



**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA**

**PROPUESTA DE UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA PARA INUNDACIONES EN
LA CUENCA DEL RÍO ACAHUAPA DE EL SALVADOR**

ING. JOSÉ ALEJANDRO MACHUCA LAÍNEZ

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

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2010.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



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

**PROPUESTA DE UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA PARA INUNDACIONES EN
LA CUENCA DEL RÍO ACAHUAPA DE EL SALVADOR**

ESTUDIO ESPECIAL

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

POR:

ING. JOSÉ ALEJANDRO MACHUCA LAÍNEZ

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

COMO REQUISITO PREVIO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE:

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

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2010.

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



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|-------------------|--------------------------------------|
| DECANO | Ing. Murphy Olympo 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. Luis Pedro Ortiz de León |
| VOCAL V | P.A. José Alfredo Ortiz Herincx |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

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 | M.Sc. Ing. Joram Matías Gil. |
| SECRETARIO | M.Sc. Ing. Elfego Odvin Orozco Fuentes |

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:

**PROPUESTA DE UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA PARA INUNDACIONES EN
LA CUENCA DEL RÍO ACAHUAPA DE EL SALVADOR**

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 17 de noviembre de 2,010.

Atentamente,

ING. JOSÉ ALEJANDRO MACHUCA LAÍNEZ

Guatemala, 18 de noviembre de 2010

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

Respetuosamente les comunico que he revisado la versión corregida, en mi calidad de asesor de estudio y, a la vez, Coordinador de la Maestría de Recursos Hidráulicos, el trabajo de Estudio Especial titulado:

Propuesta de un sistema de alerta temprana para inundaciones en la cuenca del río Acahuapa de El Salvador

presentado por el estudiante,

Ingeniero José Alejandro Machuca Láinez

Les manifiesto que el estudiante cumplió con los requisitos exigidos por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS) Y la Universidad de San Carlos de Guatemala, en la realización de su estudio en forma satisfactoria.

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

Atentamente.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

MSc. Ing. Elfege Orozco
Asesor del Estudio y
Coordinador Maestría de Recursos Hidráulicos

UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS DE GUATEMALA



Facultad de Ingeniería
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria
y Recursos Hidráulicos

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

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

Telfax (502) 2418 9124

www.ingenieria-usac.edu.gt

UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS DE GUATEMALA



Facultad de Ingeniería
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria
y Recursos Hidráulicos

El Director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos -ERIS- después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los profesores siguientes: MSc. Ing. Joram Matias Gil Larroj, MSc. Ing. Juan José Sandoval y MSc. Ing. Elfego Odvin Orozco Fuentes; así como el visto bueno del Coordinador de la Maestría en Recursos Hidráulicos, MSc. Ing. Elfego Odvin Orozco Fuentes y del trabajo del estudiante: Ingeniero José Alejandro Machuca Láinez, titulado "Propuesta de un sistema de alerta temprana para inundaciones en la cuenca del río Acahuapa de El Salvador", en representación de la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la autorización del mismo.

Guatemala 19 de noviembre de 2010.

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

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

Telfax (502) 2418 9124

www.ingenieria-usac.edu.gt

IMPRIMASE

MSc. Ing. Pedro Saravia Celis
DIRECTOR

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y
Recursos Hidráulicos



ACTO QUE DEDICO:

Al pueblo de San Vicente, como una contribución para la reducción de las pérdidas ocasionadas por las crecidas del río Acahuapa.

AGRADECIMIENTOS:

A Dios Todopoderoso ya que sin su Bendición no soy nada.

A Mimi, por amarme, darme todo tu cariño y estar en contacto conmigo todos los días.

A mi familia: José Arístides, Alina, Eduardo, Nacho y Ali por darme todo su apoyo desde el inicio de la maestría.

A mi demás familia por mantenerme siempre en sus oraciones.

A la Unión Europea, quienes a través del PREVDA, patrocinaron parcialmente mis estudios.

Al personal docente y administrativo de la ERIS, especialmente a los Ingenieros Elfego Orozco, Pedro Saravia, Juan José Sandoval, Joram Gil y Teófilo Álvarez por orientarme en el desarrollo de toda la maestría.

A mis compañeros de maestría, especialmente a: Jorge Castaneda, Diego González, Deyman Pastora, y Giovanna Pérez; Guatemala no habría sido lo mismo sin ustedes.

A las personas que me extendieron su ayuda para el desarrollo de este trabajo de investigación: Ana Deisy López, Mauricio Martínez, Hernán Romero, Luis Chipagua, José Ferdy Cruz, Adán Figueroa, Claudia Castillo, Alex Valladares, Daniel López, Oscar Carvajal, Santos López, Alejandro Sorto, Alfredo Cruz y Kenny Bercián.

A todos ustedes y a los que se me olvida mencionar, mil gracias.

Alejandro Machuca

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|----|
| 1. ASPECTOS INTRODUCTORIOS | 1 |
| 1.1 Antecedentes | 1 |
| 1.2 Justificación | 2 |
| 1.3 Beneficios | 2 |
| 1.4 Problema a investigar..... | 3 |
| 1.5 Objetivos | 3 |
| 1.5.1 General | 3 |
| 1.5.2 Específicos | 3 |
| 2. MARCO TEÓRICO | 5 |
| 2.1 El ciclo hidrológico..... | 5 |
| 2.2 Análisis de eventos extremos..... | 6 |
| 2.2.1 Conceptos básicos | 6 |
| 2.2.2 Distribuciones teóricas de frecuencia para eventos extremos..... | 7 |
| 2.3 Componentes básicas del riesgo | 8 |
| 2.3.1 Riesgo..... | 8 |
| 2.3.2 Amenaza..... | 8 |
| 2.3.3 Vulnerabilidad..... | 8 |
| 2.3.4 Desastre | 9 |
| 2.3.5 Inundaciones..... | 9 |
| 2.4 Sistema de alerta temprana | 9 |
| 2.4.1 Definiciones | 9 |
| 2.5 Simulaciones | 10 |
| 3. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO ACAHUAPA | 11 |
| 3.1 Ubicación dentro de las regiones hidrográficas de El Salvador | 11 |
| 3.2 Descripción general de la cuenca del río Acahuapa | 11 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.3 | Estimación del tiempo de concentración..... | 13 |
| 3.4 | Distribución poblacional | 14 |
| 3.5 | Aspectos económicos | 15 |
| 3.6 | Clima | 16 |
| 3.7 | Uso actual de suelo..... | 17 |
| 3.8 | Geología | 18 |
| 4. | RÉGIMEN DE LLUVIAS Y CRECIDAS | 19 |
| 4.1 | Régimen de lluvias | 19 |
| 4.1.1 | Lluvia multi-anual | 19 |
| 4.1.2 | Lluvia mensual..... | 20 |
| 4.1.3 | Lluvia diaria..... | 21 |
| 4.1.4 | Análisis estadístico de la lluvia diaria máxima anual | 22 |
| 4.1.5 | Lluvia media en la cuenca | 26 |
| 4.1.6 | Descripción de la tormenta tropical Ida..... | 27 |
| 4.2 | Régimen de crecidas..... | 29 |
| 4.2.1 | Estaciones hidrométricas | 29 |
| 4.2.2 | Modelo lluvia – escorrentía | 29 |
| 4.2.3 | Análisis regional de crecidas | 32 |
| 4.3 | Simulación hidráulica..... | 42 |
| 4.3.1 | Generalidades | 42 |
| 4.3.2 | Secciones representativas y datos geométricos e hidráulicos..... | 43 |
| 4.3.3 | Caudales simulados | 44 |
| 4.3.4 | Selección de punto para generar niveles de alerta temprana | 45 |
| 4.3.5 | Obtención de curvas lluvia-nivel-caudal | 46 |
| 5. | ANÁLISIS Y PROPUESTA DEL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA PARA INUNDACIONES PARA LA CUENCA DEL RÍO ACAHUAPA | 49 |
| 5.1 | Experiencia en El Salvador con sistemas de alerta temprana | 49 |

| | | |
|-------|--|----|
| 5.1.1 | Antecedentes | 49 |
| 5.1.2 | Tipos de inundaciones en El Salvador | 50 |
| 5.1.3 | Sistemas de alerta temprana del SNET | 50 |
| 5.2 | SAT de la cuenca del río Acahuapa..... | 53 |
| 5.2.1 | Tipo de sistema..... | 53 |
| 5.2.2 | Niveles de lluvia..... | 53 |
| 5.2.3 | Equipamiento requerido | 54 |
| 5.2.4 | Conformación de la red de observadores locales | 55 |
| 5.2.5 | Definición detallada de áreas inundables | 56 |
| 5.2.6 | Programas..... | 57 |
| 6. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 59 |
| 6.1 | Conclusiones | 59 |
| 6.2 | Recomendaciones | 60 |
| 7. | BIBLIOGRAFÍA..... | 63 |
| | ANEXOS | 67 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 3. 1 Cuenca del río Acahuapa | 12 |
| Figura 3.2 Curva hipsométrica de la cuenca..... | 13 |
| Figura 4.1 Lluvia anual en las estaciones climáticas..... | 20 |
| Figura 4.2 Precipitación media mensual. | 21 |
| Figura 4. 3 Lluvia máxima diaria | 22 |
| Figura 4.4 Distribuciones estadísticas de lluvia, San Jacinto..... | 23 |
| Figura 4. 5 Distribuciones estadísticas de lluvia, Finca El Carmen | 23 |
| Figura 4. 6 Distribuciones estadísticas de lluvia, Puente Cuscatlán..... | 24 |
| Figura 4. 7 Distribuciones estadísticas de lluvia, Santa Clara..... | 24 |
| Figura 4. 8 Distribuciones estadísticas de lluvia, Beneficio Acahuapa..... | 25 |
| Figura 4. 9 Distribuciones estadísticas de lluvia, Cojutepeque | 25 |
| Figura 4. 10 Hietograma de la TT Ida, Estación San Vicente | 29 |
| Figura 4. 11 Lluvia acumulada..... | 31 |
| Figura 4.12 Caudal índice vrs área de 7 cuencas hidrográficas..... | 34 |
| Figura 4. 13 Caudal específico vrs área de 7 cuencas hidrográficas | 35 |
| Figura 4. 14 Distribuciones estación Atalaya..... | 36 |
| Figura 4. 15 Distribuciones estación La Hachadura..... | 36 |
| Figura 4. 16 Distribuciones estación Guazapa | 37 |
| Figura 4. 17 Distribuciones estación Las Pavas | 37 |
| Figura 4. 18 Distribuciones estación El Jocote..... | 38 |
| Figura 4. 19 Distribuciones estación Quezalapa | 38 |
| Figura 4. 20 Distribución estación Obrajuelo..... | 39 |
| Figura 4. 21 Estación Obrajuelo sometida a un caudal TR 100 años..... | 45 |
| Figura 4. 22 Sección transversal comunidad 2 Puentes..... | 46 |
| Figura 4. 23 Relación lluvia-caudal-nivel, sección comunidad 2 Puentes | 47 |
| Figura 5. 1 Equipo a ser instalado para el SAT | 55 |

TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 3.1 Regiones hidrográficas de El Salvador | 11 |
| Tabla 3.2 Tiempo de concentración estimados en la cuenca del río Acahuapa..... | 14 |
| Tabla 3.3 Área y población de los municipios pertenecientes a la cuenca del río Acahuapa..... | 15 |
| Tabla 3.4 Distribución por rubros y área cultivada en la cuenca del río Acahuapa..... | 18 |
| Tabla 3.5 Geología de la cuenca del río Acahuapa..... | 18 |
| Tabla 4.1 Lluvia de 24 horas para las distintas estaciones..... | 26 |
| Tabla 4.2 Lluvia media hasta puntos de control | 27 |
| Tabla 4. 3 Número de curva (CN II) hasta puntos de control | 30 |
| Tabla 4.4 Datos para el modelo lluvia-escorrentía | 30 |
| Tabla 4.5 Caudales máximos generados mediante el modelo lluvia-escorrentía | 32 |
| Tabla 4.6 Características de las estaciones utilizadas en el análisis regional | 33 |
| Tabla 4. 7 Factores de frecuencia (K_{TR}) de distribuciones teóricas, estación La Atalaya. | 39 |
| Tabla 4. 8 Factores de frecuencia (K_{TR}) de distribuciones teóricas, estación La Hachadura. | 40 |
| Tabla 4. 9 Factores de frecuencia (K_{TR}) de distribuciones teóricas, estación Guazapa. | 40 |
| Tabla 4. 10 Factores de frecuencia (K_{TR}) de distribuciones teóricas, estación Las Pavas..... | 40 |
| Tabla 4. 11 Factores de frecuencia (K_{TR}) de distribuciones teóricas, estación El Jocote. | 40 |
| Tabla 4. 12 Factores de frecuencia (K_{TR}) de distribuciones teóricas, estación Quezalapa. | 41 |
| Tabla 4. 13 Factores de frecuencia (K_{TR}) de distribuciones teóricas, estación Obrajuelo. | 41 |
| Tabla 4. 14 Factores de frecuencia (K_{TR}) a aplicarse a la cuenca. | 42 |
| Tabla 4. 15 Caudales estimados en los puntos de control..... | 42 |
| Tabla 4. 16 Secciones representativas en el cauce principal del río Acahuapa | 43 |
| Tabla 5. 1 Umbrales de alerta para la comunidad 2 Puentes | 53 |
| Tabla 5. 2 Red de observadores locales de la cuenca del río Acahuapa | 56 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|-------------------|---|
| BID | Banco Interamericano de Desarrollo |
| CAMI | Central América Mitigation Initiative |
| CEL | Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa |
| CEPAL | Comisión Económica para América Latina |
| CEPREDENAC | Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales en América Central |
| COEN | Comité de Emergencia Nacional |
| CPH | Centro de Pronóstico Hidrológico |
| CPM | Centro de Pronóstico Meteorológico |
| ERIS | Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos |
| GMT | Hora del Meridiano de Greenwich |
| HEC - RAS | Hydrologic Engineering Center - River Analysis System |
| INSIVUMEH | Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología |
| MARN | Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales |
| MOP | Ministerio de Obras Públicas |
| NWSRFS | National Weather Service River Forecast System |
| NOAA | Centro Nacional de Huracanes |
| OEA | Organización de los Estados Americanos |
| ONU | Organización de las Naciones Unidas |
| PAES | Programa Ambiental de El Salvador |
| PER | <i>Post Earthquake Reconstruction</i> (Reconstrucción Post Terremoto) |
| PLAMDARH | Plan Maestro de Desarrollo y Aprovechamiento de los Recursos Hídricos |
| PNUD | Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo |
| SAT | Sistema de Alerta Temprana |
| SNET | Servicio Nacional de Estudios Territoriales |
| SCS | Servicio de Conservación de Suelos |
| SHMHN | Servicio Hidrológico y Meteorológico |
| USAID | Agencia Estadounidense para el Desarrollo Internacional |
| ITCZ | Zona de Convergencia Intertropical |

RESUMEN

En noviembre del 2009 la tormenta tropical Ida azotó El Salvador, el departamento de San Vicente fue afectado enormemente ya que se registraron las mayores precipitaciones en el país, alrededor de 377.8 mm en 24 horas, presentándose su mayor intensidad de 81.2 mm/hora. Como consecuencia de este fenómeno, se desató una serie de derrumbes en el volcán de San Vicente y crecidas a lo largo de la cuenca del río Acahuapa. La zona de mayor afectación debido a las crecidas fue el área urbana de San Vicente, específicamente el asentamiento conocido como comunidad 2 Puentes, en el cual se estima que fallecieron 30 personas. En otras partes de la cuenca se registraron pérdidas de cultivos y daños en diferentes obras de paso: San Vicente y la Quesera.

El documento tiene como objetivo establecer parámetros de alerta temprana, enfocado básicamente en la comunidad 2 Puentes debido a que en ese punto se registraron las pérdidas de vidas humanas y actualmente existen personas viviendo en el lugar.

Para abordar el estudio hidrológico se consideraron 2 métodos: lluvia-escorrentía y un análisis regional de crecidas. Debido a que no se cuenta con datos de caudales de la cuenca y la estación Obrajuelo se encuentra fuera de operaciones desde el año 1980, se realizó el análisis regional de crecidas para el cual se contó con datos de caudales máximos instantáneos diferentes subcuencas del río Lempa y aledañas. A partir de ello, se estableció una relación de áreas basándose en la estadística de los registros de las cuencas conocidas y obtener caudales para diferentes períodos de retorno. Para el modelo de lluvia-escorrentía, se contó con datos del uso actual de suelo, los antecedentes de humedad, la lluvia que ha existido en la zona previa a un evento determinado, para este último método se contó con el programa HEC-HMS.

Un análisis hidráulico realizado con el programa HEC-RAS demostró que para esta cuenca, el método de lluvia-escorrentía es el que se apega más a un evento real, debido a que el análisis regional tiende a subestimar los caudales para los mismos períodos de retorno. Esto se debe, principalmente a que los caudales utilizados tienden a ser calculados con curvas que han sido calibradas para caudales relativamente pequeños, teniendo una gran incertidumbre en eventos extremos. Esto pudo ser comprobado con un nivel que alcanzó el río Acahuapa en la estación Obrajuelo.

Por las características orográficas de la cuenca, se ubicó dentro de la clasificación “cuencas de respuesta rápida”, establecidas por el SNET (Servicio Nacional de Estudios Territoriales). Se establecieron umbrales de alerta temprana relacionando la lluvia con un nivel del río y finalmente se hace una propuesta para la ubicación de una estación telemétrica en el área urbana de San Vicente, para el monitoreo continuo de la parte media de la cuenca del río Acahuapa, así como la instalación de escalas limnimétricas en diferentes puntos del río Acahuapa.

ABSTRACT

In November 2009 the tropical storm Ida hit El Salvador, San Vicente department was greatly affected due to the highest record of rainfall in the country, about 377.8 mm in 24 hours, showing the highest intensity of 81.2 mm / hour. As a result of this phenomenon, it was trigger a series of landslides in the San Vicente volcano and floods along the basin of Acahuapa river. The most affected area due to flooding was the urban area of San Vicente, specifically the settlement known as community 2 Puentes, in which an estimated 30 people died. In other parts of the basin were recorded crop losses and damage in different bridges: San Vincente and la Quesera.

The document has the objective of establish early warning parameters, primarily focused on the community 2 Puentes because at that point there were losses of human lives and there are still people living there.

To the hydrological study were consider 2 methods: rainfall-runoff and regional analysis of floods. Because there is no data flow of the basin and the Obrajuelo station is out of operation since 1980, a regional analysis of flood were perform which instantaneous peak flow data were collected from different subbasins of the Lempa river and surrounding basins. On this basis, it was establish a relation between areas basing on statistical records of river flow and to get flows for different return periods. For the model of rainfall runoff, it was use the current land use, antecedent runoff condition, rainfall that has existed in the area prior to a particular event, for the last method the HEC-HMS program was use.

A hydraulic analysis performed with HEC-RAS program showed that for this basin, the rainfall-runoff method is the one that conforms more to a real event, because the regional analysis tends to underestimate flows for the same return period. This is mainly due to the flows used, tend to be calculated with curves that have been calibrated with flows relatively small, having a great uncertainty in extreme events. This could be checked with the level reached at the Obrajuelo station on the Acahuapa river

Due to the topographical features of the basin, it is located within the classification "rapid response catchments", established by the SNET (National Service of Territorial Studies). It was establish thresholds of early warning linking the rain with a water level and finally made a proposal for the location of a telemetry station in the urban area of San Vicente, for continuous

monitoring the middle basin of the Acahuapa river, and the installation of water level meters at different points along the river.

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.

Lluvia diaria máxima anual: Lluvia máxima registrada en una estación determinada durante un día específico para un año dado.

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. |
| Zona Paracentral: | Zona geográfica de El Salvador conformada por los departamentos de La Paz, Cabañas y San Vicente. |

1. ASPECTOS INTRODUCTORIOS

1.1 Antecedentes

De acuerdo al MARN (Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales) 2009, El Salvador por su geomorfología, ubicación geográfica y orografía, está expuesto a amenazas de origen natural tales como huracanes, inundaciones, terremotos, deslizamientos, erupciones volcánica, sequías, el Fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENOS en sus fases El Niño/La Niña), las cuales al impactar en el territorio causan pérdidas y daños económicos en viviendas, infraestructura, transporte, agricultura interrupción de los servicios, etc.

El número de desastres generados por eventos de origen natural en El Salvador se ha incrementado de manera exponencial en la última década (1997-2007). Durante este periodo han ocurrido 21 eventos que representan el 53% de los desastres ocurridos en 100 años; de los 21 eventos 5 (23%) son de origen geológico y 16 (76%) de origen hidrometeorológico.

Estos eventos, se manifiestan en desastres al encontrarse territorios con altos niveles de vulnerabilidad debido a la ubicación de las viviendas, a la condición socioeconómica de los habitantes y fragilidad ambiental del entorno; adicionalmente la infraestructura estratégica como puentes, carreteras, escuelas, unidades de salud, han sido construidas considerando muy poco la magnitud de estos eventos en sus diseños, ubicación y construcción.

A pesar de que la recurrencia histórica de los desastres en sitios de riesgo del país, se ha reconstruido las condiciones de vulnerabilidad, lo cual supone altas probabilidades de que se repitan las pérdidas y daños, y por consecuencia, el deterioro permanente de la economía familiar, local y nacional, generando un círculo vicioso del cual no se saldrá si no se considera seriamente el análisis de los riesgos para el ordenamiento, desarrollo del territorio y la protección ambiental.

En los últimos años, los desastres han causado cuantiosas pérdidas económicas, según estimaciones de la Comisión Económica para América Latina (CEPAL). En el caso del huracán Mitch, estudios mostraron que la población directamente afectada fue 346,910 personas, estimándose \$398.1 millones de dólares en daños. A causa de los terremotos del 2001 se alcanzaron pérdidas de US \$1,604 millones y por las sequías del mismo año se registraron US\$ 38 millones en pérdidas. En el caso del huracán Stan, CEPAL estimó que los daños rondaban los

\$196.2 millones de dólares. En el caso del huracán Ida, el Sistema Nacional de Protección Civil reportó un total de 199 personas fallecidas, 4,251 personas albergadas, 2,350 viviendas afectadas; además un monto aproximado de \$314.84 millones de dólares en daños y pérdidas. Estas evaluaciones muestran la importancia e impacto de los desastres sobre la economía.

En el área de estudio, los municipios que resultaron mayormente afectados por inundaciones del río Acahuapa ocasionadas por la tormenta tropical Ida, según datos proporcionados por los jefes de las unidades ambientales de las alcaldías y Cáritas de El Salvador fueron: Verapaz (60 personas), San Cayetano Istepeque (205 personas) y San Vicente (600 personas). El municipio de Tepetitán reportó pérdidas en cosechas y accesos viales a distintas comunidades. Adicionalmente se menciona que en la parte baja de la cuenca fueron afectadas las comunidades San Francisco Chamoco (100 personas), Guarumo (112 personas), Casas Viejas (192), Quesera y El Pedregal (804 personas).

1.2 Justificación

Actualmente no se cuenta con sistema de alerta temprana en la cuenca del río Acahuapa y la estación hidrométrica ubicada dentro de la cuenca (El Pedregal, Obrajuelo) se encuentra fuera de operación.

En vista de la necesidad de poseer un mecanismo que genere un estado de alerta ante las crecidas de los ríos, verificando el comportamiento hidrológico e hidráulico, se propone determinar niveles de alerta temprana analizando registros históricos y las condiciones actuales de la cuenca.

1.3 Beneficios

Con los datos obtenidos del estudio se generarán niveles de alerta temprana en la cuenca del Acahuapa, proveyendo un sistema de ayuda y tiempo de respuesta ante eventos meteorológicos significativos a la población, evitando pérdidas de vidas humanas y bienes materiales de la población y del Estado.

1.4 Problema a investigar

Dado cierto nivel de aguas en un río, condiciones de humedad del suelo y precipitación, ¿Cuál será el tiempo en que se genera un nivel de aguas tal que superado produzca un efecto negativo en los habitantes y los bienes materiales de ellos ó del Estado?

1.5 Objetivos

1.5.1 General

Analizar la situación de inundaciones en la cuenca del río Acahuapa, y proponer un sistema de alerta temprana.

1.5.2 Específicos

Identificar y evaluar la información hidrometeorológica disponible en la cuenca y área de influencia hidrológica.

Identificar sitios con problemas frecuentes de inundaciones

Estudio de crecidas en la cuenca del río Acahuapa.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 El ciclo hidrológico

Aparicio (2001) señala que como todo ciclo, el hidrológico no tiene ni principio ni fin; y su descripción puede comenzar en cualquier punto. El agua que se encuentra sobre la superficie terrestre o muy cerca de ella se evapora bajo el efecto de la radiación solar y el viento. El vapor de agua, que así se forma, se eleva y se transporta por la atmósfera en forma de nubes hasta que se condensa y cae hacia la tierra en forma de precipitación. Durante su trayecto hacia la superficie de la tierra, el agua precipitada puede volver a evaporarse o ser interceptada por las plantas o las construcciones, luego fluye por la superficie hasta las corrientes o se infiltra. El agua interceptada y una parte de la infiltrada y de la que corre por la superficie se evapora nuevamente. De la precipitación que llega a las corrientes, una parte se infiltra y otra llega hasta los océanos y otros grandes cuerpos de agua, como presas y lagos. Del agua infiltrada, una parte es absorbida por las plantas y posteriormente es transpirada, casi en su totalidad, hacia la atmósfera y otra parte fluye bajo la superficie de la tierra hacia las corrientes, el mar u otros cuerpos de agua, o bien hacia zonas profundas del suelo (percolación) para ser almacenada como agua subterránea y después aflorar en manantiales, ríos o el mar. De esta forma, el ciclo hidrológico o ciclo del agua es el proceso de circulación del agua entre los distintos compartimentos de la hidrósfera. Se trata de un ciclo biogeoquímico en el que hay una intervención mínima de reacciones químicas, y el agua solamente se traslada de unos lugares a otros o cambia de estado físico.

En síntesis, los procesos básicos que incluyen el ciclo hidrológico son los de evapotranspiración, precipitación, infiltración, precolación y escorrentía.

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. Las crecidas han existido desde que existe el ciclo hidrológico en la tierra, pero que el impacto de las mismas en las comunidades ha aumentado con el paso del tiempo debido al deterioro ambiental y a las variaciones en las condiciones propias de los cauces de los ríos, entre otras.

2.2 Análisis de eventos extremos

2.2.1 Conceptos básicos

A. Eventos extremos

De acuerdo con Orozco (2002), citado por Fuentes (2008), 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 (2010), la define como la frecuencia de su ocurrencia durante la repetición de un número de observaciones.

C. Período de retorno

El período de retorno, generalmente expresado en años, puede ser entendido como el número de años en que se espera que mediamente se repita un cierto caudal, o un caudal mayor. Así podemos decir que el período de retorno de una lluvia de de 300 mm, para una estación pluviométrica específica, es de 100 años, si, lluvias iguales o mayores de 300 mm se producen, en media a cada 100 años.

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

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:

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{Tr}\right)^n \quad \text{Ec. 2.1}$$

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), indica 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 escurrimiento 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).

2.2.2 Distribuciones teóricas de frecuencia para eventos extremos

Orozco (2010), señala 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.

2.3 Componentes básicas del riesgo

2.3.1 Riesgo

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.

2.3.2 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.

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).

2.3.3 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.

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.

2.3.4 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.

2.3.5 Inundaciones

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).

2.4 Sistema de alerta temprana

2.4.1 Definiciones

A. Alerta

De acuerdo con Lavell (2000) citado por Fuentes (2008), 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.

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.

2.5 Simulaciones

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.

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)

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.

3. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO ACAHUAPA

3.1 Ubicación dentro de las regiones hidrográficas de El Salvador

SNET (Servicio Nacional de Estudios Territoriales) 2005, menciona que El Salvador se encuentra dividido en 10 regiones hidrográficas con características geomorfológicas similares de acuerdo a lo establecido en la década de los 70 por el Proyecto Hidrometeorológico Centroamericano, y posteriormente por el Plan Maestro de Desarrollo y Aprovechamiento de los Recursos Hídricos PLAMDARH las cuales se presentan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Regiones hidrográficas de El Salvador

| Región Hidrográfica | | Área (km ²) |
|---------------------|--------------------------------|-------------------------|
| A | Lempa | 10,167.56 |
| B | Paz | 919.93 |
| C | Cara sucia – San Pedro | 768.85 |
| D | Grande de Sonsonate – Banderas | 778.43 |
| E | Mandinga – Comalapa | 1,294.55 |
| F | Jiboa – Estero de Jaltepeque | 1,638.62 |
| G | Bahía de Jiquilisco | 779.01 |
| H | Grande de San Miguel | 2,389.27 |
| I | Siramá | 1,294.55 |
| J | Goascorán | 1,044.44 |

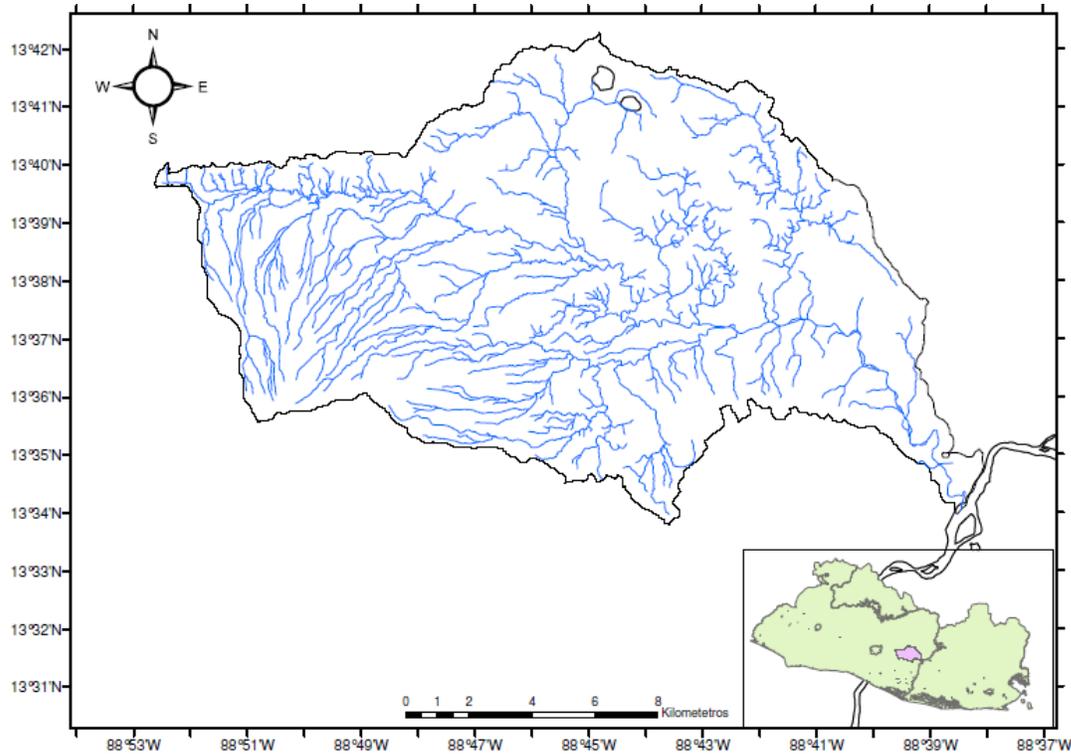
Fuente: SNET (2005)

La cuenca del río Acahuapa se encuentra dentro de la región hidrográfica A, ya que es una subcuenca del río Lempa. Véase figura 3.1.

3.2 Descripción general de la cuenca del río Acahuapa

La cuenca del río Acahuapa está ubicada en la zona paracentral de la república de El Salvador, específicamente en el departamento de San Vicente, y localizada entre las siguientes coordenadas geográficas; 13° 34', 13° 43' latitud norte y 88° 38', 88° 53' longitud oeste; con una extensión superficial de 227.65 km², equivalentes a 22,765.14 Ha. Véase figura 3.1.

Figura 3. 1 Cuenca del río Acahuapa



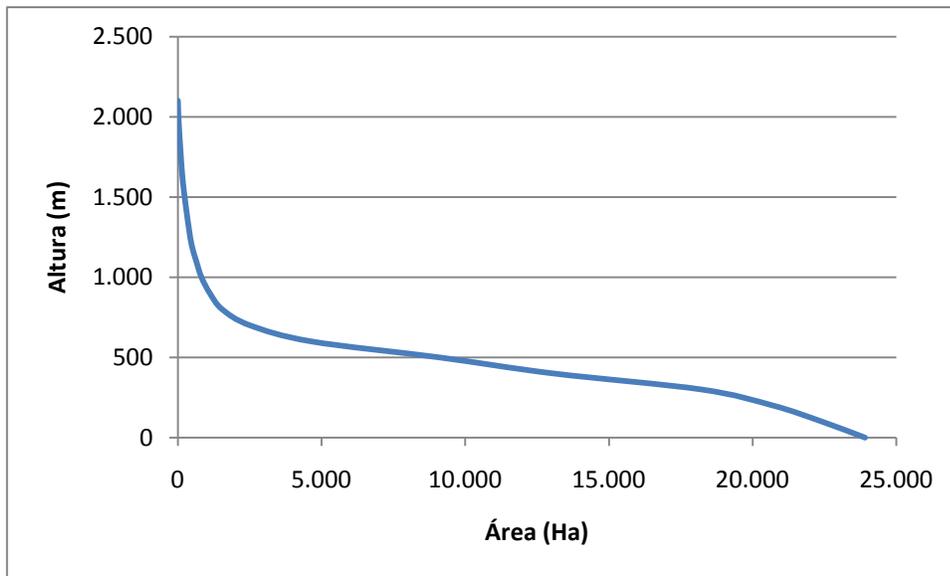
La cuenca tiene una elevación promedio de 1,081.5 msnm., con una cota máxima de 2,170 y 7 la mínima, en la parte más alta se ubican los municipios de Guadalupe, Verapaz, Tepetitán y San Cayetano Istepeque. En la parte más baja se ubican los municipios de San Vicente, Apastepeque, San Esteban Catarina y Santa Clara.

Para poder tener puntos de referencia específicos, Cáritas (2009) dividió la cuenca en tres zonas conocidas como: zona baja, media y alta.

- La zona baja; esta inicia desde la desembocadura del río Acahuapa al río Lempa; la cual tiene una elevación desde 7 msnm. y llega hasta los 100 msnm; las comunidades que se ubican en esta zona son La Quesera, La Arenera, Casas Viejas, El Carrizo, San Francisco Chamoco, El Pedregal, Quebrada Seca, La Galera.
- La zona media; comienza desde los 100 msnm. y termina hasta los 500 msnm, donde se ubica principalmente la cabecera municipal de San Vicente.
- La zona alta; empieza de los 500 msnm. y finaliza hasta los 2,170 msnm. Aquí se encuentran ubicadas las siguientes comunidades: Molineros, Tepetitán, Candelaria, Cerro Grande, El Desvío, La Vuelta del Globo, San José Los Mangos, Santa Elena, Barrio Istepeque, San Cayetano Istepeque y El Cañaverl.

En la figura 3.2 se muestran la curva hipsométrica de la cuenca.

Figura 3.2 Curva hipsométrica de la cuenca



3.3 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. Chow *et al* (1994), escribe la ecuación de Kirpich de la siguiente manera:

$$t_c = \frac{0.0195L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad \text{Ec. 3.1}$$

Donde:

t_c = Tiempo de concentración (min).

L = Longitud del canal desde aguas arriba hasta la salida (m).

S = Pendiente promedio de la cuenca (m/m).

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

Tabla 3.2 Tiempo de concentración estimados en la cuenca del río Acahuapa

| Tramo | Longitud (m) | H1 (m) | H2 (m) | ΔH (m) | $\Delta H/\Delta L$ (m/m) | Tiempo de Concentración | | Velocidad (m/s) |
|---------------------------|-----------------|-----------|-----------|-------------------|------------------------------|----------------------------|---------|--------------------|
| | | | | | | (min) | (horas) | |
| Volcán-Beneficio Acahuapa | 12,035.80 | 2,170.00 | 519.00 | 1,651.00 | 0.14 | 58.01 | 0.97 | 3.46 |
| Volcán-Santa Elena | 15,232.21 | 2,170.00 | 445.00 | 1,725.00 | 0.11 | 74.87 | 1.25 | 3.39 |
| Volcán-Puente | 18,693.78 | 2,170.00 | 358.00 | 1,812.00 | 0.10 | 93.07 | 1.55 | 3.35 |
| Volcán-Obrajuelo | 40,279.77 | 2,170.00 | 26.00 | 2,144.00 | 0.05 | 211.72 | 3.53 | 3.17 |

Fuente: Elaboración propia (2010)

3.4 Distribución poblacional

Dentro de la cuenca, se encuentran diferentes concentraciones de poblaciones, distribuidas en la zona urbana y rural. Los municipios de mayor importancia de concentración de habitantes en la zona urbana son: Tepetitán, San Cayetano Istepeque, San Vicente y Apastepeque; en cuanto a los municipios que tienen mayor influencia de habitantes en la zona rural son: Santa Clara, San Esteban Catarina, Verapaz, San Lorenzo y Guadalupe; así mismo el municipio de Tecoluca no tiene influencia de población en esta.

Cabe mencionar que no todos los habitantes de la zona rural de estos municipios están inmersos dentro de la cuenca del río Acahuapa, por tanto se presenta el tabla 3.3 donde se muestra la cantidad total de habitantes de los municipios que tienen concentraciones de población más importantes en este estudio, así como también el total de población que está dentro de la cuenca del río Acahuapa.

Tabla 3.3 Área y población de los municipios pertenecientes a la cuenca del río Acahuapa

| Municipio | Área en la cuenca (km ²) | Porcentaje (%) | Población Total | Población en la cuenca | Porcentaje (%) |
|------------------------|--------------------------------------|----------------|-----------------|------------------------|----------------|
| Apastepeque | 72.46 | 31.83 | 18,247 | 13,654 | 23.29 |
| Guadalupe* | 5.45 | 2.39 | 5,585 | 2,255 | 3.85 |
| San Cayetano Istepeque | 12.38 | 5.44 | 5,095 | 5,073 | 8.65 |
| San Esteban Catarina * | 2.49 | 1.09 | 3,275 | 208 | 0.35 |
| San Lorenzo* | 0.16 | 0.07 | 6,178 | 146 | 0.25 |
| San Vicente | 106.70 | 46.87 | 45,559 | 30,555 | 52.12 |
| Santa Clara * | 8.09 | 3.55 | 4,216 | 366 | 0.62 |
| Tepetitán | 12.56 | 5.52 | 3,813 | 3,136 | 5.35 |
| Verapaz* | 5.90 | 2.59 | 6,315 | 3,235 | 5.52 |
| Tecoluca | 1.45 | 0.64 | | | |
| Total | 227.65 | 100.00 | 98,283 | 58,628 | 100.00 |

Fuente: Adaptado de Cáritas (2009).

(*) En estos municipios, no todos sus habitantes de la zona rural están inmersos dentro de la cuenca; en cuanto a los habitantes de la zona urbana que dan fuera totalmente de la cuenca.

3.5 Aspectos económicos

Los rubros más importantes de generación de ingresos son; los productos agrícolas, entre los más cultivados tenemos, la producción de granos básicos como: maíz, frijón, sorgo, arroz y otros, los cuales se comercializan principalmente en la cabecera departamental de San Vicente; en cuanto a la caña de azúcar, algunos productores/as la procesan artesanalmente; a través de la elaboración de dulce de panela y otros derivados, por medio de trapiches (moliendas); en dicho caso, existen 11 trapiches, que se encuentran dentro de la cuenca, de los cuales, actualmente nueve están en funcionamiento; mientras que la mayoría de cañicultores, la comercializan con el Ingenio INJIBOA, para su procesamiento industrial para la elaboración de azúcar y otros derivados.

Otro cultivo que genera empleo en la zona alta de la cuenca es el café, principalmente en época de recolección del fruto, del cual, una pequeña parte es procesado en el beneficio Las Vegas, uno de los tres que están dentro de la cuenca, ya que actualmente tanto el beneficio Molineros y beneficio Acahuapa no están funcionando; en cuanto al café restante en su mayoría es llevado al beneficio Oromontique, ubicado en el municipio de Santiago de María del departamento de Usulután.

Las hortalizas y frutas son producidas en menor escala como una actividad secundaria de la siembra de granos básicos y en otros casos son cultivadas pequeñas áreas. Es decir, que las hortalizas son cultivadas en la mayoría de los hogares, las cuales son sembradas en el traspatio de las viviendas, así como en cercos, potreros y algunas fincas.

En general con estas actividades agrícolas se emplea un buen número de mano de obra, durante el establecimiento y cosechas de los cultivos de granos básicos y caña de azúcar.

En la producción pecuaria, la actividad con mayor importancia es la ganadería vacuna, la cual es comercializada en pie de cría, en el tiangué ubicado en el municipio de San Vicente, en cuanto a la carne está es distribuida localmente para Apastepeque y San Vicente, en los mercados municipales; y en los municipios restantes, se da a través de personas particulares que la venden por libras en las casas de los consumidores finales; con respecto a la leche esta es vendida por los mismos productores/as al menudo (botella), o es procesada en queso y otros derivados como los son: mantequilla y requesón.

Tanto la crianza de cerdos, aves de corral, cabras, ovejas, conejos, peces, caballos etc., es una actividad que se da en menor escala, que muchas veces se comercializan en la comunidad o en municipios vecinos o en su defecto los crían para el consumo familiar.

Además, otras actividades económicas que generan ingresos a la población son: tiendas, comedores, panaderías, ferreterías, librerías, carpinterías, salones de belleza, agroservicios, etc.

3.6 Clima

Koppen, *et al.*, (s.f.) citado por el Cáritas (2009); el clima está zonificado según la altura: sabana tropical caliente o tierra caliente de los 0-800 msnm.; sabana tropical caluroso o tierra templada de los 800-1,200 msnm.; y clima tropical de las alturas de los 1,200-2,700 msnm.

El régimen de viento predominante de la cuenca, se especifica de la siguiente manera: para la zona baja, el rumbo del viento es del norte en la estación seca y de rumbo sur en la estación lluviosa. Las brisas marinas ocurren después del mediodía, durante la noche se desarrolla el sistema local nocturno del viento con rumbos desde las montañas y colinas cercanas, con

velocidades promedio de 8 km. /h. En la zona media, el rumbo de los vientos es del norte para todo el año. Durante la noche se desarrolla el sistema local nocturno del viento con rumbos desde las montañas y colinas cercanas, la velocidad promedio es de 10 km/h. En la zona alta, los vientos son predominantes del rumbo norte en la estación seca y del rumbo sur-sureste en la estación lluviosa. Durante la noche se desarrolla el sistema local nocturno del viento con rumbos desde las montañas y colinas cercanas con velocidades promedio de 10-12 km/h.

En cuanto a la humedad relativa, esta oscila entre 60 y 85% de acuerdo al mes del año.

En cuanto a la temperatura, de acuerdo a datos registrados por el SNET. (2005) citado por Cáritas (2009), esta oscila entre 15-38° C dependiendo de la elevación en metros sobre el nivel del mar (msnm.), y los meses del año. El pico máximo de temperatura se alcanza en los meses de marzo y abril, con 38° C, lo cual solo ocurre en la parte baja de la cuenca. Mientras que las temperaturas mínimas alcanzadas son de 15° C en el mes de diciembre, y de, 16° C en los meses de enero y febrero, tanto en la parte media y alta de la cuenca ya que ambas se encuentran a mayor altura.

3.7 Uso actual de suelo

Comprende todas aquellas actividades agropecuarias que se desarrollan en el presente y de tal forma las tierras son utilizadas de acuerdo a las necesidades del hombre. En la mayor parte del territorio de la cuenca, se encuentra dedicado al sector agropecuario, que incluye el cultivo de café, caña de azúcar, pastos y la mayoría de granos básicos, así como también una buena área es forestal. Esta tendencia se puede observar en la tabla 3.4 en la cual se especifica cuánto es el área de cada uno de los rubros de mayor ocupación o explotación y el porcentaje que representa cada uno de estos.

Por otro lado se tiene una pequeña área de bosque natural, que en la actualidad ha sido declarada zona protegida, conocida actualmente como La Joya, ubicada al sureste del la cabecera departamental de San Vicente, así mismo la parte alta del volcán Chinchontepec que por sus altas pendientes representa una zona de gran peligro si se le elimina su cobertura vegetal. Anexo a este documento se puede encontrar el mapa de uso de suelo de la cuenca.

Tabla 3.4 Distribución por rubros y área cultivada en la cuenca del río Acahuapa

| Ocupación actual de suelo | Área (km ²) | Porcentaje (%) |
|---------------------------|-------------------------|----------------|
| Caña de azúcar | 36.51 | 16.04 |
| Áreas urbanas | 9.32 | 4.10 |
| Café | 9.92 | 4.36 |
| Pastos y granos básicos | 131.11 | 57.59 |
| Cuerpo de agua | 0.62 | 0.27 |
| Bosques naturales | 40.17 | 17.64 |
| Total | 227.65 | 100.00 |

Fuente: Elaboración propia (2010)

3.8 Geología

La clasificación geológica ha sido establecida en la tabla 3.5 de acuerdo al mapa geológico abordado en el anexo a este documento.

Tabla 3.5 Geología de la cuenca del río Acahuapa.

| Litología | Área (km ²) | Porcentaje (%) |
|--|-------------------------|----------------|
| "Tierra blanca": piroclástitas ácidas y epiclastitas volcánicas subordinadas; localmente efusivas ácidas | 34.17 | 15.01 |
| Conos de acumulación (escorias, tobas de lapilli, cinder) | 0.24 | 0.11 |
| Depósitos sedimentarios del Cuaternario | 24.40 | 10.72 |
| Efusivas ácidas e intermedias ácidas | 2.14 | 0.94 |
| Efusivas básicas -intermedias, piroclástitas subordinadas | 16.72 | 7.35 |
| Efusivas básicas-intermedias | 98.97 | 43.47 |
| Epiclástitas volcánicas y piroclástitas; localmente efusivas básicas -intermedias intercaladas. | 2.99 | 1.31 |
| Piroclásticas ácidas, epiclásticas volcánicas | 47.40 | 20.82 |
| Agua | 0.62 | 0.27 |
| Total | 227.65 | 100.00 |

Fuente: Elaboración propia (2010)

4. RÉGIMEN DE LLUVIAS Y CRECIDAS

4.1 Régimen de lluvias

4.1.1 Lluvia multi-anual

Para poder analizar la lluvia en la cuenca, se utilizaron los datos de las estaciones beneficio Acahuapa, finca San Jacinto, finca El Carmen, Puente Cuscatlán, Santa Clara y Cojutepeque. Estas estaciones inician sus registros a partir del año 1971 a excepción del Beneficio Acahuapa cuyos registros datan desde 1982.

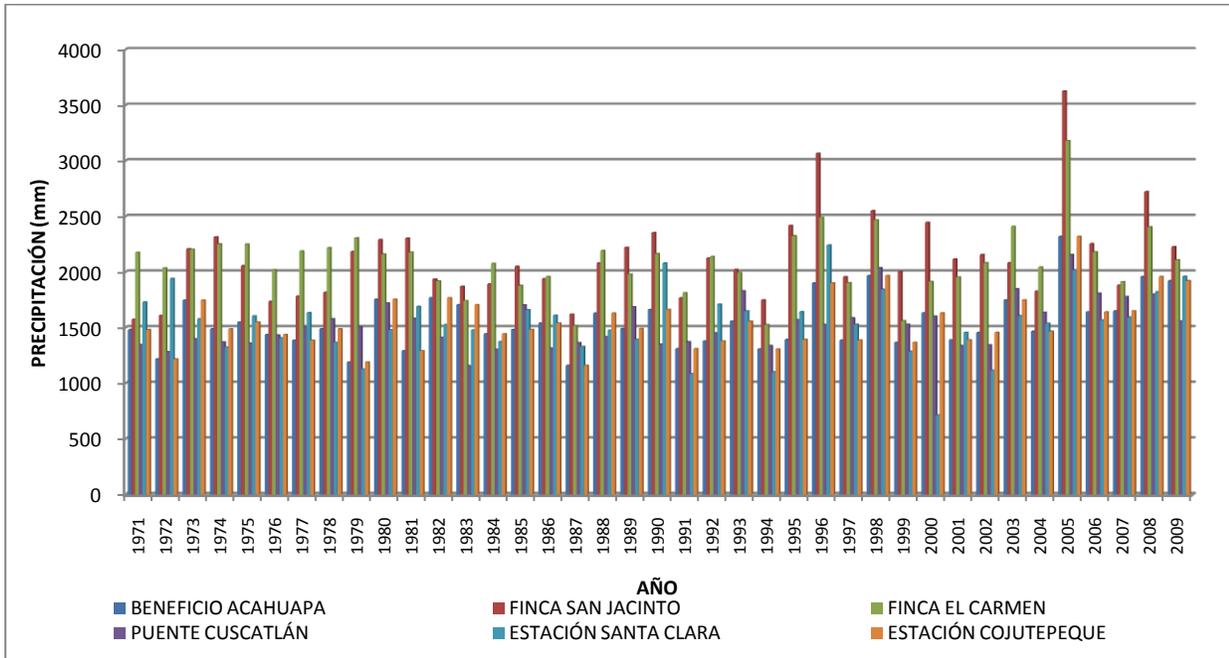
En la parte alta se ubican las estaciones finca San Jacinto (fuera de la cuenca) y finca El Carmen, en la parte media de la cuenca se ubican las estaciones beneficio Acahuapa y Santa Clara, en la parte baja se ubica la estación del Puente Cuscatlán (fuera de la cuenca); además se ha considerado la estación de Cojutepeque por poseer un registro histórico de datos considerables. En el anexo se ubica un mapa de ubicación de estas estaciones.

Debido a que las series de registro de lluvia presentan períodos incompletos, fue necesario realizar un relleno de datos, para el cual se utilizó el programa CHAC (Cálculo Meteorológico de Aportaciones y Crecidas) que ha sido desarrollado por el Centro de Estudios Hidrográficos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) del gobierno español. El programa requiere que existan al menos 3 estaciones completas para poder hacer el relleno de las demás estaciones. En este caso, se utilizaron las estaciones puente Cuscatlán, Cojutepeque y San Jacinto para realizar el relleno de la precipitación mensual en las estaciones incompletas.

En la figura 4.1 se muestra el comportamiento anual de la lluvia en las estaciones mencionadas, es de hacer notar en dicha figura, en la zona alta de la cuenca tiende a haber mayores precipitaciones que en la parte media y baja.

La lluvia media anual durante el período mencionado, para las estaciones climáticas se estima en: finca San Jacinto 2,125 mm, finca El Carmen 2,099 mm, beneficio Acahuapa 1,556 mm, Santa Clara 1,546 mm, Puente Cuscatlán 1,537 mm y Cojutepeque 1,556 mm. Custodio & Llamas (2001), se refieren a este valor como módulo pluviométrico anual medio, estimado como la media aritmética de la lluvia anual durante una serie de años.

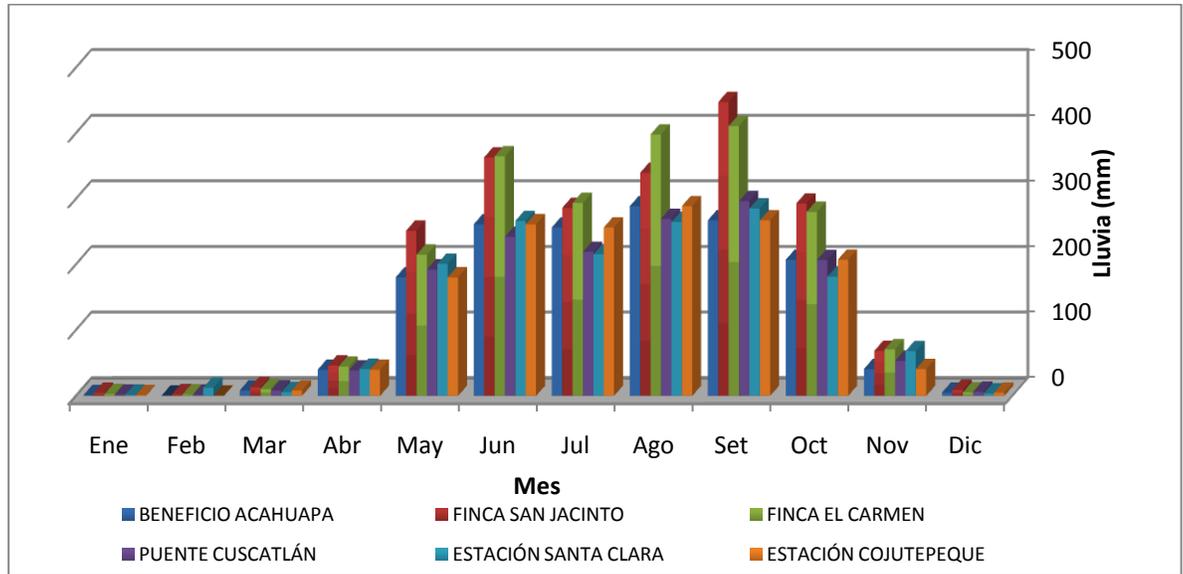
Figura 4.1 Lluvia anual en las estaciones climáticas



4.1.2 Lluvia mensual

Fuentes (2008) menciona que 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 de estaciones climáticas de las Fincas San Jacinto y El Carmen es bastante similar debido a su proximidad, además se nota una similitud entre las estaciones restantes. Es importante destacar que los meses de mayor acumulación de lámina de lluvia son los de agosto y septiembre.

Figura 4.2 Precipitación media mensual.

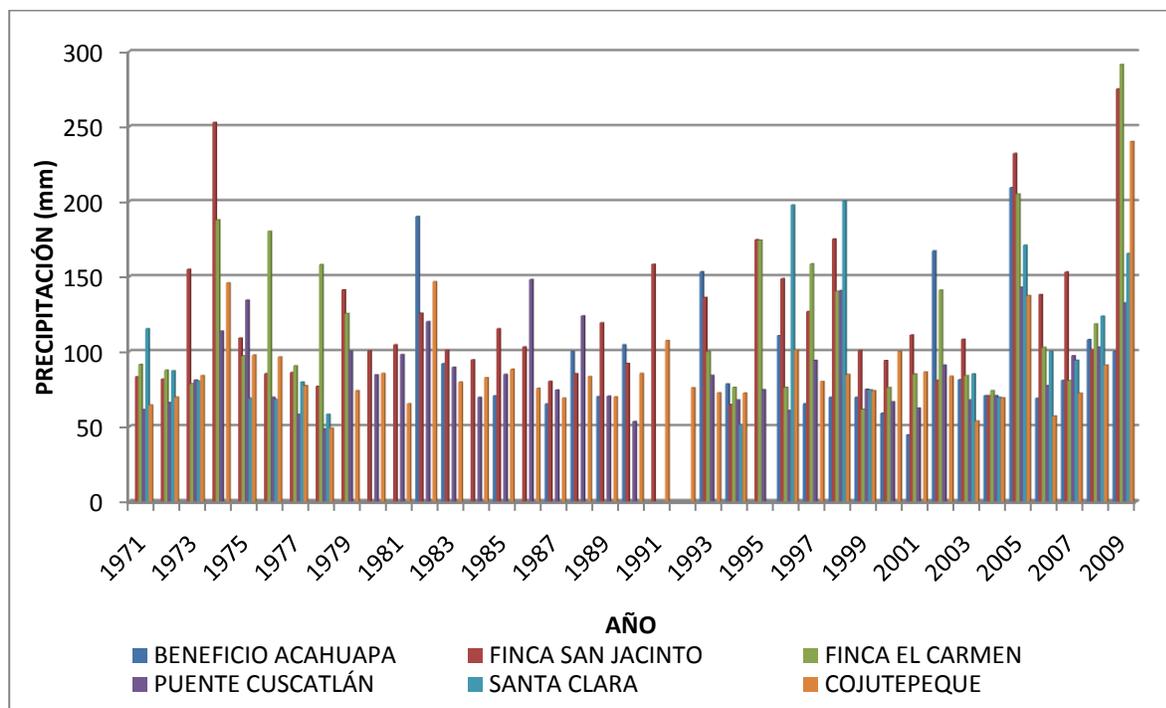


4.1.3 Lluvia diaria

Fuentes (2008) indica que 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.

Para la TT (tormenta tropical) Ida, el día 7 de noviembre del 2009, la estación instalada en la finca El Carmen registró un total de 291 mm. Para el mismo día, en la finca San Jacinto se registraron 275 mm, en la estación Cojutepeque se registraron 240 mm, 165 mm en la estación Santa Clara, 132 mm en el Puente Cuscatlán. Adicionalmente se registraron 357 mm en la estación telemétrica instalada en el volcán de San Vicente. Es importante aclarar que en los apartados anteriores no se menciona esta última estación ya que inició operaciones recientemente y no se contó con la base de datos para el presente estudio.

Figura 4. 3 Lluvia máxima diaria



Como se puede observar en la figura anterior, no todos los registros del evento climatológico Ida corresponden al mayor registro histórico de las estaciones.

4.1.4 Análisis estadístico de la 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 al total de años de registrados de las estaciones climáticas, se realizó el análisis estadístico de las mismas. Las distribuciones teóricas de distribución de frecuencia utilizadas fueron: Normal, Log Normal 2 parámetros, Log Normal 3 parámetros, Gamma 2 parámetros, Gamma 3 parámetros, Log Pearson tipo III, Gumbel y Log-Gumbel, estimando los parámetros con momentos convencionales. El ajuste de los datos considerados de lluvia diaria máxima a las curvas teóricas de distribución de frecuencia se muestra de las figuras 4.4 a 4.9.

Figura 4.4 Distribuciones estadísticas de lluvia, San Jacinto

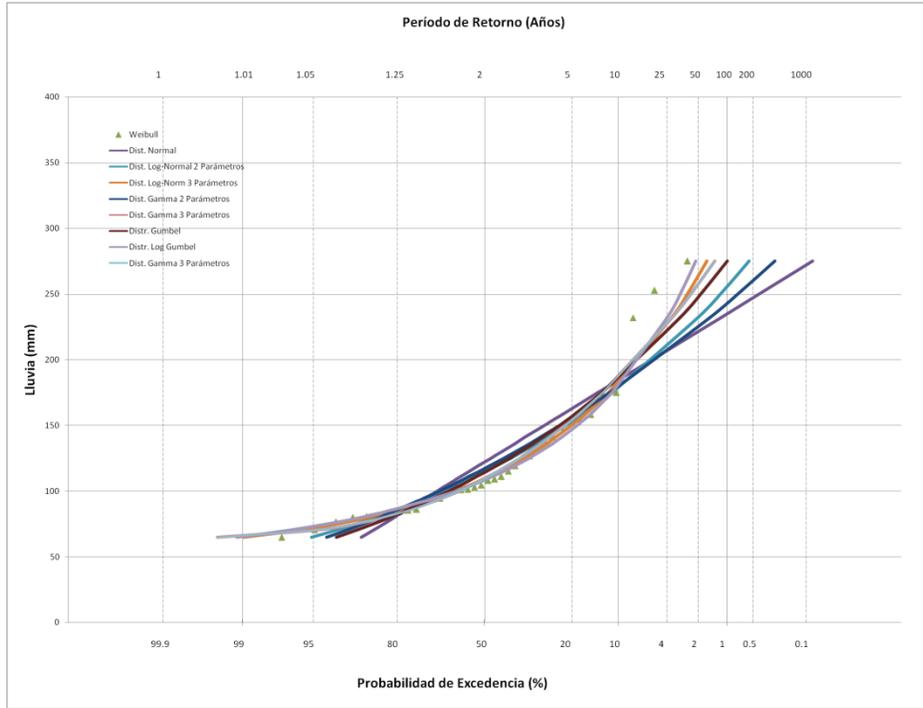


Figura 4.5 Distribuciones estadísticas de lluvia, Finca El Carmen

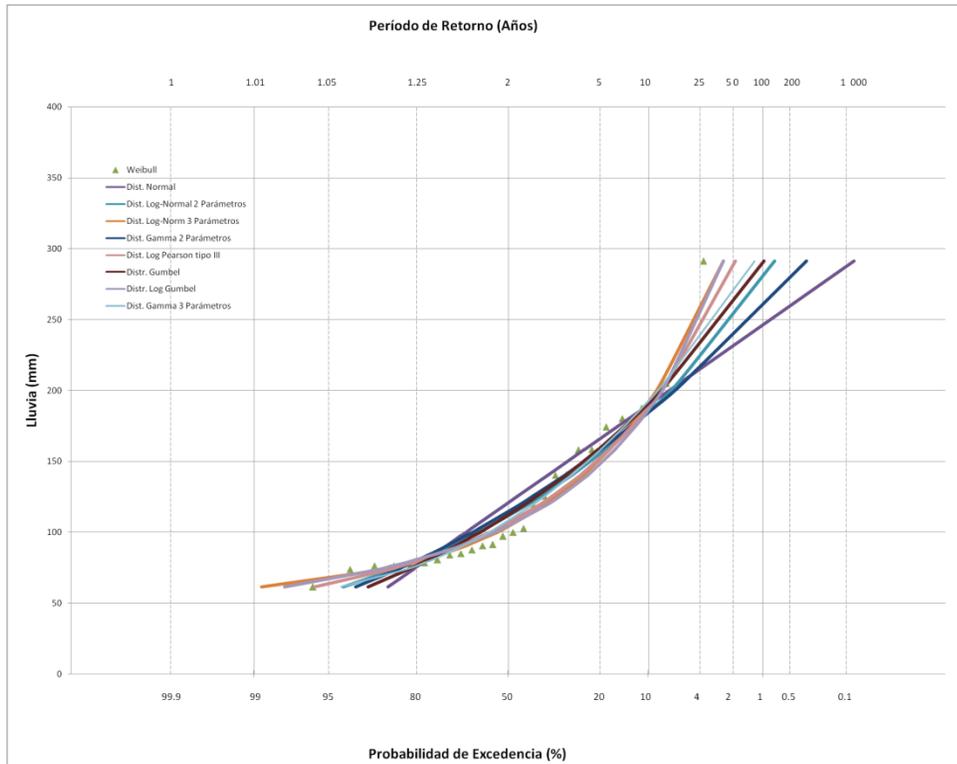


Figura 4. 6 Distribuciones estadísticas de lluvia, Puente Cuscatlán

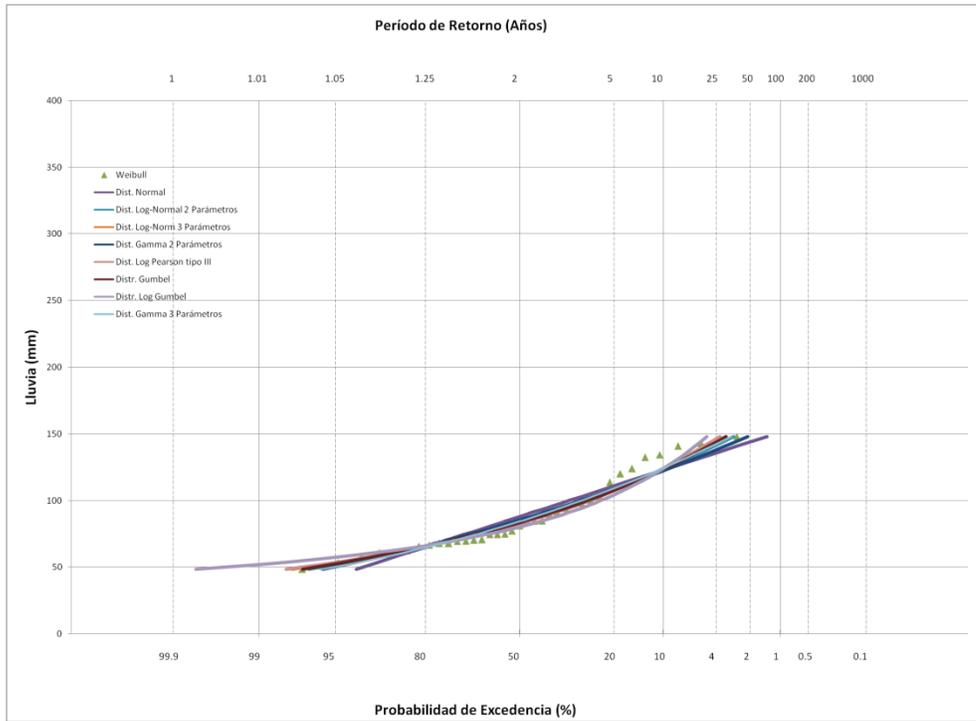


Figura 4. 7 Distribuciones estadísticas de lluvia, Santa Clara

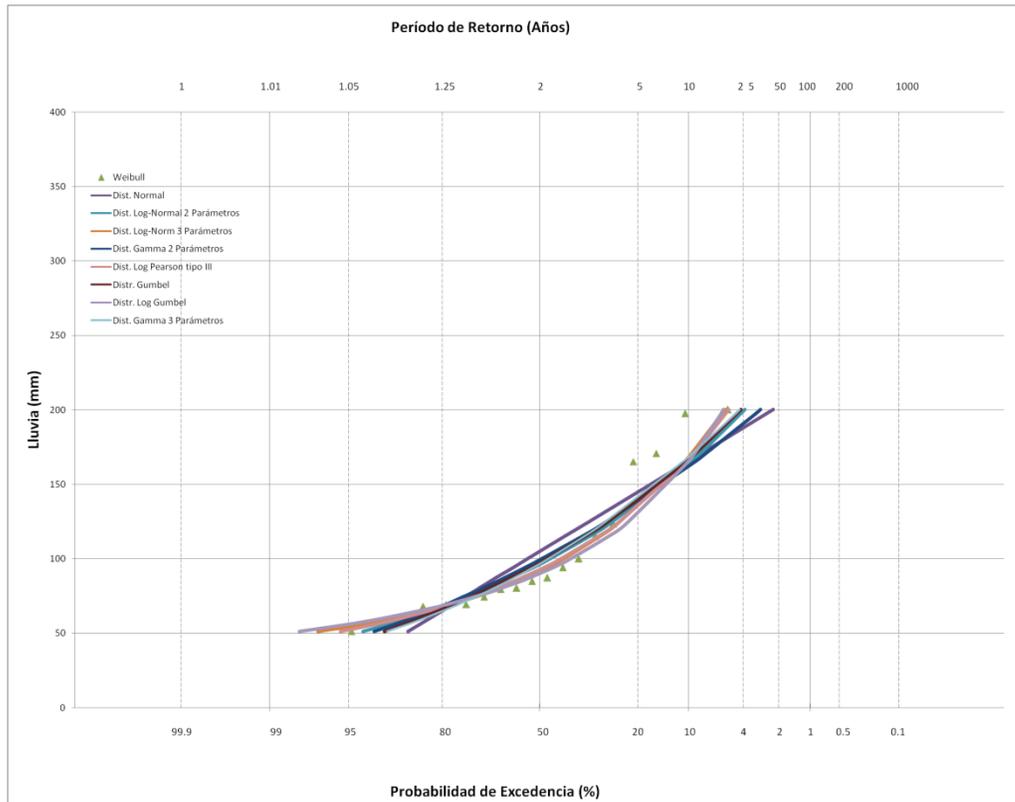


Figura 4. 8 Distribuciones estadísticas de lluvia, Beneficio Acahuapa

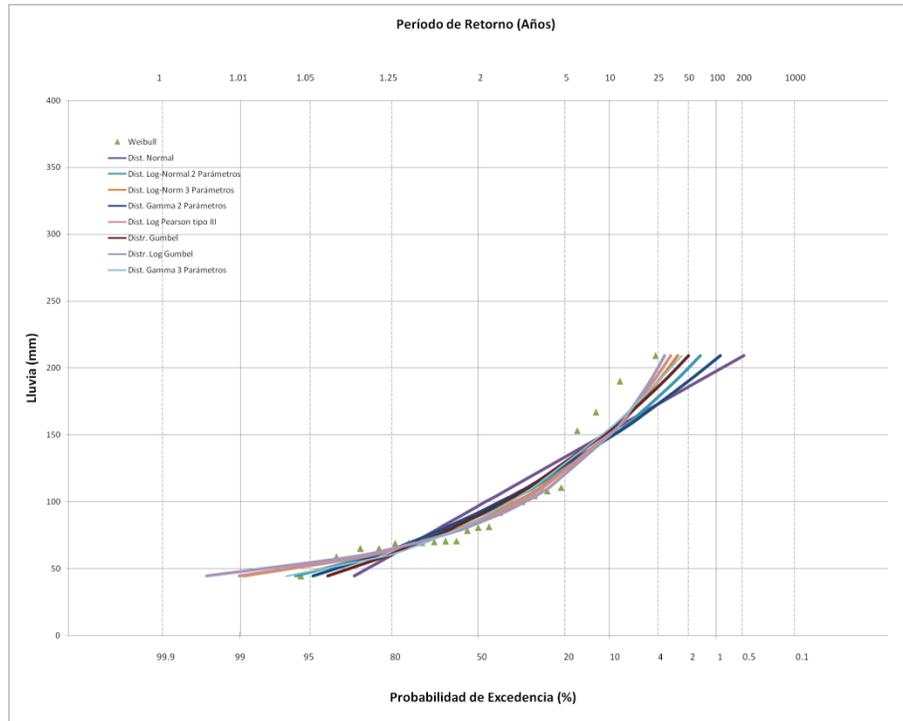
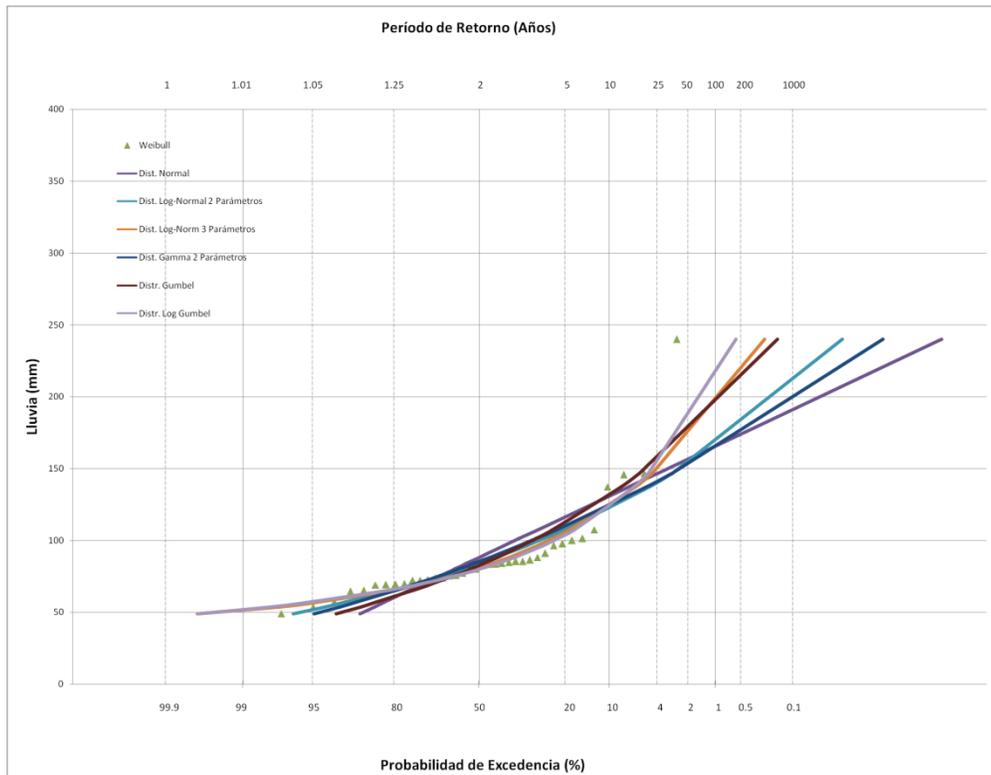


Figura 4. 9 Distribuciones estadísticas de lluvia, Cojutepeque



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).

La lluvia de 24 horas para diferentes períodos de retorno en las estaciones, considerando su mejor ajuste y que la lluvia en 24 horas es 1.13 veces la lluvia diaria, se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 4.1 Lluvia de 24 horas para las distintas estaciones

| T (años) | Finca San Jacinto (mm) | Finca El Carmen (mm) | Puente Cuscatlán (mm) | Santa Clara (mm) | Beneficio Acahuapa (mm) | Cojutepeque (mm) |
|----------|------------------------|----------------------|-----------------------|------------------|-------------------------|------------------|
| 10 | 205 | 217 | 139 | 190 | 170 | 139 |
| 25 | 257 | 287 | 174 | 246 | 219 | 172 |
| 50 | 301 | 347 | 204 | 293 | 261 | 203 |
| 100 | 350 | 416 | 240 | 344 | 308 | 238 |

Fuente: Elaboración propia (2010)

4.1.5 Lluvia media en la cuenca

En la cuenca del río Acahuapa la mejor manera de representar lluvia es mediante el uso de isoyetas ya que las lluvias son del 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. Chow *et al* (1994) define a una isoyeta como un contorno de lluvia constante y los mapas de isoyetas se construyen interpolando información de lluvia que se registra en sitios con pluviógrafos. Una vez que el mapa de isoyetas se construye, se mide el área A_j entre cada par de isoyetas en la cuenca y se multiplica por el promedio P_j de las

profundidades de lluvia de las dos isoyetas adyacentes para calcular la precipitación promedio sobre el área mediante la ecuación 4.1

$$\bar{P} = \frac{1}{A} \sum_{j=1}^J A_j P_j \quad \text{Ec. 4.1}$$

Como se mencionó en la tabla 3.2, los diferentes puntos de control son el beneficio Acahuapa, la estación Santa Elena (correspondiente a la comunidad Santa Elena), el puente San Vicente y la estación Obrajuelo. En los casos de Beneficio Acahuapa y Santa Elena se consideraron estos puntos porque las comunidades cercanas quedan incomunicadas con las crecidas del río Acahuapa. Cercano al puente San Vicente, se ubica la Comunidad 2 Puentes, la cual fue golpeada con la crecida del río Acahuapa en el evento Ida registrándose 30 personas fallecidas. La estación hidrométrica Obrajuelo tiene registros de caudales de la década de los 70's, actualmente se encuentra fuera de operación.

La lluvia media en los puntos de control considerando un período continuo de 24 horas, para diferentes períodos de retorno se muestra en la tabla 4.2. Anexo a este documento se ubican los mapas de isoyetas para períodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años.

Tabla 4.2 Lluvia media hasta puntos de control

| Períodos de retorno (años) | Beneficio Acahuapa (mm) | Santa Elena (mm) | Puente San Vicente (mm) | Obrajuelo (mm) |
|----------------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|----------------|
| 10 | 190 | 187 | 189 | 184 |
| 25 | 246 | 242 | 245 | 240 |
| 50 | 302 | 296 | 296 | 287 |
| 100 | 351 | 345 | 351 | 354 |

Fuente: Elaboración propia (2010)

4.1.6 Descripción de la tormenta tropical Ida

MARN (2009) menciona que a partir del día miércoles 4 de noviembre, la tormenta tropical Ida, el noveno sistema con nombre de la cuenca del Atlántico de acuerdo al Centro Nacional del Huracanes se ubicó en las costas caribeñas de Nicaragua, cercana a la isla de Bluefields. Esta tormenta junto a un sistema de baja presión, ubicado al sur de las costas pacíficas de El Salvador, comenzó a activar la zona de convergencia intertropical (ITCZ), produciendo lluvias de moderada intensidad, dispersas y con mayor frecuencia en la franja costera, cordillera volcánica, zona central y oriental del país.

El día jueves 5 de noviembre, la TT Ida se fortaleció por unas horas y fue reclasificado a huracán categoría 1, pero luego, al ingresar a territorio nicaragüense, fue degradado a tormenta tropical y continuó debilitándose, desplazándose hacia el noroeste. Así mismo, la baja presión continuó semi-estacionaria frente a las costas de Guatemala y El Salvador.

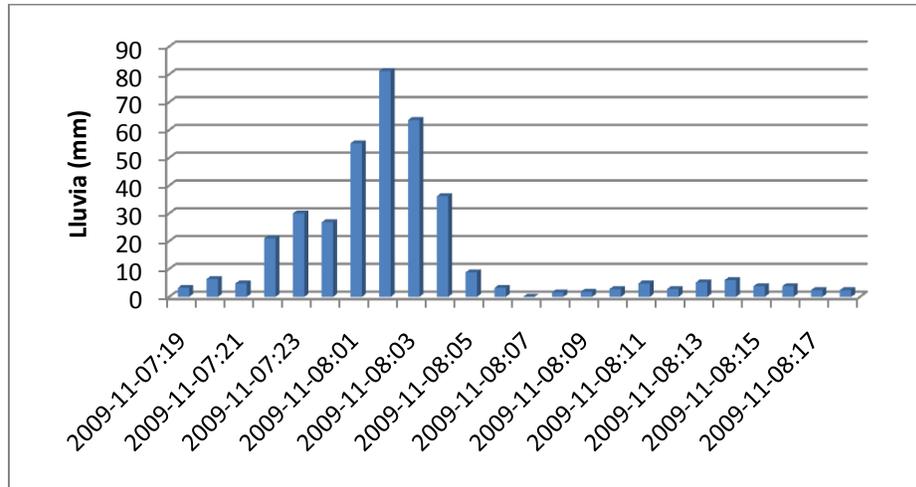
El día viernes 6 de noviembre, la TT Ida perdió fuerza y se convirtió en depresión tropical, continuando su movimiento sobre territorio de Honduras con tendencia a seguir desplazándose hacia el norte-noroeste. Sin embargo, la baja presión persistía al suroeste de El Salvador desplazando abundante humedad hacia el territorio salvadoreño.

El sábado 7 de noviembre la TT Ida se fortaleció en aguas del mar Caribe. El sistema de baja presión ubicado al suroeste de El Salvador, se observó en proceso de debilitamiento. Sin embargo, a partir del medio día, se comenzaron a registrar lluvias de moderada intensidad, principalmente en la zona paracentral.

Entre las 9:00 y las 10:00pm la TT Ida comenzó a fortalecerse lo cual contribuyó a que el campo nuboso asociado a la baja presión se modulara y amplificara sobre la zona central. A las 10:00pm las lluvias se incrementaron significativamente en la zona de los departamentos de San Salvador, La Paz y San Vicente.

La TT IDA fue reclasificada a huracán categoría 1 en la escala Saffir Simpsom a las 11:15pm. La baja presión continuó su incidencia con lluvias intensas y continuas, concentrándose en San Salvador entre las 8:00pm del sábado 7 y las 2:00am del domingo 8 de noviembre de 2009. En el departamento de San Vicente, la mayor cantidad de lluvia registrada en un período de 24 horas fue en la estación del volcán de San Vicente entre las 7 pm del día 7 hasta las 6 pm del día 8 de noviembre. La distribución temporal de la lluvia se muestra en el hietograma de 24 horas de la figura 4.10.

Figura 4. 10 Hietograma de la TT Ida, Estación San Vicente



4.2 Régimen de crecidas

4.2.1 Estaciones hidrométricas

En la cuenca del río Acahuapa no se cuenta con una estación hidrométrica en funcionamiento. La estación Obrajuelo se encuentra en desuso y su registro data períodos incompletos del año 72 al año 80, siendo imposible haber registrado eventos como Mitch, Stan e Ida.

4.2.2 Modelo lluvia – escorrentía

Para poder transformar la lluvia a escorrentía se utilizó el modelo hidrometeorológico HEC-HMS, utilizando la metodología propuesta por Soil Conservative Service (SCS), citada por la NRCS (National Resources Conservation Service), 2004. Para ello es necesario determinar el número de curva NC el cual se obtiene a partir de los diferentes usos de suelo. En la cuenca, los usos se mencionaron en la tabla 3.4 y se establecen los números de curva (tabla 4.3) hasta los puntos de control mencionados en los párrafos anteriores. Se supuso grupo hidrológico de suelo A, condiciones antecedentes de humedad (AMC por sus siglas en inglés) del tipo III, es decir condiciones húmedas y abstracciones iniciales nulas (tabla 4.4).

Tabla 4. 3 Número de curva (CN II) hasta puntos de control

| USO DE SUELO | CN II | Beneficio Acahuapa (km ²) | Santa Elena (km ²) | Puente San Vicente (km ²) | Obrajuelo (km ²) |
|-------------------------|-------|---------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|
| Caña de azúcar | 43 | 12.54 | 12.75 | 23.12 | 36.51 |
| Áreas urbanas | 86 | 0.78 | 0.78 | 1.93 | 9.32 |
| Café | 30 | 4.75 | 4.75 | 7.23 | 9.92 |
| Pastos y granos básicos | 39 | 4.84 | 8.53 | 16.55 | 124.29 |
| Cuerpo de agua | 100 | 0 | 0.00 | 0.00 | 0.59 |
| Bosques naturales | 30 | 0 | 0.00 | 0.00 | 35.67 |
| Área Total | 43 | 22.92 | 26.80 | 48.83 | 216.31 |
| CN ponderado | | 40.93 | 40.68 | 41.42 | 39.97 |

Fuente: Elaboración propia (2010)

El modelo de transformación empleado fue mediante el hidrograma unitario del SCS. Chow *et al* (1994) menciona que un estudio de los hidrogramas unitarios de muchas cuencas rurales grandes y pequeñas indica que el tiempo de retardo (*lag time*) equivale al 60% del tiempo de concentración de la cuenca (Véase tablas 3.2 y 4.4).

Tabla 4.4 Datos para el modelo lluvia-escorrentía

| | Beneficio Acahuapa | Santa Elena | Puente San Vicente | Obrajuelo |
|-------------------------|--------------------|-------------|--------------------|-----------|
| CN III | 61.44 | 61.20 | 61.92 | 60.50 |
| Tiempo de retardo (min) | 34.81 | 44.92 | 55.84 | 127.03 |

Fuente: Elaboración propia (2010)

Por otra parte, la distribución temporal de una tormenta tiene un rol importante en la respuesta hidrológica de cuencas de tamaño medio. Para una altura de lluvia dada y una duración, la elección de la distribución temporal la de lluvia adimensional permite el desarrollo del hietograma de una tormenta de diseño.

Para una cierta altura de lluvia y una duración, una distribución temporal uniforme producirá una respuesta lenta, con un pico relativamente bajo y un tiempo de base largo. Por el contrario, una distribución temporal altamente no uniforme producirá una respuesta rápida, con un pico relativamente alto y un tiempo de base corto. En la práctica, una elección juiciosa de la distribución temporal (o alternativamente, una tormenta diseño) es necesaria para el cálculo seguro de picos de flujo usando técnicas de modelado de cuencas.

Una distribución temporal de diseño puede ser derivada localmente o regionalmente. Las distribuciones de lluvia temporal adimensionales están expresadas en porcentaje de duración de la lluvia en las abscisas y porcentaje de altura de lluvia en las ordenadas. Alternativamente, la duración puede ser fijada a valores establecidos y solamente las ordenadas expresadas como porcentaje de gravedad de lluvia.

El Servicio de Conservación de Suelos ha desarrollado varias distribuciones temporales generalizadas aplicables a los Estados Unidos, entre ellas las 24-h Tipos I, IA, II, y III. Para nuestro medio sería osado la utilización de la distribución temporal de otros países, no obstante, siguiendo la misma línea se sugiere utilizar distribuciones de tormentas conocidas y que hayan causado efectos relevantes; por tal razón, la lluvia media hasta los puntos de control mostrados en la tabla 4.2 fue distribuida en porcentaje según el registro horario de la estación del volcán de San Vicente de la TT Ida (véase figura 4.11). Con ello se generaron diferentes hidrogramas para los períodos de retorno en estudio. Los caudales máximos de dichos hidrogramas son presentados en la tabla 4.5. No se consideró la TT Stan porque según se conversó con las comunidades, no causó mayores daños en la zona, tal y como era de esperarse pues las lluvias pequeñas y prolongadas tienden a causar mayores daños en cuencas grandes; las lluvias muy intensas provocan crecidas en pequeñas cuencas. En figura 4.11 se observa también la diferencia entre la TT Stan (una tormenta constante y sostenida) y la TT Ida (una tormenta no uniforme). SNET (2005), sostiene que para la TT Stan se registraron 365.8 mm de lluvia acumulada en 6 días, los cuales son 12 mm menos que los registros de Ida en un período de 24 horas

Figura 4. 11 Lluvia acumulada

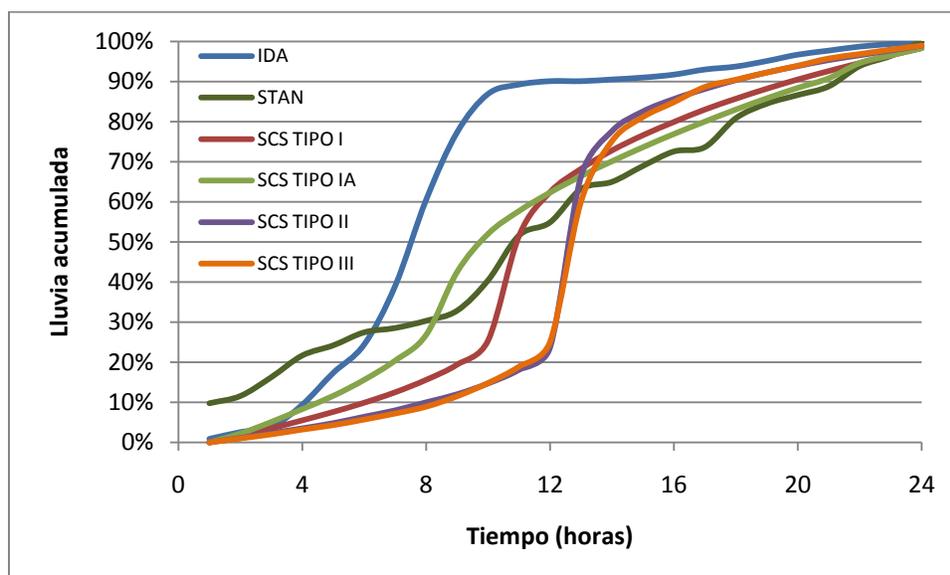


Tabla 4.5 Caudales máximos generados mediante el modelo lluvia-escorrentía

| TR (años) | Beneficio Acahuapa (m3/s) | Santa Elena (m3/s) | Puente San Vicente (m3/s) | Obrajuelo (m3/s) |
|-----------|---------------------------|--------------------|---------------------------|------------------|
| 10 | 149.90 | 166.78 | 301.06 | 1018.95 |
| 25 | 216.90 | 239.2 | 434.98 | 1485.54 |
| 50 | 286.80 | 312.14 | 558.08 | 1909.82 |
| 100 | 350.26 | 384.59 | 694.17 | 2519.50 |

Fuente: Elaboración propia (2010)

4.2.3 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. Orozco citado por Fuentes (2008), 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.

Algunas de las características de las estaciones hidrométricas utilizadas en el análisis se muestran a continuación:

Tabla 4.6 Características de las estaciones utilizadas en el análisis regional

| Estación | Río | Cuenca | Elevación (msnm) | Área (km ²) | Años de registros | Estado actual |
|--------------|-----------|-----------|---------------------|----------------------------|----------------------|------------------|
| Atalaya | San Pedro | San Pedro | 3.20 | 102 | 39 | En operación |
| La Hachadura | Paz | Paz | 30.19 | 1991 | 39 | En operación |
| Guazapa | Acelhuate | Lempa | 320.84 | 366 | 14 | En operación |
| Las Pavas | Suquiapa | Lempa | 264.57 | 435 | 26 | En operación |
| El Jocote | Sucio | Lempa | 322 | 724 | 29 | En operación |
| Suchitoto | Quezalapa | Lempa | 198.92 | 407 | 10 | En operación |
| Obrajuelo | Acahuapa | Lempa | 21.66 | 225 | 8 | No opera |

Fuente: SNET (2010)

A. Relación área – caudal índice

El método de análisis regional de acuerdo con Orozco citado por Fuentes. (2008), 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:

$$Q_I = \sum_{i=1}^n \frac{Q_a}{n} \quad \text{Ec. 4.2}$$

Donde:

Q_I = Caudal índice (m³/s).

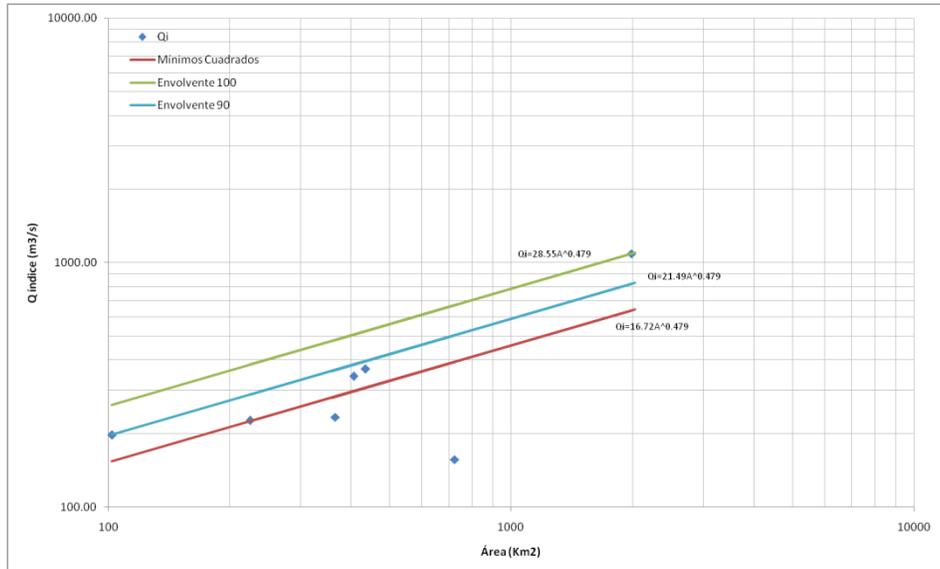
Q_a = Caudal máximo anual (m³/s).

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:

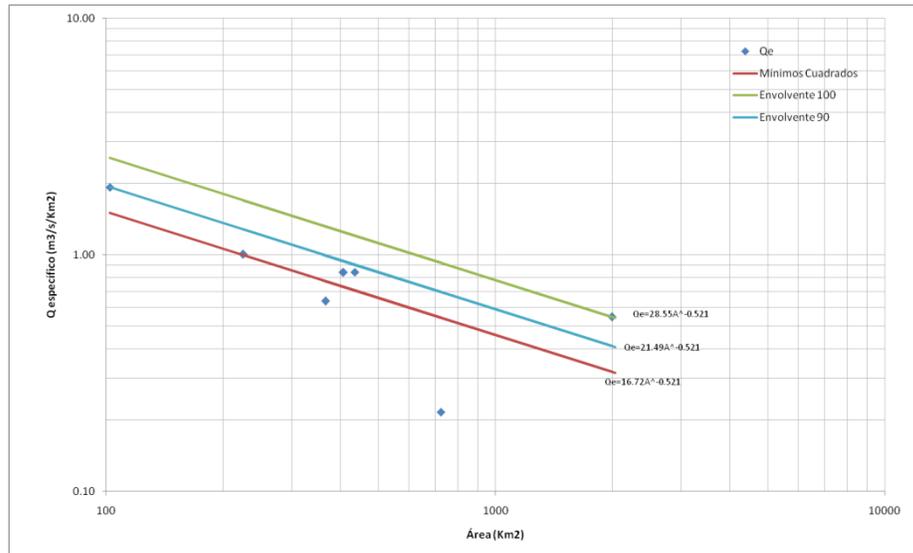
Figura 4.12 Caudal índice vrs área de 7 cuencas hidrográficas



La ecuación potencial que se deduce es $y = 16.72 x^{0.479}$, con un coeficiente de determinación de 0.48, al sustituir el caudal índice y el área se obtiene $Q_I = 16.72 A^{0.479}$. 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 graficarlas con el área se obtiene lo siguiente:

Figura 4. 13 Caudal específico vrs área de 7 cuencas hidrográficas



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 Normal, Log Normal 2 parámetros, Log Normal 3 parámetros, Gamma 2 parámetros, Gamma 3 parámetros, Log Pearson tipo III, Gumbel y Log-Gumbel, estimando los parámetros con momentos convencionales. El ajuste de los datos considerados de lluvia diaria máxima a las curvas teóricas de distribución de frecuencia se muestra en las figuras 4.14 a 4.20.

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.

Figura 4. 14 Distribuciones estación Atalaya

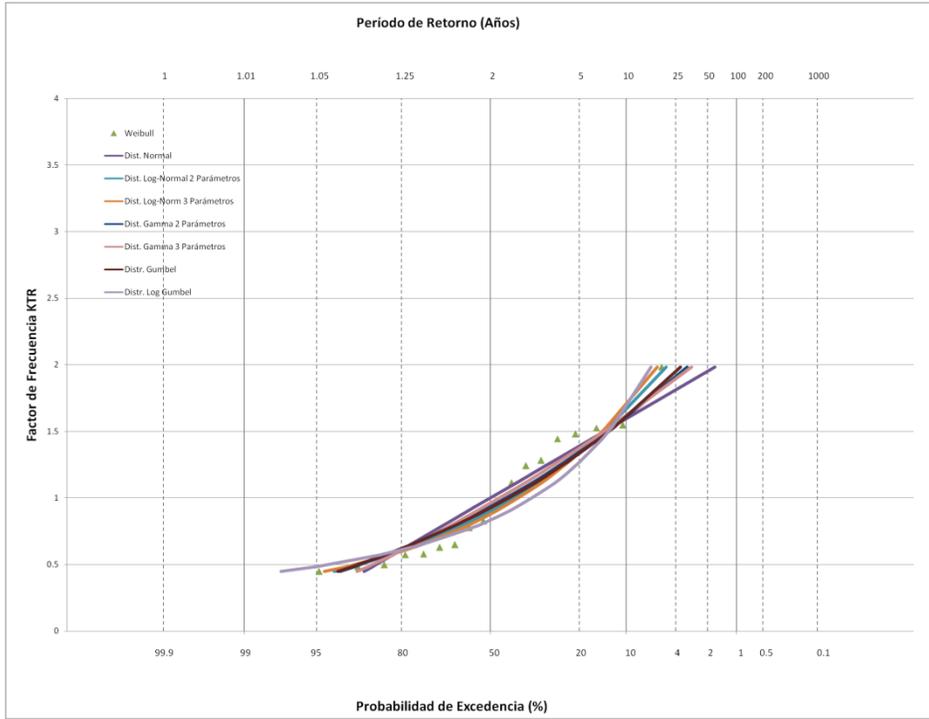


Figura 4. 15 Distribuciones estación La Hachadura

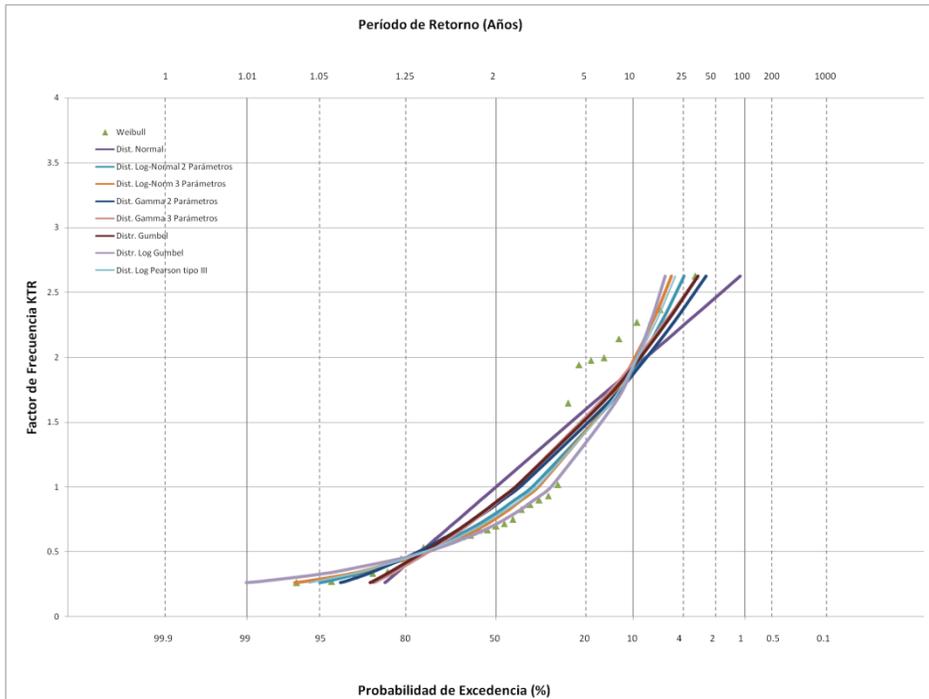


Figura 4. 16 Distribuciones estación Guazapa

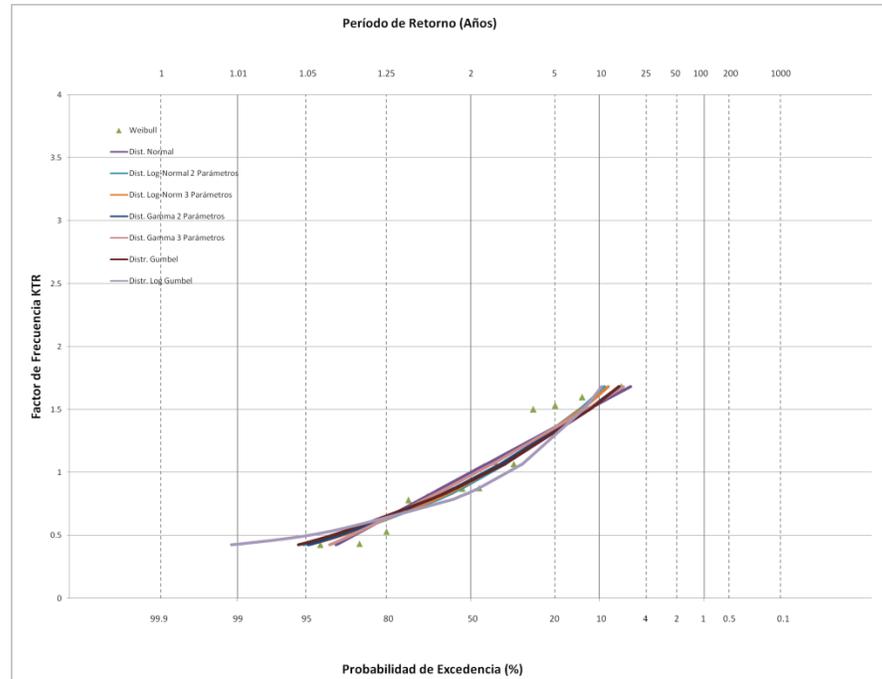


Figura 4. 17 Distribuciones estación Las Pavas

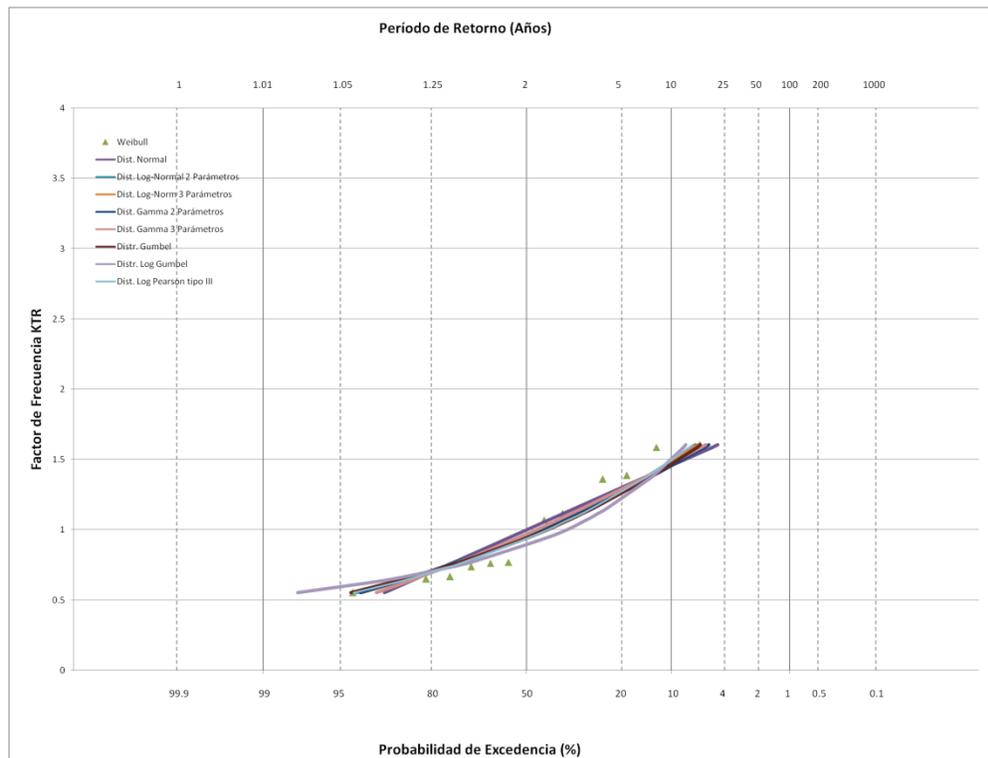


Figura 4. 18 Distribuciones estación El Jocote

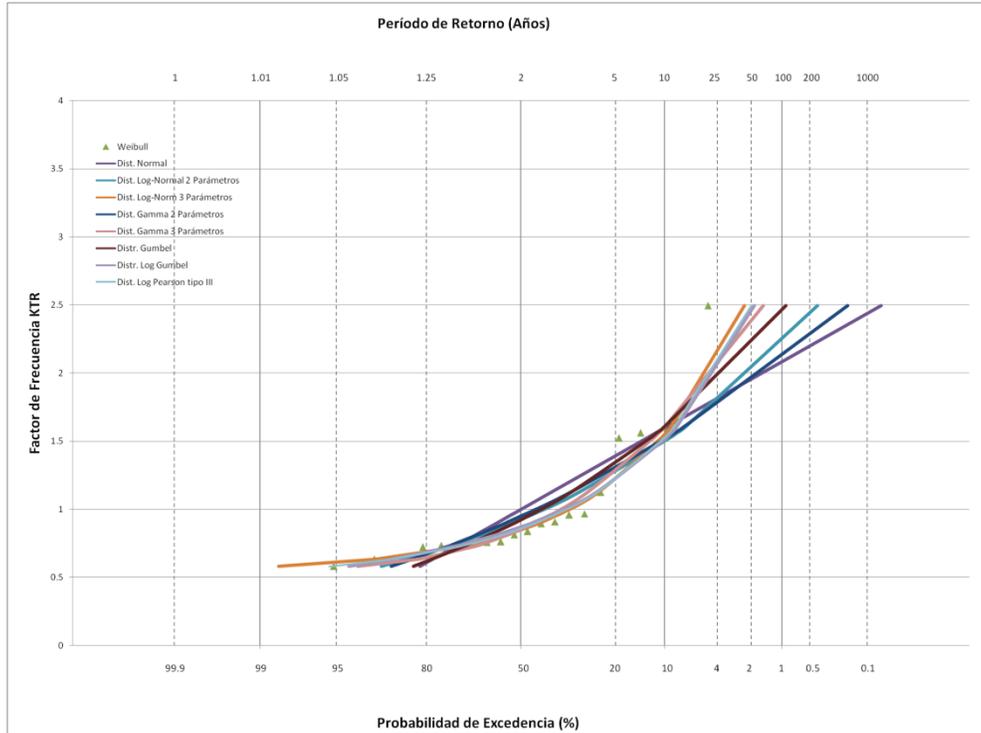


Figura 4. 19 Distribuciones estación Quezalapa

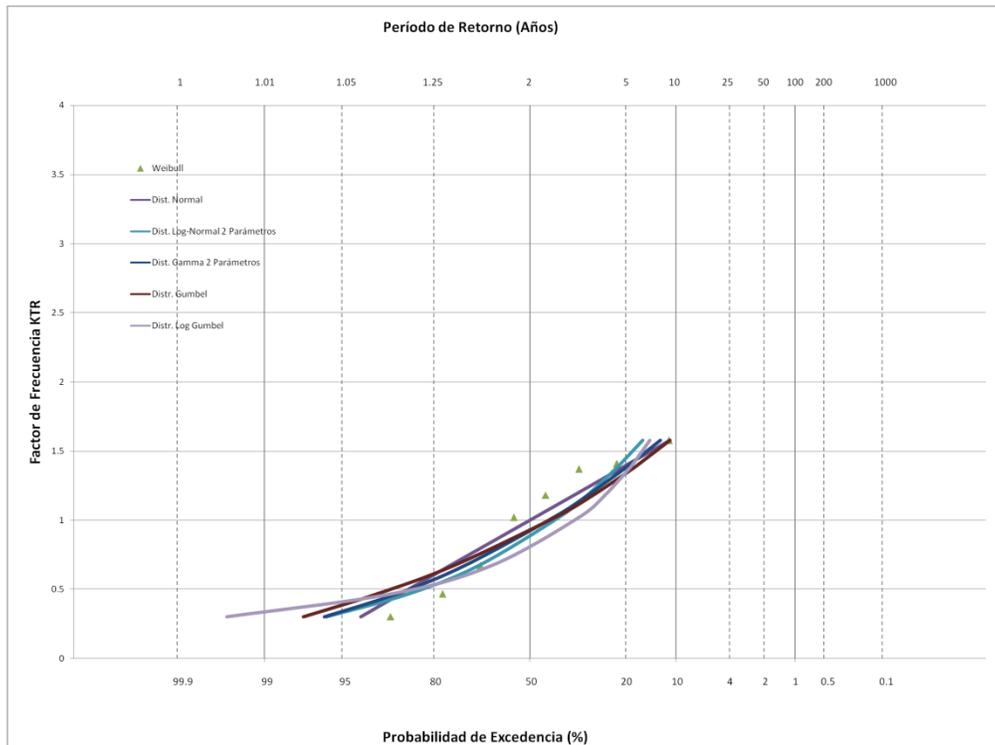
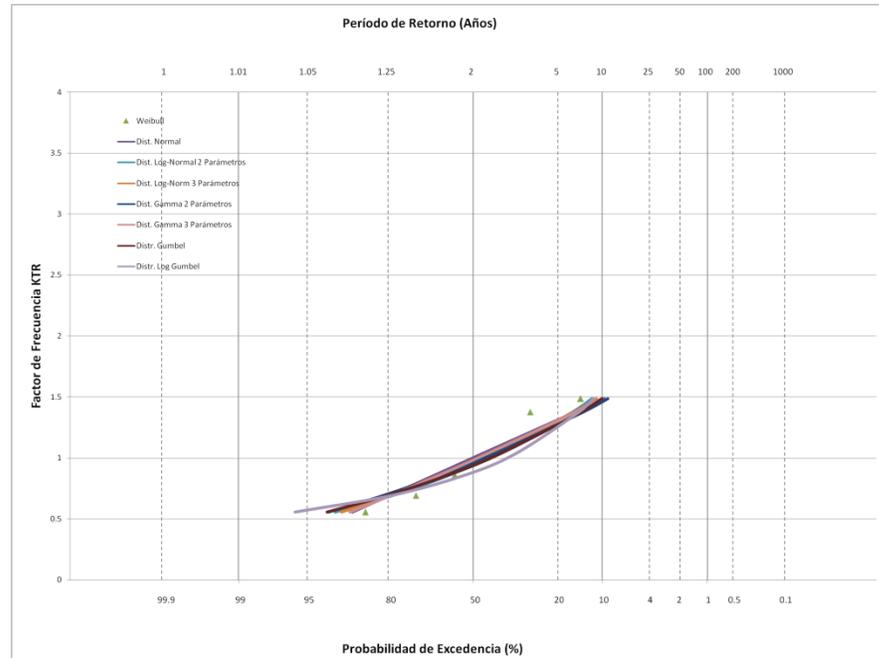


Figura 4. 20 Distribución estación Obrajuelo



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:

$$Q_{TR} = K_{TR} * Q_I \tag{Ec. 4.3}$$

Los factores de frecuencia que se deducen del análisis regional de crecidas se presentan en las tablas 4.7 a 4.13

Tabla 4. 7 Factores de frecuencia (K_{TR}) de distribuciones teóricas, estación La Atalaya.

| T (años) | Prob. Excedencia | Dist Normal | Dist. Log-Normal 2 Parámetros | Dist. Log-Normal 3 Parámetros | Dist. Gamma 2 Parámetros | Dist. Gamma 3 Parámetros | Log-Pearson tipo III | Dist. Gumbel | Dist. Log Gumbel |
|----------|------------------|-------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|--------------|------------------|
| 2 | 0.5 | 1.00 | 0.90 | 0.88 | 0.93 | 0.96 | N/A | 0.92 | 0.83 |
| 5 | 0.2 | 1.39 | 1.34 | 1.34 | 1.35 | 1.37 | N/A | 1.33 | 1.27 |
| 10 | 0.1 | 1.59 | 1.66 | 1.69 | 1.60 | 1.61 | N/A | 1.60 | 1.68 |
| 25 | 0.04 | 1.81 | 2.07 | 2.18 | 1.91 | 1.89 | N/A | 1.95 | 2.38 |
| 50 | 0.02 | 1.95 | 2.39 | 2.58 | 2.12 | 2.08 | N/A | 2.20 | 3.09 |
| 100 | 0.01 | 2.08 | 2.72 | 3.01 | 2.33 | 2.25 | N/A | 2.45 | 4.00 |
| 1000 | 0.001 | 2.43 | 3.92 | 4.64 | 2.97 | 2.78 | N/A | 3.29 | 9.42 |

Fuente: Elaboración propia (2010)

Tabla 4. 8 Factores de frecuencia (K_{TR}) de distribuciones teóricas, estación La Hachadura.

| T (años) | Prob. Excedencia | Dist Normal | Dist. Log-Normal 2 Parámetros | Dist. Log-Normal 3 Parámetros | Dist. Gamma 2 Parámetros | Dist. Gamma 3 Parámetros | Log-Pearson tipo III | Dist. Gumbel | Dist. Log Gumbel |
|----------|------------------|-------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|--------------|------------------|
| 2 | 0.5 | 1.00 | 0.80 | 0.76 | 0.86 | 0.88 | 0.77 | 0.88 | 0.71 |
| 5 | 0.2 | 1.60 | 1.41 | 1.40 | 1.47 | 1.53 | 1.39 | 1.51 | 1.30 |
| 10 | 0.1 | 1.91 | 1.90 | 1.97 | 1.87 | 1.95 | 1.93 | 1.93 | 1.93 |
| 25 | 0.04 | 2.25 | 2.61 | 2.86 | 2.37 | 2.47 | 2.78 | 2.46 | 3.18 |
| 50 | 0.02 | 2.46 | 3.20 | 3.66 | 2.74 | 2.83 | 3.55 | 2.85 | 4.62 |
| 100 | 0.01 | 2.66 | 3.85 | 4.57 | 3.09 | 3.18 | 4.44 | 3.23 | 6.67 |
| 1000 | 0.001 | 3.20 | 6.47 | 8.58 | 4.23 | 4.30 | 8.54 | 4.51 | 22.57 |

Fuente: Elaboración propia (2010)

Tabla 4. 9 Factores de frecuencia (K_{TR}) de distribuciones teóricas, estación Guazapa.

| T (años) | Prob. Excedencia | Dist Normal | Dist. Log-Normal 2 Parámetros | Dist. Log-Normal 3 Parámetros | Dist. Gamma 2 Parámetros | Dist. Gamma 3 Parámetros | Log-Pearson tipo III | Dist. Gumbel | Dist. Log Gumbel |
|----------|------------------|-------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|--------------|------------------|
| 2 | 0.5 | 1.00 | 0.91 | 0.92 | 0.94 | 0.98 | N/A | 0.93 | 0.85 |
| 5 | 0.2 | 1.36 | 1.34 | 1.34 | 1.33 | 1.35 | N/A | 1.31 | 1.27 |
| 10 | 0.1 | 1.55 | 1.64 | 1.62 | 1.57 | 1.56 | N/A | 1.56 | 1.66 |
| 25 | 0.04 | 1.75 | 2.04 | 1.97 | 1.85 | 1.80 | N/A | 1.87 | 2.33 |
| 50 | 0.02 | 1.88 | 2.34 | 2.24 | 2.05 | 1.96 | N/A | 2.11 | 2.99 |
| 100 | 0.01 | 2.00 | 2.65 | 2.51 | 2.24 | 2.10 | N/A | 2.34 | 3.84 |
| 1000 | 0.001 | 2.32 | 3.76 | 3.44 | 2.83 | 2.54 | N/A | 3.11 | 8.77 |

Fuente: Elaboración propia (2010)

Tabla 4. 10 Factores de frecuencia (K_{TR}) de distribuciones teóricas, estación Las Pavas.

| T (años) | Prob. Excedencia | Dist Normal | Dist. Log-Normal 2 Parámetros | Dist. Log-Normal 3 Parámetros | Dist. Gamma 2 Parámetros | Dist. Gamma 3 Parámetros | Log-Pearson tipo III | Dist. Gumbel | Dist. Log Gumbel |
|----------|------------------|-------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|--------------|------------------|
| 2 | 0.5 | 1.00 | 0.94 | 0.95 | 0.96 | 0.97 | 0.94 | 0.94 | 0.89 |
| 5 | 0.2 | 1.30 | 1.27 | 1.28 | 1.27 | 1.29 | 1.27 | 1.26 | 1.22 |
| 10 | 0.1 | 1.46 | 1.49 | 1.48 | 1.45 | 1.47 | 1.50 | 1.47 | 1.50 |
| 25 | 0.04 | 1.63 | 1.76 | 1.73 | 1.67 | 1.68 | 1.79 | 1.73 | 1.95 |
| 50 | 0.02 | 1.73 | 1.96 | 1.92 | 1.82 | 1.82 | 2.01 | 1.93 | 2.38 |
| 100 | 0.01 | 1.83 | 2.16 | 2.10 | 1.96 | 1.96 | 2.23 | 2.12 | 2.89 |
| 1000 | 0.001 | 2.10 | 2.84 | 2.69 | 2.39 | 2.35 | 3.02 | 2.76 | 5.49 |

Fuente: Elaboración propia (2010)

Tabla 4. 11 Factores de frecuencia (K_{TR}) de distribuciones teóricas, estación El Jocote.

| T (años) | Prob. Excedencia | Dist Normal | Dist. Log-Normal 2 Parámetros | Dist. Log-Normal 3 Parámetros | Dist. Gamma 2 Parámetros | Dist. Gamma 3 Parámetros | Log-Pearson tipo III | Dist. Gumbel | Dist. Log Gumbel |
|----------|------------------|-------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|--------------|------------------|
| 2 | 0.5 | 1.00 | 0.93 | 0.85 | 0.95 | 0.85 | 0.86 | 0.92 | 0.87 |
| 5 | 0.2 | 1.39 | 1.27 | 1.21 | 1.30 | 1.28 | 1.22 | 1.33 | 1.21 |
| 10 | 0.1 | 1.60 | 1.50 | 1.55 | 1.51 | 1.60 | 1.53 | 1.61 | 1.51 |
| 25 | 0.04 | 1.81 | 1.78 | 2.10 | 1.76 | 2.04 | 2.03 | 1.95 | 1.99 |
| 50 | 0.02 | 1.95 | 2.00 | 2.61 | 1.94 | 2.37 | 2.50 | 2.21 | 2.44 |
| 100 | 0.01 | 2.08 | 2.21 | 3.20 | 2.11 | 2.70 | 3.05 | 2.46 | 3.00 |
| 1000 | 0.001 | 2.44 | 2.94 | 5.94 | 2.62 | 3.80 | 5.78 | 3.29 | 5.87 |

Fuente: Elaboración propia (2010)

Tabla 4. 12 Factores de frecuencia (K_{TR}) de distribuciones teóricas, estación Quezalapa.

| T (años) | Prob. Excedencia | Dist Normal | Dist. Log-Normal 2 Parámetros | Dist. Log-Normal 3 Parámetros | Dist. Gamma 2 Parámetros | Dist. Gamma 3 Parámetros | Log-Pearson tipo III | Dist. Gumbel | Dist. Log Gumbel |
|----------|------------------|-------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|--------------|------------------|
| 2 | 0.5 | 1.00 | 0.88 | N/A | 0.92 | N/A | N/A | 0.92 | 0.80 |
| 5 | 0.2 | 1.40 | 1.45 | N/A | 1.38 | N/A | N/A | 1.34 | 1.35 |
| 10 | 0.1 | 1.60 | 1.88 | N/A | 1.67 | N/A | N/A | 1.61 | 1.91 |
| 25 | 0.04 | 1.82 | 2.48 | N/A | 2.03 | N/A | N/A | 1.96 | 2.96 |
| 50 | 0.02 | 1.97 | 2.98 | N/A | 2.28 | N/A | N/A | 2.22 | 4.10 |
| 100 | 0.01 | 2.09 | 3.50 | N/A | 2.52 | N/A | N/A | 2.48 | 5.67 |
| 1000 | 0.001 | 2.45 | 5.51 | N/A | 3.28 | N/A | N/A | 3.32 | 16.53 |

Fuente: Elaboración propia (2010)

Tabla 4. 13 Factores de frecuencia (K_{TR}) de distribuciones teóricas, estación Obrajuelo.

| T (años) | Prob. Excedencia | Dist Normal | Dist. Log-Normal 2 Parámetros | Dist. Log-Normal 3 Parámetros | Dist. Gamma 2 Parámetros | Dist. Gamma 3 Parámetros | Log-Pearson tipo III | Dist. Gumbel | Dist. Log Gumbel |
|----------|------------------|-------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|--------------|------------------|
| 2 | 0.5 | 1.00 | 0.94 | 0.96 | 0.96 | 0.98 | N/A | 0.94 | 0.88 |
| 5 | 0.2 | 1.31 | 1.30 | 1.30 | 1.27 | 1.31 | N/A | 1.27 | 1.24 |
| 10 | 0.1 | 1.48 | 1.54 | 1.51 | 1.46 | 1.49 | N/A | 1.49 | 1.56 |
| 25 | 0.04 | 1.65 | 1.85 | 1.76 | 1.68 | 1.68 | N/A | 1.76 | 2.07 |
| 50 | 0.02 | 1.76 | 2.08 | 1.94 | 1.83 | 1.82 | N/A | 1.96 | 2.56 |
| 100 | 0.01 | 1.87 | 2.31 | 2.12 | 1.97 | 1.94 | N/A | 2.17 | 3.16 |
| 1000 | 0.001 | 2.15 | 3.10 | 2.67 | 2.41 | 2.29 | N/A | 2.84 | 6.32 |

Fuente: Elaboración propia (2010)

De las tablas anteriores se puede observar que para períodos de retorno mayores de 25 años las distribuciones Gamma de 2 y 3 parámetros generan factores cuyos valores se ubican entre las demás distribuciones. Además se observa que los factores de frecuencia estimados con la distribución de Gumbel son 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.

Para calcular un factor de frecuencia que sea aplicable a una cuenca, Orozco (2010) propone realizar un promedio ponderado considerando el número de registros en cada serie. De esta forma y tomando en cuenta la distribución que mejor se ajusta a cada serie, se obtiene como resultado los factores siguientes:

Tabla 4. 14 Factores de frecuencia (K_{TR}) a aplicarse a la cuenca.

| T (años) | Prob. Excedencia | K_{TR} Ponderado |
|----------|------------------|-----------------------|
| 2 | 0.5 | 0.86 |
| 5 | 0.2 | 1.32 |
| 10 | 0.1 | 1.69 |
| 25 | 0.04 | 2.25 |
| 50 | 0.02 | 2.73 |
| 100 | 0.01 | 3.27 |
| 1000 | 0.001 | 5.64 |

Fuente: Elaboración propia (2010)

Una vez obtenidos los factores de frecuencia, se aplica a la ecuación para el caudal índice. En este caso particular se consideró la envolvente del 90% ya que para cuencas pequeñas, la respuesta es rápida y los caudales son relativamente mayores a la tendencia de mínimos cuadrados. De esta forma, los caudales a considerarse en los puntos de control son los mostrados en la tabla 4.15:

Tabla 4. 15 Caudales estimados en los puntos de control.

| Períodos de Retorno (años) | Beneficio Acahuapa (m^3/s) | Santa Elena (m^3/s) | Puente San Vicente (m^3/s) | Obrajuelo (m^3/s) |
|----------------------------|--------------------------------|-------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| 10 | 159.85 | 176.01 | 234.62 | 478.83 |
| 25 | 212.20 | 233.66 | 311.46 | 635.66 |
| 50 | 257.42 | 283.45 | 377.84 | 771.13 |
| 100 | 308.46 | 339.66 | 452.76 | 924.03 |

Fuente: Elaboración propia (2010)

4.3 Simulación hidráulica

4.3.1 Generalidades

Fuentes (2008) sostiene que 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). Esta actividad se hace con el fin de realizar actividades de planificación para mitigar o prevenir daños a las actividades económicas y principalmente a los habitantes.

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 (Hidrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineering). Dicho programa permite el cálculo en régimen permanente y no 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.

4.3.2 Secciones representativas y datos geométricos e hidráulicos

Para fines de estudio de simulación hidráulica se consideraron 6 secciones transversales del río, en los puntos de control mencionados en las tablas 4.5 y 4.15, adicionalmente se incluyen 2 secciones transversales mas correspondientes a la comunidad 2 Puentes (puente San Vicente 1) y la otra ubicada 130 metros aguas abajo del puente San Vicente (puente San Vicente 3). Algunas características son mostradas en la tabla 4.16:

Tabla 4. 16 Secciones representativas en el cauce principal del río Acahuapa

| Sección | Descripción | Elevación fondo río (msnm) | Distancia entre secciones | | Pendiente (%) |
|---------|-----------------------|----------------------------|---------------------------|-------|---------------|
| | | | (m) | (km) | |
| 6 | Beneficio Acahuapa | 511.95 | | | |
| 5 | Santa Elena | 438.06 | 3196 | 3.19 | 2.3 |
| 4 | Puente San Vicente 1 | 349.66 | 3386 | 3.39 | 2.6 |
| 3 | Puente San Vicente 2* | 347.01 | 75 | 0.75 | 3.5 |
| 2 | Puente San Vicente 3 | 343.18 | 130 | 0.13 | 2.9 |
| 1 | Obrajuelo | 19.19 | 21466 | 21.47 | 1.5 |

Fuente: Elaboración propia (2010)

* Corresponde a la sección transversal del puente San Vicente.

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 28 secciones (distanciadas por lo menos un km), situación que en el futuro será necesario complementar, para definir detalladamente las áreas propicias a inundación. Los coeficientes de rugosidad (n) de la ecuación de Manning que se utilizaron fueron de 0.040 en el cauce principal y en planicies de inundación. En lo que respecta a coeficientes de contracción y expansión del cauce se utilizaron 0.10 y 0.30 respectivamente.

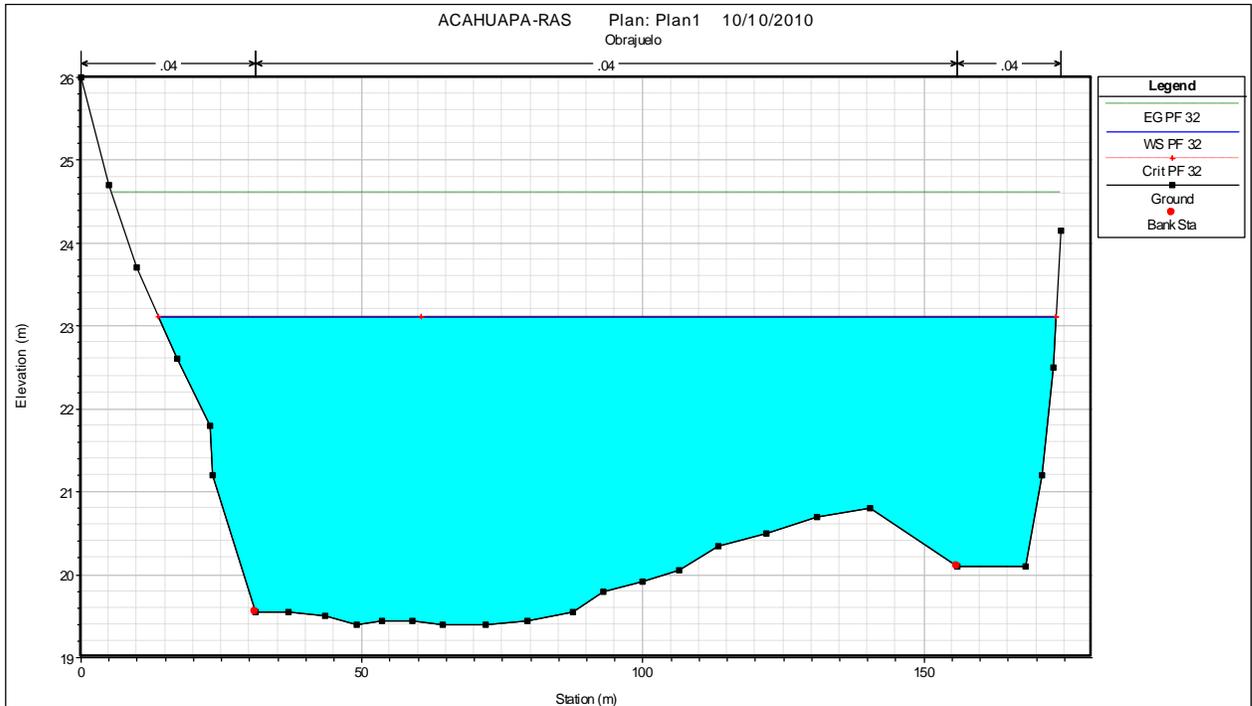
4.3.3 Caudales simulados

En este punto es importante definir los caudales a utilizarse en la simulación, el estudio ha comprendido abordar 2 métodos: lluvia-escorrentía y análisis regional de crecidas.

La tabla 4.5 muestra los caudales generados por el modelo de lluvia-escorrentía y la tabla 4.15 muestra los caudales generados por el análisis regional de crecidas. En ellas se puede observar que hasta cuencas de 30 km^2 , es decir las cuencas hasta el Beneficio Acahuapa y Santa Elena, no pareciera haber mucha diferencia en los caudales generados por ambos métodos hasta períodos de retorno de 25 años. Tal como se mencionó previamente, la importancia de la utilización del análisis regional de crecidas es que conociendo caudales confiables de cuencas aledañas a una cuenca sin datos y poseyendo una buena serie de registros en la cuenca conocida, se puede hacer una relación de áreas basándose en la estadística de los registros de la cuenca conocida y obtener caudales para diferentes períodos de retorno. Para el modelo de lluvia-escorrentía, es relevante conocer el uso actual de suelo, los antecedentes de humedad, la lluvia que ha existido en la zona previo a un evento determinado.

Para comprobar cuál de los modelos se apega más a un evento real se utilizó el programa HEC-RAS tomando en cuenta un nivel de crecida para la TT Ida en la estación Obrajuelo. El nivel registrado para el evento fue de 23.80 msnm, con lo cual el modelo de lluvia-escorrentía es el más cercano a ese dato (23.10 msnm), considerando una lluvia media en la cuenca para un período de retorno de 100 años, además suponiendo que habría existido un borde libre por sedimentos y escombros de 0.70 m, véase figura 4.21

Figura 4. 21 Estación Obrajuelo sometida a un caudal TR 100 años.



Por lo anteriormente expuesto se considera que el modelo de lluvia-escorrentía es el idóneo para utilizarse en la cuenca, para superficies mayores de 30 km² y períodos de retorno menores a 25 años.

Tal como se mencionó previamente, en éste caso, el método de regionalización de caudales tiende a subestimar las crecidas. Podría pensarse que esto está relacionado con la obtención de dichos caudales mediante curvas de descarga que han sido desarrolladas con caudales relativamente pequeños, teniendo una gran incertidumbre para niveles alcanzados en crecidas. La manera de verificar esta situación sería si se contara con los cálculos y aforos con los que se obtuvieron las curvas de descarga, comprobando que siendo superficies con lecho móvil, tendrían que haberse realizado ajustes a las curvas, es decir, sectorizándolas para diferentes períodos. Lastimosamente, éste análisis queda fuera del enfoque del presente estudio.

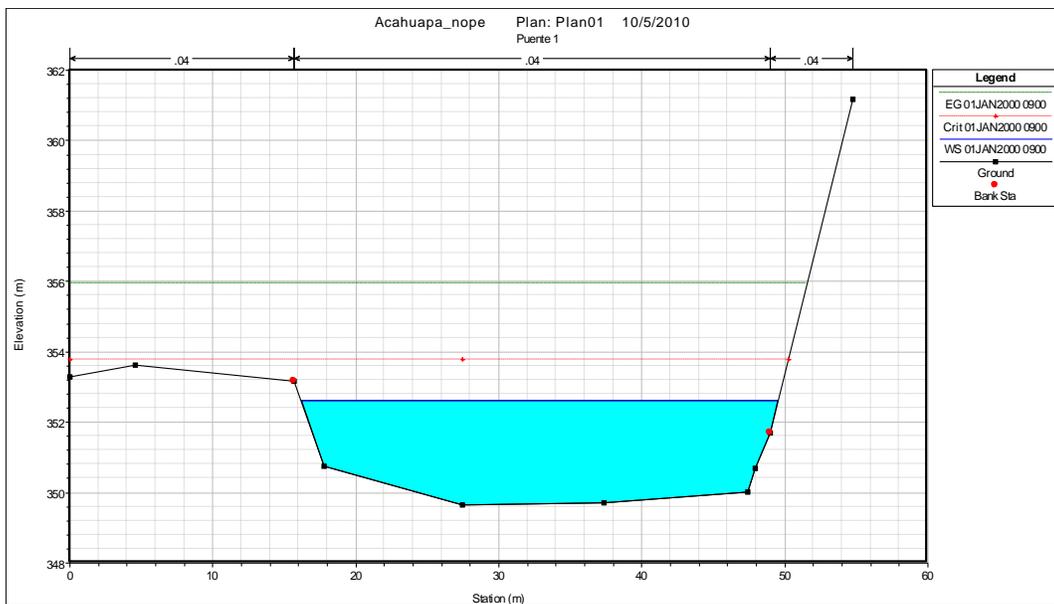
4.3.4 Selección de punto para generar niveles de alerta temprana

Debido a que en la zona urbana de San Vicente, específicamente en la comunidad 2 Puentes fue la mayormente golpeada para la TT Ida, existiendo pérdidas de vidas humanas y materiales, se propone enfocarse en éste punto para generar umbrales de alerta a la población.

4.3.5 Obtención de curvas lluvia-nivel-caudal

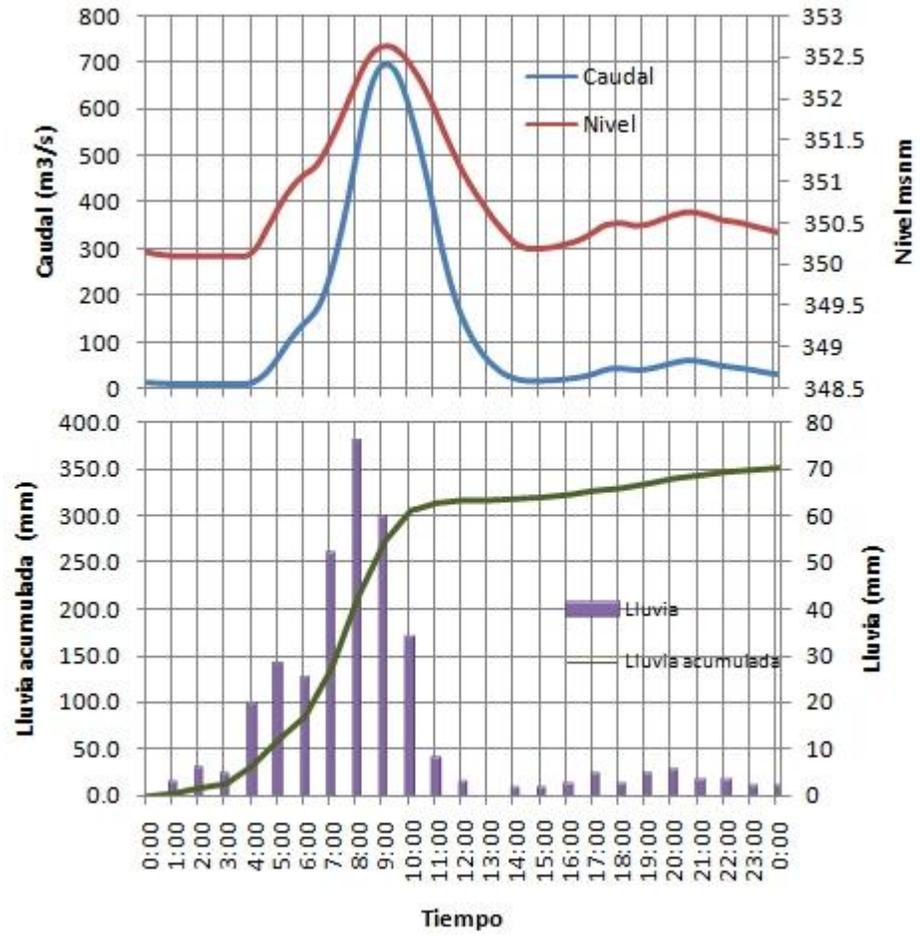
Se realizó la simulación de una tormenta cuyo período de retorno es de 100 años (tabla 4.5), distribuida según el registro de la estación telemétrica instalada en el volcán de San Vicente para la TT Ida. La sección transversal de la comunidad 2 Puentes sometida a un flujo no permanente, según la tormenta centenaria, alcanza su nivel máximo de 352.64 msnm, esto es sin considerar el nivel inducido por el flujo de sedimentos y escombros el cual es considerable en los eventos sucedidos en estas zonas. Se sugiere utilizar por lo menos 1.5 m adicionales a la superficie de agua. La figura 4.22 esquematiza lo discutido.

Figura 4. 22 Sección transversal comunidad 2 Puentes



Con los caudales simulados se obtiene una relación lluvia-caudal-nivel del río, observándose que el nivel máximo se da cuando el caudal es máximo, desfasados 1 hora del pulso de lluvia máxima (figura 4.23). Asimismo, dicha figura muestra en color verde la precipitación acumulada de la tormenta.

Figura 4. 23 Relación lluvia-caudal-nivel, sección comunidad 2 Puentes



5. ANÁLISIS Y PROPUESTA DEL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA PARA INUNDACIONES PARA LA CUENCA DEL RÍO ACAHUAPA

5.1 Experiencia en El Salvador con sistemas de alerta temprana

5.1.1 Antecedentes

López (2004) sostiene que a raíz del evento meteorológico huracán Mitch ocurrido en la región centroamericana en octubre de 1998 y cuyos efectos generaron en El Salvador inundaciones que provocaron pérdidas humanas, y pérdidas económicas en agricultura, ganadería e infraestructura, la Agencia Estadounidense para el Desarrollo Internacional, (USAID) financió a través del Proyecto de Reconstrucción Post Huracán Mitch la instalación del sistema de pronóstico y alerta temprana del río Lempa, y el sistema de alerta en el río Grande de San Miguel.

La implementación del sistema comprendió la construcción de una red de estaciones hidrometeorológicas en tiempo real, que se complementaron con la red de estaciones de la cuenca alta del río Lempa, proyectada e instalada por el Programa Ambiental de El Salvador (PAES). El sistema de alerta temprana financiado por USAID incluyó la instalación del equipo, software y modelos hidrológicos para la creación del Centro de Pronóstico Hidrológico (CPH) a ser manejado por el Servicio Hidrológico y Meteorológico (SMHN) de la Dirección General de Recursos Naturales Renovables (DGRNR) del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG).

En octubre del año 2001 y después del efecto devastador que tuvieron los terremotos, se crea el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET) adscrito al Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), unificando los servicios técnicos de geología, proveniente del Ministerio de Obras Públicas (MOP); meteorología e hidrología, proveniente de la DGRNR del MAG y creando un nuevo Servicio de Estudios Territoriales y Gestión de Riesgos. El sistema de pronóstico de crecidas y alerta temprana de la cuenca del río Lempa se trasladó con sus funciones, equipo y personal al Servicio Hidrológico Nacional (SHN) del SNET.

Durante los años 2002 y 2003, con los programas de Reconstrucción Post Mitch, Central América Mitigation Initiative (CAMI) y Reconstrucción Post-Terremoto (PER), el USAID financió y construyó con el apoyo del USGS estaciones con transmisión telemétrica en las cuencas de los ríos Paz (2), Jiboa (1) y Goascorán (2), que actualmente también son parte del

sistema de monitoreo y alerta temprana del SNET. En diciembre de 2003, se añade a esta red, una estación más en la cuenca alta del río Goascorán, a través del Proyecto CARE-COBEWS/SNET, fortaleciéndose de esta manera el SAT del Río Goascorán.

A la fecha se cuenta con una red hidrometeorológica básica de 32 estaciones: 20 estaciones con telemetría, 10 estaciones automáticas y 2 convencionales.

5.1.2 Tipos de inundaciones en El Salvador

Las inundaciones sufridas en El Salvador se pueden clasificar en tres tipos:

a) Inundaciones en cuenca baja de ríos medianos y grandes: Río Lempa, Río Paz, Río Jiboa y Río Goascorán. Ocurren debido a temporales ocasionados por eventos meteorológicos como huracanes originados en el Caribe. La lluvia es sostenida por 3 a 5 días y que generalmente ocurren en los meses de septiembre y octubre.

b) Inundaciones en cuencas de respuestas rápidas: cuencas provenientes de volcanes y cordilleras que desembocan en el Océano Pacífico, como: Cara Sucia.-San Pedro, río Grande de Sonsonate, Mandinga-Comalapa, estero de Jaltepeque y bahía de Jiquilisco. Y cuencas interiores que desembocan en ríos como: Angue y río San José. Este tipo de inundaciones son ocasionadas por precipitaciones altamente convectivas –intensas y localizadas- de 2 a 3 horas de duración, con ocurrencia principalmente en los meses de mayo y junio.

c) Inundaciones en Cuencas urbanas, también ocasionadas por precipitaciones altamente convectivas. La problemática es generada por las deficiencias o limitaciones en el sistema de drenaje urbano, obras sin control en cauces de ríos y quebradas y exceso de desechos sólidos (basura) en las quebradas.

5.1.3 Sistemas de alerta temprana del SNET

López (2004) señala que el SNET tiene 5 sistemas de alerta temprana que se monitorean y funcionan a través del centro de pronóstico hidrometeorológico y la red de monitoreo local. Los tipos de pronóstico que se generan son los siguientes:

A. Sistema de pronóstico precipitación-escorrentía

El sistema de pronóstico y alerta temprana por inundaciones instalado en la cuenca trinacional del río Lempa, utiliza el modelo hidrológico National Weather Service River Forecast System (NWSRFS) de NOAA. Los resultados obtenidos en cada corrida son: pronóstico de tres

días al futuro de los niveles de ríos en 14 sitios de la cuenca, pronóstico a corto y largo plazo de caudales de entrada en las 4 centrales hidroeléctricas operadas por CEL y mapas de inundación en el bajo Lempa. Este sistema integra la información proporcionada por CEL sobre las condiciones de los manejo de embalses. El sistema posee 10 estaciones hidrometeorológicas con transmisión telemétrica (2 en Guatemala, 1 en Honduras, y el resto en El Salvador); se complementa con 16 estaciones de precipitación de transmisión telemétrica, 7 estaciones climatológicas convencionales con información diaria y 9 estaciones climatológicas con información horaria. Este tipo de pronóstico se basa en la relación lluvia pronosticada – lluvia observada – nivel observado para producir un pronóstico de nivel o caudal en ríos y en las entradas a los embalses hidroeléctricos.

B. Sistema de pronóstico nivel-nivel

En estos sistemas el pronóstico hidrológico es de la forma nivel – nivel (o caudal - caudal). Se cuenta con monitoreo hidrometeorológico en varias estaciones ubicadas en los ríos y el pronóstico se basa en ecuaciones de correlación entre los niveles del río en las estaciones aguas arriba con las estaciones aguas abajo. También se ha desarrollado para los sistemas curva de tiempos de tránsito dadas las condiciones de velocidad de la creciente y humedad precedente. Por otro lado, se cuenta con umbrales que indican diferentes etapas de alerta con base en el nivel del río en las estaciones instaladas aguas arriba y a la posibilidad de que estos niveles generen inundaciones locales o aguas abajo. Adicionalmente se ha trabajado levantando la información en campo sobre las comunidades con problemas de inundación en diferentes escalas y se ha construido una red de monitoreo local de comunicaciones y monitoreo en las zonas susceptibles a inundación con las cuales el SNET mantiene comunicación directa.

Estos sistemas están instalados en cuatro cuencas:

- a) Río Grande de San Miguel: 3 estaciones hidrometeorológicas con telemetría, 4 estaciones telemétricas de precipitación.
- b) Río Paz: 2 estaciones hidrometeorológicas en tiempo real. Monitoreo hidrometeorológico (lluvia y nivel del río) en tiempo real en las estaciones telemétricas El Jobo y La Hachadura y estaciones convencionales de precipitación (2 en Guatemala y 2 en El Salvador)
- c) Río Goascorán: 3 estaciones hidrometeorológicas con telemetría y 4 estaciones de lluvia con telemetría

d) Río Jiboa: cuenta con una estación hidrometeorológica en tiempo real y 3 estaciones de lluvia con telemetría.

C. Sistema de pronóstico en cuencas de respuesta rápida

Este tipo de pronóstico se basa en información de lluvia observada y/o pronosticada – nivel pronosticado, debido a que los tiempos de reacción son más cortos y puede incrementarse el tiempo de alerta realizando modelación hidrológica a través de los datos de lluvia observados y los pronosticados por el CPM. El tipo de modelo hidrológico a utilizar en estas cuencas es diferente del utilizado en el Río Lempa y los modelos a utilizar en las otras cuencas de mediano tamaño.

La alerta básicamente se origina con base a tres umbrales: precipitación precedente (cantidad de agua acumulada en el suelo durante los últimos 10, 7, 5 y 3 días), precipitación pronosticada y precipitación en tiempo real. Se definen umbrales para cada uno de estos elementos medidos, que combinados entre sí proporcionan un umbral de alerta de posible iniciación de lluvias.

Martínez (2008) menciona que las cuencas que han estado trabajando con este tipo de pronóstico son:

- a) Cuenca del Estero de Jaltepeque: Donde se ha estructurado una red social de observadores locales con sus puntos de medición ya sea de lluvia y de nivel del río, en total son 22 contactos de la red, con los cuales el SNET tiene comunicación directa ya sea vía radio o por teléfono celular o línea fija. Se cuenta con dos estaciones telemétricas en la parte alta de la cuenca. Actualmente ya está en funcionamiento.
- b) Microregión Ahuachapán Sur: se ha estructurado una red social de observadores locales con sus puntos de medición ya sea de lluvia y de nivel del río, en total son 12 contactos de la red, con los cuales el SNET tiene comunicación directa ya sea vía radio o por teléfono celular o línea fija. Se cuenta con una estación telemétrica en la parte alta de la cuenca
- c) Río Cara Sucia- San Pedro
- d) Grande de Sonsonate
- d) Cuenca de la Bahía de Jiquilisco
- e) Cuenca del Río Angue
- f) Cuenca del río San José.

g) Área urbana de San Salvador.

5.2 SAT de la cuenca del río Acahuapa

5.2.1 Tipo de sistema

Para el caso de la cuenca del río Acahuapa, por sus características se propone un sistema similar a los mencionados en las cuencas de respuesta rápida, basándose en datos de lluvia observados-niveles pronosticados.

5.2.2 Niveles de lluvia

Los registros de lluvia de la TT Ida en la estación de San Vicente muestran que presentó antecedentes de lluvia 102.2 mm de 1 día previo, 121.8 mm acumulados en 2 días previos, 136 mm acumulados en 3 días previos, 154 mm acumulados en 4 días previos, 156.8 mm acumulados en 5 días previos, 184.8 mm acumulados en 6 días previos y 189 mm acumulados en 7 días previos. Se estima entonces que este tipo de suelos para llegar a la capacidad de campo considerando una profundidad de un metro necesitarían absorber por lo menos 190 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.

Por lo anteriormente expuesto, se puede decir que el sistema puede dar inicio con un preaviso si el antecedente de lluvia en 3 a 7 días supera los 190 mm. Posteriormente se debe llevar el control de la lluvia, separada por otros eventos por un tiempo no mayor de 2 horas, así como de los niveles del río, generando niveles de alerta de la siguiente forma:

Tabla 5. 1 Umbrales de alerta para la comunidad 2 Puentes

| Tipo de Alerta | Lluvia acumulada (mm) | Nivel del río (msnm) | Tiempo aproximado para inundación |
|----------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| Verde | 54.0 | 350.55 | |
| Amarilla | 79.8 | 351.03 | |
| Roja | 137.4 | 351.51 | 2 horas |

Respecto a la lluvia acumulada de 190 mm durante un período de tres a 7 días, tiene mayor prioridad en los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre 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.

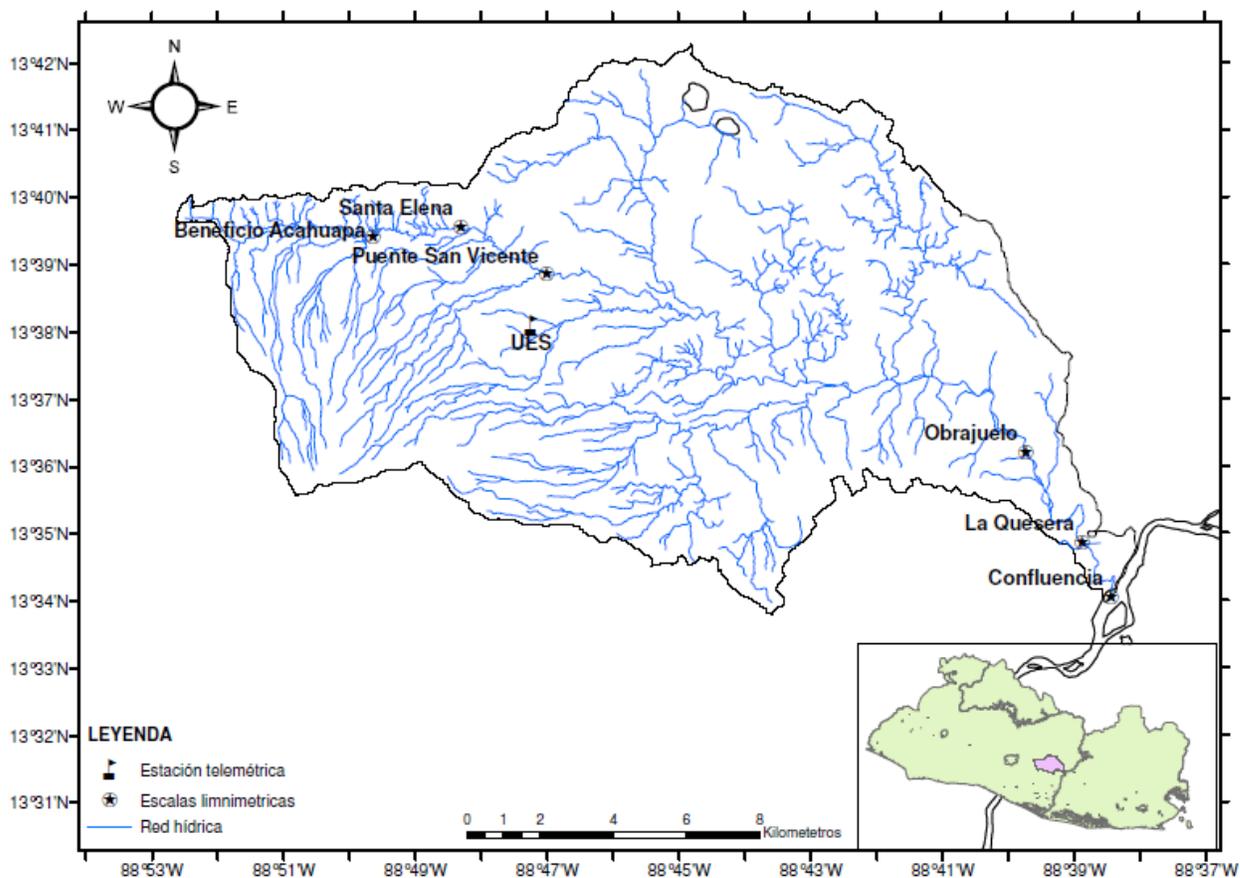
5.2.3 Equipamiento requerido

Debido a que el SAT de esta cuenca ha partido de un análisis de lluvia media considerando un período de retorno de 100 años, es necesario ubicar un punto para colocar una estación que registre la lluvia que sea aproximada a la lluvia media en la cuenca. En las isoyetas generadas para el período de retorno de 100 años (ver anexo), se observa que la isoyeta aproximada a la lluvia media se ubica en el área urbana de San Vicente, por lo que una opción para ubicar la estación es la Universidad de El Salvador (Facultad Multidisciplinaria Paracentral), buscando evitar el daño que podría generarse por vandalismo.

El tipo de estación puede ser telemétrica con transmisión de datos en tiempo real programada según los antecedentes de lluvia y los umbrales mencionados en párrafos anteriores. El tipo de estación, marca y operación debe estar de acuerdo con la experiencia obtenida en el manejo de SAT's en el país. En éste caso, el SNET juega un papel importante ya que la experiencia se remite a eventos posteriores al Huracán Mitch.

Es también importante el control de niveles del río con escalas limnimétricas a lo largo del mismo. Los puntos para la ubicación de dichas escalas pueden ser en los puntos de control definidos dentro de este estudio: Beneficio Acahuapa, comunidad Santa Elena, puente de entrada a San Vicente, estación Obrajuelo; adicionalmente comunidad la Quesera y la confluencia con el río Lempa. La figura 5.1 muestra las ubicaciones de las escalas limnimétricas mencionadas y la estación telemétrica propuesta.

Figura 5. 1 Equipo a ser instalado para el SAT



5.2.4 Conformación de la red de observadores locales

En El Salvador, los sistemas de alerta temprana funcionan bajo una figura denominada red de observadores locales, cuyos participantes incluyen jefes de las unidades ambientales de las alcaldías involucradas, ONG's, cruz roja, unidades de salud, personas pertenecientes a comités de cuenca, el SNET y el COEN. A continuación se presenta un esquema de la posible red de observadores locales:

Tabla 5. 2 Red de observadores locales de la cuenca del río Acahuapa

| Nombre | Organización a la que pertenece | Cargo | Teléfono |
|---------------------|---|--|-----------|
| Alex Valladares | Alcaldía de San Vicente | Jefe de la unidad ambiental | 7736-9293 |
| Daniel López Ramos | Alcaldía de Verapaz | Jefe de la unidad ambiental | 2396-3347 |
| Oscar Carvajal | Alcaldía de Nuevo Tepetitán | Jefe de la unidad ambiental | 7776-6571 |
| Santos Hernán López | Alcaldía de San Cayetano Istepeque | Jefe de la unidad ambiental | 7173-4270 |
| Adán Figueroa | Cáritas Diócesis de San Vicente | Coordinador del área de gestión de riesgo | 2293-0131 |
| René Orantes | Asociación de protección de la cuenca del río Acahuapa | Presidente | 7911-2713 |
| José Freddy Cruz | Universidad de El Salvador, Facultad Multidisciplinaria Paracentral | Docente de cuencas hidrográficas de la facultad de agronomía | 7850-3320 |
| Mauricio Martínez | Servicio Nacional de Estudios Territoriales | Coordinador del centro de pronóstico hidrológico | 2267-9560 |

5.2.5 Definición detallada de áreas inundables

Fuentes (2008) hace unas recomendaciones con respecto a la definición de las áreas inundables, las cuales son ajenas 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 parqueos, 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.

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.

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.

5.2.6 Programas

El financiamiento para la ejecución, puesta en marcha y operación del SAT propuesto puede incluirse dentro del marco del convenio suscrito ente el gobierno de la República de El Salvador con el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) llamado programa nacional de reducción de riesgos/rehabilitación-reconstrucción baja presión asociada a huracán Ida, por un monto de US\$17,500,000.00. El objetivo del convenio es contribuir a la reducción de riesgos en el marco del plan de reconstrucción durante el período 2010-2014 a fin de salvaguardar vidas y reducir las pérdidas económicas en futuros eventos extremos. Dentro de los productos a generarse se encuentran los sistemas de alerta temprana y no cabe duda que la cuenca del río Acahuapa es uno de los territorios prioritarios para realizar inversiones. Además se incluye la creación de un atlas dinámico de riesgos, integración de perspectiva de reducción de riesgos en la inversión pública en infraestructura, vivienda y acciones de mitigación; campañas ciudadanas de sensibilización y educación para la reducción de riesgos.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

1. Es factible implementar un sistema de alerta temprana para inundaciones en la cuenca del río Acahuapa, específicamente en la comunidad 2 Puentes, ya que se cuenta con un tiempo de antelación a la inundación de aproximadamente 2 horas.

El sistema de alerta temprana se activará cuando el antecedente de lluvia en 3 a 7 días supera los 190 mm. Posteriormente se debe llevar el control de la lluvia, separada por otros eventos por un tiempo no mayor de 2 horas, así como de los niveles del río, generando niveles de alerta de la siguiente forma:

| Tipo de Alerta | Lluvia acumulada (mm) | Nivel del río (msnm) | Tiempo aproximado para inundación |
|----------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| Verde | 54.0 | 350.55 | |
| Amarilla | 79.8 | 351.03 | |
| Roja | 137.4 | 351.51 | 2 horas |

2. Se tienen registros de lluvia diaria en varias estaciones pluviométricas dentro y cercanas a la cuenca, los registros datan a partir del año 1971 (estaciones finca San Jacinto, finca El Carmen, puente Cuscatlán, Santa Clara y Cojutepeque). En el caso de la estación del beneficio Acahuapa los registros datan a partir del año 1982. Por lo anterior se puede decir que existe una mejor base de datos de lluvia que de caudales en la cuenca.
3. El sitio con mayores problemas de inundaciones en la cuenca es el área urbana de San Vicente, específicamente la comunidad 2 Puentes debido a que durante la tormenta tropical Ida se demostró la vulnerabilidad del lugar, provocando el fallecimiento de residentes de la zona y destruyendo las viviendas a orillas del río. A la fecha, la zona sigue siendo habitada.

Los demás municipios los problemas de inundaciones se relacionan con pérdidas de cosechas y quedar incomunicados durante las crecidas, estos son los casos de las comunidades Santa Elena y la Entrevista, ésta última cercana al beneficio Acahuapa.
4. El modelo de lluvia esorrentía y regionalización de caudales realizados en el estudio presentan caudales similares para cuencas menores de 30 km² y períodos de retorno menores a 25 años.

5. El modelo que mejor se ajusta a las condiciones de la cuenca del río Acahuapa es el de lluvia escorrentía, basándose en el nivel de aguas registrado en la estación Obrajuelo para la tormenta tropical Ida.
6. Los registros pluviométricos del evento Ida denotan una amplia variabilidad en las estaciones de la cuenca, por lo cual, para el cálculo de la lluvia media, el método de las isoyetas es el que mejor se adapta debido a que considera los efectos orográficos.
7. De acuerdo con el estudio de crecidas mediante el método de lluvia-escorrentía en la estación del puente San Vicente, se estiman caudales de diseño entre los 301y 694 m³/s para períodos de retorno entre 10 y 100 años

6.2 Recomendaciones

1. Rehabilitar la estación Obrajuelo la cual se encuentra fuera de operaciones desde el año 1980.
2. Instalar escalas limnimétricas en las estaciones beneficio Acahuapa, Santa Elena, puente San Vicente, Obrajuelo y la Quesera, con el objeto de que a futuro se cuente con relaciones de niveles de agua en varios puntos de la cuenca.
3. Instalar una estación telemétrica en el área urbana de San Vicente para tener un monitoreo continuo y permanente en la parte media de la cuenca. Mediante la estación telemétrica se registran los datos de precipitación y se realizan correlaciones del nivel del río Acahuapa en la comunidad 2 Puentes.
4. Conformar la red de observadores locales en la cuenca del río Acahuapa, haciendo partícipes al gobierno central, gobierno local, ONG's, centros educativos y población.
5. Poner en práctica un ordenamiento territorial con el fin de evitar construcciones de viviendas en aquellas zonas que históricamente han sido afectadas por inundaciones.
6. Realizar un mapa de inundaciones en la cuenca para diferentes períodos de retorno, como un mecanismo no constructivo que aporte a una ordenanza territorial.
7. Para el área urbana de San Vicente se sugiere realizar un estudio más detallado para inundaciones de la quebrada Baila Huevos.
8. Fomentar la participación multidisciplinaria con el enfoque de cuenca, involucrando los gobiernos locales, población, instituciones educativas, ONG's.
9. El monitoreo de la estación telemétrica instalada en el volcán de San Vicente es fundamental, ya que debido a las tormentas del tipo orográfico en la zona, se presentarán

mayores precipitaciones en alturas mayores, propiciando inestabilidad en la parte alta del volcán y riesgos de deslaves e inundaciones.

10. Incluir medidas de conservación de cauces con la finalidad de que permanezcan o se mejoren las condiciones hidráulicas del río.
11. Fomentar la utilización agrícola del suelo según su vocación.
12. Debido a que el sistema de alerta temprana fue calculado mediante el método de lluvia-escorrentía, según el método propuesto por el SCS, es importante realizar calibraciones de los parámetros involucrados en el diseño cuando el sistema entre en operación.

7. BIBLIOGRAFÍA

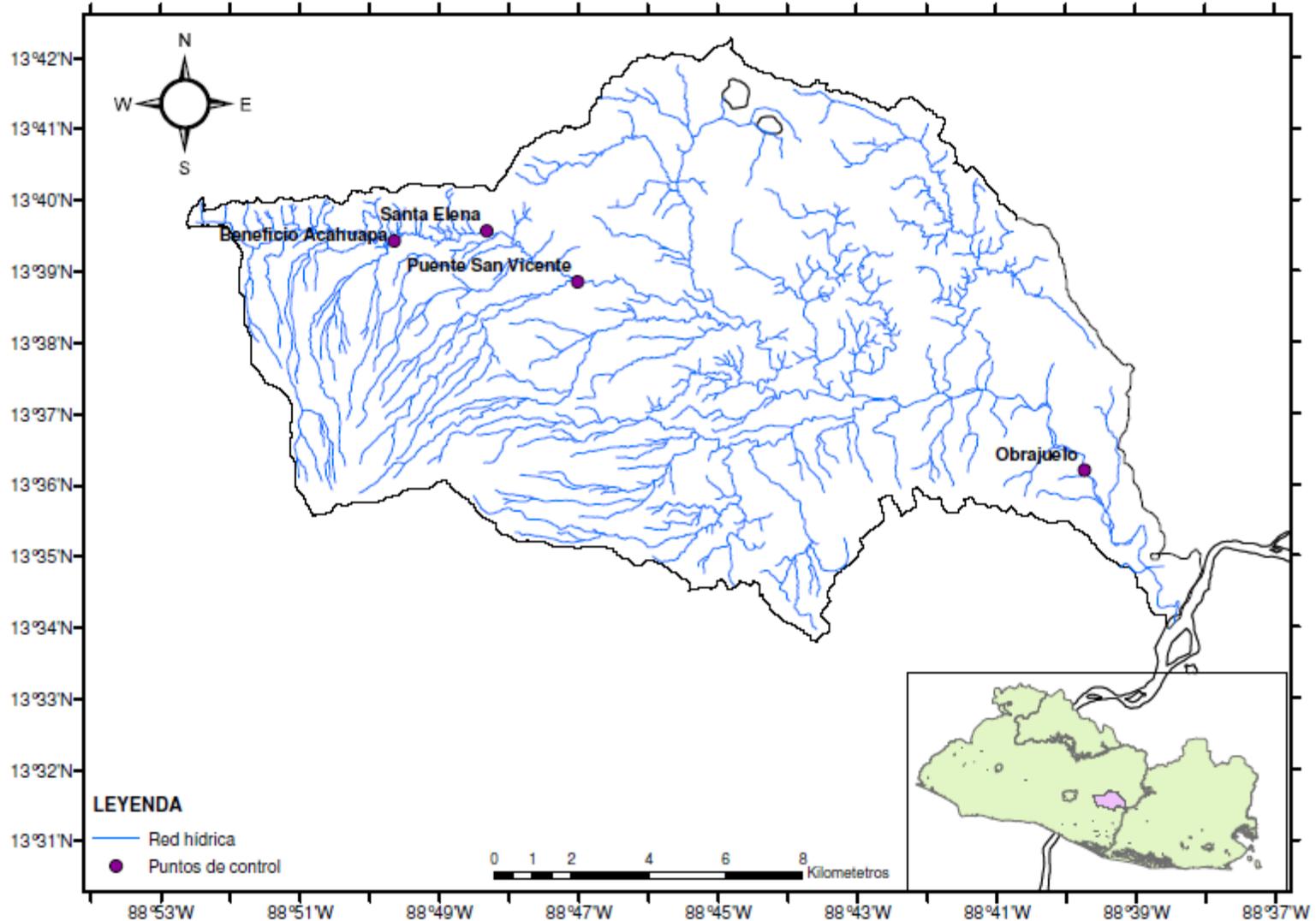
1. Aparicio, M. 2001. Fundamentos de hidrología de superficie. México, Limusa. 303 p.
2. Cáritas de El Salvador, 2009a. Boletín informativo sobre daños causados por la tormenta tropical Ida, en varios municipios del departamento de San Vicente, jurisdicción eclesial de la diócesis de San Vicente, El Salvador, CA. 10 p.
3. _____. 2009b. Subcuenca Acahuapa, San Vicente. 1 era ed. San Salvador. Servicios litográficos de El Salvador, 42 p.
4. CEPAL (Comisión Económica para América Latina, CL), 2010. Impacto socioeconómico, ambiental y de riesgo por la baja presión asociada a la tormenta tropical Ida en noviembre de 2009. México. 148 p. Disponible en: <http://www.eclac.cl/publicaciones/xml/8/38598/2010-03-L957-w1b.pdf>
5. 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.
6. Chow, V; Maidment, D; Mays, L. 1994. Hidrología aplicada. 1era ed. Santa Fé de Bogota. McGaw-Hill. 584 p.
7. CNR (Centro Nacional de Registros, SV), 2001. Monografía de San Vicente. El Salvador. 103 p.
8. 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.
9. COEM (Comité de Emergencia Municipal), 2003. Plan de mitigación y uso de tierras en San Vicente. El Salvador. 40 p.
10. COEM (Comité de Emergencia Municipal, SV), 2003a. Plan de mitigación y uso de tierras en San Cayetano Istepeque. El Salvador. 64 p.
11. _____, 2003b. Plan de mitigación y uso de tierras en Tepetitán. El Salvador. 89 p.
12. _____, 2003c. Plan de mitigación y uso de tierras en Verapaz. El Salvador. 57 p.
13. Custodio, E; Llamas, MR. 2001. Hidrología subterránea. 2 ed. Barcelona, España, Omega. v. 1, 1157 p.
14. Erazo, M. 2004. Regionalización de caudales máximos y medios de El Salvador. El Salvador. 21 p.

15. 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.
16. Francia, M; Rivas, J; Quijano, L. 2003a. Análisis de riesgos naturales y propuesta de plan municipal de Guadalupe. El Salvador. 89 p.
17. _____. 2003b. Análisis de riesgos naturales y propuesta de plan municipal de Tepetitán. El Salvador. 89 p.
18. _____. 2003c. Análisis de riesgos naturales y propuesta de plan municipal de Verapaz. El Salvador. 88 p.
19. Fuentes, J. 2008. Evaluación del sistema de alerta temprana para inundaciones, en la cuenca del río Coyolate. Tesis MSc. Recursos Hidráulicos. Guatemala, USAC, Facultad de Ingeniería. 110 p.
20. 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
21. INSIVUMEH (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, Departamento de Investigación y Servicios Hídricos, GT). 2004a. Estudio de lluvia máxima diaria en la república de Guatemala: resumen ejecutivo. Guatemala. 7 p.
22. _____, 2004b. Análisis regional de crecidas en la república de Guatemala: resumen ejecutivo. Guatemala. 3 p.
23. Linsley, A. 1988. Hidrología para ingenieros. 2 ed. México, McGraw-Hill. 386 p.
24. López, A. 2004. Sistemas de alerta temprana por inundaciones experiencia en El Salvador-SNET. El Salvador. 21 p.
25. MARN (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SV), 2009. Informe técnico de la baja presión en el pacífico y huracán Ida y su impacto en el medio ambiente. El Salvador. 24 p.
26. Martínez, J. 2008. Sistemas de alerta temprana ante riesgo de inundaciones con apoyo en redes sociales. El Salvador. 14 p.
27. Maskrey, A. 1993. Los desastres no son naturales. Perú. Red de Estudios Sociales de Prevención de Desastres en América Latina. 140 p.
28. Miner Fuentes, Y. 2002. Determinación de riesgo: análisis y generación de mapas: informe final 2002. Guatemala, CONRED. 82 p.
29. Monsalve Sáenz, G. 1999. Hidrología en la ingeniería. México, Alfaomega. 383 p.

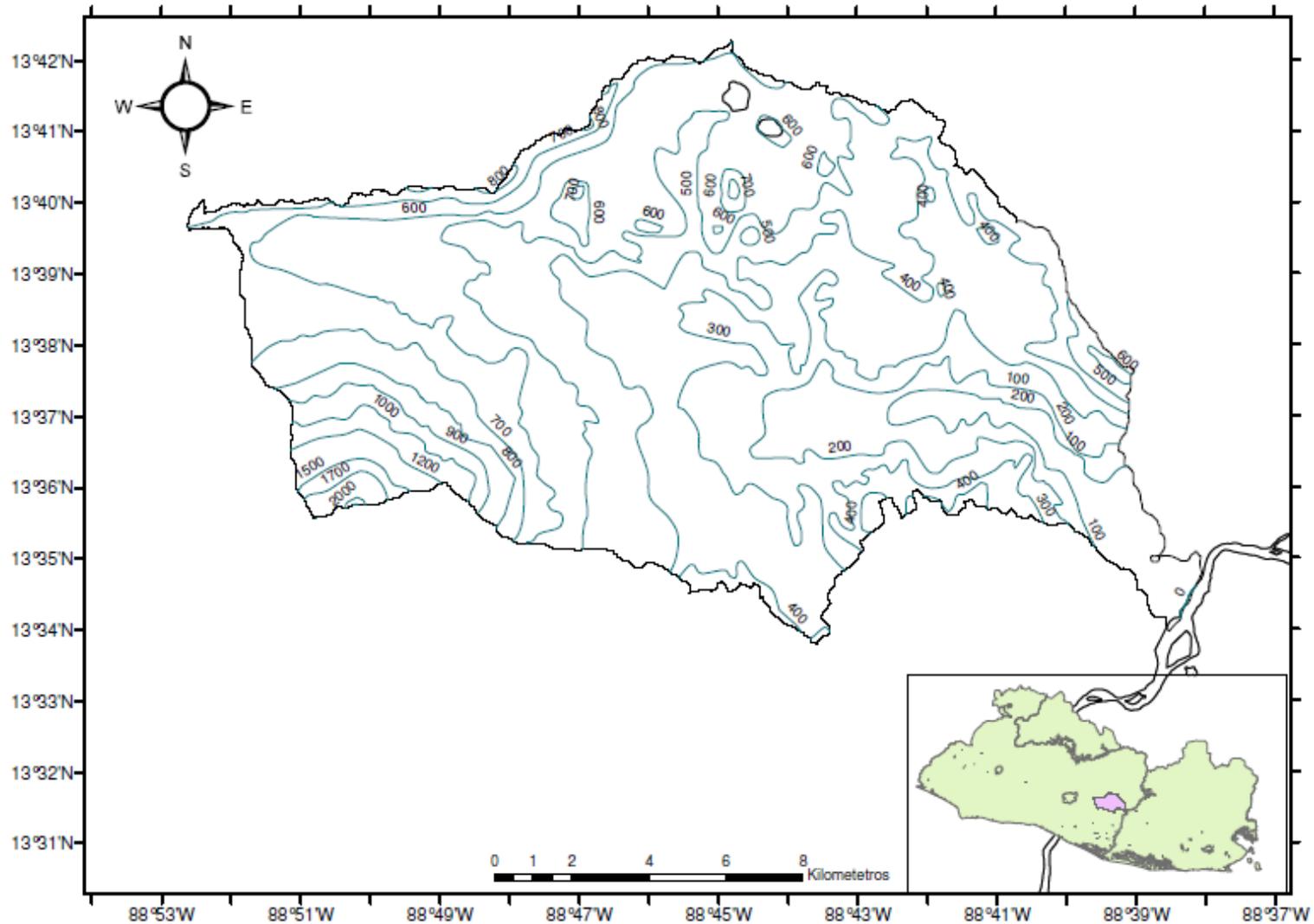
30. NRCS (Natural Resources Conservation Service, US), 2004. National engineering handbook. Part 630 Hydrology. Washington DC, US. Chaps. 9 & 10. 99 p.
31. OEA (Organización de Estados Americanos, IE), 2001. Manual para el diseño e implementación de un sistema de alerta temprana de inundaciones en cuencas menores. 55 p.
32. Orozco, E. 2010a. Notas del curso de hidrología estocástica, (Correspondencia personal). Guatemala, USAC, ERIS, Maestría en Recursos Hidráulicos. 55 p.
33. _____, 2010b. Notas del curso control de inundaciones, (Correspondencia personal). Guatemala, USAC, ERIS, Maestría en Recursos Hidráulicos. 44 p.
34. Pacheco, R; Montenegro, C; Guzmán, J. 2009. Informe evaluación cercanías volcán de San Vicente. El Salvador. 39 p.
35. 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.
36. Sandoval, J. 2010. Notas del curso de modelos en hidrología. (Correspondencia personal). Guatemala, USAC, ERIS, Maestría en Recursos Hidráulicos.
37. SNET (Servicio Nacional de Estudios Territoriales, SV), 2005. Impacto del huracán Stan en El Salvador. Cronología temporal del 1 al 6 de octubre del 2005. El Salvador. 17 p.
38. _____, 2009. Diseño del sistema de alerta temprana del río grande de Sonsonate. El Salvador. 124 p.
39. _____, 2010. Datos hidrometeorológicos a ser utilizados en trabajo de investigación propuesta de un sistema de alerta temprana en la cuenca del río Acahuapa de El Salvador. (Correspondencia personal), San Salvador, SV. (E-mail: raraujo@marn.gob.sv)
40. Suárez, J. 2004. Franjas forestales hidroreguladoras. *In* Taller de Gestión Integrada de Cuencas Hídricas (3, 2004, Managua, Nicaragua). Managua, Nicaragua, UNAN, Centro de Investigaciones de Recursos Hídricos. 8 p.
41. USGS (United States Geological Survey, US), 2001. Determinación de zonas de riesgo volcánico para el volcán de San Vicente, El Salvador. 26 p
42. 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.
43. Villón, M. 2001. Hidrología estadística. Cartago, Costa Rica, MaxSoft. 380 p.
44. _____. 2004. HidroEsta, manual del usuario. Cartago, Costa Rica, Centro de Información Tecnológica. 295 p.

45. Zamora, E. 2008. Evaluación un sistema de alerta en la parte baja de la cuenca del río Achiguate. Tesis MSc. Recursos Hidráulicos. Guatemala, USAC, Facultad de Ingeniería. 130 p.

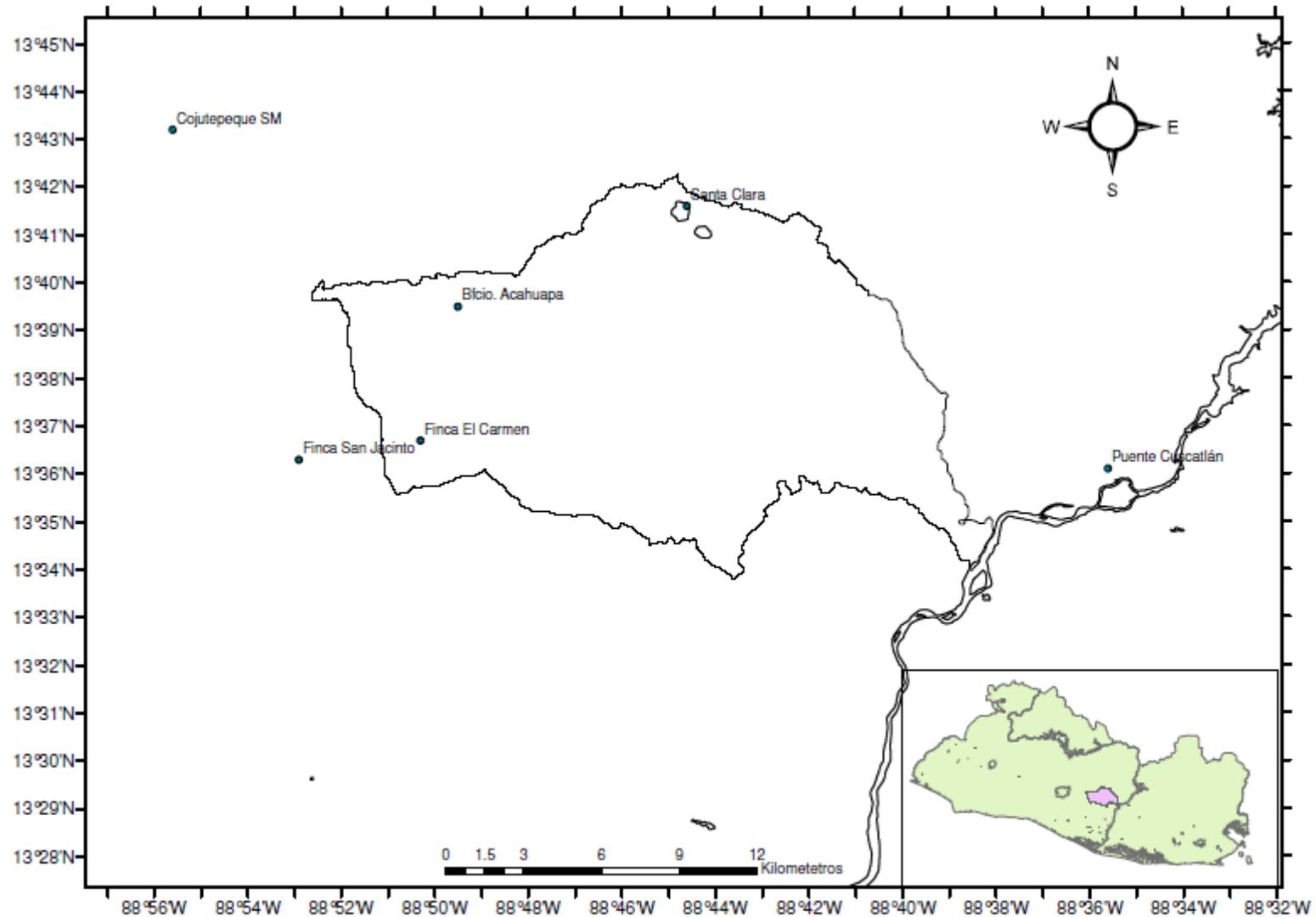
ANEXOS



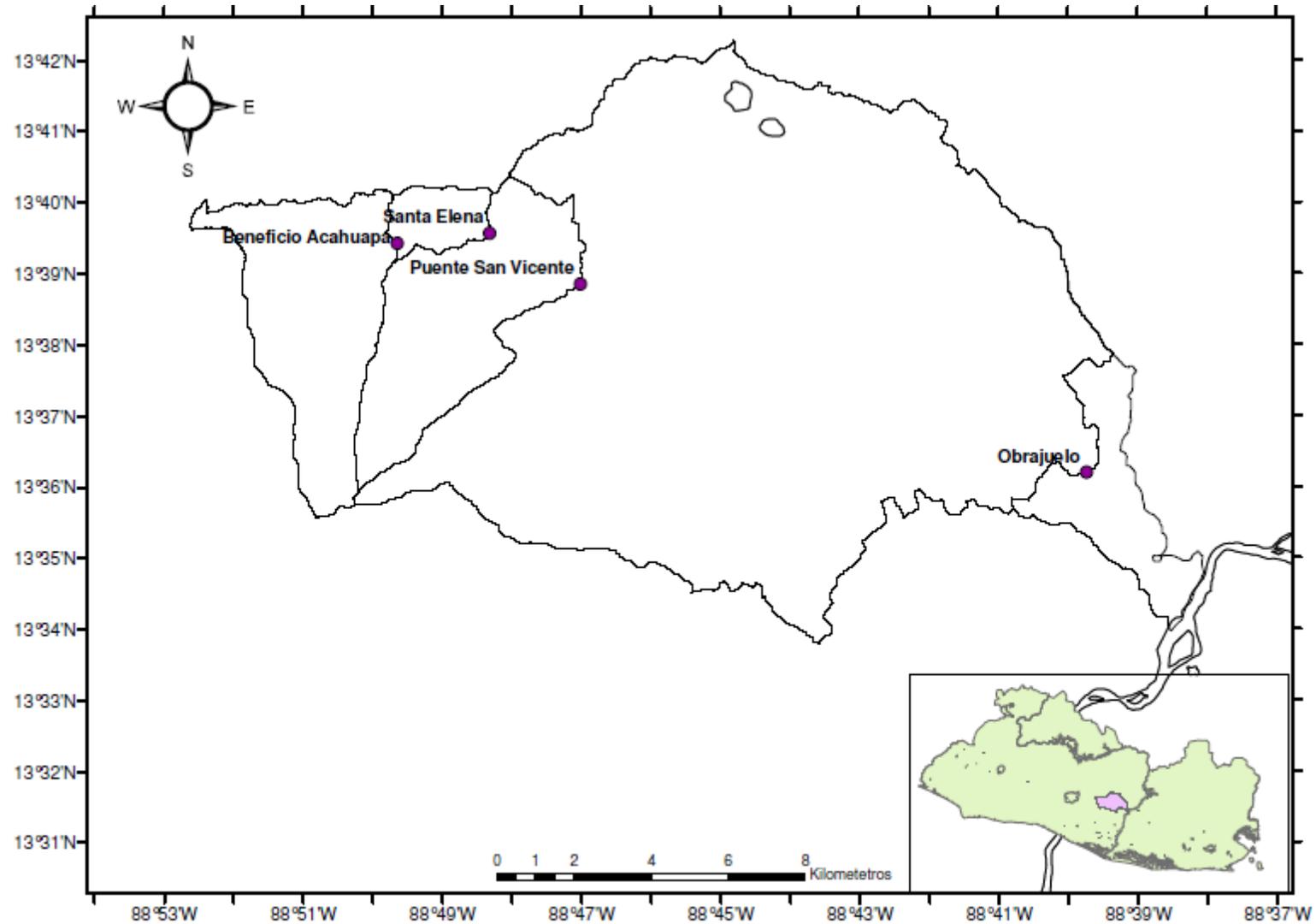
| | | |
|---|---|---|
| UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y RECURSOS HIDRÁULICOS - ERIS | PROPUESTA DE UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA PARA INUNDACIONES EN LA CUENCA DEL RÍO ACAHUAPA DE EL SALVADOR | RED HIDRICA DE LA CUENCA Y PUNTOS DE CONTROL |
| | PRESENTA: ING. JOSÉ ALEJANDRO MACHUCA LAÍNEZ | GUATEMALA, NOVIEMBRE 2010 |



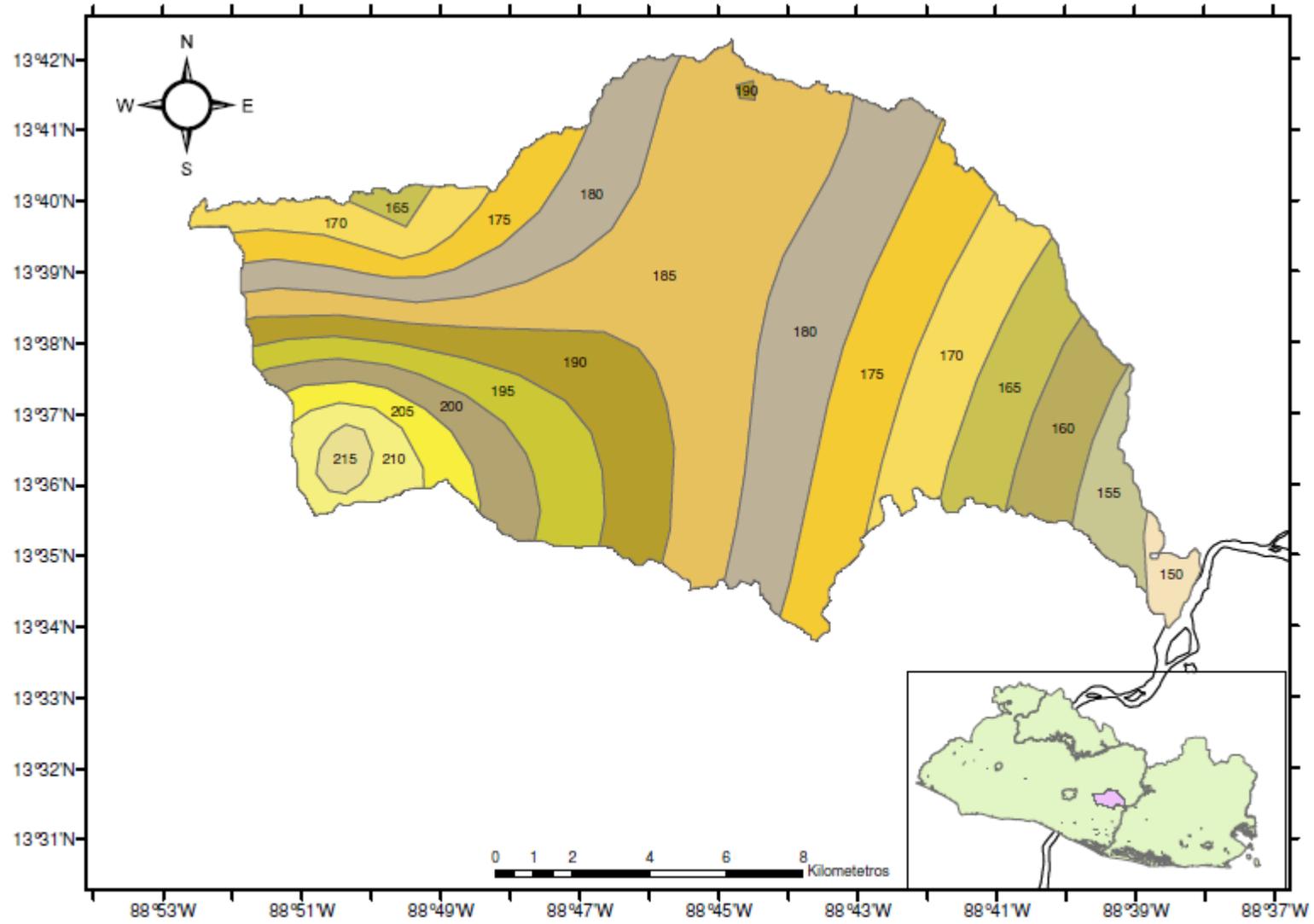
| | | |
|---|---|---------------------------|
| UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y RECURSOS HIDRÁULICOS - ERIS | PROPUESTA DE UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA PARA INUNDACIONES EN LA CUENCA DEL RÍO ACAHUAPA DE EL SALVADOR | CURVAS DE NIVEL |
| | PRESENTA: ING. JOSÉ ALEJANDRO MACHUCA LAÍNEZ | GUATEMALA, NOVIEMBRE 2010 |



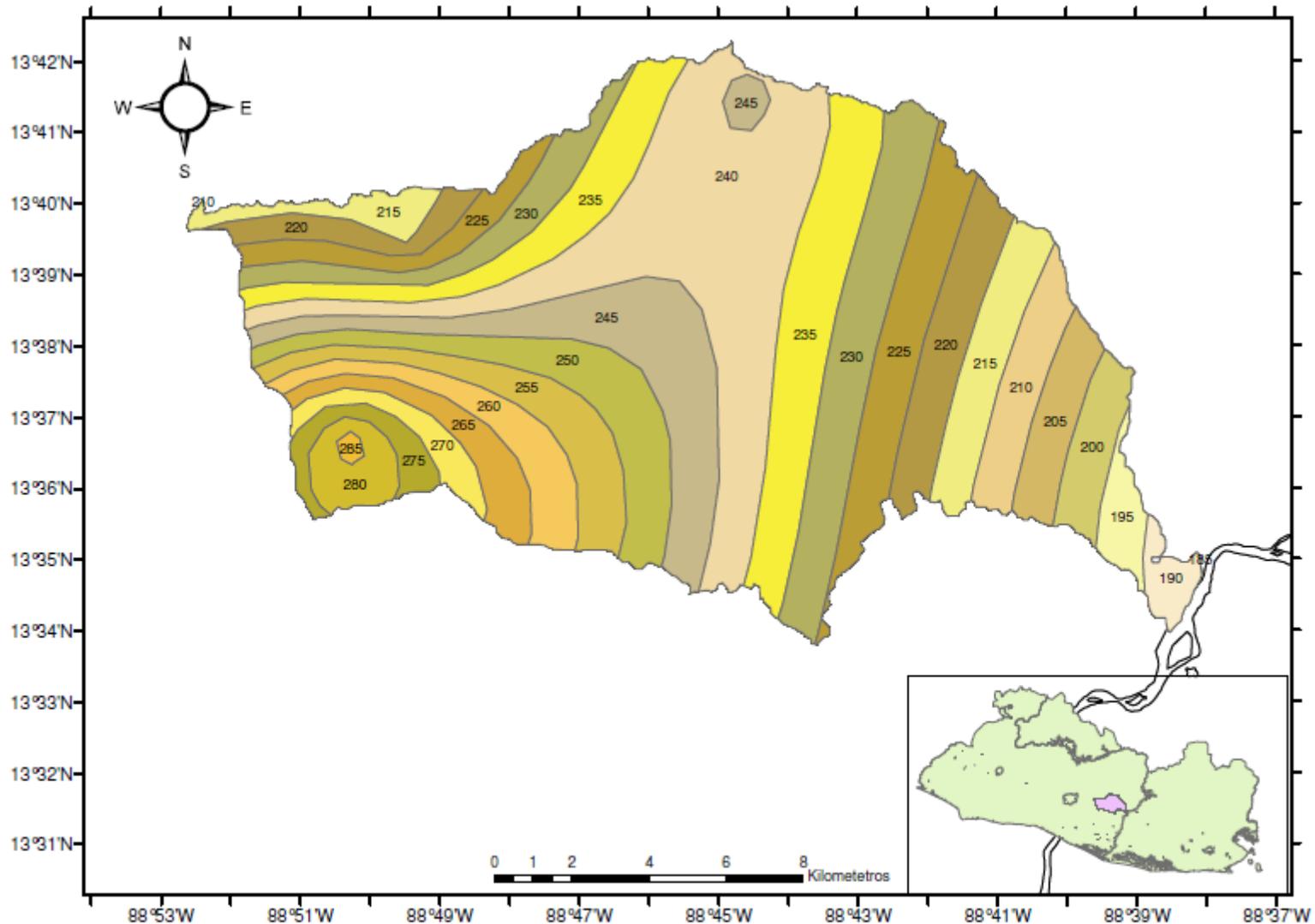
| | | |
|---|---|---------------------------|
| UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y RECURSOS HIDRÁULICOS - ERIS | PROPUESTA DE UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA PARA INUNDACIONES EN LA CUENCA DEL RÍO ACAHUAPA DE EL SALVADOR | ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS |
| | PRESENTA: ING. JOSÉ ALEJANDRO MACHUCA LAÍNEZ | GUATEMALA, NOVIEMBRE 2010 |



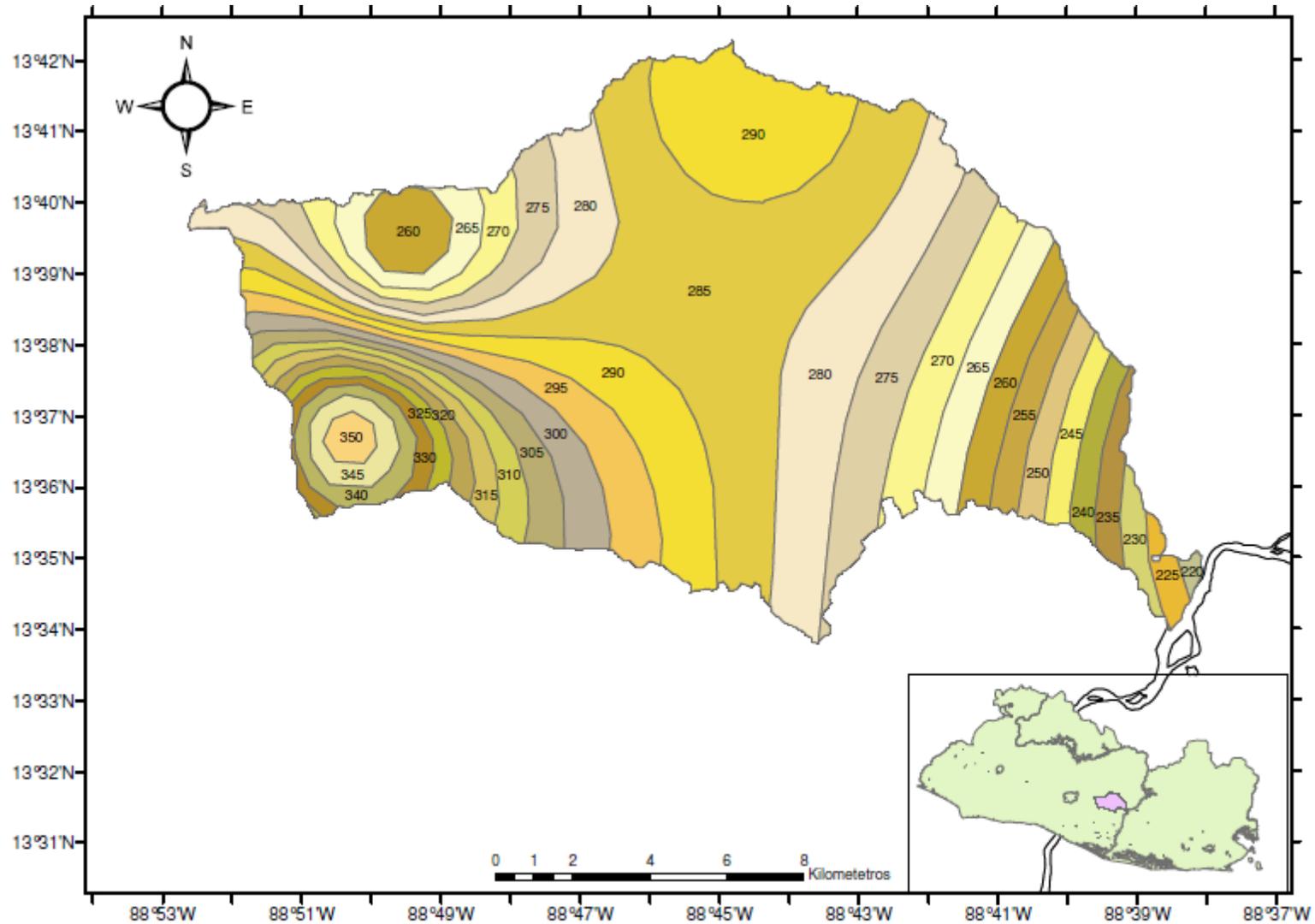
| | | |
|---|---|---------------------------|
| UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y RECURSOS HIDRÁULICOS - ERIS | PROPUESTA DE UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA PARA INUNDACIONES EN LA CUENCA DEL RÍO ACAHUAPA DE EL SALVADOR | SUBCUENCAS |
| | PRESENTA: ING. JOSÉ ALEJANDRO MACHUCA LAÍNEZ | GUATEMALA, NOVIEMBRE 2010 |



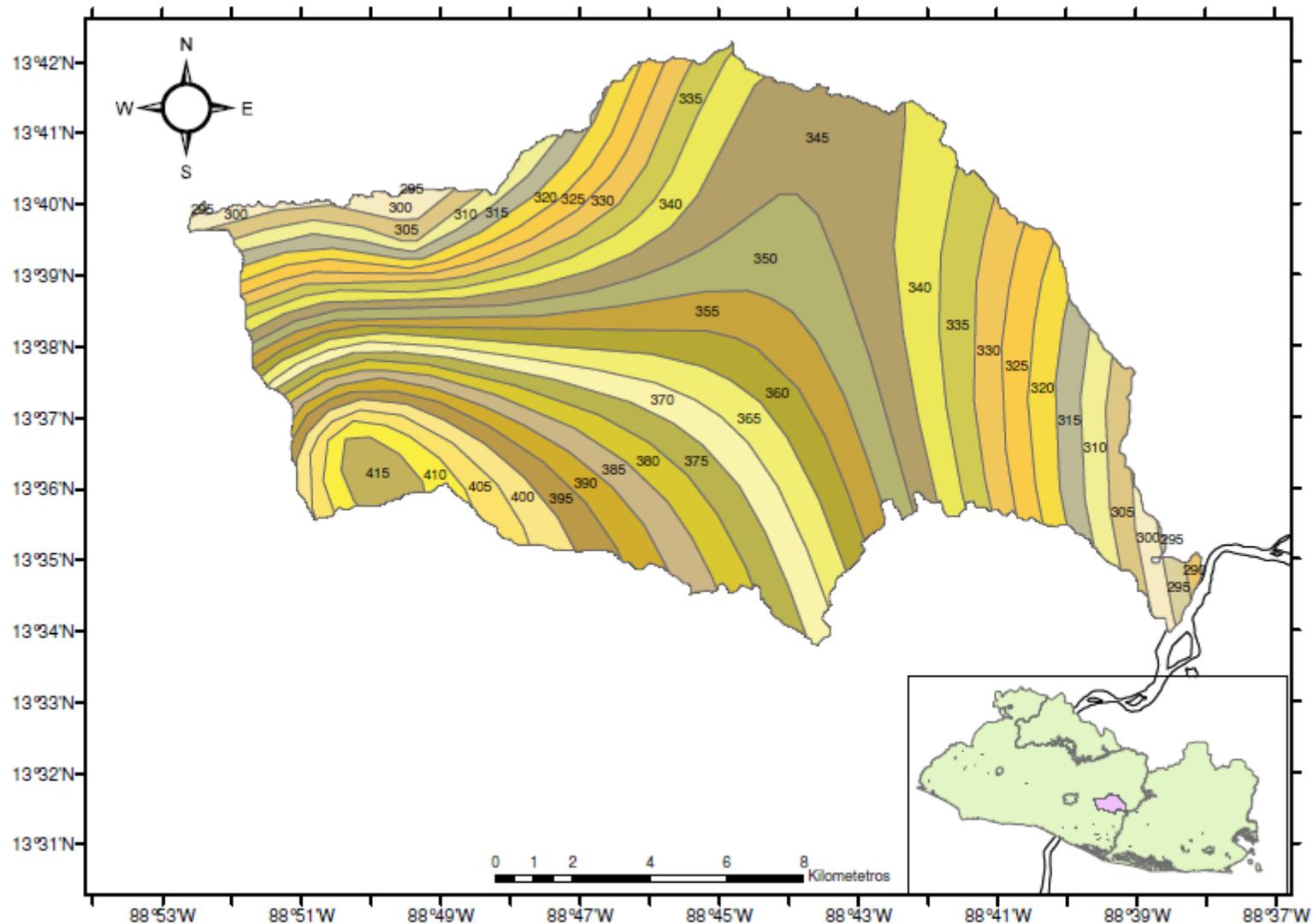
| | | |
|--|---|---|
| UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y RECURSOS HIDRÁULICOS - ERIIS | PROPUESTA DE UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA PARA INUNDACIONES EN LA CUENCA DEL RÍO ACAHUAPA DE EL SALVADOR | ISOYETAS PERÍODO DE RETORNO 10 AÑOS |
| | PRESENTA: ING. JOSÉ ALEJANDRO MACHUCA LAÍNEZ | GUATEMALA, NOVIEMBRE 2010 |



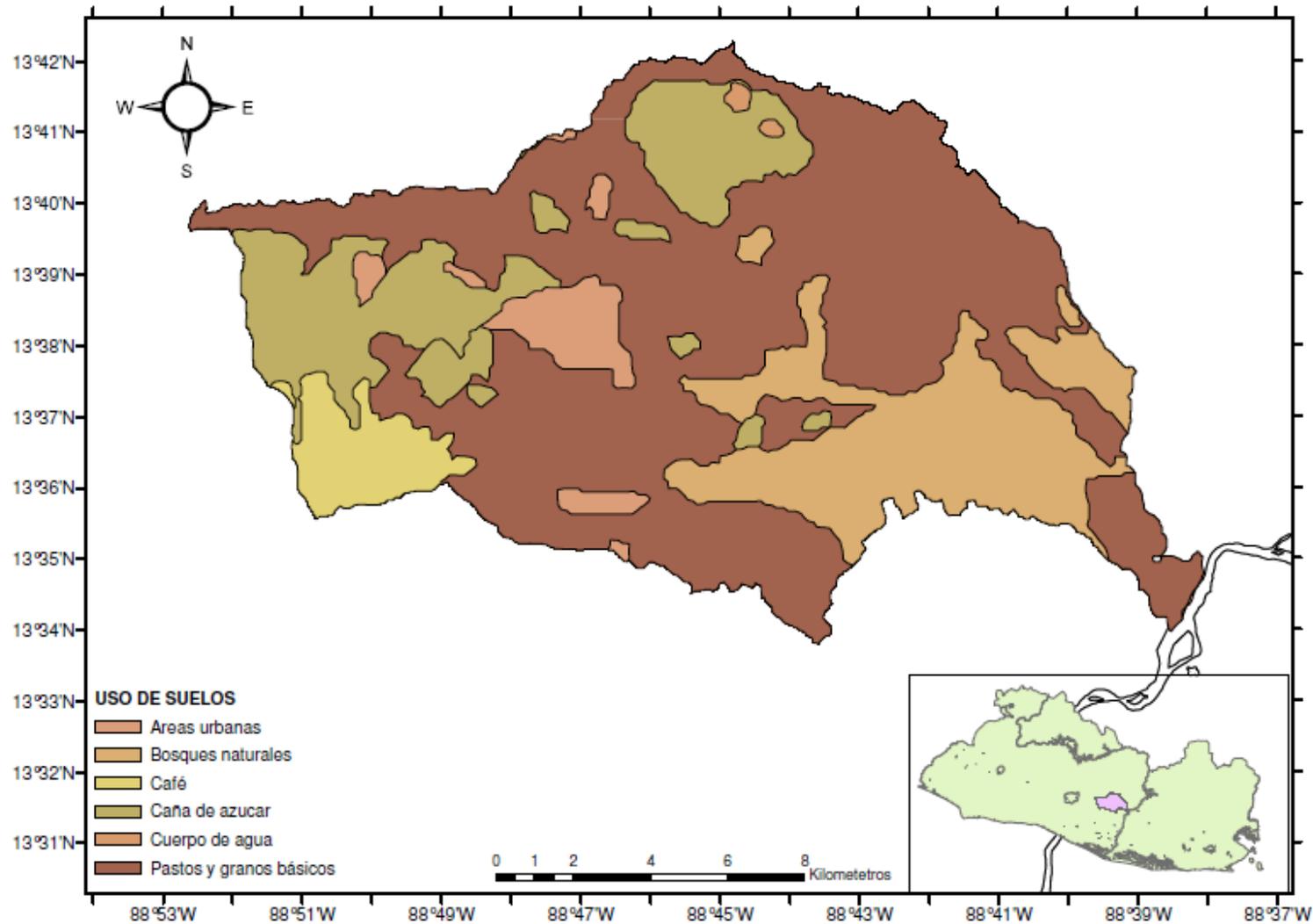
| | | |
|---|---|---|
| UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y RECURSOS HIDRÁULICOS - ERIS | PROPUESTA DE UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA PARA INUNDACIONES EN LA CUENCA DEL RÍO ACAHUAPA DE EL SALVADOR | ISOYETAS PERÍODO DE RETORNO 25 AÑOS |
| | PRESENTA: ING. JOSÉ ALEJANDRO MACHUCA LAÍNEZ | GUATEMALA, NOVIEMBRE 2010 |



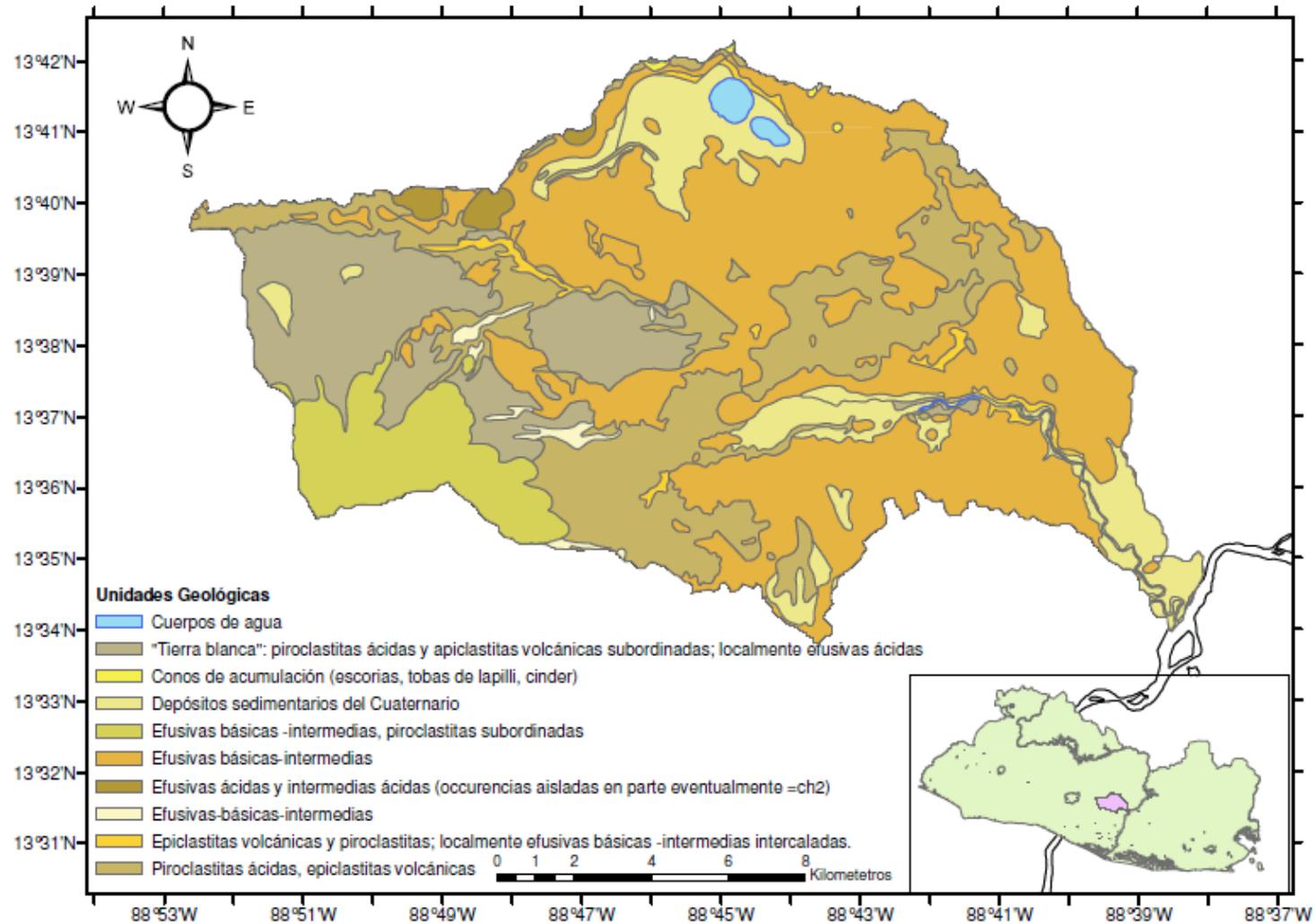
| | | |
|---|---|---|
| UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y RECURSOS HIDRÁULICOS - ERIS | PROPUESTA DE UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA PARA INUNDACIONES EN LA CUENCA DEL RÍO ACAHUAPA DE EL SALVADOR | ISOYETAS PERÍODO DE RETORNO 50 AÑOS |
| | PRESENTA: ING. JOSÉ ALEJANDRO MACHUCA LAÍNEZ | GUATEMALA, NOVIEMBRE 2010 |



| | | |
|---|---|--|
| UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y RECURSOS HIDRÁULICOS - ERIS | PROPUESTA DE UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA PARA INUNDACIONES EN LA CUENCA DEL RÍO ACAHUAPA DE EL SALVADOR | ISOYETAS PERÍODO DE RETORNO 100 AÑOS |
| | PRESENTA: ING. JOSÉ ALEJANDRO MACHUCA LAÍNEZ | GUATEMALA, NOVIEMBRE 2010 |



| | | |
|---|---|---------------------------|
| UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y RECURSOS HIDRÁULICOS - ERIS | PROPUESTA DE UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA PARA INUNDACIONES EN LA CUENCA DEL RÍO ACAHUAPA DE EL SALVADOR | USO DE SUELOS |
| | PRESENTA: ING. JOSÉ ALEJANDRO MACHUCA LAÍNEZ | GUATEMALA, NOVIEMBRE 2010 |



| | | |
|---|---|---------------------------|
| UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y RECURSOS HIDRÁULICOS - ERIS | PROPUESTA DE UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA PARA INUNDACIONES EN LA CUENCA DEL RÍO ACAHUAPA DE EL SALVADOR | GEOLÓGIA |
| | PRESENTA: ING. JOSÉ ALEJANDRO MACHUCA LAÍNEZ | GUATEMALA, NOVIEMBRE 2010 |

Este documento ha sido realizado e impreso gracias al apoyo de la Unión Europea a través del Programa Regional de Reducción de la Vulnerabilidad y Degradación Ambiental -PREVDA- ALA/2005/017-550