muchos de los fenómenos que ocurren en la naturaleza y dentro del campo de la hidráulica son tan complejos que no es fácil tratarlos únicamente con métodos matemáticos. Por lo anterior, es conveniente recurrir al empleo de técnicas experimentales, como herramienta en la obtención de soluciones prácticas, aplicadas a problemas de ingeniería y obras hidráulicas en general (Fajardo, 2006).

Los modelos hidráulicos requieren como principales variables de entrada caudales de diseño para diversos períodos de retorno (derivados de un análisis de crecidas en la cuenca), levantamientos topográficos de varias secciones transversales del cauce (indicando distancia y pendiente entre secciones), tipo y usos del suelo en la cuenca. Teniendo diversas aplicaciones, como lo son: delimitación de áreas inundables, niveles de inundación, tránsito de crecidas, control de avenidas, sedimentación, protección de obras, entre otras.

CAPÍTULO 3

CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO COYOLATE

3.1 Aspectos biofísicos

3.1.1 Ubicación geográfica

La cuenca del río Coyolate se localiza en la región sur-occidente de la república de Guatemala, siendo sus coordenadas geográficas 14°19'52" latitud norte y 91°10'05" longitud oeste, con altitud promedio de 1,200 msnm, posee una extensión territorial de 1,650.16 km² (INSIVUMEH, 2005).

La cuenca del río Coyolate forma parte de las 18 cuencas que drenan a la vertiente del océano Pacífico, identificado con el numeral 1.10 (INSIVUMEH, 2005).

Los ríos de esta vertiente nacen en la parte alta de las montañas y recorren, a través de pendientes pronunciadas de terreno, distancias comprendidas entre 40 y 60 km antes de desembocar en el mar (NOVIB, 2000).

Las hojas cartográficas a escala 1:50,000 que forman parte de la cuenca del río Coyolate, son: Tecpán, Alotenango, Chimaltenango, Sololá, Patulul, Pueblo Nuevo Tiquisate, San Lucas Tolimán, Escuintla, Santa Lucía Cotzumalguapa, La Gomera, Huitzitzil, Sipacate y Tecojate.

3.1.2 División político-administrativa

La cuenca del río Coyolate está conformada por un total de 13 municipios, pertenecientes a los departamentos de Escuintla, Suchitepéquez y Chimaltenango. En la parte alta de la cuenca se ubican los municipios de Santa Apolonia, Tecpán, Patzún, Patzicía, San Andrés Itzapa, Acatenango, Pochuta y San Pedro Yepocapa (pertenecientes al departamento de Chimaltenango), los cuales abarcan cerca del 30% del total del área de la cuenca. En la parte media se encuentran los municipios de Patulul (departamento de Suchitepéquez), Santa Lucía Cotzumalguapa y Siquinalá (departamento de Escuintla), estos municipios ocupan alrededor del 35% del área total.

En la parte baja de la cuenca se ubican los municipios de La Nueva Concepción y La Gomera (departamento de Escuintla), los cuales se estima que abarcan el 35% del área total, y es aquí donde se dan los procesos de desbordamiento, inundaciones y sedimentación. En la figura 3.1 se ilustra la ubicación de la cuenca del río Coyolate.

3.1.3 Región fisiográfica

A. Región

La cuenca del río Coyolate se ubica mayoritariamente en la región fisiográfica Llanura Costera del Pacífico, dentro de esta provincia fisiográfica del sur, está comprendido el material aluvial Cuaternario que cubre los estratos de la plataforma continental. Los cauces que drenan desde el altiplano volcánico, al cambiar su pendiente, han depositado grandes cantidades de materiales que han formado esta planicie de poca ondulación y de aproximadamente unos 50 kilómetros de ancho a lo largo de la costa del Pacífico.

Por lo general, las elevaciones son menores de 200 metros y el drenaje en su mayor parte es deficiente. Son comunes las extensas áreas sujetas a inundación, particularmente en el oeste. En contraste a la costa del Caribe, son menos frecuentes formas de tierra tales como barras de boca de bahía, barras fuera de playa, esteros o islotes. Aquí, las playas de arena negra con áreas de pantano de mangle y algunos esteros, son las características de la región (Alvarado & Herrera, 2000).

B. Sub-región

La sub-región fisiográfica en la cual se ubica la cuenca del río Coyolate es la Planicie Aluvial Costera (Madre Vieja - María Linda). Abarca el sur de los departamentos de Escuintla y Santa Rosa. Su relieve va de plano a ondulado y posee alturas desde el nivel del mar hasta los 500 m. En los abanicos aluviales hay grandes bloques de lava, materiales laháricos y fluviales, además arenas finas compuestas de andesita y basalto del cuaternario (Alvarado & Herrera, 2000).

3.1.4 Hidrografía

Las subcuencas que forman parte de la cuenca del río Coyolate son: río Mascalate, área de captación del río Cristóbal, área de captación del río Coyolate, río Aguna, río Xatá, río Pantaleón, río Xayá y río Nicán, siendo los tributarios principales, los ríos Coyolate, Pantaleón y Cristóbal. Los principales aspectos morfométricos de la cuenca, son los siguientes:

A. Perímetro

De acuerdo con Santos (2,000), la cuenca del río Coyolate posee un perímetro de 262.73 km.

Figura 3.1 Ubicación geográfica de la cuenca del río Coyolate.

B. Orden de corrientes

La cuenca del río Coyolate posee gran cantidad de corrientes de orden uno, localizadas principalmente en la parte media y alta de la cuenca. En el siguiente cuadro se ilustra el número de corrientes por cada orden así como su longitud, realizado a escala de semidetalle (1:50,000):

Cuadro 3.1 Orden, número y longitud media de corrientes de la cuenca del río Coyolate.

Orden de corrientes (u)	Número de corrientes (Nu)	Longitud de corrientes (Lu)*	Longitud media de corrientes*
1	873	1,120.71	1.28
2	196	586.09	2.99
3	40	255.72	6.39
4	9	162.69	18.08
5	3	82.04	27.35
6	1	42.78	42.78

Fuente: Santos (2006).

*Longitud dada en km.

El cauce principal de la cuenca del río Coyolate es una corriente permanente de orden seis, con abundancia de corrientes de orden uno, originándose su mayoría en la parte media y alta de la cuenca. Lo anterior se manifiesta en la longitud media de corrientes de orden uno, que es de 1.28 km/corriente, lo que indica pendientes abruptas y escarpadas.

A medida que aumenta el orden de corrientes también aumenta la longitud media, debido precisamente a que la cuenca pasa de los ríos de montaña a transición y posteriormente a planicie, originándose un delta aluvial, de acuerdo con Aparicio (2001), que clasifica los cauces según su posición topográfica.

El alto número de corrientes de orden uno, incide directamente en el radio de bifurcación de la cuenca, el cual se estima en 3.96. De acuerdo con Herrera (2004), el radio de bifurcación oscila entre dos y cuatro, por lo que en la cuenca del río Coyolate dicho valor se considera alto, lo cual se fundamenta en el alto número de corrientes de orden uno.

En lo que respecta a los aspectos de superficie, los mismos se resumen en el siguiente cuadro:

Cuadro 3.2 Aspectos de superficie de la cuenca del río Coyolate.

Aspecto	Valor	Unidad
Área	1,650.16	km ²
Relación de forma	0.08	Adimensional
Relación circular	0.30	Adimensional
Radio de elongación	0.32	Adimensional
Coefficiente de compacidad	1.81	Adimensional
Densidad de drenaje	1.36	km corriente/km ²
Frecuencia de drenaje	0.68	Número corrientes/km ²

Fuente: Santos (2006).

Los valores de relación de forma, circular y el radio de elongación indican que la cuenca es de forma alargada. De acuerdo con Herrera (2004), valores menores de relación de forma de 0.30 se presentan en cuencas de forma alargada. En el caso de la relación circular a medida que se aleja de uno la cuenca tiende a alargarse, una cuenca con relación circular igual a uno, sería completamente de forma redonda y susceptible a la formación de crecidas.

Monsalve (1999), establece que a medida que el coeficiente de compacidad es mayor a la unidad, tiende a ser de forma alargada, lo cual se confirma con la relación de forma y circular, que indican que la cuenca posee dicha forma. La densidad de drenaje se estimó en 1.36 km de corrientes/km², la cual de acuerdo a Monsalve (1999), se considera de media a baja. Cuencas excepcionalmente bien drenadas poseen densidades de drenaje hasta 3.50 corrientes/km², por el contrario, cuencas pobremente drenadas poseen densidades de drenaje hasta de 0.50 corrientes/km².

3.1.5 Sistema fluvial

A. Patrón de drenaje

El cauce principal de la cuenca del río Coyolate se origina en el altiplano del departamento de Chimaltenango. Los afluentes principales son los ríos Coyolate, Cristóbal y Pantaleón. Los afluentes del río Pantaleón se originan en las faldas de los volcanes de Fuego y Acatenango. El río Pantaleón se une al río Coyolate en jurisdicción de la aldea Cerro Colorado, municipio de La Gomera, Escuintla (Orozco & Flores, 2006).

El patrón de drenaje predominante en la cuenca del río Coyolate es paralelo, aunque cabe mencionar que en las partes altas también se presenta el patrón dentrítico. Marín (2002),

Menciona que el drenaje paralelo se presenta en áreas dominadas por una pendiente regional, lo cual le impone una dirección predominante con cauces paralelos, este patrón es común en algunos pie de montes y laderas estructurales plegadas. Mientras que el drenaje dentrítico está constituido por materiales homogéneos en su composición, sin control estructural y constituye uno de los patrones más comunes y se presenta en diversidad de ambientes.

B. Tipo de cauce y transporte de sedimentos

Schumm citado por Marín (2000), clasifica los cauces por su naturaleza en dos tipos, siendo: cauces de lechos rocosos y cauces aluviales. En el caso del río Coyolate, este se clasifica como cauce aluvial, en donde el río fluye en un canal, cuyo fondo y márgenes están constituidos por material transportado por el río, bajo las condiciones actuales de flujo. En este caso, hay libertad para ajustar dimensiones, forma, patrón y pendiente del cauce en respuesta a cambios.

De acuerdo con Méndez (2004), la función principal de este tipo de ríos es el transporte de agua y sedimentos, con un rango amplio de tamaño y distribución de los mismos, siendo los modos principales de transporte en suspensión y de fondo. El principal origen del sedimento es el lecho del río, aunque en el caso del río Coyolate, tiene significativa influencia los materiales geológicos derivados de la actividad volcánica en la región. Taboada (2003), menciona que los sedimentos en suspensión son transportados sin tocar fondo y los de fondo son los que se transportan deslizándose o rodando sobre el lecho del cauce.

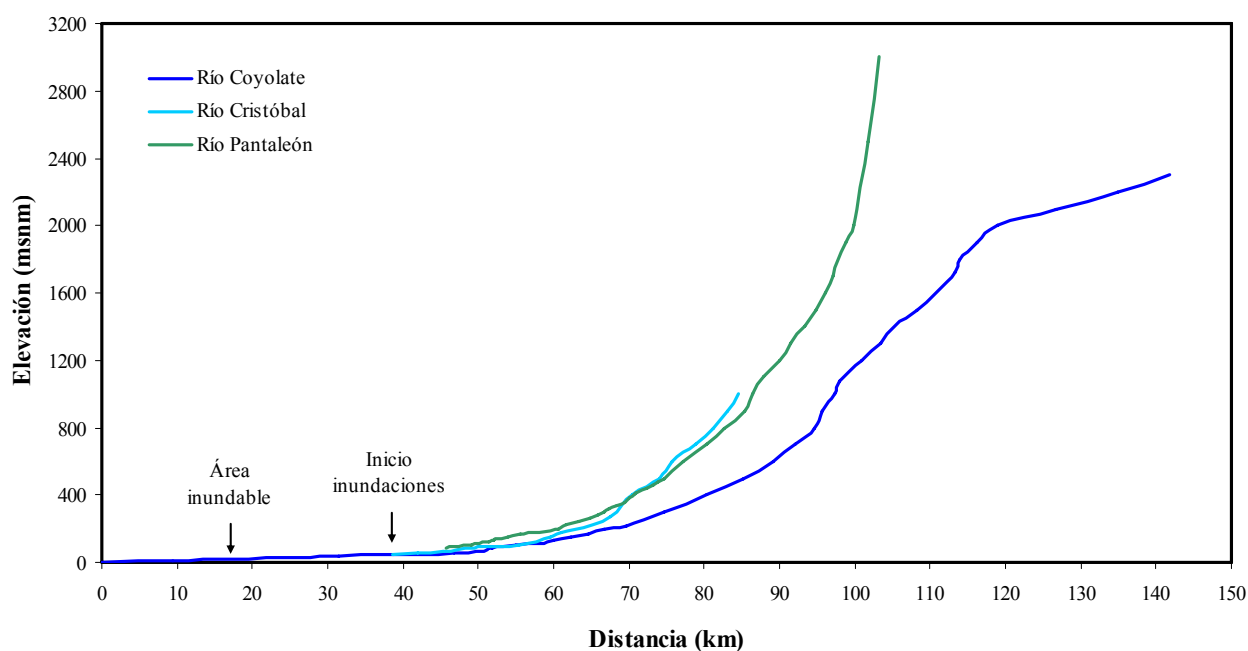
El drenaje superficial corresponde al típico de las planicies aluviales o sea el tipo trezado y méandrico, esto según la clasificación del cauce por su forma en planta. De acuerdo con Martínez (2001), el cauce trezado está formado por varios cauces que se cruzan entre sí, este tipo se presenta cuando el caudal sólido que lleva el río es superior al que este puede transportar. Mientras que el cauce méandrico caracteriza las zonas bajas de los ríos, estos cauces en forma de “S” tienden a erosionar las orillas en la parte externa, produciendo un fenómeno muy característico de avance de los meandros, mientras que en su parte interna al reducirse la velocidad se produce sedimentación.

3.1.6 Relieve

De acuerdo con Orozco & Flores (2006), la topografía de la parte alta de la cuenca del río Coyolate y media es principalmente muy empinada y accidentada.

Las pendientes del terreno predominantes superan el 30%. En la parte baja, con elevaciones menores a 100 msnm, la pendiente del terreno es relativamente plana, predominando pendientes inferiores al 1%. La pendiente media de la cuenca, según el método de Alvord citado por Herrera (2004), se estima en 17.50% clasificándose como moderada. La pendiente media del cauce principal, según el método analítico citado por el mismo autor se estima en 1.83%, siendo una pendiente suave principalmente en la parte baja de la cuenca, a la altura del puente Coyolate (jurisdicción del municipio de Santa Lucía Cotzumalguapa), hacia su desembocadura en el océano Pacífico. Cabe destacar la importancia del perfil del cauce principal del río a lo largo de toda la cuenca, por lo que planta-perfil de los principales afluentes se muestra a continuación:

Figura 3.2 Planta perfil de los principales afluentes de la cuenca del río Coyolate.



El cauce principal de la cuenca del río Coyolate, tiene su origen en las altiplanicies del municipio de Patzicía, donde la pendiente es intermedia comparada con la parte media y baja de la cuenca. En la parte media se observa claramente el aumento de la pendiente del cauce aproximadamente 100%, siendo además la región donde se registran las mayores lluvias. Esta zona comprende a la región fisiográfica pendiente volcánica reciente. La parte baja de la cuenca está bien delimitada a partir de la altura del puente Coyolate, de este sitio hacia la desembocadura en el mar la pendiente del cauce principal disminuye hasta valores menores al 1%. Siendo esta zona donde la probabilidad de ocurrencia de inundaciones es alta.

3.1.7 Estimación del tiempo de concentración

De acuerdo con Monsalve (1999), el tiempo de concentración es el tiempo que le toma a una gota de lluvia que cae en el punto más distante de la corriente de una cuenca para llegar a una sección determinada de dicha corriente, es decir mide el tiempo que se necesita para que toda la cuenca contribuya con escorrentía superficial. De acuerdo con el INSIVUMEH (2004), en nuestro medio se recomienda utilizar la ecuación de Kirpich, expresada como:

$$t_c = 3 L^{1.15} / 154 H^{0.38} \dots \dots \dots \text{Ecuación: 3.1}$$

Donde:

t_c = Tiempo de concentración (min).

L = Longitud del cauce (m).

H = Diferencia de nivel (m).

Utilizando la ecuación de Kirpich para diversos tramos en la cuenca del río Coyolate, se obtienen los siguientes resultados:

Cuadro 3.3 Tiempos de concentración estimados en la cuenca del río Coyolate.

Tramo	Longitud (m)	Diferencia nivel (m)	Tiempo de concentración		Velocidad (m/s)
			(min)	(horas)	
Toda la cuenca	141,905	2,300	864.85	14.41	2.73
Puente Coyolate a Cerro Colorado	32,604	173	426.17	7.10	1.28
Puente Cristóbal a confluencia con río Pantaleón	22,162	205	256.20	4.27	1.44
Puente Cristóbal a Cerro Colorado	30,401	233	351.13	5.85	1.44
Puente Pantaleón a confluencia con río Cristóbal	25,528	338	249.28	4.15	1.71
Puente Pantaleón a Cerro Colorado	33,768	366	333.69	5.56	1.69

Fuente: Elaboración propia (2007).

Obviamente, el tiempo de concentración considerando toda la cuenca es mayor, sin embargo, es importante destacar que dado el régimen pluviométrico en la cuenca, las lluvias en la parte alta no tienen mayor impacto en la formación de crecidas que propician inundaciones, además existe un fenómeno de amortiguamiento en la parte media de la misma.

Sin duda alguna, existe mayor importancia de los tiempos de concentración de la estación hidrométrica localizada en el puente Coyolate y de la confluencia de los ríos Cristóbal y Pantaleón al sitio donde anteriormente se localizó la estación hidrométrica Cerro Colorado, por

ser ahí donde se inicia el proceso de desbordamiento del río Coyolate. Además, es importante tomar en consideración los tiempos de concentración entre los puentes de los ríos Cristóbal y Pantaleón hacia la confluencia de los mismos, debido a que son corrientes tributarias que aportan cantidades significativas de caudal en la formación de crecidas, incluso con antecedentes históricos de colapso en el caso del puente Pantaleón. Como se mencionó, la referencia es la aldea Cerro Colorado, por ser ahí donde inician las inundaciones en la cuenca del río Coyolate.

3.1.8 Suelos

De acuerdo con el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (2001), en la cuenca del río Coyolate, se localizan los siguientes órdenes de suelos:

Cuadro 3.4 Órdenes de suelos localizados en la cuenca del río Coyolate.

Orden	Área (km²)	Porcentaje (%)
Alfisolos	29.81	1.81
Andisolos	555.36	33.65
Entisolos	244.05	14.79
Inceptisolos	308.60	18.70
Mollisolos	437.73	26.53
Ultisolos	74.60	4.52

Fuente: Santos (2006).

Los suelos predominantes en la cuenca, son del orden Andisol, debido principalmente a la alta actividad volcánica desarrollada en el área. Los suelos Entisolos son jóvenes, es decir están en constante renovación de sus horizontes, estos se localizan principalmente en el delta aluvial que forma el río. Es importante mencionar que el suelo juega un papel muy importante en el ciclo hidrológico, considerando tanto sus características físicas, principalmente textura, densidad aparente, porosidad, como sus características químicas, siendo principalmente el porcentaje de materia orgánica.

Otro factor importante que influye, es el contenido de humedad antecedente al momento de un evento de precipitación, ya que lluvias de iguales características (intensidad y duración) pueden ocasionar distintos volúmenes de escorrentía dependiendo del contenido de humedad existente en el perfil del suelo. Todas las características mencionadas anteriormente, influyen

directamente en la infiltración, y por lo tanto, en la escorrentía que posteriormente propician la formación de crecidas dando lugar a que se produzcan inundaciones.

3.1.9 Uso de la tierra

El uso de la tierra en la cuenca del río Coyolate se ilustra en el siguiente cuadro:

Cuadro 3.5 Uso de la tierra en la cuenca del río Coyolate.

Uso de la tierra	Área (km ²)	Porcentaje (%)
Agroindustria	1.46	0.09
Aguacate	7.10	0.43
Arbustos - matorrales	29.10	1.76
Arena y/o material piroclástico	7.57	0.46
Banano - plátano	11.70	0.71
Bosque coníferas	0.09	0.01
Bosque latifoliado	362.63	21.98
Bosque mixto	98.24	5.95
Café	27.28	1.65
Camaronera y/o salina	3.59	0.22
Caña de azúcar	237.48	14.39
Centros poblados	12.88	0.78
Cítricos	1.80	0.11
Frutales deciduos	0.12	0.01
Granos básicos	259.17	15.71
Hortaliza - ornamental	36.08	2.19
Hule	43.36	2.63
Humedal con otra vegetación	0.25	0.02
Manglar	4.66	0.28
Mango	0.58	0.03
Minas descubiertas y otras superficies de excavación	0.30	0.02
Palma africana	15.51	0.94
Papaya	0.58	0.04
Pastos cultivados	161.97	9.82
Pastos naturales	72.15	4.37
Pejibaya	0.23	0.01
Piña	4.96	0.30
Plantación conífera	1.28	0.08
Playa y/o arena	1.44	0.09
Río	244.19	14.80
Zona inundable	2.41	0.15

Fuente: Santos (2006).

Cabe mencionar, que los usos de la tierra con mayor área en la cuenca son bosques de latifoliadas, granos básicos, caña de azúcar y pastos. En el caso de los bosques de latifoliadas, estos se ubican principalmente en la parte media y alta de la cuenca. Lo que concierne a granos básicos, caña de azúcar y pastos se ubican en la parte baja de la cuenca. De igual manera el uso

de la tierra incide directamente sobre el volumen de escorrentía generado por un evento de lluvia. En hidrología el uso y tratamiento de la tierra se relaciona con la condición hidrológica de la misma, que de acuerdo con Monsalve (2001), puede ser buena, regular o mala.

3.2 Aspectos socioeconómicos

Los habitantes de la cuenca del río Coyolate se encuentran dentro del estatus económico medio y bajo. Sin embargo, la zona es rica en agricultura de exportación, principalmente en cultivos de caña de azúcar y banano, así como en agroindustria, dado que operan en la zona varios de los mayores ingenios de procesamiento de caña de azúcar de todo el país. Como en muchas otras cuencas, son poblaciones situadas en las cercanías de las riberas del río las que se ven afectadas por las inundaciones, sobre todo en las planicies de inundación. Además de las viviendas, se ven afectadas las rutas de acceso, así como la agricultura, ganadería y algunas fuentes de ingresos asociadas al comercio (Villagrán de León, 2003).

De acuerdo con CEPREDENAC (2006), el número de centros poblados es un indicador de la concentración de la población y el número de centros poblados en áreas con pendientes menor al 2% es un indicador de la cantidad de área inundable. Algunas características socioeconómicas de importancia en la cuenca Coyolate se muestran a continuación:

Cuadro 3.6 Características socioeconómicas de la cuenca del río Coyolate.

Variable	Condición en la cuenca
Número de centros poblados	624
Número de centros poblados en áreas con pendientes menor al 2%	209
Población total	241,381
Densidad de población (hab/km ²)	146
Municipios que incluyen la cuenca	Tecpán, Patzicía, Patzún, Pochuta, Acatenango, San Andrés Itzapa, Yepocapa, Siquinalá, La Democracia, Santa Lucía Cotzumalguapa, Nueva Concepción y La Gomera.

Fuente: Secretaría Ejecutiva de CEPREDENAC (2006).

De acuerdo con los eventos de inundación más recientes en la cuenca, las comunidades más frecuentemente afectadas son las siguientes:

Cuadro 3.7 Comunidades frecuentemente inundadas en la cuenca del río Coyolate.

Comunidad	Municipio	Población	Coordenadas geográficas		Altitud (msnm)
			Longitud oeste	Latitud norte	
El Jabalí	Santa Lucía Cotz.	2,292	91° 09' 43.64"	14° 13' 49.53"	70
Cerro Colorado	La Gomera	2,071	91° 11' 54.13"	14° 09' 49.82"	40
Monte León	Nueva Concepción	742	91° 12' 31.05"	14° 09' 31.25"	40
Canoguitas	Nueva Concepción	893	91° 12' 44.68"	14° 08' 36.41"	38
El Mora	Nueva Concepción	1,146	91° 14' 45.74"	14° 08' 40.51"	38
Santa Ana Mixtán	Nueva Concepción	1,145	91° 13' 56.88"	14° 07' 18.45"	29
Santo Domingo	Nueva Concepción	118	91° 14' 28.47"	14° 06' 59.75"	25
Texcuaco	La Gomera	1,135	91° 13' 36.94"	14° 04' 27.31"	22
Santa Odilia	Nueva Concepción	958	91° 16' 48.10"	14° 01' 57.94"	12

Fuente: Elaboración propia (2007).

Un total de nueve comunidades de tres municipios, son las que se ven seriamente afectadas por inundaciones, lo que hace un total de 10,500 habitantes, correspondiendo con las estimaciones realizadas con CEPREDENAC (2006). Aproximadamente el 50% de la población damnificada por inundaciones pertenecen al municipio de La Nueva Concepción, estimándose un total de 5,002 habitantes, el resto pertenece a los municipios de Santa Lucía Cotzumalguapa (30%) y La Gomera (20%), en el departamento de Escuintla.

Sin embargo, los datos de población utilizados corresponden al censo XI de población y VI de habitación realizado por el Instituto Nacional de Estadística (INE, 2002), estimándose en la actualidad un total de 13,179 habitantes. Lo anterior, se obtiene al utilizar el método del Índice de Crecimiento Geométrico, el cual consiste en lo siguiente:

$$P_f = P_i (1 + i)^n \dots \dots \dots \text{Ecuación: 3.2}$$

Donde:

P_f = Población final.

P_i = Población actual o inicial.

i = Tasa de crecimiento anual de la población expresada en forma decimal.

n = Período de diseño (años).

En este caso, se utilizó la tasa de crecimiento anual correspondiente al departamento de Escuintla, que de acuerdo al INE se estima en 3.86. En lo que respecta al período de diseño, se utilizó un período de seis años para realizar la proyección de la población del año 2002 al 2008.

CAPÍTULO 4

RÉGIMEN DE LLUVIAS Y CRECIDAS

4.1 Régimen de lluvias

4.1.1 Generalidades

De acuerdo con el INSIVUMEH (2005), la cuenca del río Coyolate posee un régimen de lluvias tipo orográfico. La lluvia a la altura de la costa es de aproximadamente 1,500 mm anuales, mientras que en la bocacosta, aguas arriba del municipio de Santa Lucía Cotzumalguapa, es superior a los 4,000 mm anuales y en la parte alta, a la altura del departamento de Chimaltenango, es del orden de los 1,000 mm anuales.

En cuanto a lluvias intensas pueden esperarse lluvias arriba de los 100 mm en 24 horas. Durante los días del paso del ciclón tropical Stan, en el mes de octubre del año 2005, se registraron lluvias de 505.50 mm durante el período comprendido del 01 al 10 de octubre, en Santa Lucía Cotzumalguapa, con lluvia máxima registrada en 24 horas, de 169.30 mm. Siendo los días 04 y 05 donde se produjo la mayor acumulación de lluvia.

Según series de registros históricos del INSIVUMEH (1980), el 19 de septiembre del año 1982, se registró en la estación climática Camantulul, ubicada en Santa Lucía Cotzumalguapa, 202.20 mm de lluvia diaria máxima anual.

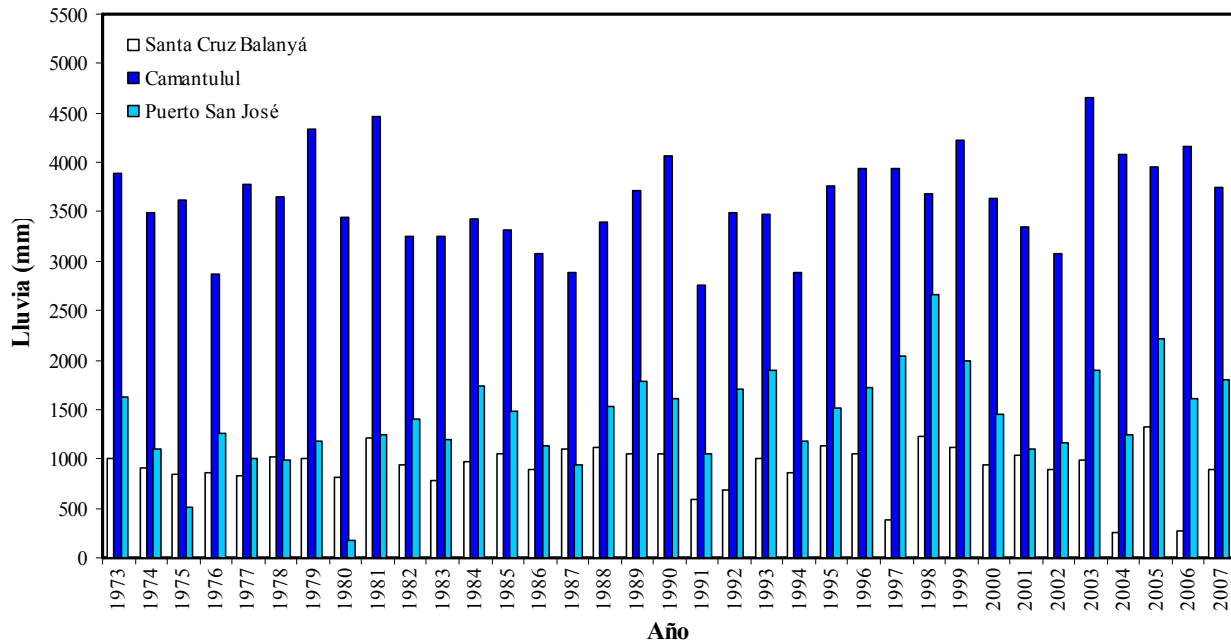
4.1.2 Lluvia multi-anual

De acuerdo a lo discutido previamente y para los fines del estudio, se consideraron las estaciones climáticas monitoreadas por INVISUMEH ubicadas en el Puerto de San José, Camantulul y Santa Cruz Balanyá, representando las partes baja, media y alta de la cuenca respectivamente. En las tres estaciones se cuentan con registros históricos continuos de 35 años, correspondientes al período 1973 - 2007. En la figura 4.1 se muestra el comportamiento anual de la lluvia, donde se observa claramente la diferencia significativa entre la parte media de la cuenca, correspondiente a la estación climática Camantulul, con las partes baja y alta de la misma, donde la lluvia disminuye drásticamente, en especial en la parte alta.

La lluvia media anual durante el período mencionado, para las tres estaciones climáticas se estima en 1,432.90 mm, 3,621.90 mm y 915.90 mm, correspondientes a las partes baja, media y alta respectivamente. Custodio & Llamas (2001), mencionan que este valor se conoce como

módulo pluviométrico anual medio, estimado como la media aritmética de la lluvia anual durante una serie de años.

Figura 4.1 Lluvia anual en tres estaciones climáticas con influencia en la cuenca del río Coyolate.



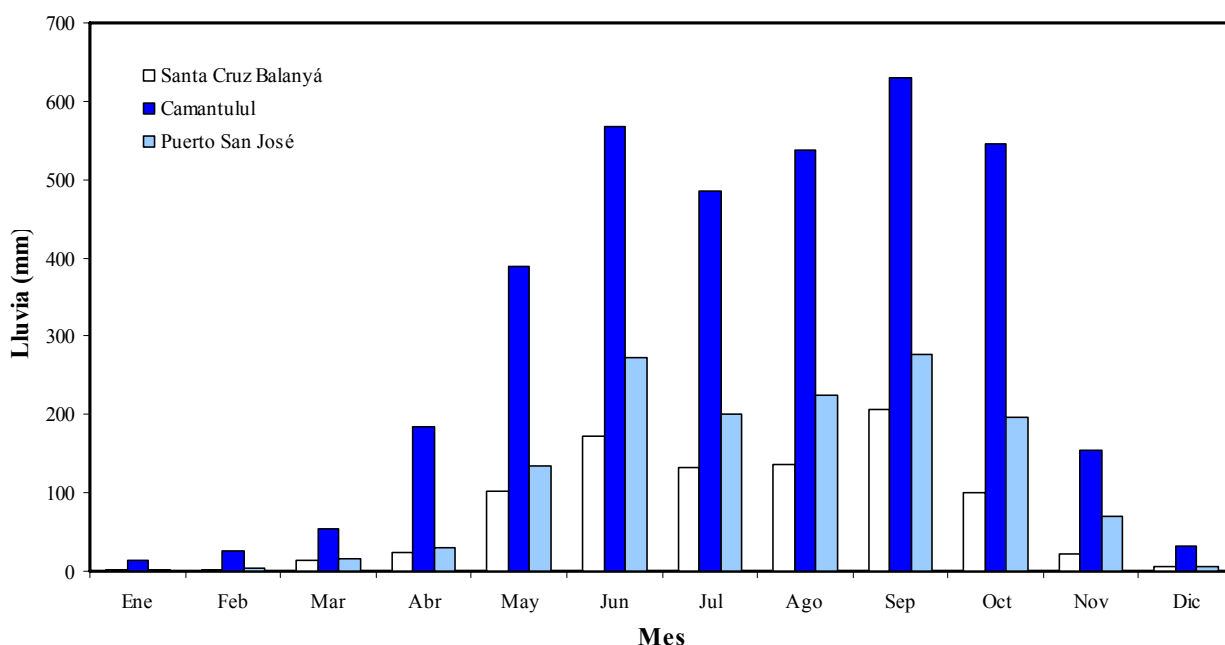
Es necesario hacer la aclaración que la estación climática Puerto San José, se encuentra ubicada en la cuenca del río Achiguate, pero debido a que no se cuenta con una estación climática en la parte baja de la cuenca del río Coyolate, se utilizó la estación en mención por considerarse que se ubica en la misma región hidrológica.

4.1.3 Lluvia mensual

La lluvia mensual consiste en la suma de las alturas de precipitación ocurridas durante un mes, por el contrario el promedio de los valores registrados para cada mes durante una serie de tiempo sería la lluvia media mensual. Como se observa en la figura 4.2 el comportamiento en las tres estaciones climáticas en mención es bastante similar, donde los meses de mayor acumulación de lámina de lluvia son los de agosto, septiembre y octubre, siendo aproximadamente el 48% de la lluvia total para el caso de la estación climática Camantulul. Inclusive, presentándose eventos extremos en el mes de octubre, como es el caso del ciclón tropical Stan. Cabe mencionar que tanto para la lluvia media anual como la lluvia media mensual, existe mayor dispersión de los datos en la estación Camantulul, debido a que son lluvias de tipo orográfico, que de acuerdo con

Monsalve (1999), son el resultado de la ascensión mecánica de corrientes de aire húmedo con movimiento horizontal cuando chocan sobre barreras naturales. Este tipo de lluvias sobre la parte media de la cuenca del río Coyolate, se caracterizan por ser de alta intensidad y normalmente de moderada duración, propiciando la formación de crecidas, esto aunado al efecto del relieve y a la deforestación existente.

Figura 4.2 Lluvia media mensual en tres estaciones climáticas con influencia en la cuenca del río Coyolate.



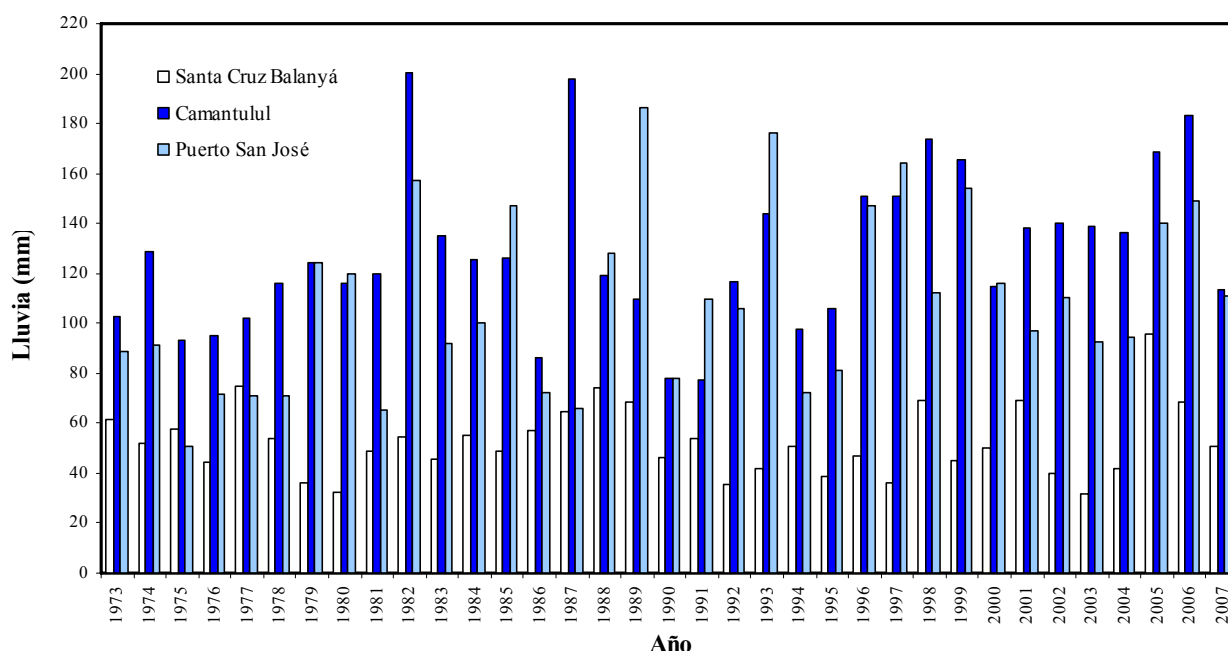
4.1.4 Lluvia diaria

La lluvia diaria es la cantidad total de lámina llovida durante un día, comprendido entre las 7:00 a.m. del día actual y las 7:00 a.m. del día posterior. Cabe mencionar que en los años de 1982 y 1987 para el caso de la estación climática Camantulul se registraron eventos de 202.20 y 197.70 mm de lluvia diaria máxima anual respectivamente, siendo mayores a lo que se observó durante el ciclón tropical Stan, que fue de 169.30 mm. Este tipo de eventos es de relevancia en la formación de crecidas que posteriormente propician inundaciones, debido a que son eventos de intensidad moderada y duración prolongada, saturando el suelo, y con esto acercando o igualando el coeficiente de escorrentía a uno, o sea del porcentaje de lluvia que cae sobre el suelo aproximadamente el 100% se convierte en escorrentía directa. Considerando también que el suelo se encuentra con un alto contenido de humedad. Además, es conveniente hacer la aclaración entre lluvia máxima diaria y lluvia máxima en 24 horas, ya que no necesariamente son lo mismo. La lluvia máxima diaria es la lluvia máxima registrada durante un día y la lluvia máxima en 24 horas

es la lluvia máxima registrada durante un período continuo de 24 horas. Siendo esta última la más perjudicial, ya que no le permite al suelo disminuir su contenido de agua y por ende aumentar su capacidad de almacenamiento. Para estimar la lluvia máxima en 24 horas es necesario contar con un pluviógrafo para posteriormente analizar la banda y obtener el registro continuo.

En Guatemala se han realizado estudios que sugieren que la magnitud de la lluvia de 24 horas de duración es aproximadamente 13% mayor que la magnitud de la lluvia diaria. Por lo tanto, conociendo las magnitudes de lluvia diaria máxima, se pueden inferir lluvias máximas de 24 horas de duración y posteriormente inferir para períodos más cortos (INSIVUMEH, 2004). Para el caso de las estaciones climáticas con influencia en la cuenca del río Coyolate, la lluvia máxima diaria durante el registro considerado es el siguiente:

Figura 4.3 Lluvia diaria máxima anual en tres estaciones climáticas con influencia en la cuenca del río Coyolate.



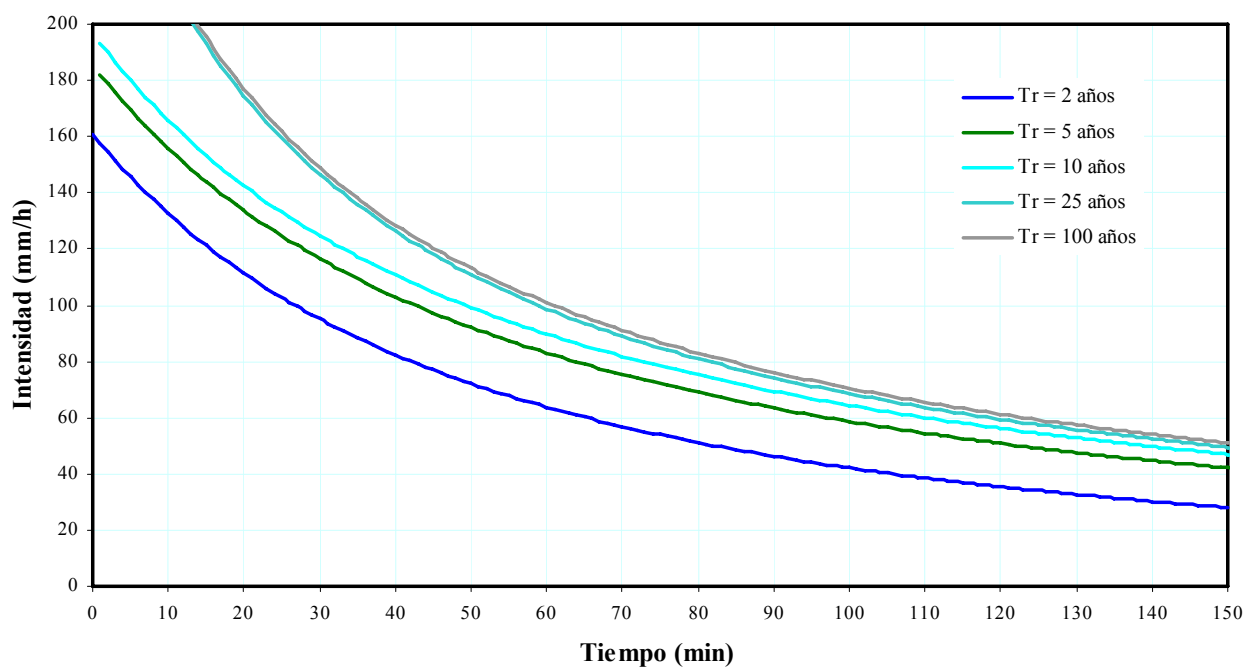
4.1.5 Intensidad de las lluvias

La intensidad es uno de los aspectos más importantes a considerar de un evento de precipitación. Johnson (1985), menciona que una lluvia moderada de larga duración favorece la infiltración, las lluvias intensas saturan muy rápidamente el suelo, perdiéndose gran parte en escorrentía superficial, además compactan el suelo reduciendo su habilidad para absorber el agua. La intensidad es directamente proporcional a la magnitud de la crecida derivada de una tormenta,

por lo tanto, a mayor intensidad de lluvias, mayor es la magnitud de las crecidas y el riesgo de inundaciones. Lo anterior es importante, siempre y cuando se considere la duración de la tormenta, ya que eventos de lluvia de alta intensidad pero de corta duración no necesariamente propician la formación de crecidas, más aún si el suelo se encuentra a un contenido de humedad cercano al punto de marchitez permanente.

De acuerdo con el INSIVUMEH (2004), la caracterización de lluvias en cuanto a intensidades es importante en varias aplicaciones, específicamente en relación a la evaluación de eventos extremos máximos. Normalmente, en hidrología, existen ciertos tipos de aplicaciones que requiere de eventos de lluvias intensas asociadas a una duración y una frecuencia de ocurrencia, siendo las curvas duración-intensidad-frecuencia (DIF) las que ofrecen dicha relación. Para la estación climática Camantulul, las curvas DIF se muestran a continuación:

Figura 4.4 Curvas duración-intensidad-frecuencia en la estación climática Camantulul.



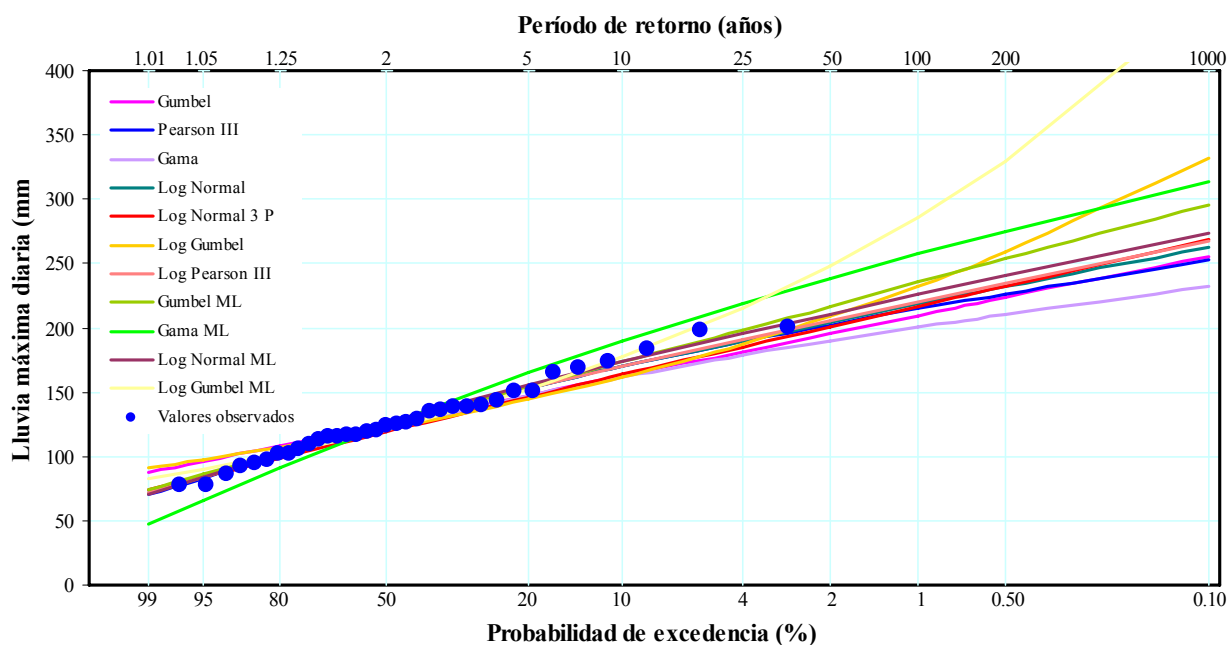
Es importante hacer la aclaración, que eventos como el ciclón tropical Stan, se caracterizaron por ser de intensidad moderada pero de larga duración, saturando completamente los suelos y ocasionando crecidas. Así, se estima que la mayor concentración de lluvia en la estación climática Camantulul, ocurrió durante las 9:00 a.m. del día 04 a las 22:30 del día 05, donde precipitó un total de 288.00 mm, lo equivaldría a intensidad promedio de 7.68 mm/h. Para el caso de los eventos extremos registrados en la estación climática Camantulul, en los años 1982,

1987 y 2005, las intensidades correspondientes a lluvia diaria máxima anual serían de 8.34 mm/h y 8.24 mm/h y 7.05 mm/h respectivamente. Dado lo anterior, se concluye que las lluvias en la parte media de la cuenca se caracterizan por ser de alta intensidad y de baja a moderada duración, por lo que un factor de vital importancia en el sistema de alerta temprana es considerar la duración del evento.

4.1.6 Análisis estadístico de lluvia diaria máxima anual

Con la finalidad de determinar una distribución teórica de frecuencia a la cual se ajusten los datos de la serie de lluvia diaria máxima anual correspondientes a 35 años de registros de la estación climática Camantulul, se realizó el análisis estadístico de la misma. Las distribuciones teóricas de distribución de frecuencia utilizadas fueron: Gumbel, Gama, Pearson III, Log Normal, Log Normal de tres parámetros, Log Gumbel y Log Pearson III, estimando los parámetros con momentos convencionales y lineales, a excepción de las distribuciones Log Normal de tres parámetros, Pearson III y Log Pearson III (únicamente con momentos convencionales). Como es de esperarse en este tipo de eventos extremos, el coeficiente de sesgo de los datos es positivo, siendo en este caso de 0.62. Los datos presentan una ligera dispersión, reflejándose en el coeficiente de variación que es de 0.24. El ajuste de los datos considerados de lluvia diaria máxima a las curvas teóricas de distribución de frecuencia se muestra en la siguiente figura:

Figura 4.5 Ajuste de registros históricos de lluvia diaria máxima anual a curvas teóricas de distribución de frecuencia en la estación climática Camantulul.



Prácticamente resulta difícil estimar de forma visual la distribución teórica de frecuencia a la que mejor se ajustan los datos. Pareciera que los datos se ajustan a la mayoría de distribuciones a partir de períodos de retorno desde 1.01 hasta 10 años, a excepción de la distribución Gama ML. Al aplicar la prueba estadística del error cuadrático se obtiene lo siguiente:

Cuadro 4.1 Posición relativa del ajuste de 11 distribuciones teóricas de frecuencias utilizadas en el análisis de lluvia diaria máxima anual, en la estación climática Camantulul.

Distribución teórica de frecuencia	Error cuadrático mínimo	Posición relativa
Gumbel	51.73	5
Pearson III	85.02	9
Gama	114.66	10
Log Normal	24.72	3
Log Normal 3 P	24.37	2
Log Gumbel	52.64	6
Log Pearson III	65.66	8
Gumbel ML	106.73	11
Gama ML	63.83	7
Log Normal ML	21.21	1
Log Gumbel ML	39.72	4

Fuente: Elaboración propia (2008).

En orden de prioridad se deduce que los datos se ajustan mejor a las distribuciones Log Normal ML, Log Normal de tres parámetros, Log Normal, Log Gumbel ML, Gumbel y Log Gumbel. Coincidiendo en el caso de las distribuciones Log Normal ML y Gumbel, con lo que recomienda el INSIVUMEH (2,004), para la región donde se localiza la estación climática en mención. Al utilizar la distribución Log Normal ML para estimar el período de retorno del evento de lluvia máxima diaria del ciclón tropical Stan, se obtiene un tiempo de 12.80 años. En la figura 1A se muestra el ajuste de los datos a la distribución teórica de frecuencia Log Normal ML.

4.2 Régimen de crecidas

4.2.1 Generalidades

Los caudales máximos de crecida están, obviamente, condicionados por el aporte de las lluvias y su distribución en el tiempo. Además de la magnitud de las lluvias, los caudales máximos están influidos por la topografía accidentada y empinada de la parte media de la cuenca

que influye en el tiempo de concentración. Puede agregarse otro factor que magnifica el efecto de las crecidas en la parte baja, y es el arrastre de material sólido. La parte media de la cuenca, en las faldas de los volcanes de Fuego y Acatenango, se originan cantidades apreciables de material volcánico y en la parte alta material sólido como resultado de la erosión hídrica. El material transportado por las crecidas se va depositando a lo largo del cauce, a medida que la pendiente longitudinal del cauce de los ríos decrece, mientras se acerca a la costa (Orozco & Flores, 2006).

De acuerdo con ERIS (2006), la crecida del río Coyolate durante el ciclón tropical Mitch, en la estación hidrométrica localizada en el puente del mismo nombre se estimó en $122.60 \text{ m}^3/\text{s}$, con una altura limnimétrica de 2.55 m. A manera de comparador también se menciona la crecida histórica en el mismo punto, en el año 1974, en donde se estimó un caudal de $156.70 \text{ m}^3/\text{s}$, con una altura limnimétrica de 3.08 m. Según el mapa de cuencas priorizadas la probabilidad de ocurrencia de inundaciones (MAGA *et al.* 2002), en la cuenca del río Coyolate es muy alta, oscilando entre 59.50 y 100%. Lo cual se comprueba con las frecuentes inundaciones suscitadas en la cuenca.

4.2.2 Estaciones hidrométricas

Actualmente, se cuenta únicamente con una estación hidrométrica operando en la parte media de la cuenca del río Coyolate, en donde existen registros continuos. En la parte alta de la cuenca operó por algún tiempo la estación hidrométrica La Presa y en la parte baja operó la estación hidrométrica Cerro Colorado, cesando su operación debido a problemas de inundación y asolvamiento. Algunas características de las mismas se muestran a continuación:

Cuadro 4.2 Características de las estaciones hidrométricas de la cuenca del río Coyolate.

Estación	Río	Estrato	Elevación (msnm)	Área (km ²)	Años de registros	Estado actual
La Presa	Xayá	Alto	2,062	75	6	No opera
Puente Coyolate	Coyolate	Medio	213	512	32	En operación
Cerro Colorado	Coyolate	Bajo	42	1,154	6	No opera

Fuente: Departamento de Investigación y Servicios Hídricos, INSIVUMEH (2007).

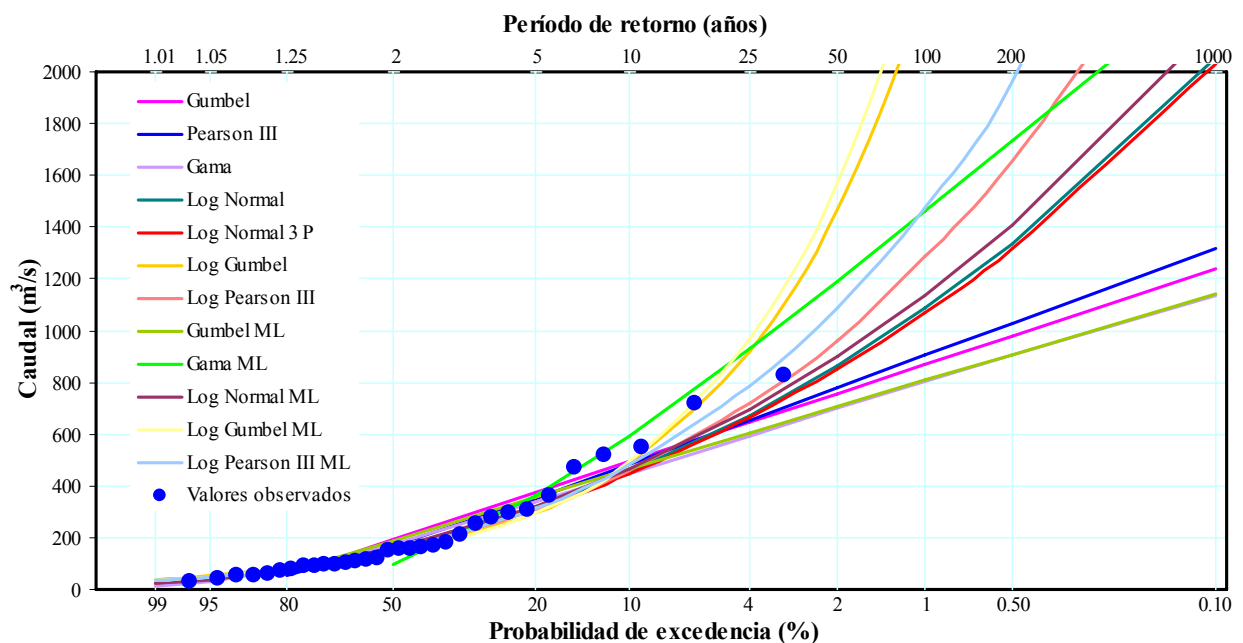
Como puede observarse, la estación hidrométrica Puente Coyolate, es la única en la cuenca que actualmente está operación y que además está monitoreada vía satélite, recopilando información continua del nivel del río. Es importante hacer mención, que la estación actualmente

en operación es la de mayor relevancia en el estudio, ya que se encuentra ubicada en una zona donde el régimen de lluvias es el que da origen a la formación de crecidas. Además, se cuenta con registros continuos durante el ciclón tropical Stan.

4.2.3 Análisis estadístico de caudales máximos anuales en la estación hidrométrica Puente Coyolate

Con el objetivo de conocer el comportamiento de las crecidas en la estación hidrométrica localizada en el puente Coyolate y estimar el período de retorno del ciclón tropical Stan se realizó el análisis estadístico de las mismas. Además, se adquiere un mejor criterio en el análisis regional de crecidas para definir los caudales para diferentes períodos de retorno, que se pueden considerar en un análisis hidráulico a partir de los puentes Coyolate, Cristóbal y Pantaleón hacia la aldea Cerro Colorado. Para el efecto, se consideró un total de 32 registros de caudales máximos anuales en dicha estación, mostrándose a continuación el ajuste de los datos a las distintas distribuciones teóricas de frecuencia utilizadas:

Figura 4.6 Ajuste de registros históricos de caudales máximos anuales a curvas teóricas de distribución de frecuencia en la estación hidrométrica Puente Coyolate.



Los eventos extremos normalmente se ajustan a las distribuciones teóricas de frecuencia principalmente para períodos de retorno menores, en este caso, parece que se ajustan a todas las distribuciones con períodos de retorno menores a dos años. Al aplicar el método estadístico del error cuadrático mínimo para estimar el ajuste de los datos a las distribuciones se obtiene que los

datos se ajustan de mejor manera a las distribuciones Log Pearson III ML, Log Normal ML, Log Normal, Pearson III, Log Pearson III y Log Normal de tres parámetros, coincidiendo en la mayoría de casos con lo que INSIVUMEH establece para dicha región. Las posiciones relativas, de acuerdo al método del error cuadrático mínimo se muestran a continuación:

Cuadro 4.3 Posición relativa del ajuste de 12 distribuciones teóricas de frecuencias utilizadas en el análisis de caudales máximos anuales, en la estación hidrométrica Puente Coyolate.

Distribución teórica de frecuencia	Error cuadrático mínimo	Posición relativa
Gumbel	331.83	9
Pearson III	253.49	4
Gama	338.34	11
Log Normal	251.72	3
Log Normal 3 P	266.71	6
Log Gumbel	333.02	10
Log Pearson III	253.49	5
Gumbel ML	357.09	12
Gama ML	327.28	8
Log Normal ML	220.44	2
Log Gumbel ML	305.95	7
Log Pearson III ML	186.16	1

Fuente: Elaboración propia (2008).

Al realizar las estimaciones del período de retorno utilizando las distribuciones teóricas de frecuencia mejor posicionadas para el ciclón tropical Stan, analizando la crecida máxima en la estación hidrométrica Puente Coyolate, se obtiene lo siguiente:

Cuadro 4.4 Períodos de retorno estimados para la crecida máxima durante el ciclón tropical Stan, en la estación hidrométrica Puente Coyolate.

Distribución teórica de frecuencia	Período de retorno (años)	Probabilidad de excedencia (%)	Probabilidad de no excedencia (%)
Log Pearson III ML	28.00	3.57	96.43
Log Normal ML	39.70	2.52	97.48
Log Normal	44.20	2.26	97.74
Log Pearson III	34.90	2.87	97.13
Log Normal 3 P	46.10	2.17	97.83

Fuente: Elaboración propia (2008).

Por lo tanto, se estima que el período de retorno de dicha crecida oscila entre 28 y 46 años, siendo el valor de 28 años el que estadísticamente es mas preciso. Lo anterior, tiene consistencia al observar las crecidas de diseño en la estación hidrométrica Puente Coyolate de acuerdo al análisis regional de crecidas, ya que utilizando la distribución Log Pearson III ML se obtiene un caudal de 949 m³/s para un período de retorno de 25 años, al aplicar las demás distribuciones los valores obtenidos son mayores (en la figura 2A se muestra el ajuste de los datos a la distribución). Algo que es importante resaltar, es que cuando se trata de eventos extremos (lluvias intensas y crecidas), las distribuciones teóricas a la que mejor se ajustan los datos es cuando se realiza la transformación logarítmica de los mismos. Técnica muy usual en hidrología que disminuye el coeficiente de sesgo mejorando sustancialmente su distribución.

4.2.4 Análisis regional de crecidas

De acuerdo con Monsalve (1999), 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. Orozco (2006), menciona que los factores que propician la formación de crecidas son climáticos y aspectos relacionados con la cuenca tributaria. Actualmente un factor de gran importancia que influye en la formación de crecidas es el cambio del uso de la tierra, principalmente la deforestación en las partes altas de las cuencas, y en menor proporción la impermeabilización del suelo por áreas urbanas.

Para fines de análisis de crecidas, interesa la crecida máxima instantánea anual registrada en un determinado río, o sea el máximo nivel instantáneo alcanzado en el cauce durante el año. Generalmente, este máximo nivel se registra durante los meses de septiembre y/o octubre, donde existe mayor precipitación y por ende mayor escurrimiento. El análisis regional de crecidas es un procedimiento donde se utilizan series anuales (crecidas máximas instantáneas), de varias estaciones hidrométricas con un determinado número de registro, obviamente a mayor cantidad de datos y estaciones se obtiene mayor confiabilidad en los resultados.

El objetivo de dicho análisis consiste en estimar factores de frecuencia para ciertos períodos de retorno y aplicarlos para estimar el caudal en cualquier punto de la cuenca en función del área de la misma.

Es importante en el análisis regional de crecidas seleccionar series de registros de caudales máximos instantáneos anuales que sean confiables y con determinada longitud. Sin embargo, en nuestro medio existe el inconveniente que no se cuenta con suficiente información disponible, además hay que hacer notar que las estimaciones de caudales máximos son realizadas con base a ecuaciones calibradas para caudales menores, por lo que en la mayoría de los casos dichos valores de crecidas poseen significativos márgenes de error.

También hay que hacer notar, que el análisis regional de crecidas se realiza para áreas geográficas donde los fenómenos que producen la lluvia y por lo tanto la escorrentía son homogéneos, en base a lo anterior, Guatemala está dividida en ocho regiones hidrológicas, nominadas de I a VIII. Para el caso de la cuenca del río Coyolate, en lo que concierne al estrato medio y bajo, se localiza en la región hidrológica II. Lo que concierne a la parte alta de la vertiente del océano Pacífico, corresponde a la región hidrológica I, caracterizada por una disminución significativa de la lluvia (INSIVUMEH, 2004). Algunas de las características de las estaciones hidrométricas utilizadas en el análisis se muestran a continuación:

Cuadro 4.5 Características de las estaciones hidrométricas utilizadas en el análisis regional de crecidas.

Estación	Río	Cuenca	Elevación (msnm)	Área (km ²)	Años de registros	Estado actual
Cabúz	Malacatán	Suchiate	360	395	30	En operación
Coatepeque	Naranjo	Naranjo	291	501	10	No opera
Meléndrez II	Meléndrez	Naranjo	20	149	12	No opera
Pajapita	Nahuatán	Naranjo	40	185	23	No opera
Caballo Blanco	Ocosito	Ocosito	48	462	32	No opera
La Máquina	Sis	Sis-Icán	28	156	25	No opera
San Miguel Moca	Nahualate	Nahualate	176	620	30	No opera
San Mauricio	Nahualate	Nahualate	30	1,191	10	No opera
Montecristo	Cutzán	Nahualate	229	129	31	No opera
Barriles	Siguacán	Nahualate	67	154	6	No opera
Puente Coyolate	Coyolate	Coyolate	213	512	32	En operación
Cerro Colorado	Coyolate	Coyolate	42	1,154	6	No opera

Fuente: Departamento de Investigación y Servicios Hídricos, INSIVUMEH (2007).

Actualmente, solo operan las estaciones hidrométricas Cabúz y Puente Coyolate, por lo que existe una tendencia a la disminución en el monitoreo de los principales ríos de la república.

Es importante destacar, que de acuerdo a las elevaciones de las estaciones hidrométricas, se ubican en las partes medias y bajas de las respectivas cuencas, ya que la parte alta como se mencionó, corresponde a otra región hidrológica.

A. Relación área - caudal índice

El método de análisis regional de acuerdo con Orozco citado por INSIVUMEH *et al.* (2003), consiste en una ecuación potencial que relacione el caudal índice y el área de la cuenca. La estimación del caudal índice para una serie de datos es la siguiente:

$$Q_I = \sum_{i=1}^n Q_a / n \dots \dots \dots \text{Ecuación: 4.1}$$

Donde:

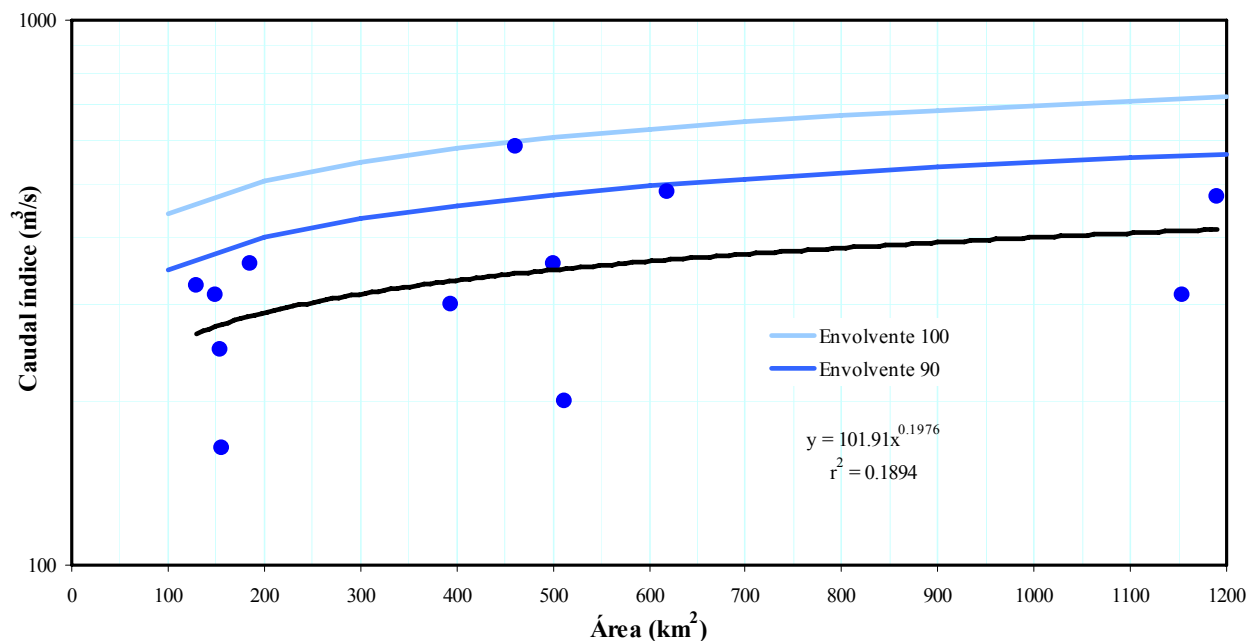
Q_I = Caudal índice (m^3/s).

Q_a = Caudal máximo anual (m^3/s).

n = Número de datos en la serie.

De acuerdo con el INSIVUMEH (2004), el caudal índice (Q_I) es llamado también caudal máximo medio (QMM). De tal forma, que por cada serie de registros correspondientes a cada estación se obtiene un valor de caudal índice. La relación entre el caudal índice y el área de la cuenca, trazando además las curvas envolventes 100 y 90, se muestra en la figura siguiente:

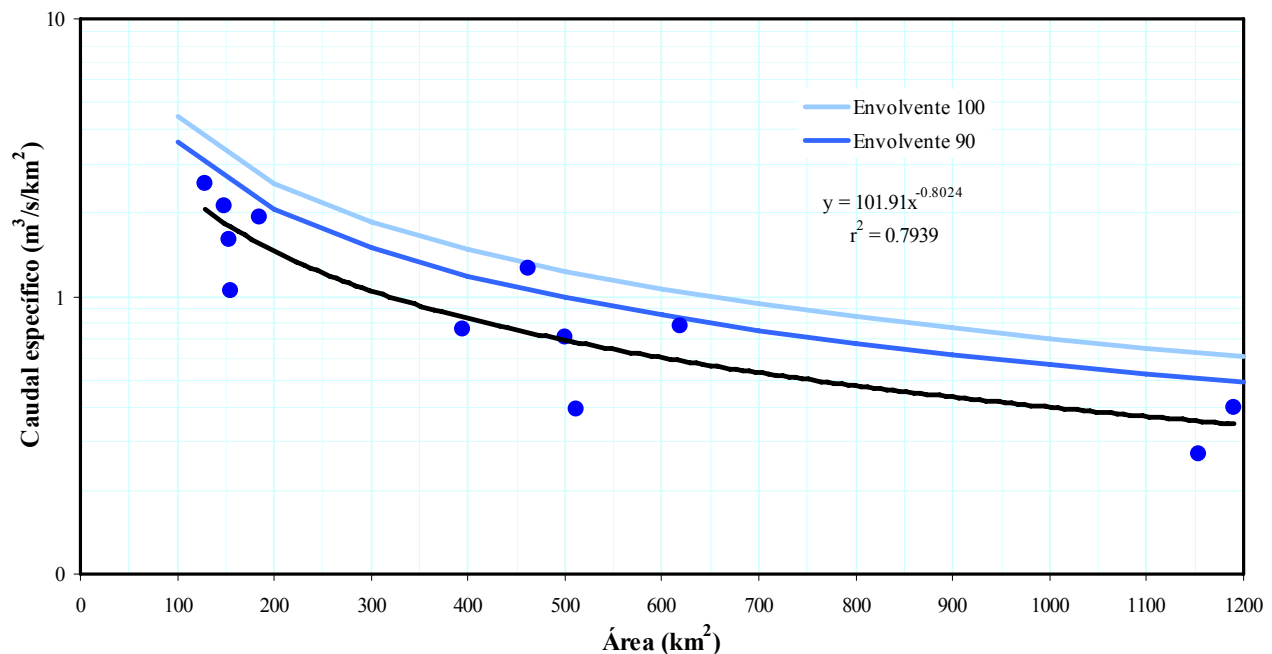
Figura 4.7 Caudal índice vrs área de 12 cuencas hidrográficas.



La ecuación potencial que se deduce es $y = 101.91 x^{0.1976}$, con un coeficiente de determinación de $0.1894 \approx 0.19$, al sustituir el caudal índice y el área se obtiene $Q_I = 101.91 A^{0.1976}$. El coeficiente de determinación que se obtiene se considera bajo, lo cual se debe a la incertidumbre de los datos de las series, como se mencionó, dichas crecidas son estimadas mediante ecuaciones deducidas para caudales mucho más bajos.

En hidrología existe otro concepto de suma importancia, denominado caudal específico, que resulta al dividir el caudal entre el área ($m^3/s/km^2$), al obtener la media aritmética de los caudales específicos de cada dato correspondiente a cada serie de registros, y plotearlas con el área se obtiene lo siguiente:

Figura 4.8 Caudal específico vrs área de 12 cuencas hidrográficas.



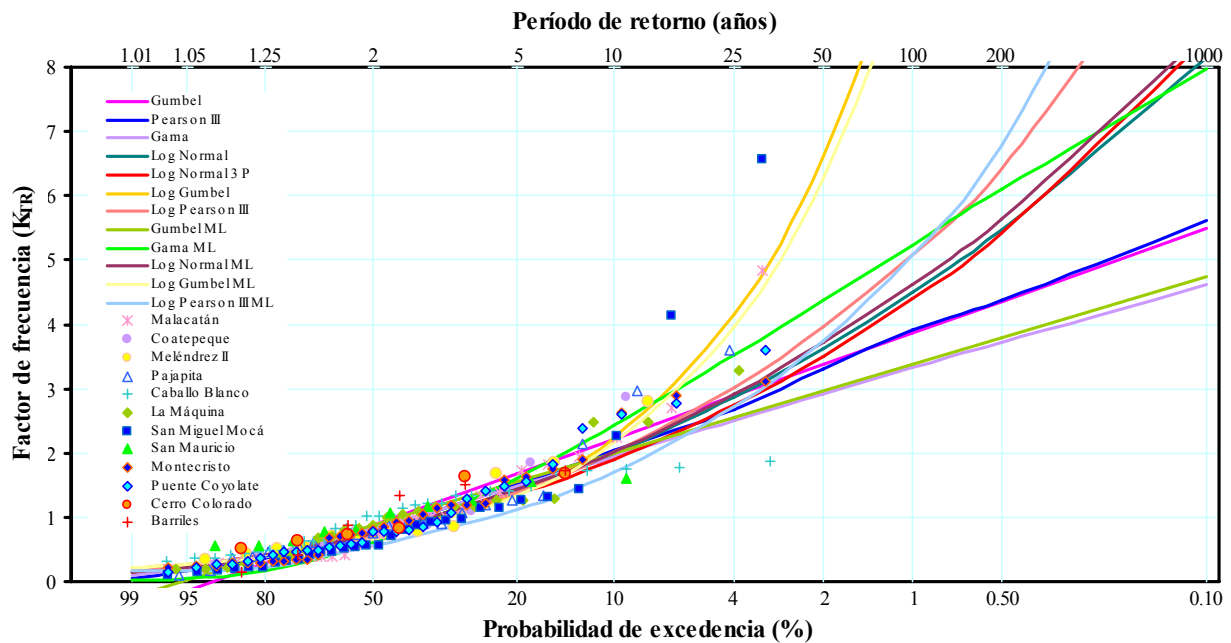
Como se observa en la figura anterior, el coeficiente de determinación es de 0.79, siendo mayor que el obtenido en la relación área - caudal índice considerándose adecuado.

B. Ajuste de curvas teóricas de distribución de frecuencia a series estandarizadas

Para el ajuste de las series estandarizadas de los datos a curvas teóricas de distribución de frecuencia, se utilizaron las distribuciones Gumbel, Pearson III, Gama, Log Normal, Log Normal de tres parámetros, Log-Gumbel y Log Pearson III, estimando los parámetros con momentos convencionales. Además, se estimaron los parámetros con momentos lineales para las

distribuciones Gumbel, Gama, Log Normal, Log Gumbel y Log Pearson III, para lo cual se utilizó el software hidrológico HidroEsta. El ajuste de las series estandarizadas a las curvas teóricas de distribución de frecuencia se muestra en la siguiente figura:

Figura 4.9 Ajuste de series estandarizadas de caudales máximos anuales a curvas teóricas de distribución de frecuencia.



Como puede observarse, para períodos de retorno menores de 10 años, los datos estandarizados parecen presentar buen ajuste a la mayoría de distribuciones teóricas de frecuencia, sin embargo, para valores más altos de períodos de retorno, los datos se dispersan. Cabe mencionar, que algunos datos de la estación hidrométrica San Miguel Mocá, tienden a ajustarse a distribuciones teóricas de frecuencia que estimarían valores demasiado altos, mientras que los datos de la estación hidrométrica Caballo Blanco, se sitúan por debajo de la distribución teórica de frecuencia que estimaría valores relativamente bajos. Lo anterior, puede deberse a cierta inconsistencia en los registros históricos de ambas estaciones hidrométricas. Como se mencionó con anterioridad, el objetivo del análisis regional de crecidas, es estimar un factor de frecuencia (K_{TR}), de un sitio de la cuenca donde no se dispone de información, para sustituirlo en la siguiente ecuación:

$$Q_{TR} = K_{TR} * Q_I \dots \dots \dots \text{Ecuación: 4.2}$$

Los factores de frecuencia que se deducen del análisis regional de crecidas en la vertiente del océano Pacífico son los siguientes:

Cuadro 4.6 Factores de frecuencia (K_{TR}) de distribuciones teóricas, donde los parámetros se estimaron con momentos convencionales.

Período de retorno (años)	Probabilidad de excedencia (%)	Distribución teórica de frecuencia						
		Gumbel	Pearson III	Gama	Log Normal	Log Normal 3 parámetros	Log Gumbel	Log Pearson III
2	50	0.89	0.78	0.84	0.76	0.74	0.67	0.73
5	20	1.69	1.51	1.49	1.43	1.36	1.37	1.38
10	10	2.22	2.05	1.94	2.00	1.90	2.23	2.02
25	4	2.88	2.68	2.50	2.87	2.75	4.15	3.02
50	2	3.38	3.30	2.92	3.63	3.51	6.61	3.96
100	1	3.87	3.92	3.33	4.50	4.39	10.53	5.09
200	0.50	4.36	4.37	3.73	5.48	5.42	16.82	6.43
1,000	0.10	5.50	5.61	4.63	8.14	8.45	50.42	10.77

Fuente: Elaboración propia (2007).

Es notorio los factores de frecuencia estimados con la distribución de Gumbel, siendo significativamente mayores que al resto de las demás distribuciones, debido a que la transformación logarítmica de Gumbel tiende a sobreestimar los valores, principalmente para eventos con períodos de retorno mayores a 25 años. Dado a lo anterior, en nuestro medio la distribución de Gumbel con transformación logarítmica no es de aplicabilidad, siendo más aplicables las distribuciones Pearson III, Gumbel y Normal (con transformación logarítmica en el caso de las distribuciones Pearson III y Normal). Para el caso de los factores de frecuencia estimados con momentos lineales, los resultados son los siguientes:

Cuadro 4.7 Factores de frecuencia (K_{TR}) de distribuciones teóricas, donde los parámetros se estimaron con momentos lineales.

Período de retorno (años)	Probabilidad de excedencia (%)	Distribución teórica de frecuencia				
		Gumbel	Gama	Log Normal	Log Gumbel	Log Pearson III
2	50	0.88	0.62	0.76	0.67	0.57
5	20	1.54	1.61	1.44	1.35	1.13
10	10	1.99	2.42	2.03	2.16	1.70
25	4	2.55	3.53	2.93	3.97	2.71
50	2	2.96	4.38	3.72	6.27	3.75
100	1	3.37	5.24	4.63	9.93	5.08
200	0.50	3.78	6.10	5.65	15.76	6.79
1,000	0.10	4.73	7.98	8.55	46.77	12.72

Fuente: Elaboración propia (2007).

De igual manera, la distribución Log Gumbel (estimando los parámetros con momentos lineales), presenta valores demasiado altos, contrarios con los valores de K_{TR} de las distribuciones Gumbel y Gama. De acuerdo al análisis realizado aplicando el método del error cuadrático mínimo, se deduce que las distribuciones teóricas de frecuencia a la que se ajustan los datos de mejor manera son en orden de prioridad: Log Pearson III ML, Log Normal ML, Log Normal, Log Pearson III y Log Normal de tres parámetros. De cualquier manera, es importante mencionar, que todo lo anterior son técnicas estadísticas que ayudan a comprender mejor el comportamiento de las crecidas. Su interpretación dependerá del criterio que se tenga acerca de la hidrología, de las condiciones del área y del tipo de proyecto que se esté realizando. Además hay que recordar, que en nuestro medio, la principal limitante es la carencia de información, por lo que en la mayoría de los casos hay que recurrir hacer estimaciones de este tipo.

Es importante hacer notar, que para el caso de la cuenca del río Coyolate, se cuenta con una estación hidrométrica actualmente en operación a la altura del puente Coyolate (ubicado en la parte media de la cuenca), y los factores de frecuencia se utilizan para estimar el caudal para un determinado período de retorno en un punto de la cuenca donde no se dispone de información. Además, en dicho lugar actualmente opera una estación hidrométrica para fines de alerta temprana contra inundaciones en la parte baja de la cuenca.

Dado lo anterior, los sitios prioritarios en la cuenca para los fines del estudio son los ríos Coyolate, Cristóbal y Pantaleón, en los puentes del mismo nombre, ubicados en los km 105, 91 y 85 de la ruta al Pacífico respectivamente. De lo anterior, resulta vital monitorear el nivel del río en los tres sitios mencionados, dado que confluyen en donde anteriormente se ubicó la estación hidrométrica Cerro Colorado, lugar donde se inicia el desbordamiento del río e inundaciones. Los valores de caudal se estimaron con la envolvente promedio, debido a que es la que da resultados más cercanos a la realidad. Las curvas envolvente 100 y 90 sobreestiman los caudales, tomando como base el análisis de los registros históricos en la estación hidrométrica Puente Coyolate. De igual manera los caudales de crecidas se subestiman significativamente mediante el caudal específico.

Lo ideal hubiese sido disponer de una serie de registros históricos en el sitio donde inician las inundaciones en la cuenca, que es la estación hidrométrica localizada en la aldea Cerro Colorado, para contrastar, sin embargo, únicamente se dispone de seis años de información

continua (1970 - 1975). En el siguiente cuadro se estiman algunos caudales de diseño para diversos períodos de retorno:

Cuadro 4.8 Caudales máximos anuales (m^3/s) estimados en diversos sitios de interés en la cuenca del río Coyolate.

Sitio	Tr (años)	Gumbel	Pearson III	Log Normal	Log Pearson III	Log Normal ML	Log Pearson III ML
Cerro Colorado	2	364	320	311	301	312	234
	5	692	620	586	565	592	464
	10	910	842	820	831	833	697
	25	1,184	1,102	1,178	1,241	1,203	1,114
	50	1,388	1,355	1,492	1,625	1,529	1,538
	100	1,590	1,611	1,848	2,089	1,900	2,087
	200	1,791	1,793	2,250	2,639	2,319	2,789
	1,000	2,258	2,302	3,342	4,422	3,510	5,224
Puente Coyolate	2	310	273	265	257	266	199
	5	590	528	499	481	504	395
	10	775	717	698	707	709	594
	25	1,008	938	1,003	1,057	1,024	949
	50	1,182	1,154	1,270	1,384	1,302	1,310
	100	1,354	1,372	1,573	1,779	1,618	1,777
	200	1,526	1,527	1,916	2,247	1,975	2,375
	1,000	1,923	1,960	2,846	3,765	2,989	4,448
Puente Cristóbal	2	207	182	177	171	177	133
	5	393	352	332	320	336	263
	10	516	478	465	472	473	396
	25	672	625	668	704	683	632
	50	788	769	847	923	868	873
	100	902	914	1,049	1,186	1,078	1,185
	200	1,017	1,018	1,277	1,498	1,316	1,583
	1,000	1,282	1,307	1,897	2,510	1,992	2,965
Puente Pantaleón	2	227	199	194	188	194	145
	5	431	386	365	351	368	289
	10	566	524	510	517	518	434
	25	737	686	733	772	749	693
	50	864	843	928	1,012	952	957
	100	990	1,003	1,150	1,300	1,182	1,299
	200	1,115	1,116	1,400	1,642	1,444	1,736
	1,000	1,405	1,433	2,080	2,752	2,184	3,251

Fuente: Elaboración propia (2007).

4.2.5 Simulación hidráulica

A. Generalidades

Los objetivos de realizar una simulación hidráulica en el tramo de un determinado cauce de un río son estimar las planicies de inundación (mediante la estimación de las alturas para diversos caudales de diseño) y las velocidades del flujo en cada uno de los tramos considerados la simulación. En el primer caso, se estiman las áreas susceptibles a inundación considerando todos los afluentes en el punto de interés para realizar actividades de planificación con fines de mitigar o prevenir daños a las actividades económicas y principalmente a los habitantes. La estimación de la velocidad de flujo es de utilidad para conocer el tiempo de viaje de una onda de crecida de un punto de control hacia otro de interés, principalmente para alertar a las comunidades sobre riesgos de inundaciones, el cual fue el principal objetivo de la simulación para los fines del estudio.

Para realizar la simulación hidráulica se utilizó el programa HEC - RAS, software que fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros Hidrólogos del Ejército de los Estados Unidos (Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineering). Dicho programa permite el cálculo en régimen permanente de la superficie del agua en cauces naturales y canales, tanto en régimen subcrítico como en régimen supercrítico. Se utiliza en el cálculo de tramos con un solo remanso, así como con varios remansos dentro del mismo cálculo.

El programa permite modelar tanto las secciones transversales de cauces naturales como la curvatura en la definición en planta, definiendo distancia entre secciones en el centro y en ambos laterales. Asimismo permite el modelo de estructuras hidráulicas, por mencionar algunas, como puentes, diques, presas, entre otras. Los resultados que se calculan incluyen además de la definición de la superficie libre, las velocidades y energías en cada una de las secciones, así como otros datos de interés, como pendiente de energía, pérdidas de energía, etc.

B. Secciones representativas y datos geométricos e hidráulicos

Para los fines del estudio la simulación hidráulica se realizó con el objetivo de conocer el tiempo de viaje para determinadas crecidas en un tramo de interés. El tramo del cauce principal que se seleccionó fue del puente Coyolate hacia la confluencia con el río Pantaleón en la aldea Cerro Colorado, por considerarse que es el principal afluente en la cuenca, con una longitud

aproximada de 32.60 km, dominado por una pendiente suave. En dicho tramo se seleccionó un total de siete secciones representativas del cauce, siendo las siguientes:

Cuadro 4.9 Secciones representativas en el cauce principal de la cuenca del río Coyolate.

Sección	Descripción	Elevación fondo río (msnm)	Distancia entre secciones		Pendiente (%)
			(m)	(km)	
6	Puente Coyolate	212.89	--	--	--
5	Delta tres	206.26	235	0.23	2.83
4	Aldea El Naranjo	192.91	890	0.89	1.50
3	Hda. El Refugio	126.61	8,811	8.81	0.75
2	Hda. San Miguel	83.46	7,112	7.11	0.61
1	Hda. El Jabalí	65.82	5,127	5.13	0.34
0	Confluencia	33.26	10,429	10.43	0.31

Fuente: Elaboración propia (2008).

Es importante mencionar, que en una simulación de crecidas donde el objetivo principal sea estimar las planicies de inundación es necesario realizar un mayor número de secciones transversales del cauce, considerándose para este caso un mínimo de 30 secciones (distanciadas por lo menos un km), situación que un futuro será necesario complementar, para definir detalladamente las áreas propicias a inundación. Sin embargo, en este caso el objetivo fue estimar el tiempo de viaje para diversas crecidas y que además, la pendiente es bastante homogénea (< 1%) lo que permitió que se consideraran las secciones indicadas anteriormente. Los coeficientes de rugosidad (n) de la ecuación de Manning que se utilizaron fueron de 0.035 en el cauce principal y 0.040 en planicies de inundación. En lo que respecta a coeficientes de contracción y expansión del cauce se utilizaron 0.10 y 0.30 respectivamente.

Se simularon caudales estimados con períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 1,000 años obtenidos mediante los cuantiles derivados del análisis regional de crecidas utilizando la distribución teórica de frecuencia Log Pearson ML, por observarse que los datos se ajustan de mejor manera a la misma. Los valores de caudales para dichos períodos de retorno en el punto donde se localiza la estación hidrométrica Puente Coyolate se muestra en el cuadro 4.8.

C. Velocidades simuladas

Como es de esperarse, a mayor caudal mayor es la velocidad del flujo, obteniéndose valores hasta de 6.98 m/s para crecidas con períodos de retorno de 1,000 años. Algo para destacar

es que el tiempo de concentración estimado con base a la ecuación recomendada por el INSIVUMEH (2004), para el mismo tramo es de 1.28 m/s, significativamente menor que la velocidad estimada para una crecida con dos años de período de retorno (2.06 m/s).

Considerando que crecidas con períodos de retorno a partir de cinco años ocasionan inundaciones en la parte baja, el tiempo máximo de alerta es de aproximadamente tres horas con 15 minutos. Para crecidas con períodos de retorno mayores, entre 25 y 50 años (como en el caso del ciclón tropical Stan), el tiempo de alerta oscila entre dos horas con 20 minutos a dos horas aproximadamente. Las velocidades simuladas ponderadas que se obtuvieron a partir del puente Coyolate hacia la aldea Cerro Colorado, son las siguientes:

Cuadro 4.10 Velocidades simuladas mediante el programa HEC - RAS en el tramo en consideración.

Período de retorno (años)	Caudal (m ³ /s)	Tiempo		Velocidad (m/s)
		minutos	horas	
2	199	264.17	4.40	2.06
5	395	196.35	3.27	2.77
10	594	168.06	2.80	3.23
25	949	140.45	2.34	3.87
50	1,310	124.25	2.07	4.37
100	1,777	110.45	1.84	4.92
200	2,375	98.89	1.65	5.50
1,000	4,448	77.87	1.30	6.98

Fuente: Elaboración propia (2008).

D. Niveles simulados

El nivel del río aunado a la intensidad y frecuencia de lluvia es indispensable en todo sistema de alerta temprana. En este caso, existe una estación hidrométrica en el puente Coyolate, por lo que su monitoreo durante la época de lluvias es vital en el sistema. Se observa que los niveles del río Coyolate para crecidas con períodos de retorno de dos años es de 1.64 m, concordando con el comportamiento normal del nivel al observar las figuras 3A y 4A.

Para crecidas con períodos de retorno de cinco años el nivel asciende a 2.71 m, pudiendo ser un indicativo de alerta un nivel de dos m. Para la crecida con período de retorno de 50 años se

obtiene un nivel de 5.52 m, siendo menor de lo que se registró durante el ciclón tropical Stan (5.80 m).

Esta ligera incoherencia puede deberse a subestimación de los caudales en la estación hidrométrica en mención. Los niveles en dicha estación que se estimaron mediante la simulación hidráulica para los diversos caudales son los siguientes:

Cuadro 4.11 Niveles simulados para diversos caudales en la estación hidrométrica Puente Coyolate.

Período de retorno (años)	Caudal (m³/s)	Nivel (msnm)	Diferencia con respecto al fondo del río (m)
2	199	214.69	1.64
5	395	215.52	2.71
10	594	216.23	3.62
25	949	217.30	5.52
50	1,310	218.24	6.75
100	1,777	219.35	7.67
200	2,375	220.61	9.49
1,000	4,448	224.31	13.70

Fuente: Elaboración propia (2008).

Al realizar, el análisis hidráulico de la sección transversal donde se ubica la estación hidrométrica Puente Coyolate de acuerdo a la ecuación de Manning, se obtiene un caudal de 917.95 m³/s, a una altura similar a la registrada en el ciclón tropical Stan y al perfil número cuatro generado con el programa HEC - RAS. El análisis de la ecuación de Manning, indica que los resultados arrojados por el programa son consistentes. Por lo que los niveles estimados pueden usarse con toda confiabilidad.

El nivel de alerta puede considerarse a partir de 1.80 m. Es sumamente importante hacer la aclaración la simulación hidráulica realizada es de forma preliminar, cuyo objetivo principal fue conocer el comportamiento de los niveles en la estación hidrométrica Puente Coyolate bajo distintos caudales de diseño. La realización de una simulación hidráulica detallada permitiría conocer otros aspectos importantes como, definición de áreas inundables y velocidades principalmente.

4.3 Descripción y análisis del ciclón tropical Stan

4.3.1 Antecedentes

De acuerdo con el Perfil Ambiental de Guatemala (2006), en términos generales durante el ciclón tropical Stan, las inundaciones afectaron las zonas bajas de la costa del océano Pacífico, mientras que las tierras altas y las zonas de transición fueron principalmente afectadas por deslaves y derrumbes. Deforestación, sobreexplotación y saturación del suelo, disposición de desechos sólidos, aunadas a la pobreza, son señaladas por expertos como las principales causas que dieron origen a deslaves tras las intensas lluvias ocasionadas por Stan, que agravan la fragilidad de los ecosistemas y elevan el riesgo ante este tipo de eventos, que ocasionan un impacto negativo en el bienestar de la sociedad y rezagan el alcance de los niveles de crecimiento y desarrollo.

Medina (2007), menciona que las lluvias intensas en el litoral del Pacífico recibieron cantidades que oscilaron entre 400 y 650 mm superando las cantidades recibidas durante el ciclón tropical Mitch. El caso de severa condición lluviosa asociada al ciclón tropical Stan, puede considerarse de gran interés porque se trató de un ciclón tropical que apenas alcanzó la categoría uno en la escala Zafiro-Simpson, y nos enseña que la preparación ante la amenaza debe ser máxima siempre, no solamente cuando se trata de huracanes muy intensos. Para el ciclón tropical Mitch, las lluvias torrenciales, con prolongación e intensidad de moderada a fuerte (200 mm y 600 mm de lluvia entre el 25 de octubre y el seis de noviembre), cuando los suelos se encontraban saturados.

4.3.2 Características

Sánchez (2007), menciona que las primeras referencias sobre la depresión tropical que dio origen a Stan empezaron a aparecer en los pronósticos de largo plazo emitidos por la NOAA (Centro Nacional de Huracanes) en los últimos días de septiembre de 2005, cuando recién terminaba de circular el huracán Rita frente a las costas del golfo de México en Estados Unidos. Stan fue la depresión tropical número 20 de huracanes 2005, probablemente la más activa desde que se llevan registros.

El siguiente cuadro es generado a partir de los reportes emitidos por el Centro Nacional de Huracanes, el cual muestra algunos puntos relevantes de las posiciones por las que fue pasando Stan durante su ciclo de vida:

Cuadro 4.12 Información relevante del ciclón tropical Stan.

Fecha	Hora*	Latitud norte	Longitud oeste	Categoría	Velocidad viento (km/h)	Presión atmosférica (mb)
01-Oct-05	12:00	19.20	85.50	Depresión tropical DT	46	1,007
	15:00	19.30	85.50	Depresión tropical DT	45	1,007
02-Oct-05	06:00	19.50	87.30	Depresión tropical DT	55	1,004
	09:00	19.60	87.50	Tormenta tropical TT	75	1,003
03-Oct-05	09:00	20.50	91.50	Tormenta tropical TT	65	1,002
	21:00	20.00	92.60	Tormenta tropical TT	95	995
04-Oct-05	03:00	19.90	93.40	Tormenta tropical TT	100	990
	09:00	18.80	94.40	Huracán categoría 1	120	982
	15:00	18.60	95.10	Huracán categoría 1	130	979
	18:00	18.00	95.50	Degradado a TT	105	988
05-Oct-05	09:00	16.90	97.30	Degradado a TT	45	1,006

Fuente: Centro Nacional de Huracanes citado por Sánchez (2007).

*La hora GMT es la hora del Meridiano de Greenwich. Los reportes meteorológicos usan esa hora como referencia pero la indican como la hora Z. Para obtener la hora local de Guatemala se le restan seis horas.

Como se observa en el cuadro anterior, la vida del ciclón tropical Stan no fue tan prolongada, la categoría que alcanzó no fue más que uno el día 04, los vientos alcanzados no fueron extremos y los valores de presión atmosférica llegaron escasamente a 979 mb. El día 05 fue degradado a tormenta tropical, en donde se registró mayor cantidad de lluvia en la parte media de la cuenca del río Coyolate.

4.3.3 Efectos

El ciclón tropical Stan a su paso por Guatemala impactó sobre todo los sectores sociales y las condiciones de vida de los grupos poblacionales, productivos y étnicos más vulnerables. Los impactos sociales del paso de Stan, al sumarse a vulnerabilidades pre-existentes apuntan a la necesidad de reducir el riesgo de las comunidades afectadas, restituir su capacidad de producción y tener ingresos y vincularlos a los mercados, a los circuitos productivos y mejorar su inserción social y productiva. El hecho que el impacto macroeconómico no sea catastrófico ofrece la posibilidad de un proceso que genere sinergias positivas en la dinámica del desarrollo y se supere en lo local y comunitario el desastre de una forma que no persista el trauma del mismo (CEPAL & SEGEPLAN, 2005).

En lo que respecta a pérdida de suelo, Medina (2007), menciona que en la zona de desastre se estima un promedio de 12.45 toneladas/hectárea y analizando solo el 80% de zonas de

ladera, la pérdida de suelo es de 719,000 hectáreas, que arroja un total de 9,027,483 toneladas de suelo, cuyo valor económico de uso equivalente es de 308.70 millones de quetzales.

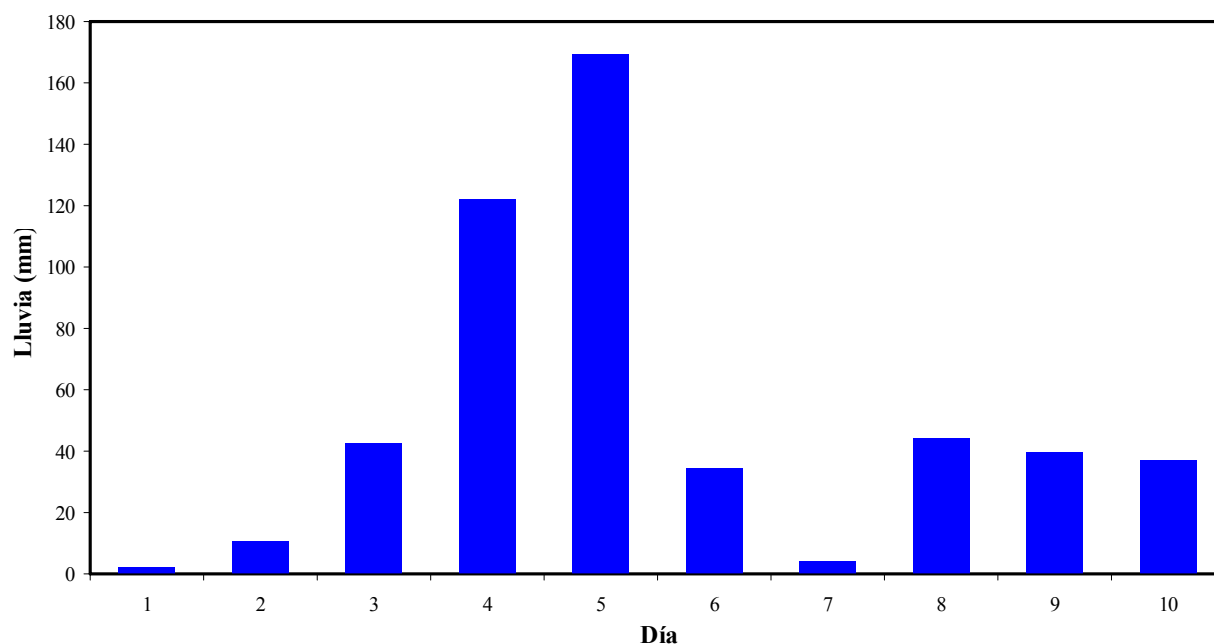
4.3.4 Comportamiento de la lluvia

El tiempo atemporalado que se presentó en territorio nacional en los primeros días del mes de octubre del año 2005, fue promovido por la interacción de varios sistemas meteorológicos, en los que resalta la formación y evolución del ciclón tropical Stan en el mar Caribe y golfo de México, la posición latitudinal de la zona de convergencia intertropical, cercana a las costas del Pacífico guatemalteco asociado a un sistema fuerte de baja presión y la persistencia en baja atmósfera de flujo de viento del sur y suroeste penetrando desde el océano Pacífico. Estos fenómenos meteorológicos propiciaron abundante humedad que, al interactuar con el relieve guatemalteco, favoreció la formación de lluvias continuas a partir del 01 de octubre, especialmente en toda la costa sur del país, aunque con valores acumulados mayores en el sur oriente y centro del Pacífico. A partir del día 03 de octubre prácticamente desde las primeras horas de la mañana se empezó a presentar condiciones de lluvia y/o llovizna intermitente en los altiplanos central y occidental del país, manteniéndose estas condiciones inclusive hasta el 10 de octubre. Los acumulados de lluvia, durante el período fueron elevados, desde el sur de la meseta central hacia la costa sur las isolíneas de lluvia acumulada en 10 días son mayores a los 350 mm, con valores extremos más hacia el occidente del país (INSIVUMEH, 2005).

De acuerdo con estimaciones del INSIVUMEH (2005), en ciudad Tecún Umán se registraron durante el 01 al 10 de octubre del año 2005, un total de 968.20 mm, mientras que en la estación climática Camantulul se registró un total de 505.50 mm de lluvia aproximadamente. Según los registros históricos de las bandas de pluviógrafo (pluviograma) de la estación climática Camantulul, los primeros tres días de octubre fueron relativamente de baja precipitación, registrándose 2.10, 10.70 y 42.40 mm respectivamente. El incremento de precipitación fue notorio a partir del día 04, donde se registró 122.30 mm de lluvia, alcanzando su máximo valor el día 05, con 169.30 mm, decreciendo el día 06 con 34.40 mm.

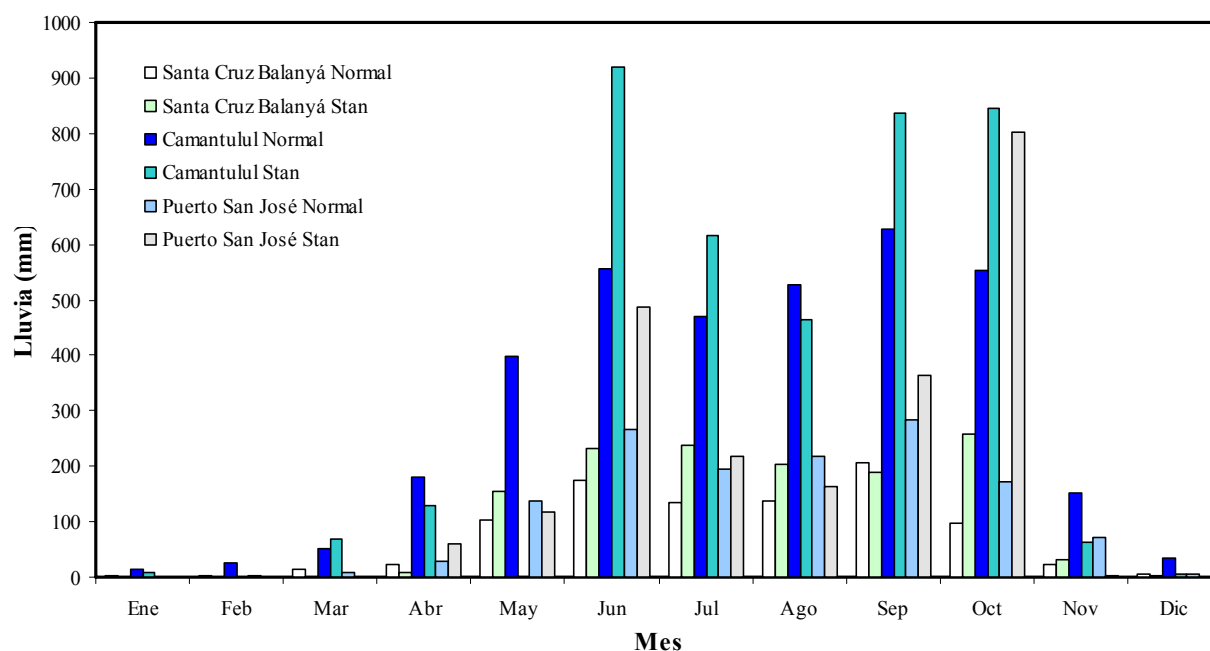
En la gráfica siguiente, se muestra el comportamiento de la lluvia en dicha estación durante los primeros 10 días de octubre del año 2005:

Figura 4.10 Lluvia diaria durante el ciclón tropical Stan del 01 al 10 de octubre del año 2005, en la estación climática Camantulul.



Se observa claramente que los días de mayor concentración de lluvia fueron el 04 y 05 de octubre, donde precipitó un total de 291.60 mm. Además, la siguiente gráfica muestra a manera de comparación las diferencias entre el régimen histórico de precipitación durante el período de 1973 a 2004 y el año del ciclón tropical Stan:

Figura 4.11 Comparativo del régimen de lluvia normal respecto al año 2005.



Resalta significativamente que las lluvias son de mayor magnitud en la parte media de la cuenca, razón por lo que la estación climática Camantulul se toma como referencia para el análisis de crecidas. Además, en el mes de junio del año 2005, en la estación climática Camantulul se registraron 919 mm de lluvia siendo mayor que lo que se registró en el mes de octubre del mismo año. La diferencia es que durante el ciclón tropical Stan la mayor parte de la lluvia estuvo concentrada durante los primeros 10 días del mes de octubre, contrario al mes de junio, donde hubo una mayor homogeneidad de las lluvias en cuando a frecuencia e intensidad.

El hietograma con intervalos de 60 y 15 minutos para los días 04 y 05 de octubre del año 2005, en la estación climática Camantulul se muestra en las figuras 4.12 y 4.13 respectivamente. Ambos días acumulan en total 291.60 mm de lluvia, siendo aproximadamente el 60% del total que precipitó del 01 al 10 del mismo mes. Los eventos de precipitación en estos días fueron los que provocaron la crecida del río Coyolate y posteriormente inundaciones. La lluvia fue continua a partir de las 9:00 a.m. del día 04 hasta las 22:30 a.m. del día 05, donde se estima que precipitó un total de 283.50 mm. Previo a este evento, los suelos ya habían recibido en promedio unos 300 mm de lluvia en los últimos días del mes de septiembre, por lo que estaban a una condición de humedad antecedente AMC III, o sea, cuando los suelos tienen el mayor potencial de escorrentía.

Figura 4.12 Hietograma con intervalos de 60 minutos los días 04 y 05 de octubre del año 2005, en la estación climática Camantulul.

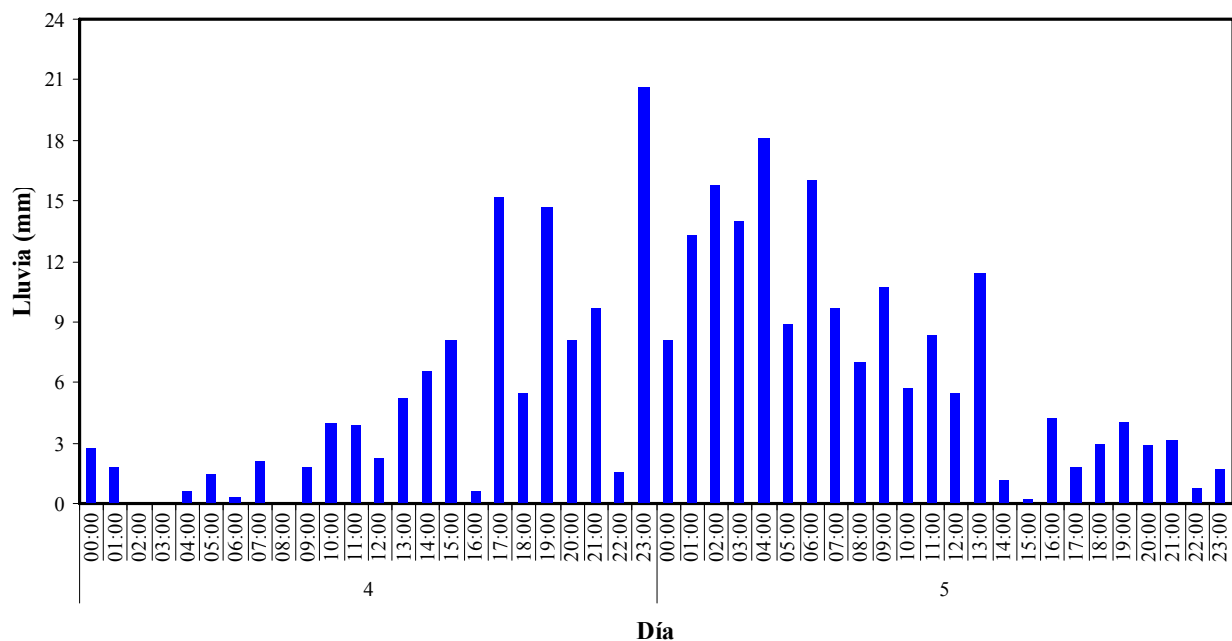
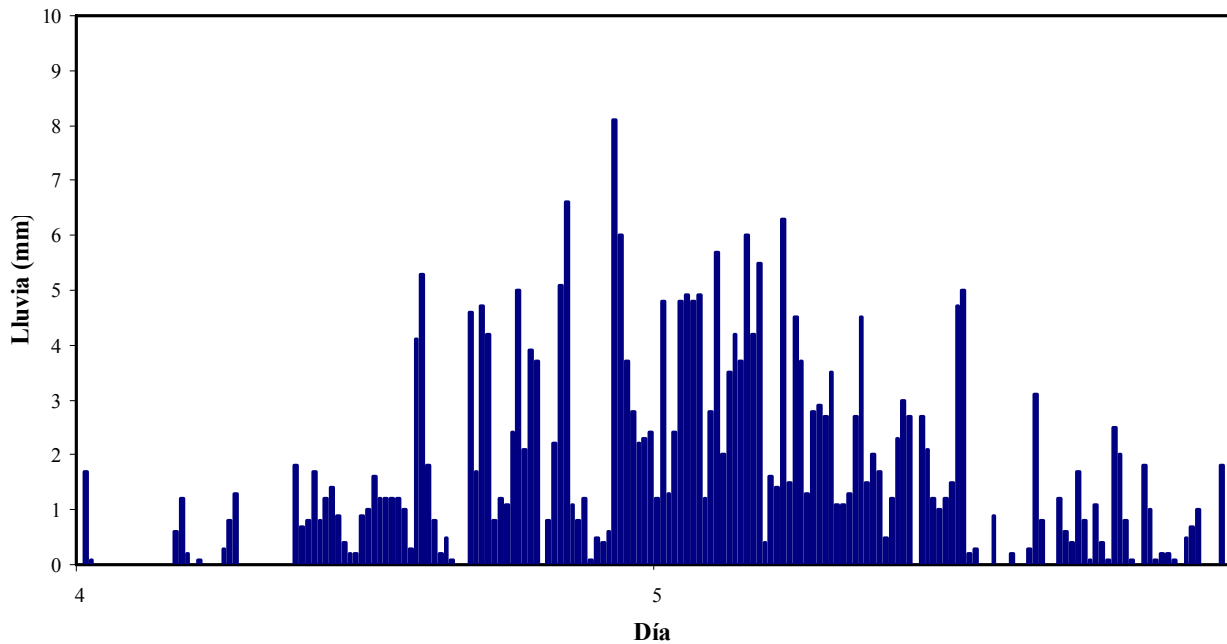


Figura 4.13 Hietograma con intervalos de 15 minutos los días 04 y 05 de octubre del año 2005, en la estación climática Camantulul.



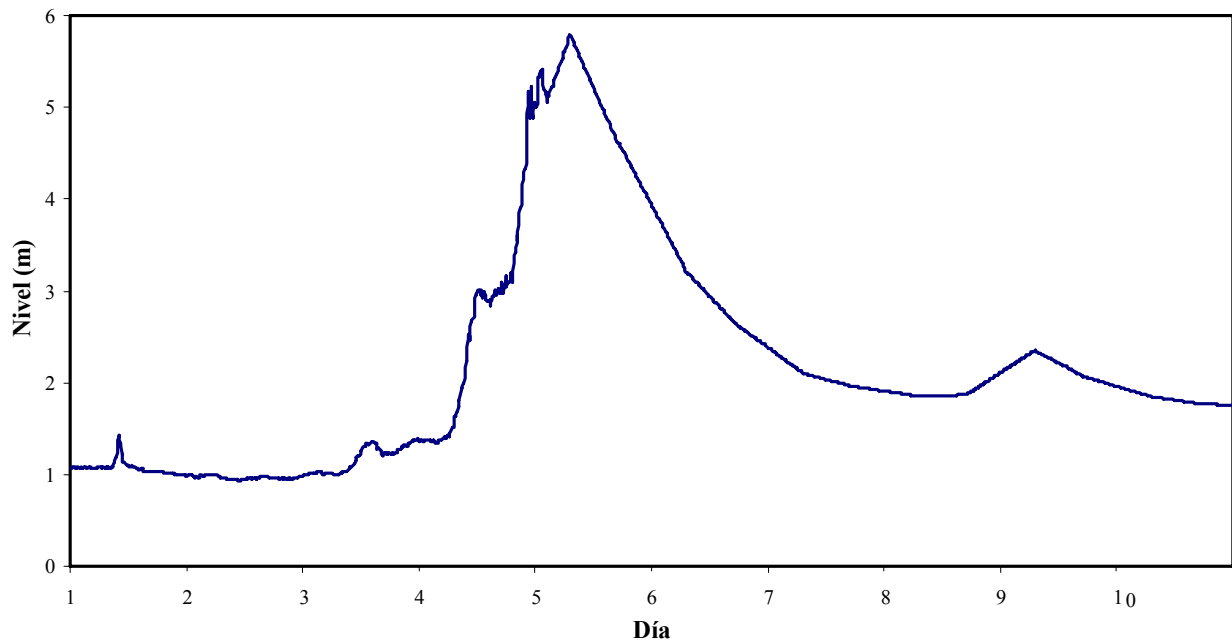
En esta condición de humedad antecedente, la humedad de los suelos oscila entre la saturación (cero atmósferas de tensión) y la capacidad de campo ($1/3$ de atmósfera de tensión), donde poseen el menor potencial de infiltración, acercando el coeficiente de escorrentía a la unidad, es decir, la mayor parte de la lámina de lluvia se transforma en escurrimiento directo sobre el suelo.

4.3.5 Comportamiento limnimétrico del río Coyolate

El comportamiento y las fluctuaciones del nivel del agua en el río Coyolate es de relevancia en el estudio, ya que podría establecerse un nivel crítico relacionado con el inicio de las inundaciones aguas abajo. Para esto se cuenta con registros históricos del comportamiento del nivel del río cada 15 minutos durante el período del 01 al 10 de octubre del año 2005 con sus ecuaciones respectivas para la estimación del caudal, en lo que corresponde a la estación hidrométrica localizada en el puente del río del mismo nombre (Pérez, 2007).

El nivel del río Coyolate durante el período de 01 al 10 de octubre de 2005 se observa en la siguiente figura:

Figura 4.14 Nivel del río Coyolate del 01 al 10 de octubre del año 2005, en la estación hidrométrica Puente Coyolate.



En términos generales, el comportamiento del nivel del río Coyolate, los días previos a que se intensificarán las lluvias, es bastante homogéneo, oscilando entre uno y 1.25 m, a excepción de un pequeño pico que se produce el día 01 de octubre, entre las 9:15 a.m. y 10:30 a.m. alcanzando su mayor valor a las 10:00 a.m. (1.43 m). Esto pudo haberse debido a un evento de precipitación aislado en la parte media de la cuenca, ya que coincide con un evento de lluvia que se registró en la estación climática Camantulul. Además, se observa que existe cierta tendencia a incrementar el nivel del río a partir de las 9:30 a.m. del día 03 de octubre donde se registró un nivel de 1.07 m, alcanzando 1.35 m a las 02:00 p.m. del mismo día, prácticamente donde se da el inicio del aumento en la intensidad de las lluvias.

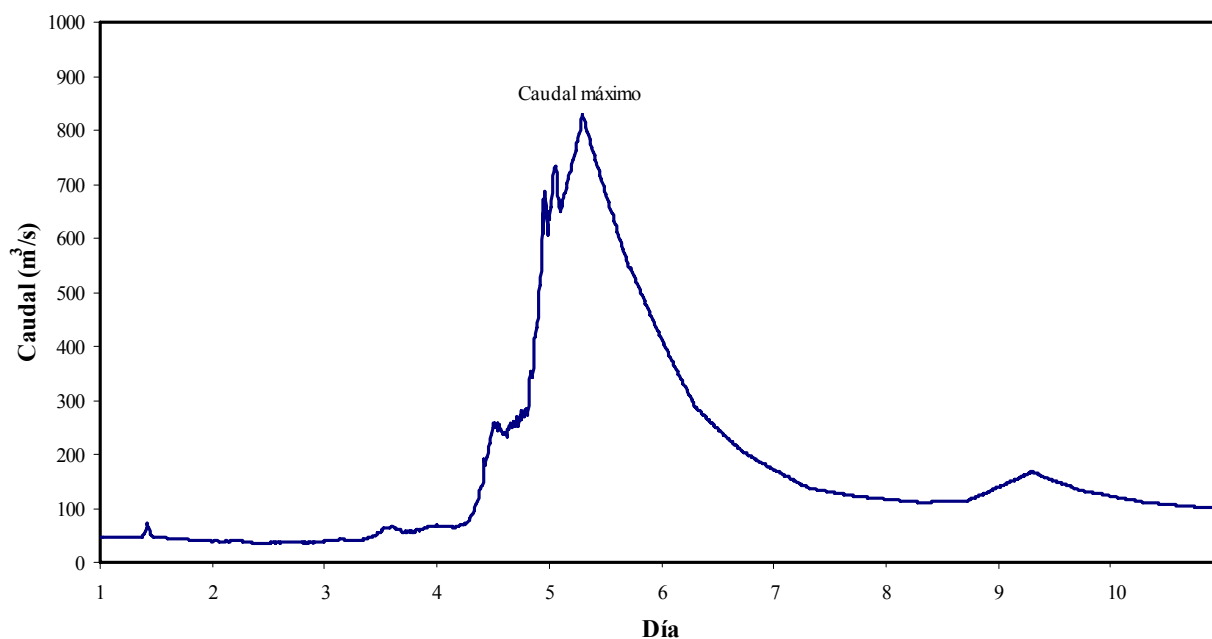
Se observa que en las primeras horas del día 04 de octubre el nivel del río se mantiene más o menos constante, registrándose un ascenso a partir de las 5:00 a.m. hasta las 12:15 p.m. donde el nivel asciende de 1.39 m hasta aproximadamente 3.01 m, manteniéndose constante hasta las 05:15 p.m. del mismo día. A partir de las 05:30 p.m. se registra un ascenso significativo del nivel del río hasta registrarse el máximo nivel a las 07:00 a.m. del día 05. Es importante mencionar que el máximo nivel en el río se alcanzó, ya que según estimaciones, en la estación climática Camantulul se registró una lámina total de lluvia de 179.30 mm durante las 04:00 p.m. del día 04 a las 7:00 a.m. del día 05, lo cual se vio reflejado en el nivel del río. Posteriormente,

inicia un descenso gradual del nivel del río aproximadamente a las 10:30 a.m. del día 07, con un nivel de 2.05 m. Además, existe un descenso drástico de la intensidad de precipitación, ya que durante este el período transcurrido entre las 7:00 a.m. del día 05 y las 10:00 a.m. del día 07 se estimó una lámina de 109.30 mm. Además, el día 07, únicamente se registró un total de 4.20 mm de lluvia, los suelos completamente saturados disminuyeron su volumen de agua (agua gravitacional), acercándose al contenido de humedad correspondiente a la capacidad de campo.

Se observa un ligero ascenso del nivel del río el día 08, a partir de las 05:00 p.m. lo cual se debe a un evento de precipitación registrado en la estación Camantulul, el cual inicia a partir de las 01:45 p.m. y finaliza a las 05:45 a.m. del día siguiente, donde se estimaron 74.60 mm de lluvia. A partir del día 10 al 31 de octubre, se estimó un total de 340 mm de lluvia, donde prácticamente los suelos ya habían drenado lo suficiente y así aumentaron su capacidad de almacenamiento, disminuyendo posteriormente el escurrimiento directo. A partir del día 10 de octubre el nivel del río tiende a estabilizarse y alcanzar el nivel que oscila entre uno y 1.25 m.

La figura anterior, muestra el comportamiento típico de un hidrograma, con sus partes bien definidas, entre las que cabe destacar, curva ascendente, curva descendente, caudal pico, etc. El hidrograma de la crecida provocada por el ciclón tropical Stan, se muestra a continuación:

Figura 4.15 Hidrograma del ciclón tropical Stan en la estación hidrométrica Puente Coyolate.

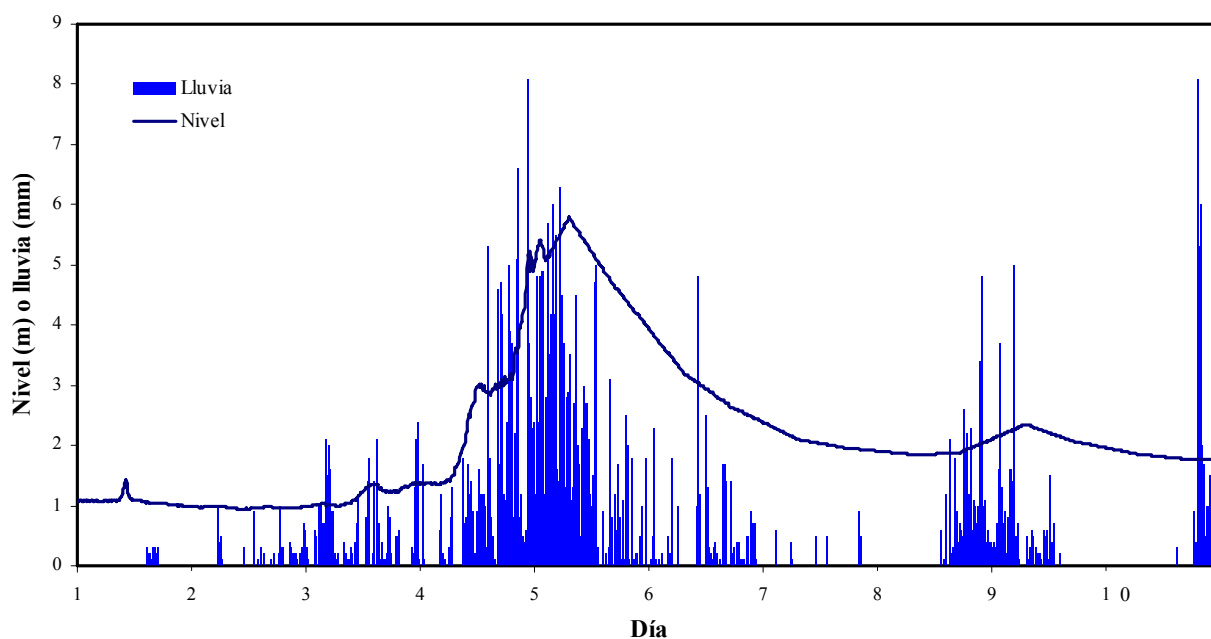


El caudal del 01 al 09 del mes de octubre osciló alrededor de $50 \text{ m}^3/\text{s}$, aumentando hasta llegar al caudal máximo, que se estimó en $828.51 \text{ m}^3/\text{s}$. De acuerdo con el análisis estadístico realizado el período de retorno de este evento se estima en 28 y 46 años. Es importante tomar en consideración que el valor del caudal para esta crecida puede estar subestimado, ya que a partir de 5.80 m no existen registros, debido a que el sensor fue arrastrado por la corriente, no existiendo datos certeros del nivel máximo alcanzado durante la crecida.

4.3.6 Interacción de la lluvia en el comportamiento limnimétrico del río Coyolate

La transformación de la lluvia en escurrimiento superficial, depende factores climáticos, edáficos y de relieve. Durante el ciclón tropical Stan los factores de mayor influencia fueron climáticos y edáficos. Dentro de los factores climáticos el de mayor influencia fue la duración de la lluvia, debido precisamente a que la intensidad durante el evento osciló de baja a moderada. En lo que respecta a los factores edáficos, influyó directamente el contenido de humedad de los suelos. Conjugados estos dos factores, se dio origen a la formación de crecidas que posteriormente originaron inundaciones. Lo anterior es elemental en un sistema de alerta temprana para inundaciones, considerar el contenido de humedad antecedente en el suelo, la duración (considerando además la intensidad) y el nivel limnimétrico. La figura siguiente muestra la influencia de la lluvia en el nivel del río Coyolate:

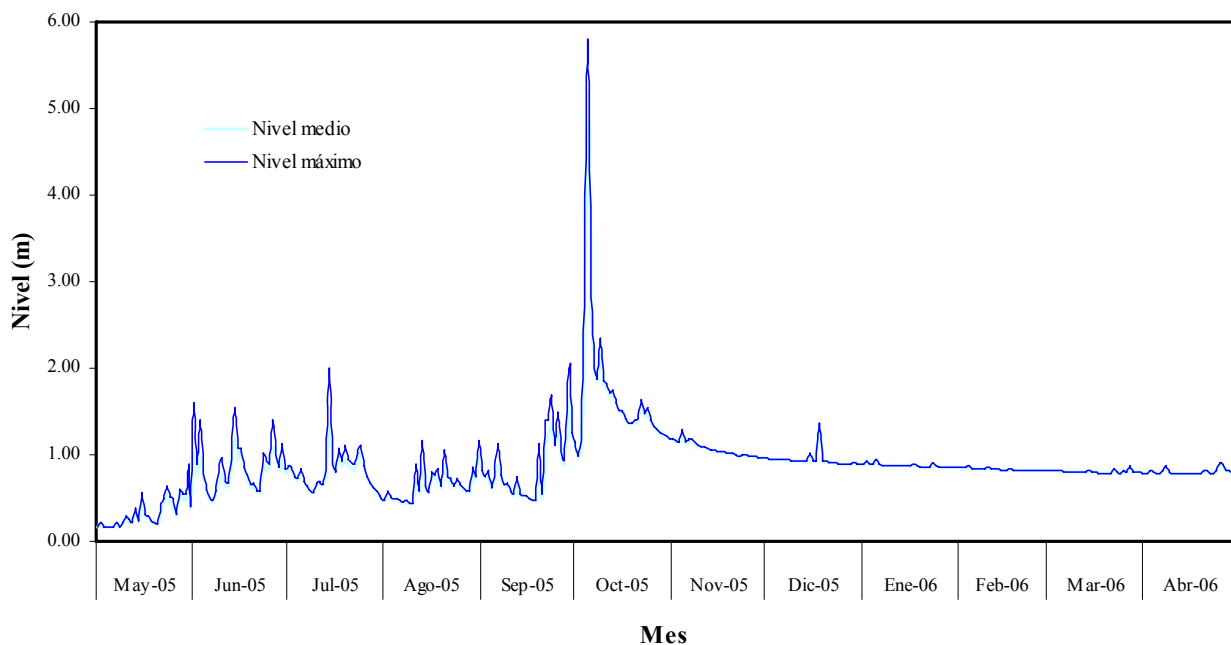
Figura 4.16 Nivel del río Coyolate vrs lluvia del 01 al 10 de octubre del año 2005, con intervalos de 15 minutos.



Básicamente, se observa que existió alta incidencia de la lluvia registrada en la estación climática Camantulul en el comportamiento del nivel del río en la estación hidrométrica Puente Coyolate. Por lo que el uso de indicadores, tanto de intensidad y duración de lluvia como del nivel del río, son útiles para ser implementados en alertas sobre inundaciones en la cuenca del río Coyolate. En síntesis, el evento de precipitación de mayor duración y lámina comprendió entre las 9:00 p.m. del día 04 hasta las 10:30 p.m. del siguiente día, donde se estimaron 283.50 mm.

En este caso se utilizaron los datos de la estación climática Camantulul, por localizarse en la parte media de la cuenca, aproximadamente 65 m de mayor altura sobre el nivel del mar que la estación hidrométrica Puente Coyolate. Por su localización, en este sitio se dan los eventos de precipitación de mayor intensidad y duración. Algo sumamente importante, es resaltar que el nivel normal del río Coyolate oscila alrededor de 1.50 m de profundidad, por lo que niveles mayores y considerando que los suelos se encuentran con humedad cercana o mayor a la capacidad de campo pueden ser indicativos de una probable crecida que propiciará inundaciones en la parte baja de la cuenca, donde está expuesta aproximadamente el 30% de los poblados en la cuenca. Lo anterior, se fundamenta también en el comportamiento del nivel del río durante el año, tal como se muestra en la siguiente figura:

Figura 4.17 Comportamiento del nivel diario del río Coyolate durante el año hidrológico 2005 - 2006.



Es importante hacer notar, que acá se considera únicamente el río Coyolate como el afluente principal causante de las inundaciones. Sin embargo, los ríos Cristóbal y Pantaleón aportan cantidades significativas de caudal y cuando estos se unen al río Coyolate, normalmente se producen inundaciones en jurisdicción de la aldea Cerro Colorado hacia el océano Pacífico. Por lo tanto, resulta vital un monitoreo constante del nivel en ambos cauces, pudiéndose ubicar una estación hidrométrica en el río Pantaleón, ya que en el río Cristóbal actualmente se encuentra instalada una estación. Lo ideal, sería contar con estaciones automatizadas vía satélite para poseer registros continuos en tiempo real del nivel del río.

Además del monitoreo constante del nivel del río en los principales afluentes de la cuenca del río Coyolate, es necesario su almacenamiento y procesamiento, con el objetivo de analizar futuros eventos extremos, así como realizar pronósticos de crecidas e inundaciones para cada temporada de lluvias. De esta manera se podrían ir detallando los indicativos de alerta, repercutiendo en el aumento de la eficiencia del sistema y reduciendo la vulnerabilidad de la población ante este tipo de eventos hidrometeorológicos.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS Y PROPUESTA DEL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA, PARA INUNDACIONES DE LA CUENCA DEL RÍO COYOLATE

5.1 Antecedentes

De acuerdo con CEPREDENAC (2006), el primer antecedente documental sobre la concepción del sistema de alerta temprana se ubica en el perfil del proyecto para la reducción del riesgo por inundación, erosión y sedimentación en las cuencas de los ríos Achiguate, Coyolate, María Linda y Madre Vieja, generado entre los años de 1995 y 1996 por el entonces Comité Nacional de Emergencias (CONE). En el documento original del proyecto se establece que este es resultado de la determinación de riesgo por inundaciones, en donde se expresa claramente que el departamento de Escuintla representa el 42% de la zona inundable, así como el área más productiva del país. Dentro del mismo se conciben tres grandes componentes, que son:

- Análisis, monitoreo y pronóstico de inundaciones.
- Sistemas de reducción de desastres.
- Diseño y desarrollo de campaña de divulgación para reducción de desastres.

El componente de análisis, monitoreo y pronóstico de inundaciones se definió como el que se encargará de la recuperación histórica, sobre los fenómenos que puedan originar desastres en las cuencas de los ríos de interés, así como establecer pronósticos y modelos de las zonas críticas de riesgo para ubicar la tendencia de las inundaciones, erosión y sedimentación con la finalidad de dar una temprana alerta. Es aquí en donde se puede ubicar la primera noción sobre el funcionamiento del SAT en la cuenca del río Coyolate. Los fondos para el proyecto, provinieron de la Agencia Sueca para el Desarrollo (ASDI) y con el apoyo de CEPREDENAC, se trabajó en dicha cuenca.

La idea resurgió en el año 2006, con la iniciativa de un proyecto a realizarse conjuntamente entre CEPREDENAC, INSIVUMEH, ERIS y la Facultad de Agronomía, USAC. Dentro del marco de los proyectos de reconstrucción post-Stan, la Secretaría Ejecutiva de CONRED consideró conveniente la necesidad de revitalizar y fortalecer el funcionamiento de los SAT's iniciando por los de la vertiente del océano Pacífico. En la misma línea, se ha planteado que la realización de un estudio hidrológico en dichas cuencas debería ser la actividad inicial en el proceso (CONRED, 2006).

5.2 Estudios de caso

De acuerdo con Villagrán (2003), en Guatemala se operan diversos sistemas que se pueden clasificar de dos maneras:

- Los sistemas comunitarios, donde la comunidad realiza prácticamente todas las actividades.
- Los sistemas centralizados, donde el INSIVUMEH, realiza las actividades de vigilancia de los fenómenos y procede a informar a la CONRED, y a la población sobre los posibles fenómenos, de tal manera que CONRED coordina la respuesta de manera intersectorial e interinstitucional, haciendo uso del sistema de coordinadoras regionales, departamentales, municipales y locales.

En Guatemala se implementó SAT's en las cuencas de los ríos Samalá, Madre Vieja, Coyolate, Achiguate, María Linda, Polochic, Motagua, Chixoy y en la subcuenca del río Pensativo.

5.2.1 SAT de la subcuenca del río Pensativo

Santos (2003), realizó un estudio en la subcuenca del río Pensativo para la implementación y operación de un sistema de alerta temprana, estructurándolo de la siguiente manera:

- El observador de la estación climática y radio receptora volcán de Agua, realiza observaciones meteorológicas sinópticas de lluvia, temperatura, presión, velocidad y dirección del viento al completarse cada hora, estas son enviadas vía radio VHF a la oficina Alfa INSIVUMEH en el edificio central.
- Las estaciones climáticas La Alameda y Suiza Contenta, pueden comunicarse con la radio receptora del volcán de Agua y enviar las observaciones de la cantidad de lluvia que se está registrando en sus localidades en tiempo real.
- Las estaciones hidrometeorológicas Santa Lucía Milpas Altas y San Juan Gascón que poseen plataformas de comunicación satelital con lo cual pueden transmitir datos de lluvia y niveles del río Pensativo en forma automática las 24 horas.
- El observador de la estación climática volcán de Agua tiene la responsabilidad de informar del desplazamiento de los sistemas de nubes de tormenta dentro y en los alrededores de la subcuenca.

En su estudio, Santos (2003), concluye que se ha logrado la comunicación de las lecturas de los niveles en el cauce del río, los volúmenes de lluvia registrados en las estaciones climáticas Suiza Contenta, La Alameda, volcán de Agua y en las estaciones automáticas con plataforma satelital de Santa Lucía Milpas Altas y San Juan Gascón, con la oficina de Alfa de INSIVUMEH, la municipalidad y el comité de emergencia local de la ciudad de Antigua Guatemala. Por lo tanto, el sistema tiene la capacidad de atender cualquier emergencia de esta naturaleza que se presente para que la municipalidad y el comité local de prevención de desastres de Antigua Guatemala, puedan utilizar la información inmediata, trasladándola a los diversos sectores.

5.2.2 SAT de la cuenca del río Samalá

Este sistema está basado en la estructura operativa del SAT de la cuenca del río Coyolate, maneja dos tipos de amenazas simultáneamente; inundaciones provocadas por el río Samalá y lahares provenientes del volcán activo Santiaguito. Abarca múltiples comunidades de tres municipios en la parte baja de la cuenca y es coordinado por la Coordinadora Departamental para la Reducción de Desastres de Retalhuleu. El SAT está configurado con seis estaciones de monitoreo hidrometeorológico y de lahares situadas en faldas del complejo volcánico Santiaguito - Santa María, dos estaciones operadas en bases militares de la zona, estaciones en dos alcaldías y en el cuerpo de bomberos de Retalhuleu, así como ocho estaciones situadas en ambas márgenes del río en la parte baja de la cuenca (Villagrán, 2003).

5.2.3 SAT de la cuenca del río Achiguate

El sistema es de tipo centralizado, de tal manera que se cuenta con una red de instrumentos automáticos situados en la parte media y alta, que miden condiciones hidrometeorológicas (precipitación y nivel de río), enviando estas señales vía radio a las instalaciones del INSIVUMEH. La información es analizada por los expertos de hidrología a cargo del sistema, quienes en caso de crecidas envían un boletín sugiriendo niveles de alerta por vía fax o vía telefónica a CONRED. Posteriormente, CONRED disemina la alerta por una red de radiocomunicación a estaciones situadas en comunidades que típicamente se inundan, así como a otras entidades que conforman el sistema (Villagrán, 2003).

De los sistemas de alerta temprana mencionados anteriormente, actualmente operan los de la subcuenca del río Pensativo y el de la cuenca del río Samalá (ambos ubicados en la vertiente del océano Pacífico). En el caso del sistema de la cuenca del río Achiguate, existió una estación

automatizada que registraba niveles continuos del río y los transmitía vía satélite, instalada en el puente Achiguate, y que actualmente se encuentra deshabilitada, así como el sistema de alerta.

5.3 SAT de la cuenca del río Coyolate

5.3.1 Antecedentes de inundaciones en la cuenca del río Coyolate

A. Desborde del río Coyolate afectó a 482 familias

Las intensas lluvias ocurridas en el mes de julio provocaron el desbordamiento del río Coyolate, que inundó las viviendas de 482 familias de cuatro aldeas de Nueva Concepción, Escuintla. Los vecinos comentaron que la inundación fue más fuerte que cuando llegó el ciclón tropical Mitch, en el año de 1998. La CONRED, en colaboración con la comuna local, habilitó dos albergues en escuelas (Prensa Libre, 2005).

B. Río Coyolate destruye puente

Decenas de habitantes de cuatro comunidades del municipio de La Nueva Concepción se incomunicaron porque el río Coyolate destruyó el puente El Flor, que los une con esta localidad, derivado de las copiosas lluvias de los últimos días. Los afectados son pobladores de las aldeas Santa Odilia y Santa Marta del Mar, así como los caseríos Zanjón El Flor y Coyolate (Prensa Libre, 2006).

5.3.2 Descripción

A. Operación del sistema

El sistema inicia operaciones en el año de 1997, empleando un año para el diseño y puesta en marcha del sistema. El mismo es de tipo comunitario, de tal manera que se cuenta con una red de observadores voluntarios. La información es transmitida a la CONRED por una red de radiocomunicación, así como a estaciones situadas en comunidades que típicamente se inundan, y a otras entidades que conforman el sistema, como la Cruz Roja, Cuerpo de Bomberos Locales y alcaldías respectivas. Se han sistematizado precipitaciones y niveles de río que provocan inundaciones, lo que ha permitido establecer procedimientos simples para el pronóstico de crecidas. Las alertas entonces se emiten localmente una vez que se ha sobrepasado los niveles críticos de nivel de río en la parte media y se inician las operaciones de emergencia. CONRED por su parte, da el mantenimiento técnico al sistema para mantenerlo operativo de manera permanente y realiza las ampliaciones que considera necesarias (Villagrán de León, 2003).

B. Estructura del sistema

El sistema de alerta temprana de la cuenca del río Coyolate está integrado de lo siguiente:

- dos estaciones de vigilancia en la parte alta de la cuenca, ubicadas en San Pedro Yepocapa y San Rafael Sumatán, las cuales miden precipitación pluvial.
- cinco estaciones de vigilancia y de confirmación de niveles del río en la parte media de la cuenca, ubicadas en Siquinalá, Santa Lucía Cotzumalguapa, Carrizal y El Naranjo, donde se mide precipitación pluvial, niveles de río y condiciones hidrometeorológicas.
- siete estaciones de respuesta en la parte baja de la cuenca, ubicadas en las comunidades de: Texcuaco, Canoguitas, Santa Odilia, Chontel, Santa Ana Mixtán, Santa Marta del Mar y Santo Domingo Los Cocos. En el cuadro siguiente se muestra una descripción de las estaciones que conforman el sistema:

Cuadro 5.1 Estaciones que conforman el sistema de alerta temprana para inundaciones en la cuenca del río Coyolate.

Estación	Tipo	Localidad	Coordenadas geográficas		Altitud (msnm)
			Longitud oeste	Latitud norte	
Delta uno	Vigilancia	Municipalidad Sta. Lucía Cotz.	91° 01' 15.37"	14° 19' 29.43"	375
Delta dos	Vigilancia	Parc. Sn. Rafael Sumatán	91° 02' 58.51"	14° 25' 01.08"	750
Delta tres	Vigilancia	Parc. El Naranjo	91° 08' 09.60"	14° 22' 36.17"	212
Delta cuatro	Vigilancia	Aldea El Carrizal	91° 08' 07.80"	14° 11' 12.51"	60
Delta cinco	Vigilancia	Aldea Cerro Colorado	91° 11' 54.13"	14° 09' 49.82"	40
Delta seis	Vigilancia	Río Cristóbal, km 91	91° 06' 33.11"	14° 19' 58.23"	275
Delta siete	Vigilancia	41 Cia. Cuerpo Bomberos V.	91° 01' 07.37"	14° 19' 25.43"	375
Delta ocho	Vigilancia	Municipalidad Sn. Pedro Y.	90° 57' 31.14"	14° 30' 01.18"	1,380
Base Ardilla	Respuesta	Aldea Texcuaco	91° 13' 36.94"	14° 04' 27.31"	22
Base Canoguitas	Respuesta	Aldea Canoguitas	91° 12' 44.68"	14° 08' 36.41"	38
Base Mariposa	Respuesta	Aldea Santa Odilia	91° 16' 48.10"	14° 01' 57.94"	12
Base Ratón	Respuesta	Caserío Chontel	91° 13' 36.58"	14° 31' 29.63"	12
Base Sta. Ana	Respuesta	Santa Ana Mixtán	91° 13' 56.88"	14° 07' 18.45"	29
Base Sta. Marta	Respuesta	Aldea Sta. Marta del Mar	91° 18' 54.17"	13° 58' 19.47"	2
Base Los Cocos	Respuesta	Aldea Sto. Domingo Los Cocos	91° 14' 28.47"	14° 06' 59.75"	25

Fuente: CONRED (2007).

En la figura 5.1 se muestra la ubicación en la cuenca de las estaciones, así como el área frecuentemente inundada.

C. Sistema de vigilancia

El sistema consta de aparatos simples, de bajo costo, adaptados a las capacidades y limitaciones de los operadores, los cuales son:

- Condiciones atmosféricas: estación meteorológica marca Radio Shack, modelo WX 200 que reporta presión barométrica, humedad relativa, temperatura, velocidad y dirección del viento, precipitación acumulada e intensidad instantánea de precipitación y pronóstico.
- Precipitación: se mide utilizando pluviómetro de plástico marca TruCheck que registra precipitación acumulada hasta un nivel de seis pulgadas, con escalas métrica y en pulgadas.
- Nivel del río: unidad digital electrónica diseñada y construida por Villatek, Sociedad Anónima con capacidad para medir 10 niveles discretos (cero a nueve). Opera en base a baterías AA o C, cuenta con alarma auditiva una vez que el río alcanza el nivel crítico preestablecido. Cuenta con un sensor que se fija a la orilla del río, un indicador electrónico situado en la vivienda a la par de la unidad de radiocomunicación y un cable de interconexión.

5.3.3 Análisis

A. Ventajas

Una de las grandes ventajas del sistema, es que la población (principalmente el voluntariado) desempeña un papel muy importante en la preparación y respuesta en caso de desastres naturales, así como en la operación rutinaria del sistema. La capacitación constante y actualizada del mismo es de vital importancia para garantizar el mejor funcionamiento del sistema. Han existido casos aislados de rechazo por parte de algunas entidades ante la responsabilidad del monotireo constante de las condiciones hidrometeorológicas, razón por la cual no existe monitoreo en la municipalidad de Santa Lucía Cotzumalguapa.

Se conoce el comportamiento hidrometeorológico instantáneo en la parte alta, media y baja de la cuenca, dado al monitoreo constante de las condiciones. Además, en la parte media de la cuenca existen dos estaciones climáticas en la finca Camantulul, siendo monitoreadas por el INSIVUMEH y por el Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar (CENGICAÑA) respectivamente. En ambas estaciones se cuenta con pluviógrafo, y en el caso de la estación de CENGICAÑA es automatizada obteniendo los resultados inmediatamente. La desventaja es que ambas estaciones están distanciadas aproximadamente un km, prácticamente no existiendo variación alguna.

Lo ideal hubiese sido disponer de una estación climática con pluviógrafo en jurisdicción de San Rafael Sumatán (localizado aproximadamente a 100 metros más de altura sobre el puente Coyolate). Para el caso de la estación limnimétrica del río Cristóbal, hubiese sido de mucha utilidad contar con registros históricos del comportamiento del nivel del río, por estar a 300 m de distancia y así relacionar el nivel de del río con la intensidad de lluvia (tal como se hizo con la estación hidrométrica Puente Coyolate), con el objetivo de establecer un nivel crítico de inundación. La ventaja es que existe la estación hidrométrica Puente Coyolate, que registra y almacena el comportamiento del nivel del río.

El sistema cuenta con infraestructura necesaria y adecuada para un buen funcionamiento, su optimización dependerá de la actualización, evaluación, supervisión y capacitación al personal (tanto de campo como técnicos encargados de la recopilación, análisis y pronóstico de eventos extremos), así como una clara definición del rol que juegan cada una de las entidades que actualmente están involucradas en el sistema.

Existe interés real por parte de algunas instituciones educativas a nivel superior en el país, como la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos de la Facultad de Ingeniería, por mencionar un caso, para realizar investigación pura y aplicada en el campo de la ingeniería de los recursos hidráulicos y su aplicación a casos reales que sean de impacto a nivel nacional. Por lo tanto, deben propiciarse las condiciones óptimas, tanto de financiamiento, logísticas y materiales a los investigadores y/o asesores, para llevar a cabo las actividades que sea necesarias, ya que hay que reconocer que el potencial de recurso humano puede realizar valiosos aportes en pro de las comunidades afectadas por inundaciones y/o otro tipo de evento natural.

B. Desventajas y/o limitaciones

El sistema de alerta temprana de la cuenca del río Coyolate fue el primero en implementarse en la república de Guatemala en 1998, naciendo la idea en 1977 por parte del INSIVUMEH, ERIS y el Instituto de Investigaciones de Ciencias Agrícolas (IICA). El sistema inició su operación previo al ciclón tropical Mitch, funcionando eficientemente y dando resultados satisfactorios. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que este evento fue significativamente menor que el ciclón tropical Stan, estimándose de acuerdo con López (1999), el nivel del río Coyolate durante el ciclón tropical Mitch en 2.55 m. Hay que hacer notar, este evento tuvo mayor impacto en la vertiente del océano Atlántico, mientras que el ciclón tropical

Stan tuvo mayor impacto en la vertiente del océano Pacífico, ocasionando inundaciones, mientras que el altiplano se afectó por procesos de remoción en masa. Lo anterior, puso en evidencia las deficiencias del sistema de alerta temprana, ya que durante el ciclón tropical Stan se registró inundaciones a las comunidades que en la mayoría de los casos no fueron alertadas y evacuadas.

Algo muy importante, es que para el establecimiento del sistema, no se realizó un estudio previo hidrológico de la cuenca. En donde se definieran los componentes del ciclo hidrológico, principalmente en este caso los de mayor impacto son la precipitación y el escurrimiento directo, y por supuesto, la infiltración. Otros aspectos a considerar hubiese sido el análisis de crecidas históricas relacionadas con la intensidad de lluvia y con los niveles del ríos Coyolate, Cristóbal y Pantaleón, que son los mayores tributarios de la cuenca. El estudio hidrológico, hubiese incluido la estimación de los tiempos de concentración en diversos tramos de la cuenca, principalmente a partir de los puentes de los ríos mencionados anteriormente, a la confluencia de ambos ríos. Sin embargo, hay que hacer notar que las estaciones de monitoreo hidrometeorológico fueron distribuidas espacialmente de manera uniforme en la cuenca, instalándose en la parte alta, media y baja, catalogándose de monitoreo, vigilancia y de respuesta.

En lo que se refiere a la instrumentación, el pluviómetro Tru-Chek (en forma de cuña) debido a que el área de la sección transversal del mismo se reduce hacia el fondo, se incrementa la distancia entre las unidades de medida, causando confusión entre los observadores. Lo anterior, obviamente es una dificultad principalmente para observadores que no poseen experiencia en este tipo de mediciones, por lo que se requiere de una capacitación adecuada para tal actividad. Lo ideal, sería colocar un pluviómetro convencional donde no exista confusión con la escala, y su monitoreo debiera ser constante, principalmente en eventos de lluvia intensos y de duración prolongada.

Hay que considerar que estos eventos de lluvia elevan la humedad de los suelos a un contenido igual o mayor al de la capacidad de campo de los mismos, en donde la escorrentía aumenta significativamente. Si bien es cierto, en 13 de las 14 estaciones ubicadas originalmente en el sistema operan actualmente (a excepción de la estación ubicada en la municipalidad de Santa Lucía Cotzumalguapa), no existen registros históricos de lluvia y de nivel de los ríos Cristóbal y Coyolate, esto se complementa con la carencia de documentos e información que

garanticen la eficiencia del sistema, ya que de acuerdo con Cordillera (2007), no ha existido un seguimiento del desempeño de cada componente del SAT durante los últimos seis años.

Lo anterior, pone de manifiesto que no existe un esquema administrativo y organizativo bien definido del funcionamiento del sistema, existiendo de manera muy dispersa y no actuando como un sistema integrado. Por parte de CONRED se identificaron tres componentes mencionados anteriormente, dentro de los que cabe mencionar el componente de Análisis, Monitoreo y Pronóstico de Inundaciones recayendo la responsabilidad al departamento de informática, donde se denota que existe falta de conocimiento acerca de las actividades del mismo. Como también se mencionó, lo ideal es contar con los registros históricos de las variables hidrometeorológicas de interés, en este caso, lluvia (intensidad y duración) y niveles del río, para realizar análisis de los mismos con el objetivo de pronosticar inundaciones futuras en la cuenca. Es necesario mencionar, que en lo que se refiere a procesos hidrológicos, estos se basan en hechos históricos para predecir lo que pueda suceder en el futuro, por lo que el almacenamiento de información confiable es de vital importancia en la operación del actual sistema.

Dada la naturaleza del sistema, el mismo solo indica sitios donde se pueden manifestar inundaciones, pero no los niveles de inundación a esperarse, que dado el relieve de la parte baja de la cuenca (áreas con pendientes menores al 1%) es de relevancia, ya que cambios mínimos en el nivel del río pueden inundar grandes áreas. Dado lo anterior, es necesario realizar un estudio hidráulico del cauce principal del río, donde se realiza una simulación detallada del mismo considerando el relieve, obstáculos y obras hidráulicas a lo largo del mismo. En la simulación habría que considerar los tramos críticos del cauce, que podrían ser de los puentes Coyolate, Cristóbal y Pantaleón hacia la confluencia de ambos ríos, en jurisdicción de la aldea Cerro Colorado, que es donde inician las inundaciones. Previamente, se conocen los sitios que frecuentemente se inundan en la cuenca, por lo que con la simulación hidráulica se podrían estimar los niveles para crecidas con períodos de retorno iguales o mayores a dos años. Existen otros factores que se consideran ajenos a la estructura y el funcionamiento del sistema de alerta temprana, pero que si influyen en el mismo, entre los que se pueden mencionar los siguientes:

- Ha existido alteración del régimen hidráulico del río, ya que el estado ha construido bordas en las márgenes del río, así como dragados en la parte baja de la cuenca.

- En algunos casos han colapsado las bordas, causando inundaciones muy críticas en algunos sitios en particular, algo que no está contemplado en este tipo de sistemas simples.
- Dada la intensa actividad agroindustrial en el área, principalmente cultivos extensivos como caña de azúcar y banano, las empresas construyen diversidad de obras hidráulicas durante la época seca con el objetivo de derivar agua del río Coyolate para sistemas de riego, alteran el régimen hidráulico del río causando interferencias en la época de lluvias.
- El cambio de uso de la tierra es otro factor importante, principalmente la deforestación en las partes estratégicas de la cuenca (alta y media). Esto incide directamente sobre la escorrentía directa, ya que al sustituir la vegetación natural por sistemas agrícolas convencionales (cultivos limpios sin adopción de prácticas de conservación de suelo y agua) disminuye su potencial de infiltración, propiciando la formación de crecidas.

5.3.4 Propuesta

De acuerdo con lo realizado en el estudio sobre la operación del SAT de la cuenca del río Coyolate, así como en el análisis profundo del régimen de lluvias y crecidas, con el objetivo de propiciar un mejor funcionamiento y así elevar la eficiencia del mismo que se vea reflejado en alertas tempranas oportunas para evacuar a las comunidades, se plantean medidas relacionadas directamente con el sistema y otras que pueden considerarse complementarias, siendo lo siguiente:

A. Instrumentación

Dentro de la instrumentación es necesario contemplar la implementación de pluviómetros convencionales para que no exista confusión entre los observadores. Durante los meses de mayor concentración de lluvia en el área (meses de agosto, septiembre y octubre) realizar mediciones constantes, las cuales pueden ser cada 15 minutos, y de esta forma conocer la intensidad de los eventos. Considerar el monitoreo de un pluviógrafo en jurisdicción del parcelamiento San Rafael Sumatán, ubicado a 100 m de elevación sobre del puente Coyolate, siendo ideal para el análisis de crecidas contrastando los registros de intensidad de lluvia con niveles en el río.

Las estaciones hidrométricas en la parte media de la cuenca son de vital importancia en la operatividad y eficiencia de los sistemas, su mantenimiento es esencial, por lo que cada temporada de lluvias es necesario el respectivo mantenimiento y calibración. Además, hay que considerar la instalación de estaciones hidrométricas en el río Pantaleón, ya que es un importante

afluente, incluso con antecedentes de colapso del puente del mismo nombre. De preferencia, si las estaciones son automatizadas es mejor, ya que esto permitiría conocer el nivel del río cada cierto tiempo (por lo menos cada 15 minutos) durante los eventos.

B. Registro de datos

Además del monitoreo hidrometeorológico constante y continuo, es necesario asignar o crear una dependencia dentro de CONRED que se encargue del procesamiento y almacenamiento de la información, ya que actualmente no existe. Prácticamente se puede decir, que a partir del primer año de funcionamiento del sistema (1998) a la fecha, se han perdido 10 años de información valiosa para realizar evaluaciones y/o ajustes al sistema. Es importante, coordinar con otras instituciones del estado como INSIVUMEH o de la iniciativa privada como CENGICAÑA, para evitar duplicidad de esfuerzos y aumentar la eficiencia en ambas instituciones. Aparte del procesamiento y almacenamiento de la información, es necesario el análisis de la información para fines de pronóstico de inundaciones para cada época de lluvias.

El registro del nivel del río, se propone monitorearlo con intervalos regulares de 15 minutos, en especial durante la época de mayor concentración de la lluvia (meses de agosto, septiembre y octubre). Importante considerar la cuenca, el río, sitio y la época, tal como se propone en el cuadro 1A. Considerando los mismos datos se propone el cuadro 2A, para el caso del registro de la lluvia. Es importante, considerar que estos registros se aplican a sistemas comunitarios donde exista concienciación de los habitantes del monitoreo de las variables hidroclimáticas, por lo que la participación comunitaria es indispensable. Lo ideal, como se mencionó anteriormente, es contar con sensor remoto para monitoreo continuo de niveles y un pluviógrafo, lo que serían sofisticados sistemas de alerta temprana contra inundaciones.

C. Análisis hidrológico

En este estudio se realizó la interacción entre el nivel del río Coyolate y la lluvia registrada en la estación climática Camantulul durante el ciclón tropical Stan, con el objetivo de encontrar un nivel crítico que pudiera ocasionar inundaciones y/o desbordamientos del río aguas abajo. Por lo tanto, realizar el mismo análisis, pero en este caso conociendo el comportamiento del nivel de los ríos Cristóbal y Pantaleón, complementaría el mismo, ya que acá únicamente se considera como principal afluente el río Coyolate.

Lo anterior se basa en que los ríos mencionados están ubicados en la misma región donde el régimen de las lluvias es torrencial, influyendo directamente en la formación de crecidas e inundaciones. Resulta vital contar con información continua y espacial de los niveles de los principales afluentes del cauce principal de la cuenca del río Coyolate. Disponiendo de registros históricos de niveles y precipitación, se podrían realizar análisis detallados sobre niveles de alerta repercutiendo en el aumento de la eficiencia del sistema. Además, en este estudio se consideró el evento correspondiente al ciclón tropical Stan (aproximadamente 28 años de período de retorno) debido a la información disponible y de que con este evento se produjeron inundaciones que afectaron a las comunidades. Sin embargo, dado a lo observado en la actualidad, en la cuenca eventos de menor magnitud pueden ocasionar inundaciones. Por lo tanto, habría que realizar el análisis con crecidas que correspondan a dos años de períodos de retorno y de esta forma afinar aún más los niveles críticos de alerta.

D. Niveles de alerta

a. Precipitación pluvial

Dada las condiciones de relieve y el comportamiento de la lluvia en la cuenca, esta bien definido que el monitoreo hidrometeorológico en la parte alta de la cuenca no es de relevancia, ya que aparte de que el régimen de lluvias es de menor intensidad, existe un efecto amortiguador ocasionado en la parte media de la cuenca. Por lo tanto, el monitoreo de la intensidad de la lluvia debe enfocarse en la parte media de la misma, donde de acuerdo a registros históricos del INSIVUMEH (2007), se han estimado hasta 4,600 mm anuales. De igual manera el monitoreo del nivel del en los principales afluentes de la cuenca, como se mencionó anteriormente.

Actualmente en el sistema existen dos criterios para la disseminación de la alerta temprana para inundaciones. En el caso de la lluvia se considera que si precipitan 50 mm en un período menor de dos horas en la estación climática Camantulul, es muy probable que se inunde aguas abajo. Esto derivado a partir del análisis que se realizó del ciclón tropical Mitch, sin embargo, hay que considerar que este evento fue de magnitud considerablemente menor que el ciclón tropical Stan. De acuerdo al análisis hidrológico realizado, muy probablemente este valor este sobreestimado, ya que para el caso del ciclón tropical Stan la mayor cantidad de lluvia que precipitó en un período continuo de dos horas se estimó en 32.10 mm ocurridos aproximadamente entre las 2:00 p.m. y 4:00 p.m. del día 05 de octubre.

Como principio habría que considerar las intensidades de lluvia mayores a la tasas de infiltración de los suelos, que es cuando inicia el escurrimiento superficial. Dada las características de los suelos en la región siendo en su mayoría franco arenosos con alto contenido de materia orgánica su velocidad de infiltración es alta, estimándose de acuerdo a sus características no menor de cinco cm/h. Por lo que difícilmente la intensidad de la lluvia excederá la capacidad de infiltración de los suelos. Sin embargo, una vez alcanzado el contenido de humedad igual o mayor al de la capacidad de campo (saturación), la mayor parte de la lluvia se transformará en escurrimiento directo (acercándose el coeficiente de escorrentía a uno). Se estima que estos suelos para llegar a la capacidad de campo considerando una profundidad de un metro necesitarían absorber por lo menos 200 mm de agua. Normalmente los suelos alcanzan la capacidad de campo el primer mes de la época lluviosa (entre mayo y junio), manteniéndose durante los meses restantes a una humedad cercana o mayor a la capacidad de campo. Por lo que durante los meses de mayor precipitación que son de agosto a octubre, los suelos están completamente saturados favoreciendo la formación de crecidas sobre todo con eventos de lluvia de duración prolongada.

Dado el fundamento anterior, en el sistema de alerta temprana hay que considerar la humedad del suelo, la duración y la frecuencia. De acuerdo con los tipos de suelos en el área, se puede considerar que una lámina de lluvia igual o mayor a 200 mm acumulados en los días previos al evento, es suficiente para llevar los suelos a la capacidad de campo. Por lo tanto, un buen indicador de alerta podría ser considerar intensidades de lluvia 10 mm/h, de duraciones mayores a tres horas y separadas por un espacio no mayor de una hora. Ya que podría ser demasiado prolongado esperar una intensidad de lluvia de 25.40 mm/h repercutiendo en una ineficiencia del sistema. Es necesario hacer notar, que para este tipo de sistemas, las características de la lluvia más importantes son la duración y la frecuencia, considerando que la intensidad de lluvia oscila entre baja a moderada.

b. Nivel limnimétrico

En el análisis realizado se consideró el registro continuo cada 15 minutos del nivel del río Coyolate, utilizando información de la estación hidrométrica Puente Coyolate (INSIVUMEH, 2007). De acuerdo a lo observado, se deduce que el nivel normal sin que hayan inundaciones en la parte baja de la cuenca oscila aproximadamente entre 1.50 y 2.00 m, niveles mayores podrían ocasionar inundaciones. Aunado a lo anterior en la simulación hidráulica, se estimó un nivel de

1.64 m para una crecida con período de retorno de dos años. Por lo tanto, un buen indicador para emitir una alerta en esta estación hidrométrica sería considerar un nivel de 1.80 m, siempre y cuando la lluvia sea de duración prolongada y alta frecuencia, como se mencionó anteriormente. Disponiéndose de un tiempo que oscila entre 4.40 y 1.30 horas dependiendo de la magnitud de la crecida.

Es importante mencionar, que el mismo análisis habría que realizarlo para los tramos de los ríos Cristóbal y Pantaleón (en los respectivos puentes) hacia la confluencia con el río Coyolate, y así emitir una alerta mucho más eficiente. Actualmente, se tiene el criterio de que una vez el río Coyolate alcance el nivel siete es muy probable la ocurrencia de inundaciones en la parte baja de la cuenca. Sin embargo, existen ocasiones en que el río alcanza dicho nivel y no se registra ninguna inundación, debido precisamente a que no se considera todos los afluentes.

c. Niveles propuestos

Del análisis anterior se proponen tres niveles de aviso en la parte baja de la cuenca, dada las condiciones hidrometeorológicas existentes. En el cuadro siguiente se proponen dichos niveles en el sitio donde se localiza la estación hidrométrica Puente Coyolate:

Cuadro 5.2 Niveles críticos de alerta y acciones a implementar en la cuenca del río Coyolate.

Tipo	Condición	Acción
Aviso	Precipitación pluvial acumulada igual o mayor a 200 mm durante un período tres a cinco días.	Avisar a la comunidad para que se de el seguimiento al comportamiento de la lluvia y que estén atentos a cualquier eventualidad.
Alerta	Intensidades de lluvia de 10 mm/h, con duración igual o mayor a tres horas y separadas de otros eventos por un tiempo no mayor de dos horas.	Dar alerta a los encargados para implementar acciones previas a una inundación.
Alarma	Aumento del nivel del río a partir de 1.80 m con condiciones de lluvia de intensidad moderada y de duración prolongada.	Dar alarma a las comunidades en la parte baja de la cuenca, para que se implementen los planes de emergencia.

Fuente: Elaboración propia (2008).

Es sumamente importante hacer notar, que las características de la lluvia relacionadas con la intensidad y la duración son las principales a considerar para aumentar la eficiencia del sistema

de alerta temprana, repercutiendo en disminución de pérdidas humanas ocasionadas por inundaciones. Respecto a la precipitación acumulada de 200 mm durante un período de tres a cinco días, tiene mayor prioridad en los meses de agosto, septiembre y octubre, donde los suelos se encuentran con humedad cercana a la capacidad de campo. Siendo totalmente diferente si este evento de precipitación ocurre en el inicio de la época lluviosa (mayo o junio), estando los suelos con humedad cercana al punto de marchites permanente, donde poseen su mayor potencial de infiltración y por ende su menor potencial de escurrimiento.

Lo anterior, se fundamenta en lo observado el día 31 de agosto del año 2006 en la estación climática Camantulul, donde se estimó un total de 183 mm de lluvia diaria (equivalente a la lluvia diaria máxima anual), siendo mayor que lo estimado durante el ciclón tropical Stan durante el mismo período de tiempo. La diferencia, es de que durante el evento mencionado, la lluvia antecedente durante los últimos cinco días previos se estimó en 46.90 mm, lo que indica que el contenido de humedad de los suelos estaba muy cercano al punto de marchites permanente, o sea a una condición de humedad antecedente AMC I, donde los suelos poseen el menor potencial de escurrimiento y por lo tanto mayor potencial de infiltración. Debido a lo indicado, en la cuenca del río Coyolate, no se registró un aumento significativo del nivel del río que pudiera ocasionar crecidas y posteriormente inundaciones, en donde de acuerdo a registros históricos el nivel máximo para ese día se estimó en 1.14 m.

Otro aspecto relevante, es tener presente que la mayoría de los eventos de lluvia en la cuenca se caracterizan por ser de moderada a fuerte intensidad, pero de corta duración, los que no precisamente ocasionan crecidas e inundaciones. Por ejemplo, de acuerdo a las curvas duración-intensidad-frecuencia de la estación climática Camantulul, se pueden esperar lluvias con períodos de retorno de dos años y duración de dos horas, hasta de 35 mm/h. Por lo tanto, los aspectos a tener en cuenta de la lluvia, más allá de su régimen torrencial, es la duración e incluso con intensidades que oscilan entre bajas a moderadas. Lo anterior, también se fundamenta al observar las figuras 20A y 21A, donde el nivel máximo del río Coyolate para los años hidrológicos 2003 - 2004 y 2004 - 2005 fue de 2.10 y 2.35 m respectivamente. Además, en dichos años no se registraron inundaciones de gran magnitud en la cuenca, debido a que no hubo eventos de lluvia de duración prolongada. Lo que demuestra que eventos de lluvia intensos y de corta duración son comunes en la cuenca, los cuales no precisamente ocasionan inundaciones.

E. Definición detallada de áreas inundables

Definir áreas inundables es ajeno a la operación del sistema, sin embargo, la definición detallada de de estas áreas, podría prevenir y/o disminuir daños a las comunidades y la infraestructura, ya que se podría reglamentar lo siguiente:

- Desarrollo urbano: en la zona inundable se negarán permisos para construir cualquier tipo de infraestructura a no ser que se mitigue el impacto negativo que produce dichas invasiones en la zona inundable. La obra aumenta el tirante de agua y por lo tanto, incrementa la zona inundable. Dicha mitigación será demostrada en tres fases, siendo modelación de la situación actual, modelación con proyecto de obra y modelación de obra de mitigación de sus efectos negativos (para lo cual será necesario una evaluación formal del impacto ambiental). Tampoco se podrá establecer plantas de tratamiento de aguas residuales y/o cementerios dentro de dicha zona inundable.
- El manejo de los recursos naturales: en la zona inundable se prohíbe realizar movimientos de suelos y deforestación. Todo esto a no ser que se realice una mitigación de los impactos negativos. Modificar las condiciones de suelo y vegetación puede producir una modificación de la zona inundable. También podría propiciarse la instalación de bosques de galería o franjas forestales hidrorreguladoras, ya que de acuerdo con Suárez (2004), las orillas de los ríos o embalses son las zonas de mayor debilidad erosiva en una cuenca hidrográfica, en ellas incide la lluvia directa, el agua de escorrentía proveniente de las partes altas de la ladera y la erosión lateral producida por la propia corriente fluvial. Las franjas forestales hidrorreguladoras representan la versión artificial de los bosques de galerías y son imprescindibles en las orillas de los ríos y embalses. Propician el traslado del escurrimiento superficial hacia los horizontes inferiores del suelo y la retención de los productos de la erosión por lo que influyen de manera decisiva en la disminución de tasas de asolvamiento, mejoran la calidad del agua y regulación del escurrimiento superficial, además de que estabilizan y rectifican los cauces naturales de los ríos. Estos bosques de galería preferentemente tendrían que ubicarse en los mayores afluentes de la cuenca, o sea los ríos Coyolate, Pantaleón y Cristóbal, y algunos otros que se consideren necesarios, en las partes alta y media de la cuenca. Actividad que podría ser coordinada y ejecutada entre instituciones privadas y del estado.

La delimitación detallada de estas áreas inundables tendría que hacerse a una escala 1:50,000 como mínimo o a un nivel más detallado que sería 1:10,000, con topografía de precisión y debe incluir una distancia no menor de 30 km a partir del litoral hacia donde inician las inundaciones. Para el caso de la cuenca del río Coyolate, esta distancia se estima en 37.08 km entre la aldea Cerro Colorado y el océano Pacífico.

Para realizar la simulación hidráulica del cauce se recomendaría utilizar el programa HEC - RAS, el cual es un modelo que requiere información detallada de la topografía del río y la disposición de cierta información hidrológica como lo son caudales de diseño para diversos períodos de retorno, además se requiere estimar las características hidráulicas del cauce. Con la modelación hidráulica, se estimarían los niveles que el río podría alcanzar con distintos caudales de diseño a partir del punto de la estación hidrométrica Cerro Colorado. Los tramos prioritarios de modelación hidráulica son de los puentes Coyolate, Cristóbal y Pantaleón hacia la confluencia de ambos, y de ahí aproximadamente 30 kilómetros aguas abajo hacia la desembocadura con el océano Pacífico.

F. Programas

Existen algunos programas a nivel regional y/o local que pueden implementarse o reactivarse, lo que incluiría a instituciones del estado y de la iniciativa privada. A nivel del estado, podría reactivarse los siguientes programas:

- Programa de manejo integral de cuencas con enfoque de conservación de suelo y agua, esto obviamente restauraría hidrológicamente las cuencas, teniendo repercusiones directas sobre los volúmenes de escurrimiento superficial y de arrastre de sedimentos.
- Programa de reforestación, principalmente en las partes alta y media de la cuenca, para lo cual habría que incentivar a los propietarios de las tierras a realizar este tipo de actividades. Además, habría que promover los sistemas agroforestales.
- Programa de infraestructura, en lo que se refiere al dragado y rectificación del cauce principal del río Coyolate, principalmente en su parte media y baja, así como las principales obras de protección de cauces (diques, gaviones y muros). Además, habría que propiciar condiciones adecuadas del río para la época de lluvias, eliminando y/o rectificando obras temporales durante la época seca (canales, presas y muros).

- Programa de capacitación y concientización a la población, sobre las medidas a tomar al momento de una inundación.

Lo anterior puede implementarse con entidades como el Ministerio de Comunicaciones, Transporte y Obras Públicas, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA), Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN), Instituto Nacional de Bosques (INAB), INSIVUMEH, CONRED, Municipalidades, Universidades (en lo que se refiere a investigación básica y aplicada, adopción e implementación de tecnologías), Organizaciones no Gubernamentales (ONG's), obviamente complementado con la participación de la comunidad.

Algo que es necesario, es fortalecer la red hidrometeorológica nacional, que actualmente ha venido en decremento constante. A nivel de la iniciativa privada podrían y/o deberían formar parte las empresas agroindustriales del sector de la caña de azúcar y otros cultivos extensivos. Esto orientado principalmente fortalecer o implementar lo siguiente:

- Fomento del establecimiento y el mantenimiento de bosques de galería en las márgenes de los ríos, por lo menos en los tramos en donde atraviesa las propiedades privadas.
- Rectificación y/o remoción de las obras provisionales para el desvío y captación de agua en sistemas de riego en la época seca.
- Apoyo logístico a la investigación pura y aplicada relacionada con la ingeniería de los recursos hidráulicos en la región en beneficio de toda la sociedad.

Es importante mencionar que el análisis realizado y las distintas propuestas planteadas están orientadas a lograr una mejor eficiencia en la operación del sistema, en la medida de lo posible que se logren involucrar a todos los actores interesados se obtendrán mejores resultados. Para lograr disminuir la vulnerabilidad de las comunidades a los efectos adversos de los eventos hidrometeorológicos extremos que se dan en nuestro medio, es necesario el conocimiento del mismo. Una vez conocido, se tendrán mayores elementos técnicos y/o científicos que implementados a nuestros sistemas de alerta temprana, se obtendrán beneficios que se reflejarán en la disminución del número de personas afectadas por estos eventos. Entonces, se puede hablar de varios componentes en un sistema de alerta temprana que una vez integrado provee un sistema eficaz de evacuación y atención a las comunidades previo un evento natural. Las estrategias de

mitigación deben estar basadas en un sólido conocimiento de los eventos, a fin de prevenir los efectos cuando esto sea posible y así aliviar las consecuencias, cuando estas sean inevitables.

Actualmente, la tendencia es hacia un incremento ante este tipo de eventos, dado principalmente el calentamiento global, ocasionado por el uso de combustibles fósiles, el cambio de uso de la tierra (deforestación, impermeabilización de los suelos, etc.), desertificación, entre otros, nos hacen más vulnerables, ya que propician un desequilibrio al ciclo hidrológico, ocasionando que exista mayor precipitación en tiempos mas cortos. Por lo tanto, nos queda seguir actualizando y evaluando los sistemas de alerta temprana contra inundaciones, sin dejar a un lado la capacitación y supervisión al personal, además de propiciar un manejo integral de los recursos naturales del país al nivel de cuenca hidrográfica. Queda la experiencia de no contar con registros históricos, lo que ayudaría significativamente a ir afinando los niveles de alerta. Una vez estableciéndose los lineamientos en la cuenca del río Coyolate, ésta puede servir de modelo y así seguir implementándose en las demás cuencas de la vertiente del océano Pacífico.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

1. La información hidrometeorológica disponible en la cuenca del río Coyolate se considera aceptable, sin embargo, es necesaria la instalación y monitoreo constante de estaciones hidrométricas en los ríos Cristóbal y Pantaleón.
2. De acuerdo con el estudio de crecidas realizado para la región donde inician las inundaciones en la cuenca del río Coyolate, se estiman caudales de diseño que oscilan entre 234 y 2,087 m³/s con períodos de retorno entre 2 y 100 años. Para el caso del ciclón tropical Stan se estima que el caudal máximo osciló entre 1,300 y 1,500 m³/s.
3. Actualmente el nivel de alerta de lluvia en la parte media de la cuenca está sobreestimado, lo que repercute en una baja eficiencia del sistema, además, no se considera la duración, frecuencia y lluvia acumulada en los días previos al evento.
4. Existe falta de comunicación y trabajo en equipo por parte de las entidades competentes en lo que se refiere a la operación del sistema de alerta temprana, en la cuenca del río Coyolate.

6.2 Recomendaciones

1. Integrar y concienciar por medio del estímulo de la participación comunitaria a todos los actores involucrados en el sistema, en una constante actualización y evaluación del mismo.
2. Integrar grupos multidisciplinarios que incluyan aspectos técnicos y sociales para la constante actualización de los sistemas de alerta temprana en el país.
3. Propiciar un manejo integral de los recursos naturales, con el objetivo de restaurar hidrológicamente a nivel de cuenca hidrográfica.
4. Continuar con el análisis hidrológico de eventos extremos considerando los demás afluentes importantes en la cuenca.
5. Instalar estaciones limnimétricas en las bases de los puentes Cristóbal y Pantaleón considerando su monitoreo constante.
6. Propiciar un sistema de monitoreo y almacenamiento de datos, principalmente lluvia en la parte media de la cuenca y niveles de los ríos Coyolate, Cristóbal y Pantaleón, lo que permitiría la constante actualización de los niveles de alerta.
7. Realizar la simulación hidráulica de los principales afluentes hacia el sitio donde inician las inundaciones (jurisdicción de la aldea Cerro Colorado) considerando crecidas con períodos de retorno igual o mayor a dos años, en donde se defina detalladamente las áreas inundables.
8. Utilizar como indicador de alerta eventos de lluvia con intensidad de lluvia mayores o iguales a 10 mm/h, con duración de tres horas y separados por un espacio de tiempo no mayor a dos horas en la estación climática Camantulul, considerando la humedad del suelo igual o mayor a la capacidad de campo (como mínimo 200 mm de lluvia acumulada en los tres a cinco días previos al evento).
9. En lo que se refiere a niveles del río Coyolate, se tiene definido un nivel específico, sin embargo, se recomienda utilizar como indicador de alerta un nivel de 1.80 m en la estación hidrométrica Puente Coyolate.

BIBLIOGRAFÍA

1. Alvarado, G; Herrera, I. 2000. Mapa fisiográfico - geomorfológico de la república de Guatemala. Guatemala, Plan de Acción Forestal para Guatemala. Esc. 1:250,000. Color.
2. Aparicio, M. 2001. Fundamentos de hidrología de superficie. México, Limusa. 303 p.
3. Azurdia, I. 2007. El cambio climático y mecanismos de desarrollo limpio. *In* Taller Cambio Climático (1, 2007, Guatemala). Guatemala. 1 CD.
4. Beltetón, O. 2007. Cambio climático y desastres. *In* Taller Cambio Climático (1, 2007, Guatemala). Guatemala. 1 CD.
5. Bereciartua, P. 2006. Desafíos de la gestión integrada de los recursos hídricos. *In* Curso Regional Itinerante en Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (1, 2006, Guatemala). Guatemala. 1 CD.
6. Buch, M; Turcios, M. 2003. Vulnerabilidad socioambiental: aplicaciones para Guatemala. Guatemala, Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente. 24 p.
7. Carballo, D. 2008. Generalidades del sistema de alerta temprana en la cuenca del río Coyolate. Sección de Sistemas de Alerta Temprana, CONRED. (comunicación personal)
8. CEPAL (Comisión Económica para América Latina, CL); SEGEPLAN (Secretaría General de Planificación de la Presidencia de la República, GT). 2005. Efectos en Guatemala de las lluvias torrenciales y el ciclón tropical Stan, octubre de 2005. Guatemala. 14 p.
9. _____. 2007. Riesgos ambientales, resumen de algunos efectos económicos de Mitch y Stan. *In* Taller Cambio Climático (1, 2007, Guatemala). Guatemala. 1 CD.
10. CEPREDENAC (Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales en América Central, Secretaría Ejecutiva, PA). 2006. Inventario de cuencas en Guatemala. Guatemala. 41 p.
11. _____. 2006. Sistematización de una experiencia de cuenca en Guatemala. Guatemala. 53 p.
12. Chow, V; Maidment, D; Mays, L. 1994. Hidrología aplicada. 1era ed. Santa Fé de Bogota. McGaw-Hill. 584 p.
13. Coburn, A; Spence, R; Pomonis, A. 1991. Vulnerabilidad y evaluación del riesgo. Cambridge, Reino Unido, PNUD, Programa de Entrenamiento Para el Manejo de Desastres. 69 p.
14. CONRED (Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres en Guatemala, GT). 2006. Términos de referencia generales para el estudio hidrológico en 6 cuencas del océano Pacífico. Guatemala. 3 p.

15. _____. 2007. Sistema de alerta temprana en la cuenca del río Coyolate: hoja cartográfica. Guatemala. Esc 1:125,000. Color.
16. CORDILLERA (Consultoría en Manejo Integral de Recursos Naturales, GT). 2007. Diagnóstico de los SAT por inundaciones en cuencas de la vertiente del Pacífico. Guatemala. p. 42 - 82 (Capítulo 3).
17. Cruz S, JR De la. 1982. Clasificación de zonas de vida de Guatemala a nivel de reconocimiento. Guatemala, INAFOR. 42 p.
18. Custodio, E; Llamas, MR. 2001. Hidrología subterránea. 2 ed. Barcelona, España, Omega. v. 1, 1157 p.
19. Declaración de Panamá. Encuentro Latinoamericano de Legisladores sobre Recursos Hídricos: Evaluación de los Ecosistemas de Milenio-agua, un recurso para la vida. 2006. Agroboletín informativo, Guatemala, GT, no. 4-2006, agosto-Sept:8.
20. ERIS (Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, GT). 2006. Evaluación de crecidas. Uruguay, UNESCO. 17 p. Consultado 29 ene 2007. Disponible en: www.unesco.org.uy/phi/libros/mitch/conclusiones.html
21. Fajardo, R. 2006. Evaluación hidráulica mediante el uso de modelos del tramo final del río Villalobos. Tesis MSc. Recursos Hidráulicos. Guatemala, USAC, Facultad de Ingeniería. 96 p.
22. Gárfias, J. 2002. Introducción a la modelación: flujo y transporte de contaminantes. Centro Interamericano de Recursos del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México. (Correspondencia personal)
23. Herrera Ibáñez, I. 2004. Manual de hidrología. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 241 p.
24. Ibáñez, L; Castillo, M; Arteaga, Eduardo. 2004. Metodología para la definición de zonas más propensas a inundaciones. In. 3er. Seminario sobre manejo y conservación del suelo y agua en Chiapas. México. p. 177-184
25. IGM (Instituto Geográfico Militar, GT). 1984. Mapa topográfico de república de Guatemala; hoja Chimaltenango no. 2059 IV. Guatemala. Esc. 1:50,000. Color.
26. IGM (Instituto Geográfico Militar, GT). 1984. Mapa topográfico de república de Guatemala; hoja Tecpán Guatemala no. 2060 III. Guatemala. Esc. 1:50,000. Color.
27. IGM (Instituto Geográfico Militar, GT). 1985. Mapa topográfico de república de Guatemala; hoja Escuintla no. 2058 IV. Guatemala. Esc. 1:50,000. Color.
28. IGN (Instituto Geográfico Nacional, GT). 1969. Mapa topográfico de república de Guatemala; hoja Pueblo Nuevo Tiquisate no. 1958 IV. Guatemala. Esc. 1:50,000. Color.

29. IGN (Instituto Geográfico Nacional, GT). 1970. Mapa topográfico de república de Guatemala; hoja Santa Lucía Cotzumalguapa no. 1958 I. Guatemala. Esc. 1:50,000. Color.
30. IGN (Instituto Geográfico Nacional, GT). 1975. Atlas hidrológico. Guatemala. Esc. 1:1,000,000. Color.
31. IGN (Instituto Geográfico Nacional, GT). 1977. Mapa topográfico de república de Guatemala; hoja Alotenango no. 2059 III. Guatemala. Esc. 1:50,000. Color.
32. IGN (Instituto Geográfico Nacional, GT). 1978. Mapa topográfico de república de Guatemala; hoja San Lucas Tolimán no. 1959 I. Guatemala. Esc. 1:50,000. Color.
33. IGN (Instituto Geográfico Nacional, GT). 1980. Mapa topográfico de república de Guatemala; hoja Patulul no. 1959 II. Guatemala. Esc. 1:50,000. Color.
34. IGN (Instituto Geográfico Nacional, GT). 1981. Mapa topográfico de república de Guatemala; hoja La Gomera no. 1958 II. Guatemala. Esc. 1:50,000. Color.
35. IGN (Instituto Geográfico Nacional, GT). 1981. Mapa topográfico de república de Guatemala; hoja Sipacate no. 1957 I. Guatemala. Esc. 1:50,000. Color.
36. IGN (Instituto Geográfico Nacional, GT). 1994. Mapa topográfico de república de Guatemala; hoja Huitzitzil no. 1958 III. Guatemala. Esc. 1:50,000. Color.
37. IGN (Instituto Geográfico Nacional, GT). 1994. Mapa topográfico de república de Guatemala; hoja Tecojate no. 1957 IV. Guatemala. Esc. 1:50,000. Color.
38. _____. 1980. Evaluación cuantitativa del riesgo de desastre por ciclones tropicales en la república de Guatemala. Guatemala. 393 p.
39. IARNA (Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente, Universidad Rafael Landívar, GT); IIA (Instituto Incidencia Ambiental, Universidad Rafael Landívar, GT). 2006. Perfil ambiental de Guatemala: tendencias y reflexiones sobre la gestión ambiental. Guatemala.
40. INE (Instituto Nacional de Estadística, GT). 2003. Censos nacionales XI de población y VI de habitación 2002: población y locales de habitación particulares censados según departamento y municipio (cifras definitivas). Guatemala. 1 CD.
41. INSIVUMEH (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, GT); CONRED (Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres, GT); IGN (Instituto Geográfico Nacional, GT); FAUSAC (Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía, GT); CESEM (Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas); ERIS (Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, GT). 2003. Zonificación de amenazas naturales en la cuenca del río Samalá y análisis de vulnerabilidad y riesgo en la población de San Sebastián. Guatemala. 47 p.

42. INSIVUMEH (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, GT); MAGA (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, GT). 2005. Atlas hidrológico. Escala 1:1,000,000.
43. INSIVUMEH (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, Departamento de Investigación y Servicios Hídricos, GT). 2004. Análisis regional de crecidas en la república de Guatemala: resumen ejecutivo. Guatemala. 3 p.
44. _____. 2004. Estudio de lluvia máxima diaria en la república de Guatemala: resumen ejecutivo. Guatemala. 7 p.
45. _____. 2005. Resumen del impacto asociado al huracán Stan en Guatemala. Guatemala. 5 p.
46. Johnson, EE. 1985. El agua subterránea y los pozos. Minnesota, Estados Unidos, Johnson. 513 p.
47. Lavell, A. 2000. Sobre la gestión del riesgo: apuntes hacia una definición (correspondencia personal). Lima, Perú, USAID. 22 p.
48. Linsley, A. 1988. Hidrología para ingenieros. 2 ed. México, McGraw-Hill. 386 p.
49. López, F. 1999. Evaluación hidrológica de las crecidas provocadas por el huracán Mitch en Guatemala (correspondencia personal). Montevideo, Uruguay, UNESCO, Oficina Regional en Montevideo, Programa Hidrológico Internacional. 20 p.
50. López Quiroa, JL. 2007. Alta probabilidad de que se forme el fenómeno climático de “La Niña”. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, Guatemala, abril 30:2. (no. 170).
51. López Vera, F. 2001. Fundamentos de economía, administración y gestión de recursos hídricos. In Jornada iberoamericana sobre enfoques integrados de la problemática del agua (1, 2001, Antigua Guatemala, GT). Antigua Guatemala. 42 p.
52. MARN (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, GT). 2007. El clima y cambio climático. In Taller Cambio Climático (1, 2007, Guatemala). Guatemala. 1 CD.
53. Marín, G. 2002. Hidráulica fluvial. Bogotá, Colombia, Ingeniería Colombiana de Consulta y Desarrollo. 169 p.
54. Martínez, E. 2001. Hidráulica fluvial, principios y práctica. Madrid, Ediciones Técnicas y Científicas. 382 p.
55. Maskrey, A. 1993. Los desastres no son naturales. Perú. Red de Estudios Sociales de Prevención de Desastres en América Latina. 140 p.
56. Medina, B. 2007. Deslizamientos e impactos ambientales de los huracanes Mitch y Stan en Guatemala. In Jornadas Internacionales sobre Gestión del Riesgo de Inundaciones y Deslizamientos de Laderas (2007, BR). Brasil. 11 p.

57. Méndez, N. 2004. Transporte de sedimentos: aplicaciones en ingeniería de riegos e ingeniería de ríos (Correspondencia personal). Venezuela, Universidad Centro Occidental “Lisandro Alvarado”, Profesor titular. 24 p.
58. Miner Fuentes, Y. 2002. Determinación de riesgo: análisis y generación de mapas: informe final 2002. Guatemala, CONRED. 82 p.
59. Miranda, S. 2008. Aspectos de operación y funcionamiento del sistema de alerta temprana en la estación delta 6, puente Cristóbal. (Comunicación personal).
60. Monsalve Sáenz, G. 1999. Hidrología en la ingeniería. México, Alfaomega. 383 p.
61. Morales, F. 2006. Río Coyolate destruye puente: cuatro comunidades de Nueva Concepción incomunicadas. Prensa Libre, Guatemala, Guatemala. septiembre 23: 1 p. Consultado 15 abr 2007. Disponible en: www.prensalibre.com.gt
62. NOVIB (Organización Holandesa para la Cooperación Internacional al Desarrollo, ND); Fundación Solar, GT. 2001. Estado del agua en Guatemala 2000. Guatemala. 55 p.
63. OEA (Organización de los Estados Americanos, US). 1991. Desastres, planificación y desarrollo: manejo de amenazas naturales para reducir los daños. Washington, DC, US. 145 p.
64. Oliva Alonso, R. 2007. Calentamiento global. Enfoques Económicos, GT, 28 de febr: 13–15.
65. Orozco, E. 2003. Análisis estadístico de eventos extremos: crecidas y lluvias extremas (Correspondencia personal). Guatemala, USAC, ERIS. 13 p.
66. _____. 2006. Los recursos hídricos en Guatemala. In Curso Regional Itinerante en Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (1, 2006, Guatemala). Guatemala. 1 CD.
67. _____. 2006. Notas del curso de estadística, capítulo 1 (Correspondencia personal). Guatemala, USAC, ERIS, Maestría en Recursos Hidráulicos. 14 p.
68. _____. 2006. Notas del curso de hidrología, capítulo 1 (Correspondencia personal). Guatemala, USAC, ERIS, Maestría en Recursos Hidráulicos. 6 p.
69. _____. 2006. Notas del curso de hidrología, capítulo 5 (Correspondencia personal). Guatemala, USAC, ERIS, Maestría en Recursos Hidráulicos. 35 p.
70. Orozco, E; Flores, O. 2006. Problemas de inundaciones en los ríos Coyolate y Achiguate: informe de visita de reconocimiento. Guatemala, USAC, ERIS. 22 p.
71. Palencia, G; Munaiz, C. 2005. Desborde del río Coyolate afecta a 482 familias: habilitan 2 alberges y ejército vigilará ese sector. Prensa Libre, Guatemala, Guatemala. julio 18:1 p. Consultado 15 abr 2007. Disponible en: www.prensalibre.com.gt
72. Palomino, J. 2008. Aspectos de operación y funcionamiento del sistema de alerta temprana en la estación delta 3, puente Coyolate. (Comunicación personal).

73. Pérez, V. 2007. Registros históricos de nivel del río Coyolate en la estación hidrométrica Puente Coyolate. Guatemala, INSIVUMEH, Departamento de Investigación y Servicios Hídricos. 1 hoja electrónica.
74. PNUD, Programa de Entrenamiento para el Manejo de Desastres, UK. 1992. Visión general sobre manejo de desastres. 2 ed. Cambridge, Reino Unido. 137 p.
75. _____. 1995. Introducción a las amenazas. 2 ed. Cambridge, Reino Unido. 182 p.
76. Programa Mundial de Alimentos; MAGA (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, GT); INSIVUMEH (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, GT); CONRED (Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres de Guatemala, GT). 2002. Estimación de amenazas inducidas por fenómenos hidrometeorológicos en la república de Guatemala. Guatemala. 30 p.
77. Ramírez, A. 2006. Clima extremo. Prensa Libre, Dominical, Guatemala, GT, 3 sept: 20-21.
78. Raymundo, E; Godínez, M. 2005. Efectos ecológicos, económicos y sociales del desvío de cauce de los ríos: análisis preliminar. Guatemala, Asociación para la Promoción y el Desarrollo de la Comunidad -CEIBA-. 15 p.
79. Revolorio, A. 2003. Notas del curso manejo y conservación de suelo y agua (Correspondencia personal). Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. s.p.
80. Rozé, J. 2000. Crisis, vulnerabilidad y desastres: la globalización en regiones periféricas de América Latina. Argentina, Universidad Nacional del Nordeste, Facultad de Arquitectura. 4 p.
81. Salguero, M. 2003. Vulnerabilidad de los recursos hídricos en Guatemala ante el cambio climático (Correspondencia personal). Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 40 p.
82. Sánchez, J. 2007. Consecuencia del paso del ciclón tropical Stan en octubre 2005 en la zona cañera Guatemalteca. In Presentación de resultados de investigación zafra 2005-2006. Memoria. Guatemala, CENGICANÁ. p. 280 - 288.
83. Sandoval, J. 2007. Notas del curso de modelos en hidrología. (Correspondencia personal). Guatemala, USAC, ERIS, Maestría en Recursos Hidráulicos.
84. Santos, L. 2003. Diseño y recomendaciones para la implementación y operación de un sistema de alerta temprana contra inundaciones en la cuenca del río Pensativo. Tesis Ing. Agr. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 40 p.
85. _____. 2007. Metodología para la estimación de caudales en la estación hidrométrica Puente Coyolate (comunicación personal). Guatemala, INSIVUMEH, Departamento de Investigación y Servicios Hídricos.
86. Santos Mancilla, G. 2006. Propuesta y validación de un método que genere modelos para establecer zonas vulnerables a desastres naturales en la cuenca del río Coyolate. Guatemala, CONCYT / FONACYT. 40 p.

87. Suárez, J. 2004. Franjas forestales hidrológicas. *In* Taller de Gestión Integrada de Cuencas Hídricas (3, 2004, Managua, Nicaragua). Managua, Nicaragua, UNAN, Centro de Investigaciones de Recursos Hídricos. 8 p.
88. Taboada, B. 2003. Dinámica de sedimentos en cuencas hidrográficas. Tesis Ing. en Irrigación. Chapingo, México, Universidad Autónoma Chapingo. 178 p.
89. URL (Universidad Rafael Landívar, GT), IARNA (Instituto de Incidencia Ambiental y Recursos Naturales, GT). 2004. Perfil ambiental de Guatemala: informe sobre el estado del ambiente y bases para su evaluación sistemática. Guatemala. 461 p.
90. Villagrán de León, JC. 2001. Manual para la estimación cuantitativa de riesgos asociados a diversas amenazas. Guatemala, Acción Contra el Hambre / CONRED / ECHO. 69 p.
91. _____. 2003. América Central en el contexto de la consulta hemisférica sobre alerta temprana. Guatemala. 44 p.
92. _____. 2003. Registro de sistema de alerta temprana SAT - río Achiguate. Guatemala, Centro de Investigación y Mitigación de Desastres Naturales. 6 p.
93. _____. 2003. Registro de sistema de alerta temprana SAT - río Coyolate. Guatemala, Centro de Investigación y Mitigación de Desastres Naturales. 6 p.
94. _____. 2003. Sistemas de alerta temprana para emergencias de inundaciones en Centroamérica. Panamá, UNICEF / CEPREDENAC. 62 p.
95. Villón, M. 2001. Hidrología estadística. Cartago, Costa Rica, MaxSoft. 380 p.
96. _____. 2004. HidroEsta, manual del usuario. Cartago, Costa Rica, Centro de Información Tecnológica. 295 p.

ANEXO

Figura 1A. Ajuste de registros históricos de lluvia diaria máxima anual, en la estación climática Camantulul.

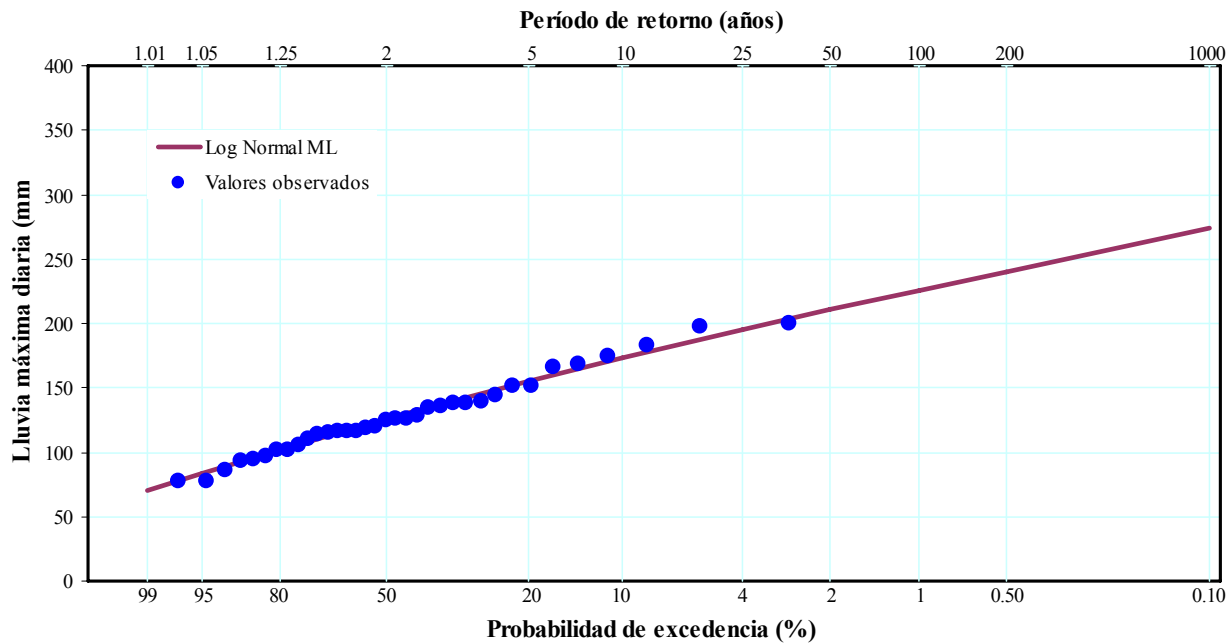


Figura 2A. Ajuste de registros históricos de caudales máximos anuales, en la estación hidrométrica Puente Coyolate.

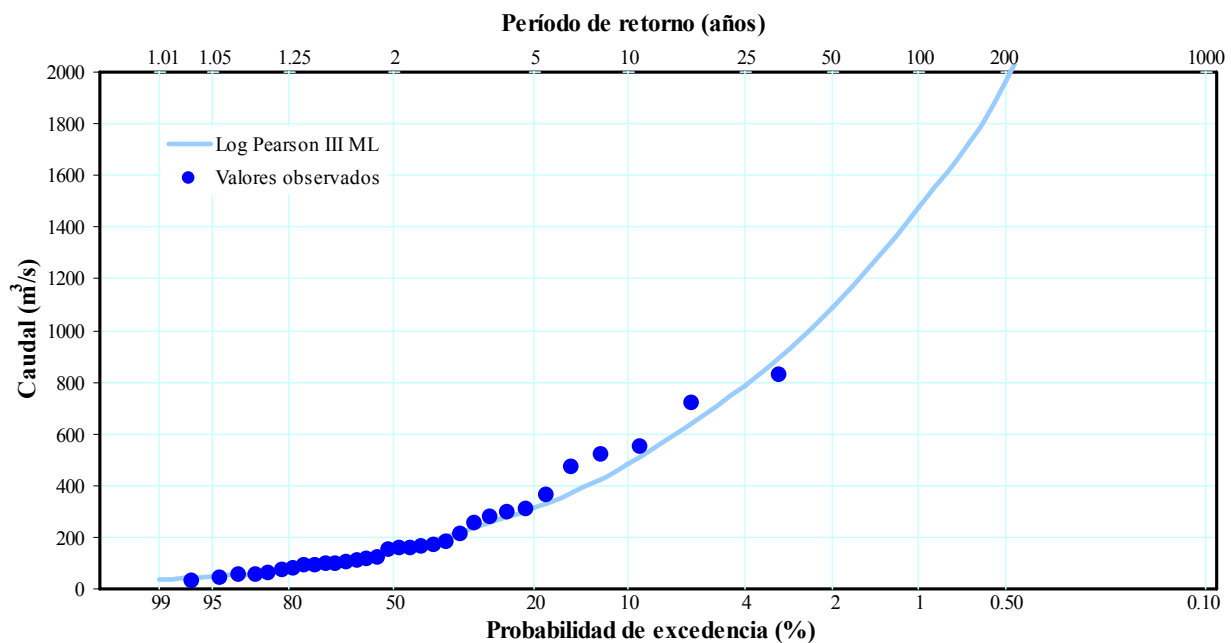


Figura 3A. Comportamiento del nivel diario del río Coyolate durante el año hidrológico 2003 - 2004.

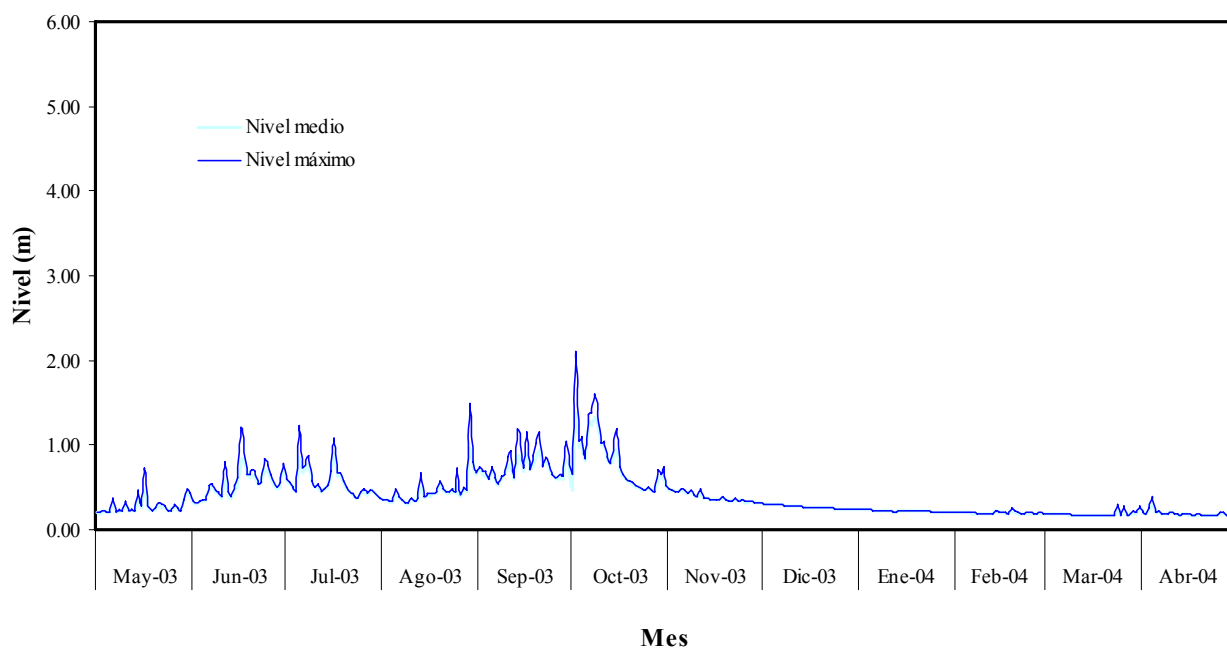


Figura 4A. Comportamiento del nivel diario del río Coyolate durante el año hidrológico 2004 - 2005.

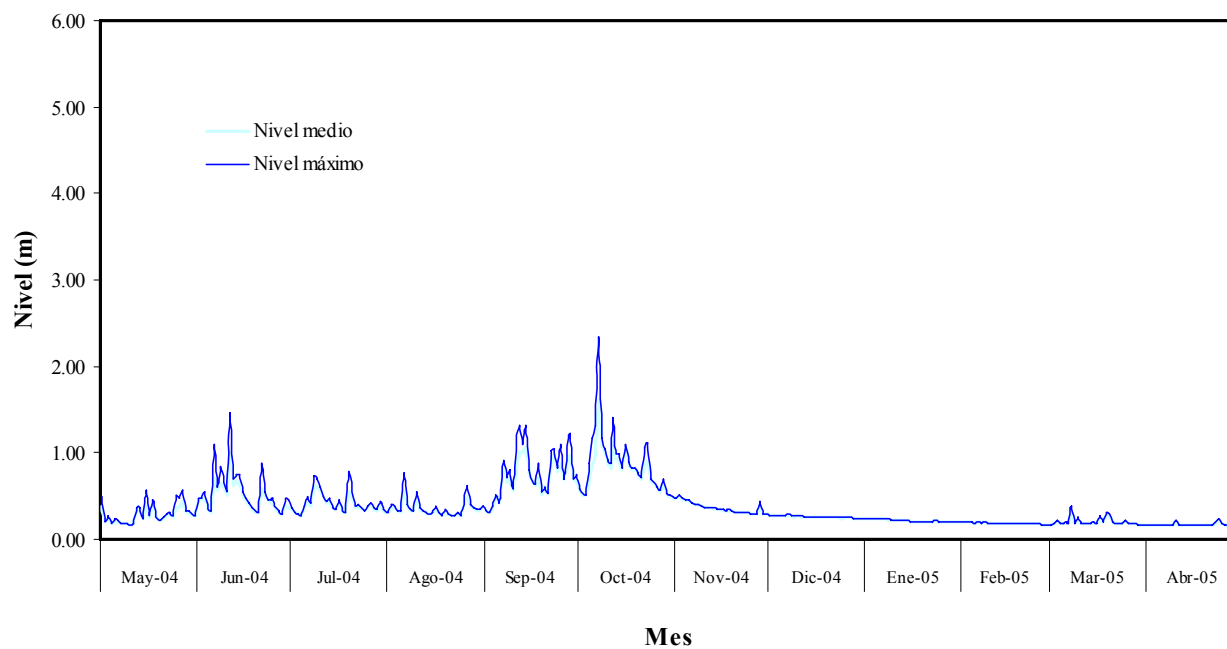


Figura 5A. Inundaciones en áreas agrícolas en la parte baja de la cuenca del río Coyolate.



**Figura 6A. Acumulación de sedimentos en el río Coyolate al este de la aldea Canoguitas.
(Tomada de Orozco & Flores, 2006)**



Figura 7A. Estación hidrométrica localizada en el puente Coyolate.



Figura 8A. Estación delta tres del sistema de alerta temprana en la cuenca del río Coyolate.



