

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGRONÓMICAS -IIA-

CARACTERIZACIÓN DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL Y MODELACIÓN HIDRÁULICA, EN DOS  
MICROCUENCAS DE LA CUENCA DEL LAGO DE ATITLAN, SÓLOLA

MARIO FEDERICO BONILLA RECINOS



GUATEMALA, NOVIEMBRE 2008

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGRONÓMICAS –IIA-**

**CARACTERIZACIÓN DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL Y MODELACIÓN HIDRÁULICA, EN DOS  
MICROCUENCAS DE LA CUENCA DEL LAGO DE ATITLAN, SÓLOLA**

**TESIS**

**PRESENTADA A LA HONORABLE JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE  
AGRONOMÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE Guatemala**

**POR**

**MARIO FEDERICO BONILLA RECINOS**

**En el acto de investidura como**

**INGENIERO AGRÓNOMO**

**EN**

**SISTEMAS DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA**

**EN EL GRADO ACADÉMICO DE**

**LICENCIADO**

**GUATEMALA, NOVIEMBRE 2008**

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

**RECTOR**

**LICENCIADO ESTUARDO GÁLVEZ**

**JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA**

<b>DECANO</b>	<b>Msc. Francisco Javier Vásquez Vásquez</b>
<b>VOCAL PRIMERO</b>	<b>Ing. Agr. Waldemar Nufio Reyes</b>
<b>VOCAL SEGUNDO</b>	<b>Ing. Agr. Walter Arnoldo Reyes Sanabria</b>
<b>VOCAL TERCERO</b>	<b>Msc. Danilo Ernesto Dardón ÁVILA</b>
<b>VOCAL CUARTO</b>	<b>Bach. rigoberto morales ventura</b>
<b>VOCAL QUINTO</b>	<b>Bach. Miguel armando salazar donis</b>
<b>SECRETARIO</b>	<b>Msc. Edwin Enrique Cano Morales</b>

**Guatemala, noviembre 2008**

**Honorable Junta Directiva  
Honorable Tribunal Examinador  
Facultad de Agronomía**

**Universidad de San Carlos de Guatemala**

**Honorables miembros:**

**De conformidad con la Ley Orgánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala,  
tengo el honor de someter a vuestra consideración, el trabajo de tesis titulado,**

**CARACTERIZACIÓN DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL Y MODELACIÓN HIDRÁULICA, EN DOS  
MICROCUENCAS DE LA CUENCA DEL LAGO DE ATITLAN, SÓLOLA.**

Como requisito previo a optar el título de Ingeniero Agrónomo en Recursos Naturales Renovables,  
en el grado académico de Licenciado.

Esperando que la presente investigación llene los requisitos necesarios para su aprobación, me  
suscribo,

Atentamente,

Mario Federico Bonilla Recinos

## **ACTO QUE DEDICO**

**A:**

**DIOS:** Todopoderoso y dueño de mi ser por guiarme y darme la sabiduría y fuerzas necesarias para alcanzar este gran logro.

**MIS PADRES:** En agradecimiento a sus grandes esfuerzos y apoyo brindados durante todos estos años de estudios, gracias de todo corazón, los quiero mucho.

**MI HERMANO:** Con todo cariño por estar conmigo en los momentos difíciles de mi vida.

**MI ABUELO:** José Mario Bonilla Padilla, Q.E.P.D, porque sé que mi éxito lo llena de orgullo hallá en los cielos, te llevaré siempre en mi corazón.

**MI FAMILIA:** Con mucho cariño para todos ellos.

**MI NOVIA:** Irelida con mucho cariño, por el apoyo que me brindaste para alcanzar este éxito.

**MI COMPADRE:** Ing. Agr. Elizardo Gonzales, por su apoyo y ayuda para alcanzar esta meta.

**MIS AMIGOS:** José Cetino, Pinto Navas, Justo Pérez, Pedro Oquendo, Jorge Méndez, Sergio Gómez, Geissler Velásquez y Cesar Amilcar Torres como recuerdo de las experiencias vividas y compartidas durante todos estos años.

## TESIS QUE DEDICO

A:

DIOS

MI FAMILIA

MI PATRIA GUATEMALA

SERVICIOS INTERNACIONALES DE EXPORTACIÓN S.A.

FACULTAD DE AGRONOMÍA

## **AGRADECIMIENTOS**

**A:**

**MIS ASESORES:**

Ing. Agr. Juan Carlos Fuentes, Ing. Agr. Tomas Padilla, por su apoyo y asesoría brindada en esta investigación.

**FINCA LA CUCHILLA:**

A todo el personal que labora en especial al Msc. Edgar Rolando García por el apoyo brindado para alcanzar este éxito.

**Ing. Agr. Fredy Hernandez Ola:**

Por su apoyo brindado.

# I. ÍNDICE GENERAL

<b>I.I. ÍNDICE DE CONTENIDO</b>	<b>i</b>
<b>I.II. ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>iii</b>
<b>I.III. ÍNDICE DE CUADROS</b>	<b>iv</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>2</b>
<b>3. JUSTIFICACIÓN</b>	<b>3</b>
<b>4. MARCO TEÓRICO</b>	<b>4</b>
4.1 MARCO CONCEPTUAL	4
4.1.1. Ciclo hidrológico	4
4.1.2. Cambio climático	4
4.1.3. Consecuencias del cambio climático	5
4.1.4. Efectos del calentamiento global en Centroamérica	6
4.1.5. Procesos de escurrimiento	9
4.1.6. Conceptos básicos de simulaciones	12
4.2. MARCO REFERENCIAL	16
4.2.1. Ubicación geográfica	16
4.2.2. Ubicación político-administrativa	16
4.2.3. Características socioeconómicas	17
4.2.4. Aspectos biofísicos	21
<b>5. OBJETIVOS</b>	<b>35</b>
5.1. GENERAL	35
5.2. ESPECÍFICOS	35
<b>6. METODOLOGÍA</b>	<b>36</b>
6.1 Delimitación del área de estudio	36
6.2 Geomorfología	36
6.2.1 Descripción del sistema fluvial	36
6.2.2. Análisis regional de crecidas	40
6.2.3. Simulación hidráulica	42
<b>7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>44</b>
7.1 Descripción del sistema fluvial	44
7.1.1 Patrón de drenaje superficial	44
7.1.2 Tipo de cauce y transporte de sedimentos	44
7.2 Geomorfología	45
7.2.1 Red de drenaje	45
7.2.2 Aspectos de Relieve	46
7.2.3 Perfil del cauce principal	47
7.3 Análisis regional de crecidas	48
7.3.1 Estaciones hidrométricas	48
7.3.2. Relación área Vrs. caudal índice	48
7.3.3. Estandarización de las series	49
7.3.4. Ajuste de curvas de frecuencia a series estandarizadas	49
7.3.5. Factores de frecuencia	50
7.3.6. Caudales de diseño	51
7.4 Simulación hidráulica	54

<b>8. CONCLUSIONES</b>	<b>58</b>
<b>9. RECOMENDACIONES</b>	<b>59</b>
<b>10. BIBLIOGRAFIA</b>	<b>60</b>
<b>11. ANEXOS</b>	<b>62</b>

## I.II. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ilustración cualitativa de la evolución de la escorrentía superficial, durante un evento de lluvia de intensidad constante .....	10
Figura 2. Mapa de ubicación geográfica de las microcuencas .....	18
Figura 3. Mapa político administrativo de la región.....	19
Figura 4. Climadiagrama de la estación El Tablón, Sololá, período de 1994 a 2007.....	21
Figura 5. Mapa de zonas de vida de las microcuencas Argueta y Xibalbay .....	22
Figura 6. Mapa de serie de suelos de las microcuencas .....	28
Figura 8. Mapa hidrográfico de las microcuencas del río Argueta y Xibalbay.....	33
Figura 9. Perfil del cauce principal de los ríos Xibalbay y Argueta.....	47
Figura 10. Caudal índice vrs. área de 11 cuencas hidrográficas localizadas en la región hidrológica I. ....	49
Figura 11. Ajuste de datos estandarizados de caudales máximos anuales a curvas teóricas de distribución de frecuencia. ....	50
Figura. 14 Perfiles simulados para diversos periodos de diseño en la unión de los ríos Xibalbáy y Argueta. ....	57

### I.III. ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. El futuro de Guatemala ante los efectos del calentamiento global .....	9
Cuadro 2. Coordenadas UTM de las microcuencas del río Argueta y río Xibalbay. ....	16
Cuadro 3. Poblados comprendidos dentro de la subcuenca del río Quiscab. ....	16
Cuadro 4. Área y porcentaje de las zonas de vida del área de estudio .....	23
Cuadro 6. Leyenda Fisiográfica del área de estudio.....	26
Cuadro 7. Series de suelos presentes en las microcuencas del río Argueta y río Xibalbay.....	27
Cuadro 8. Principales usos de la tierra dentro de la Subcuenca del río Quiscab.....	30
Cuadro 5. Aforos realizados en el área de estudio.....	32
Cuadro 9. Orden, número y longitud de corrientes en la microcuenca del río Xibalbay. ....	45
Cuadro 10. Orden, número y longitud de corrientes en la microcuenca del río Argueta. ....	45
Cuadro 11. Aspectos de relieve en la microcuenca del río Xibalbay. ....	46
Cuadro 12. Aspectos de relieve en la microcuenca del río Argueta.....	47
Cuadro 13. Características de las estaciones hidrométricas utilizadas en el análisis regional de crecidas. ....	48
Cuadro 14. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos convencionales.....	51
Cuadro 15. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos lineales. ....	51
Cuadro 16. Caudales de diseño para diversos sitios de interés en la microcuenca del río Argueta. ....	52
Cuadro 17. Caudales de diseño para diversos sitios de interés en la microcuenca del río Xibalbay. ....	53
Cuadro 18A. Parámetros estadísticos de la serie estandarizada correspondiente a caudales máximos instantáneos anuales en la estación hidrométrica Cunláj. ....	62
Cuadro 19A. Parámetros estadísticos de la serie estandarizada correspondiente a caudales máximos instantáneos anuales en la estación hidrométrica Cantel. ....	63
Cuadro 20A. Parámetros estadísticos de la serie estandarizada correspondiente a caudales máximos instantáneos anuales en la estación hidrométrica Catarina Ixtahuacán.....	64
Cuadro 21A. Parámetros estadísticos de la serie estandarizada correspondiente a caudales máximos instantáneos anuales en la estación hidrométrica Panibáj.....	64
Cuadro 22A. Parámetros estadísticos de la serie estandarizada correspondiente a caudales máximos instantáneos anuales en la estación hidrométrica El Potrero.....	65
Cuadro 23A. Parámetros estadísticos de la serie estandarizada correspondiente a caudales máximos instantáneos anuales en la estación hidrométrica San Luis Las Carretas.....	65
Cuadro 24A. Parámetros estadísticos de la serie estandarizada correspondiente a caudales máximos instantáneos anuales en la estación hidrométrica Santo Tomás.....	66
Cuadro 25A. Parámetros estadísticos de la serie estandarizada correspondiente a caudales máximos instantáneos anuales en la estación hidrométrica Jaibal.....	66
Cuadro 26A. Parámetros estadísticos de la serie estandarizada correspondiente a caudales máximos instantáneos anuales en la estación hidrométrica Corral Grande.....	67
Cuadro 27A. Parámetros estadísticos de la serie estandarizada correspondiente a caudales máximos instantáneos anuales en la estación hidrométrica La Presa. ....	67

Cuadro 28A. Parámetros estadísticos de la serie estandarizada correspondiente a caudales máximos instantáneos anuales en la estación hidrométrica Alotenango. ....	68
Cuadro 29A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos convencionales en la estación hidrométrica Cunláj. ....	69
Cuadro 30A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos lineales en la estación hidrométrica Cunláj. ....	69
Cuadro 31A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos convencionales en la estación hidrométrica Cantel. ....	70
Cuadro 32A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos lineales en la estación hidrométrica Cantel. ....	70
Cuadro 33A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos convencionales en la estación hidrométrica Catarina Ixtahuacán. ....	71
Cuadro 34A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos lineales en la estación hidrométrica Catarina Ixtahuacán. ....	71
Cuadro 35A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos convencionales en la estación hidrométrica El Potrero. ....	72
Cuadro 36A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos lineales en la estación hidrométrica El Potrero. ....	72
Cuadro 37A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos convencionales en la estación hidrométrica Panibáj. ....	73
Cuadro 38A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos lineales en la estación hidrométrica Panibáj. ....	73
Cuadro 39A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos convencionales en la estación hidrométrica Santo Tomás. ....	74
Cuadro 40A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos lineales en la estación hidrométrica Santo Tomás. ....	74
Cuadro 41A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos convencionales en la estación hidrométrica Jaibal. ....	75
Cuadro 42A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos lineales en la estación hidrométrica Jaibal. ....	75
Cuadro 43A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos convencionales en la estación hidrométrica Corral Grande. ....	76
Cuadro 44A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos lineales en la estación hidrométrica Corral Grande. ....	76
Cuadro 45A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos convencionales en la estación hidrométrica La Presa. ....	77
Cuadro 46A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos lineales en la estación hidrométrica La Presa. ....	77
Cuadro 47A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos convencionales en la estación hidrométrica Alotenango. ....	78
Cuadro 48A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos lineales en la estación hidrométrica Alotenango. ....	78
Cuadro 49A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos convencionales en la estación hidrométrica San Luis Las Carretas. ....	79
Cuadro 50A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos lineales en la estación hidrométrica San Luis Las Carretas. ....	79



## 1. INTRODUCCIÓN

La república de Guatemala posee una extensión superficial aproximada de 108,889 km<sup>2</sup>, localizada casi en el centro geográfico de América, entre los paralelos 13°44' a 18°30' latitud norte y meridianos 87°30' a 92°13' longitud oeste. La más septentrional de las repúblicas de América Central, limita al oeste y al norte con México, al este con el océano Atlántico, Honduras y El Salvador y al sur con el océano Pacífico (IGN, 1975).

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

La cuenca del lago de Atitlán, pertenece a la vertiente del océano Pacífico, siendo una cuenca cerrada (endorreica), poseyendo drenaje de tipo subterráneo. La microcuenca del río Argueta posee un área de 41.89 km<sup>2</sup> y la microcuenca del río Xibalbay cuenta con un área 23.69 km<sup>2</sup>, ambas microcuencas pertenecen a la subcuenca del río Quiscab y a la cuenca del lago de Atitlán.

El estudio comprendió el análisis de los principales parámetros geomorfológicos que inciden en el escurrimiento superficial, a decir, patrón de drenaje, sistema de drenaje superficial, factores de forma, sinuosidad y algunos aspectos de relieve. Además, se realizó el análisis hidrológico mediante un análisis regional de crecidas, previo a la simulación hidráulica mediante el programa HEC – RAS. El objetivo de la misma fue la caracterización de la escorrentía superficial en las microcuencas, seleccionándose las mismas, dada la predominancia de los usos forestal y agrícola. En la microcuenca del río Argueta, predomina el uso forestal (especies de coníferas), mientras que en la subcuenca del río Xibalbay, predomina el uso agrícola. La información básica generada servirá de apoyo, al estudio macro del proyecto, Impacto Hidrológico Derivado del Uso del Suelo en Plantaciones de Coníferas en la Cuenca del Lago de Atitlán, financiado por SENACYT.

## **2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La república de Guatemala, dado el manejo de los recursos naturales (renovables y no renovables) es vulnerable a desastres naturales. De acuerdo con Revolorio (2003), actualmente, se estima que ocupa el tercer lugar a nivel latinoamericano con un 72% de suelos que presentan degradación severa y muy severa.

El manejo inadecuado de los recursos naturales del país, principalmente bajo el enfoque de cuenca hidrográfica, aunado a los efectos climáticos que amenazan la región, aumentan la vulnerabilidad a los desastres naturales. Se prevé que en un futuro el calentamiento global a nivel de cuenca en la región centroamericana traerá efectos adversos como inundaciones, sequías, pérdidas de suelo (por erosión hídrica), con efectos posteriores, como catástrofes, pérdidas de vidas humanas, racionamiento de energía, daños a la infraestructura, escasez de alimentos y agua potable.

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

Las subcuencas en estudio son de importancia en la región, dado a que son tributarias de la subcuenca del río Quiscáb, que drena a la cuenca del lago de Atitlán. Los cambios en el uso de la tierra en las microcuencas, son de impacto directo aguas abajo, en el lago de Atitlán. En especial el reemplazamiento del bosque por cultivos limpios, sin ningún tipo de práctica de manejo y/o conservación de suelos.

### 3. JUSTIFICACIÓN

El agua es un recurso natural, finito y vulnerable, en años anteriores era abundante y disponible en cualquier época, pero actualmente en muchos países del mundo es escasa. En Guatemala ha venido sufriendo un gran deterioro, por otro lado también disminuye su calidad para ser utilizada con fines de consumo humano y riego en la agricultura, lo cual es debido principalmente al manejo inadecuado en las áreas de recarga hídrica en las cuencas hidrográficas, ocasionado por la deforestación y la contaminación que se ocasiona a los acuíferos, principalmente por los sectores agrícola, industrial y doméstico, aunado a esto el aumento en la demanda de agua debido al acelerado crecimiento demográfico y el desarrollo socioeconómico.

Según MAGA *et al.* (2,001), citado por Fuentes (2,006), si se caracteriza someramente el factor suelo en la República de Guatemala, habría que recalcar en los siguientes aspectos: gran variabilidad de clases (13 unidades), sólo 26% del suelo es apto para la agricultura intensiva, el 22% es apto para pastos y más del 40% lo es de vocación forestal, 63% de los suelos están sujetos a diversos grados de erosión hídrica, estimándose pérdidas de suelo que oscilan de 20 a 300 toneladas métricas por ha/año en áreas con cobertura forestal densa y pérdidas entre 700 a 1,100 toneladas métricas por ha/año en áreas desforestadas. Lo anterior tiene mayor evidencia sobre todo en áreas donde el suelo es vulnerable a la erosión hídrica, es decir, sin cobertura vegetal y sin prácticas adecuadas de manejo y conservación de suelo y agua.

La importancia del estudio consiste en la interpretación de los principales parámetro geomorfológicos, el análisis regional de crecidas (que permite la estimación de diversos caudales de diseño) y la modelación hidráulica mediante el programa HEC – RAS. Además, el mismo consistirá en la primera fase para realizar la modelación de la pérdida de suelo por erosión hídrica a nivel de cuenca hidrográfica, la cual permitirá establecer lineamientos de manejo sobre los recursos naturales con la finalidad de alcanzar la sostenibilidad.

## **4. MARCO TEÓRICO**

### **4.1 MARCO CONCEPTUAL**

#### **4.1.1. Ciclo hidrológico**

El ciclo hidrológico es un proceso continuo en el que una partícula de agua evaporada del océano, vuelve a él después de pasar por las etapas de precipitación y escorrentía superficial o subterránea. A lo largo del ciclo, existen múltiples cortos circuitos o ciclos menores. También hay que tener en cuenta que el movimiento del agua en el ciclo hidrológico se caracteriza por la irregularidad, tanto en el espacio como en el tiempo. (Custodio y Llamas, 2001)

Un ciclo que al describirlo se puede partir del punto en que el agua se evapora de los océanos (en mayor proporción) y de la superficie terrestre por efecto de la radiación solar y el viento. Este vapor se transporta y eleva por la atmósfera en forma de nubes hasta condensarse y precipitarse nuevamente a la tierra. (Aparicio, 2001)

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

#### **4.1.2. Cambio climático**

A todo lo largo y ancho del Planeta se han encontrado evidencias cada vez más fuertes de que el cambio climático se está produciendo de una forma acelerada. Algunos de los ejemplos más evidentes los podemos encontrar en lugares tan apartados de nuestra geografía como Siberia, o la

península Antártica. Sin embargo, Centroamérica está viviendo una situación climática la corriente de El Niño, que da indicios claros del calentamiento del clima en nuestra región. (NOVIB, 2001)

Todas estas catástrofes tienen un punto en común: los científicos del mundo coinciden en que se deben a las alteraciones climatológicas que se están produciendo debido al calentamiento global de la temperatura del Planeta, el cual tiene su origen en las emisiones de gases que se están realizando por las actividades humanas. (NOVIB, 2001)

El cambio a gran escala que se está produciendo en la circulación atmosférica y en las corrientes marinas -como la oscilación del sur "El Niño"-, debido al calentamiento de la atmósfera, está provocando en la Región Centroamericana una modificación sobre el régimen de lluvias y los patrones del clima. Esta situación ha llegado hasta tal punto, que incluso en las áreas más lluviosas de la zona se está sufriendo una fuerte sequía, pues ha variado la distribución estacional de la lluvia y su intensidad, lo que ha causado un aumento en la evaporación. (NOVIB, 2001)

Aunque las emisiones de gases de invernadero producidas en nuestros países no se encuentran en los niveles de las naciones industrializadas, lo cierto es que Centroamérica es un territorio muy vulnerable a los efectos producidos por el calentamiento global. Este hecho por sí sólo, debería servir como justificante suficiente para que los mandatarios de la región tomaran acciones inmediatas para dejar de fomentar en sus países las emanaciones de este tipo de gases, adoptando el uso de energías renovables. Además deberían demandar a los gobernantes de los estados desarrollados que adopten prácticas urgentes para reducir sus emisiones de forma efectiva. De no aceptar una actitud de responsabilidad ante la amenaza que supone el efecto invernadero, las consecuencias que hoy se están viendo tales como hambruna, enfermedades, inundaciones, sequía, pérdidas de cosechas, racionamientos de energía y un largo etcétera, supondrán un muy grave riesgo para los habitantes de todo el planeta, y en particular -por su vulnerabilidad- de la región centroamericana. (NOVIB, 2001)

#### **4.1.3. Consecuencias del cambio climático**

No es posible predecir con gran seguridad lo que pasaría en los distintos lugares, pero es previsible que los desiertos se hagan más cálidos pero no más húmedos, lo que tendría graves consecuencias

en el Oriente Medio y en África donde el agua es escasa. Entre un tercio y la mitad de todos los glaciares del mundo y gran parte de los casquetes polares se fundirían, poniendo en peligro las ciudades y campos situados en los valles que se encuentran por debajo del glaciar. Grandes superficies costeras podrían desaparecer inundadas por las aguas que ascenderían de 0,5 a 2 m., según diferentes estimaciones. Unos 118 millones de personas podrían ver inundados los lugares en los que viven por la subida de las aguas.

Tierras agrícolas se convertirían en desiertos y, en general, se producirían grandes cambios en los ecosistemas terrestres. Estos cambios supondrían una gigantesca convulsión en nuestra sociedad, que en un tiempo relativamente breve tendría que hacer frente a muchas obras de contención del mar, emigraciones de millones de personas, cambios en los cultivos, etc. (NOVIB, 2001)

La principal causa de la emisión de gases de invernadero a la atmósfera es el uso de combustibles fósiles (ver diagrama 1). Si embargo, durante años la industria del petróleo, carbón y gas ha movilizado millones de dólares en recursos, además de grandes influencias, para argumentar que el cambio climático no es más que un mito, una teoría sin comprobar e incluso una conspiración ecologista. Con esos argumentos y conociendo las grandes necesidades de los países en vías de desarrollo, han desplegado una enorme capacidad para convencer a la opinión pública de que la única alternativa energética técnicamente viable, es la quema de combustibles fósiles. (NOVIB, 2001)

Los efectos del calentamiento dependen de la velocidad con que se produzca. También las posibilidades de limitarlo y en definitiva las decisiones políticas a tomar.

Sería muy diferente la situación a enfrentar en el caso de un aumento de 0,5 °C o de 1,5 °C dentro de 50 años por ejemplo. Estos valores corresponden a los aceptados actualmente, mientras que hace pocos años los extremos calculados variaban entre 1 y 5 °C en el mismo plazo aproximado, según diferentes modelos. (NOVIB, 2001)

#### **4.1.4. Efectos del calentamiento global en Centroamérica**

##### **A. Características climáticas actuales**

La peculiaridad de la región centroamericana, cruzada por cadenas montañosas que se sitúan de forma perpendicular a los vientos alisios, hace que exista una diferencia climática entre la vertiente atlántica y la pacífica: el atlántico es por lo general más lluvioso, y por tanto tiene una cobertura

nubosa mayor, mientras que el pacífico tiene una estación seca bien definida y menos cobertura nubosa. . (NOVIB, 2001)

Aún con todo, el régimen de precipitaciones de Centroamérica es cambiante, ya que depende de la dirección de los vientos y de la posición de las zonas de convergencia tropical e intertropical.

La temperatura se caracteriza por tener variaciones bastantes marcadas entre el día y la noche, con diferencias mayores a las que se encuentran entre la estación más fría y la más calida. Debido a que la temperatura en la región se encuentra muy modulada por los índices de nubosidad, la vertiente Pacífica suele ser más caliente, al tener más horas de sol.

Esta diferencia de temperatura, nubosidad y precipitaciones que se dan en ambas vertientes, provocan que los efectos del calentamiento del planeta sobre Centroamérica deban ser estudiados de forma distinta par a la zona Atlántica y la Pacífica. De hecho, la situación que se está viviendo actualmente bajo los efectos de la Corriente de El Niño, es un reflejo de esa diferencia climática que existe en ambas vertientes. Esa es la razón por la cual, mientras unas zonas del país viven una intensa sequía, otras partes del mismo territorio se ven azotadas por lluvias torrenciales e inundaciones. . (NOVIB, 2001)

## **B. La vulnerabilidad de la región ante el calentamiento global**

Según las apreciaciones de la mayoría de los meteorólogos del mundo, los efectos devastadores que se están viviendo durante los últimos meses debidos a la corriente de El Niño, son una consecuencia directa del calentamiento que está sufriendo nuestro planeta debido a la acción humana.

Existen varios factores que hacen que la región se considere muy vulnerable a los efectos de un cambio climático permanente:

- La mayoría de los climas de Centroamérica son considerados marítimos. Al provocarse cambios en las corrientes marinas, los patrones de lluvia y viento se alteran enormemente, con lo que toda la región se verá afectada.
- La población cuenta con una infraestructura de abastecimiento de agua muy precaria, en la inmensa mayoría de os casos muy ligada a que existan lluvias abundantes y cíclicas.

- La actividad económica de los países de Centroamérica está basada en gran medida en la agricultura y además existe una gran cantidad de personas que dependen de los cultivos de subsistencia. Las malas cosechas provocan hambre y enfermedades en la población y una hecatombe para la economía regional.

Existe una porción importante de personas que dependen de los recursos marino-costeros para sobrevivir, así como unos ecosistemas muy frágiles, que con unos pocos centímetros de aumento en el nivel de los mares pueden desaparecer. Además, la mayoría de los países de Centroamérica están desarrollando una infraestructura turística y portuaria en dichas zonas, que se puede ver muy afectada. . (NOVIB, 2001)

- Una gran parte de la población depende de los recursos de los bosques para sobrevivir. Un cambio en los patrones climáticos, puede alterar de forma grave, aunque aún no conocida, la composición de los mismos, provocando penurias en la población.

Los recursos energéticos están poco desarrollados, y apenas, existen programas nacionales para la investigación en las energías limpias de gran potencial en la región, como son la solar, la eólica y la geotérmica. Para contrarrestar los efectos de las sequías, se está invirtiendo en generadoras térmicas -que utilizan combustibles fósiles-, lo que aumenta las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y por lo tanto contribuye al calentamiento global: los gobiernos están impulsando políticas erróneas de las que cada vez es más difícil salir.. (NOVIB, 2001)

### C. Guatemala en el futuro ante los efectos del calentamiento global

Cuadro 1. El futuro de Guatemala ante los efectos del calentamiento global

País	Temperatura	Cuencas Hidrográficas	Aumento del mar	Agricultura	Población
Guatemala	Aumento de 1,5°C a 4,5°C	Exceso o déficit de escorrentía de 8% al 15%. Inundaciones y sequías. Gran erosión.	Incremento de las áreas inundadas. Incremento de la salinidad en estuarios y canales. Desaparición de estuarios.	Grandes pérdidas de cosechas	Catástrofes, muertes y pérdidas económicas. Hambruna. Racionamientos de energía. Escasez de agua potable. Aumento deuda externa. Pérdidas en viviendas. Migración a las ciudades.

Datos de GREENPEACE, Proyecto Centroamericano sobre Cambios Climáticos (PCC) Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, (PNUMA) y Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC)

#### 4.1.5. Procesos de escurrimiento

##### A. Escorrentía

Conviene distinguir entre escorrentía superficial y escorrentía en sentido amplio. (González, 2005)

- i) La escorrentía superficial, es la parte de la precipitación que se escapa de la infiltración y de la evapotranspiración y que, consecuentemente, circula por la superficie (arroyamiento en superficie).
- ii) Escorrentía en sentido amplio, es la circulación de agua producida en un cauce superficial.

La distinción es importante porque la escorrentía consta de varios componentes, tiene distintas aportaciones. El caudal de una red de drenaje en un momento dado procede de:

- Arroyamiento en superficie (escorrentía superficial)
- Precipitación sobre el propio cauce (a veces es más importante que la primera)
- Flujo hipodérmico. Es una parte de la precipitación que no circula en superficie pero tampoco se infiltra en el suelo, sino que circula pendiente abajo en el suelo a ligera profundidad.

Aportaciones del flujo subterráneo. También es a veces la más importante (río efluente). (González, 2005)

## B. Generación de escorrentía

El proceso de generación de escorrentía es complicado. De una manera simple puede explicarse este proceso mediante un ejemplo. Considérese una lluvia con intensidad constante que cae sobre un área. Al inicio de la lluvia, la mayor parte queda retenida sobre la superficie de las plantas (intercepción) y sobre la superficie del suelo (retención superficial). Cuando se superan las pérdidas iniciales, una parte de la lluvia inicia a infiltrarse. Mientras progresa la lluvia, aumenta la parte que fluye sobre la superficie (escorrentía superficial), mientras que la parte que se infiltra disminuye progresivamente. (Orozco, 2003)

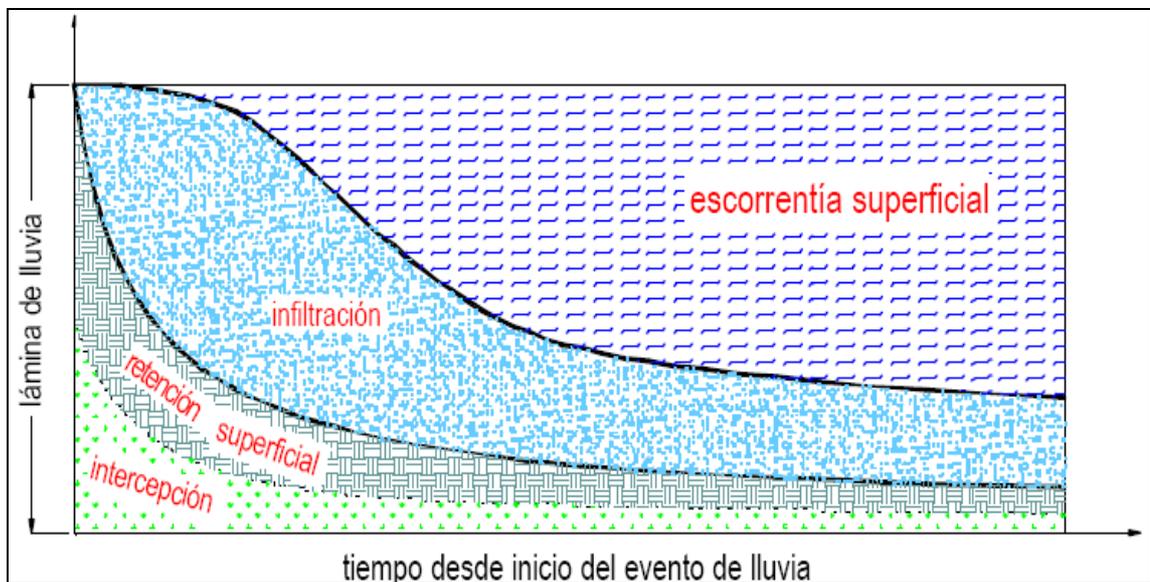


Figura 1. Ilustración cualitativa de la evolución de la escorrentía superficial, durante un evento de lluvia de intensidad constante

Fuente: Tomado de documento, Precipitación-Escorrentía. (Orozco, 2003)

La figura 1 muestra, cualitativamente, el desarrollo de estos cuatro componentes del ciclo hidrológico para un área, sobre la cual cae una lluvia de intensidad constante.

Como se menciona arriba, el proceso dominante en el componente de las abstracciones es la infiltración. Inicialmente, cuando la precipitación cae sobre un suelo seco, la intensidad de lluvia es, frecuentemente, menor que la tasa de infiltración. Sin embargo, mientras los poros del perfil de suelo se van llenando de agua, la tasa de infiltración disminuye y las depresiones en la superficie se empiezan a llenar. Cuando todas las depresiones están llenas y la tasa precipitación excede la tasa de infiltración, inicia la escorrentía. El suelo no necesariamente tiene que estar saturado (todo el espacio poroso ocupado por agua) para que ocurra la escorrentía. (Orozco, 2003)

### **C. Factores que influyen en la escorrentía**

Los factores que determinan la magnitud de los procesos de escorrentía incluyen:

#### **El Clima**

Es uno de los factores climáticos de mayor incidencia en la manifestación y desarrollo de la erosión hídrica. Se consideran cuatro aspectos principales relacionados con el clima; ellos son: lluvia, temperatura, energía solar y el viento. El elemento climático de mayor incidencia en la manifestación y desarrollo de la erosión hídrica esta constituido por las lluvias. (Linsley, 1988)

Existen tres características importantes de la lluvia: el volumen, la intensidad, y la distribución de lluvias, son responsables para que se produzca erosión. La velocidad y el volumen de escorrentía determinan la capacidad de arrastre de sedimentos.

#### **La Topografía**

La longitud, el grado y uniformidad de la pendiente son las características topográficas de mayor influencia en el desarrollo de los procesos erosivos. El grado de la pendiente; es importante porque a medida que aumenta el grado de pendiente la erosión crece rápidamente. La longitud de pendiente influye en la velocidad y el volumen del agua de escorrentía. Según Millar, citado por (Fuentes 2006), los terrenos con pendientes moderadas de gran longitud pueden sufrir una mayor

erosión que los que tienen altos grados de pendiente y corta longitud, pues la longitud influye en la velocidad y volumen de escorrentía.

### **La Cobertura**

La cubierta vegetal es la mejor defensa natural de un terreno contra la erosión. Toda planta defiende el suelo de los efectos de la lluvia en proporciones diferentes. Un suelo cubierto por una vegetación permanente como pastos o bosques, no muestran señales de erosión, puede haber escorrentía si la pendiente es fuerte.

Según Orozco (2003), otro de los factores relacionados con la cuenca tributaria que afecta los procesos de escorrentía son la morfología, las características de la red de drenaje, el uso del suelo, posición geográfica y el suelo.

#### **4.1.6. Conceptos básicos de simulaciones**

##### **A. Simulación**

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

##### **B. Modelo**

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

- Modelo hidrológico: herramienta matemática que permite simular el comportamiento de la escorrentía bajo distintas condiciones de precipitación y evaporación.
- Modelo hidráulico: modelo de procesos biofísicos que describen el flujo en ríos, inundaciones, entre otros.
- Modelo de erosión: simula producción de sedimentos bajo distintas condiciones de clima, relieve, suelos, vegetación y contenido de humedad.

### **C. Clasificación**

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

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

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

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

### **D. Modelación mediante HEC - RAS**

Los objetivos de realizar una simulación hidráulica en el tramo de un determinado cauce de un río son estimar las planicies de inundación (mediante la estimación de las alturas para diversos caudales de diseño) y las velocidades del flujo en cada uno de los tramos considerados la simulación. En el primer caso, se estiman las áreas susceptibles a inundación considerando todos los afluentes en el punto de interés para realizar actividades de planificación con fines de mitigar o prevenir daños a las actividades económicas y principalmente a los habitantes. La estimación de la velocidad de flujo es de utilidad para conocer el tiempo de viaje de una onda de crecida de un punto de control hacia otro de interés, principalmente para alertar a las comunidades sobre riesgos de inundaciones, el cual fue el principal objetivo de la simulación para los fines del estudio. (Gárfias 2002)

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

El programa permite modelar tanto las secciones transversales de cauces naturales como la curvatura en la definición en planta, definiendo distancia entre secciones en el centro y en ambos laterales. Asimismo permite el modelo de estructuras hidráulicas, por mencionar algunas, como puentes, diques, presas, entre otras. Los resultados que se calculan incluyen además de la definición de la superficie libre, las velocidades y energías en cada una de las secciones, así como otros datos de interés, como pendiente de energía, pérdidas de energía, etc. (Gárfias , 2002)

### **E. Simulación hidrológica**

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

### **F. Simulación hidráulica**

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

Los modelos hidráulicos requieren como principales variables de entrada caudales de diseño para diversos períodos de retorno (derivados de un análisis de crecidas en la cuenca), levantamientos topográficos de varias secciones transversales del cauce (indicando distancia y pendiente entre secciones), tipo y usos del suelo en la cuenca. Teniendo diversas aplicaciones, como lo son: delimitación de áreas inundables, niveles de inundación, tránsito de crecidas, control de avenidas, sedimentación, protección de obras, entre otras. (Fajardo, 2006)

## 4.2. MARCO REFERENCIAL

### 4.2.1. Ubicación geográfica

La Microcuenca del río Argueta posee un área de 41.89 km<sup>2</sup> y la microcuenca del río Xibalbay cuenta con un área 23.44 km<sup>2</sup>, ambas microcuencas pertenecen a la subcuenca del río Quiscab y a la cuenca del lago de Atitlán, el cual se encuentran en la vertiente del Océano Pacífico

Cuadro 2. Coordenadas UTM de las microcuencas del río Argueta y río Xibalbay.

Microcuenca	Ubicación	X	Y
Río Argueta	Parte superior	697182.83	1643157.15
	Punto de aforo	693307.46	1636375.24
	Punto Oeste	692785.77	1639952.51
	Punto Este	699244.73	1642536.09
Río Xibalbay	Parte Superior	688264.50	1646386.63
	Punto de aforo	693307.46	1636350.40
	Punto Oeste	685879.66	1642163.46
	Punto Este	693978.19	1642064.09

Fuente: Hojas topográficas de Chichicastenango (1960 I), Sololá (1960 II) y Totonicapán (1960 IV)

### 4.2.2. Ubicación político-administrativa

El área en estudio ubicada en la subcuenca del río Quiscab, se encuentra en la región número VI Sur-Occidental. El área de estudio abarca 2 municipios del departamento de Sololá (Sololá y Nahualá) y 1 municipio del departamento de Totonicapán (Totonicapán). 47 poblados del departamento de Sololá y 1 municipio y 4 poblados del departamento de Totonicapán (Cuadro 2) Datos de SIG e INE.

Cuadro 3. Poblados comprendidos dentro de la subcuenca del río Quiscab.

Departamento	Municipio	Poblado		Categoría	Población
Sololá	Sololá	1	Chuaxic	Aldea	1,075
		2	Chuiquel	Aldea	1,059
		4	La Ilusión Chuiquel	Caserío	810
		6	Argueta	Aldea	1.375
		7	El Tablón	Aldea	9.969
		8	Los Encuentros	Aldea	3.283

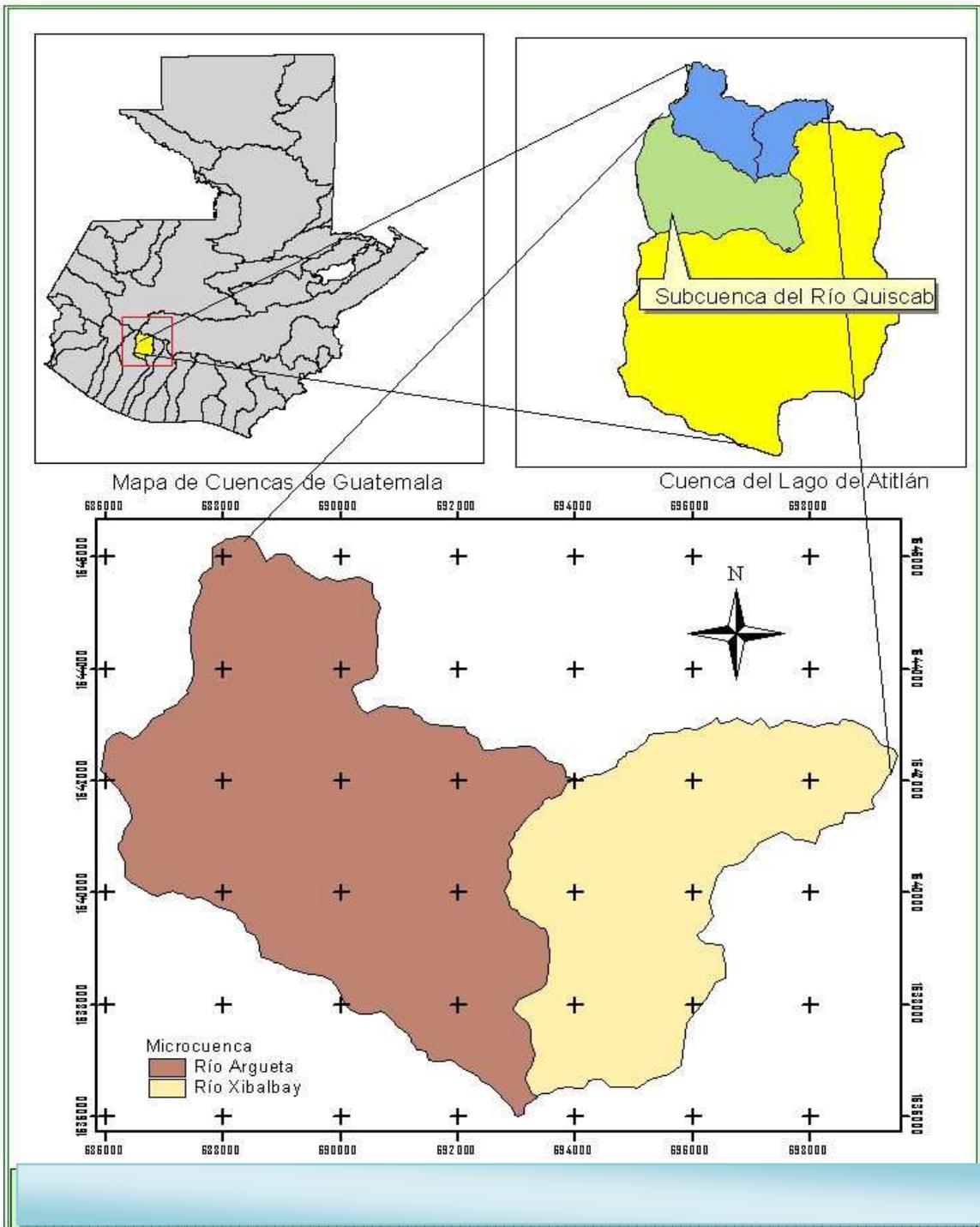
		9	María Tecún	Colonia	915	
		11	Xaquijyá	Aldea	2.450	
		12	Xajaxac	Aldea	6.214	
		13	Coxom	Caserío	537	
		14	Cooperativa Xaquijyá	Caserío	873	
	Nahualá	1	Xeabaj	Caserío	927	
		2	Paminajá	Caserío	458	
		4	Pacoxom	Caserío	880	
		5	San Lázaro	Caserío	103	
		6	Tzamcoton ó Santa Rita	Cantón	205	
		7	Santa Rita Xeabaj	Caserío	896	
	Totonicapán	Totonicapán	1	Barremeché	Aldea	2.469
			2	La Esperanza	Caserío	1.842
			3	La Concordia	Aldea	1.036
Población Total de la subcuenca del río Quiscab					8,766.638	

Fuente: con base en el XI Censo de Población y VI de habitación, INE, 2002

#### 4.2.3. Características socioeconómicas

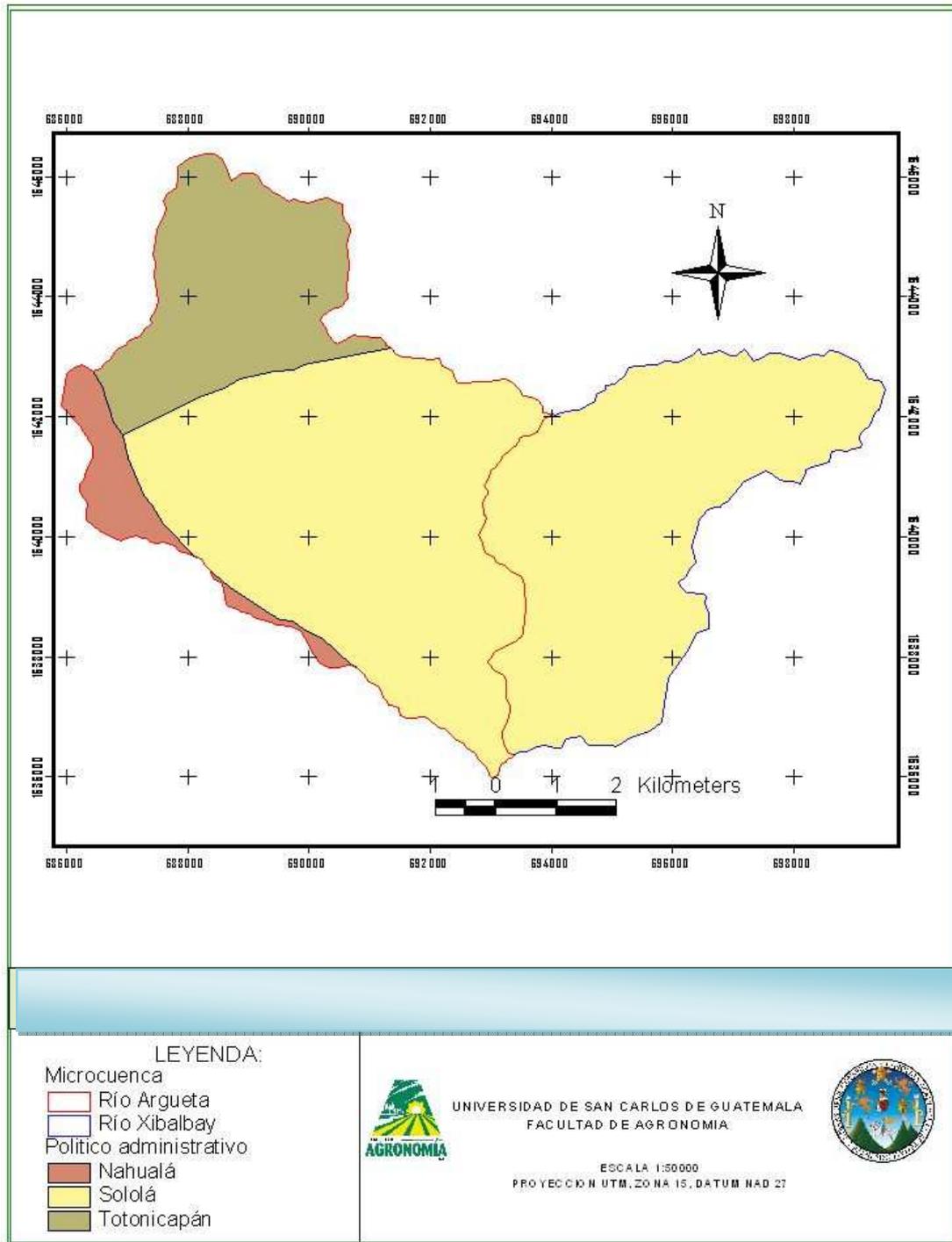
##### A. Demografía

El área posee una población de 27608 habitantes, de los cuales 17,551.91 habitantes pertenecen a la microcuenca del río Argueta y 10,052 a la microcuenca del río Xibalbay (Según el Censo XI de Población y VI de Habitación 2,002) teniendo una densidad poblacional de 419 habitantes /km<sup>2</sup> siendo una densidad media en la zona pero relativamente alta a nivel nacional por poseer una tasa de crecimiento poblacional anual del 4 % (Proyecciones nacionales de crecimiento). (SENACYT, 2007). La población económicamente activa dentro del área de estudio es de 6,349 habitantes, de los cuales el 80.63% son hombres y el 19.37% mujeres. Los pobladores oficialmente activos son: empleados públicos y privados, agricultores, familiar no remunerado, esto se debe a un bajo nivel de escolaridad y escasa o ninguna preparación para el trabajo, en consecuencia, los ingresos son bajos y la dependencia de los recursos naturales es alta. A nivel de género el 51% de la población son mujeres (14,080 habitantes) y el 49% son hombres (13.528 habitantes), representando un balance de distribución por género. (SENACYT, 2007)



Fuente: IGN

Figura 2. Mapa de ubicación geográfica de las microcuencas



Fuente: IGN

Figura 3. Mapa político administrativo de la región

## **B. Educación**

Las tasas de escolaridad primaria en la subcuenca del río Quiscab son altas con un 48% (31,842 habitantes), pero disminuyen en básico y diversificado a 5,970 (9%). Esto debido a que los jóvenes después de la primaria con más rigor y necesidad ingresan a la PEA (Población Económicamente Activa) y al matrimonio. El 41% de la población son alfabetos y el 59% de la población es analfabeta. (SENACYT, 2007)

## **C. Idiomas**

En el área de estudio además de hablar el español también se hablan dos idiomas mayas: Quiché y K'aq'chi'el. Siendo el 96.76% de la población indígena y únicamente el 3.23% no indígena. (SENACYT, 2007)

## **D. Tenencia de la Tierra**

En la mayoría de los poblados pertenecientes a las dos microcuencas viven en terrenos de su propiedad o bien comunal y municipal, se utilizan como unidad de medida productiva de trabajo a la cuerda, que básicamente consta de 32 varas por 32 varas ( $1024 \text{ varas}^2 = 0.065 \text{ ha}$ ).

## **E. Actividades Productivas**

En las microcuencas se cultivan principalmente el maíz y frijol, arveja, papa, aguacate, zanahoria, repollo, remolacha, coliflor, cebolla; entre algunos frutales están: durazno, manzana, granadilla, higo, nísperos y ciruelas. (SENACYT, 2007)

Aproximadamente el 65 % de las familias que conforman el área de estudio tienen crianza de diferentes clases de ganado, como el vacuno, caballar y lanar, siendo este departamento uno de los mayores productores de lana a nivel nacional. El ganado vacuno es destinado a la venta. El 80% de las familias tiene pollos y gallinas de los que obtiene huevos y carne para autoconsumo y en algunos casos para la venta dentro de la misma comunidad. (Censo Agropecuario, 2003). La producción pecuaria dentro de la subcuenca se realiza en pequeña escala y de forma extensiva, ya que el ganado lo pastorean la mayoría de veces en áreas no aptas para pastura. Debido a la topografía, clima y

minifundio no permite una producción extensiva de ganado bovino que resulta ser el de mayor número de individuos.

#### 4.2.4. Aspectos biofísicos

##### A. Clima

El clima de las microcuencas según la clasificación de Thornthwaite es templado, de acuerdo a los registros de la estación meteorológica El Tablón, la temperatura media es de 14.8 C°. La precipitación pluvial anual varía entre 975 mm a 1836.8 mm, la humedad relativa en el año de 1994 a 2007 es de 78% según datos obtenidos de la estación meteorológica del Tablón, Sololá (INSIVUMEH, 2004)

El climadiagrama indica que el mes de abril a inicios de noviembre (relleno celeste) hubo un superávit de agua aprovechable para cultivos del área y para aguas superficiales (afluentes del río Quiscab) porque como se observa en el climadiagrama la PP (precipitación promedio) superó a la ETP (evapotranspiración potencial), en los meses de diciembre a marzo (relleno verde), existió un déficit de agua, siendo esto porque existió mayor evapotranspiración potencial; la temperatura media a lo largo del año oscila entre los 13.4 y 15.6 grados centígrados.

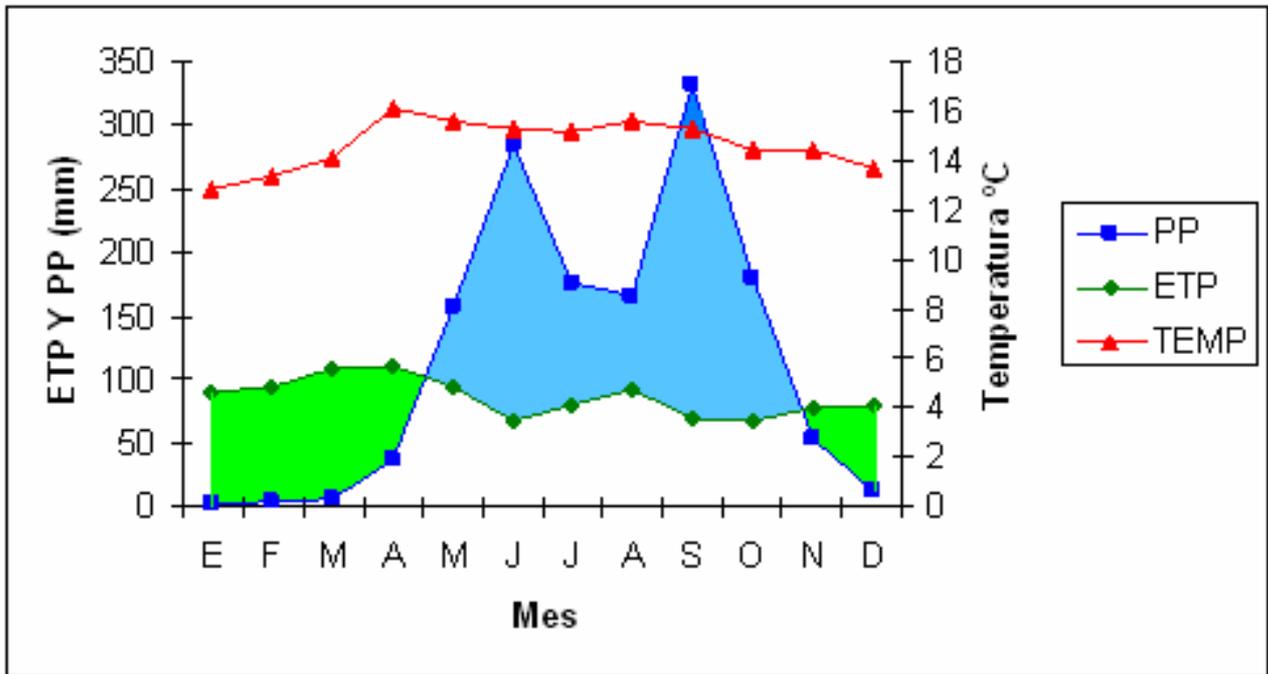
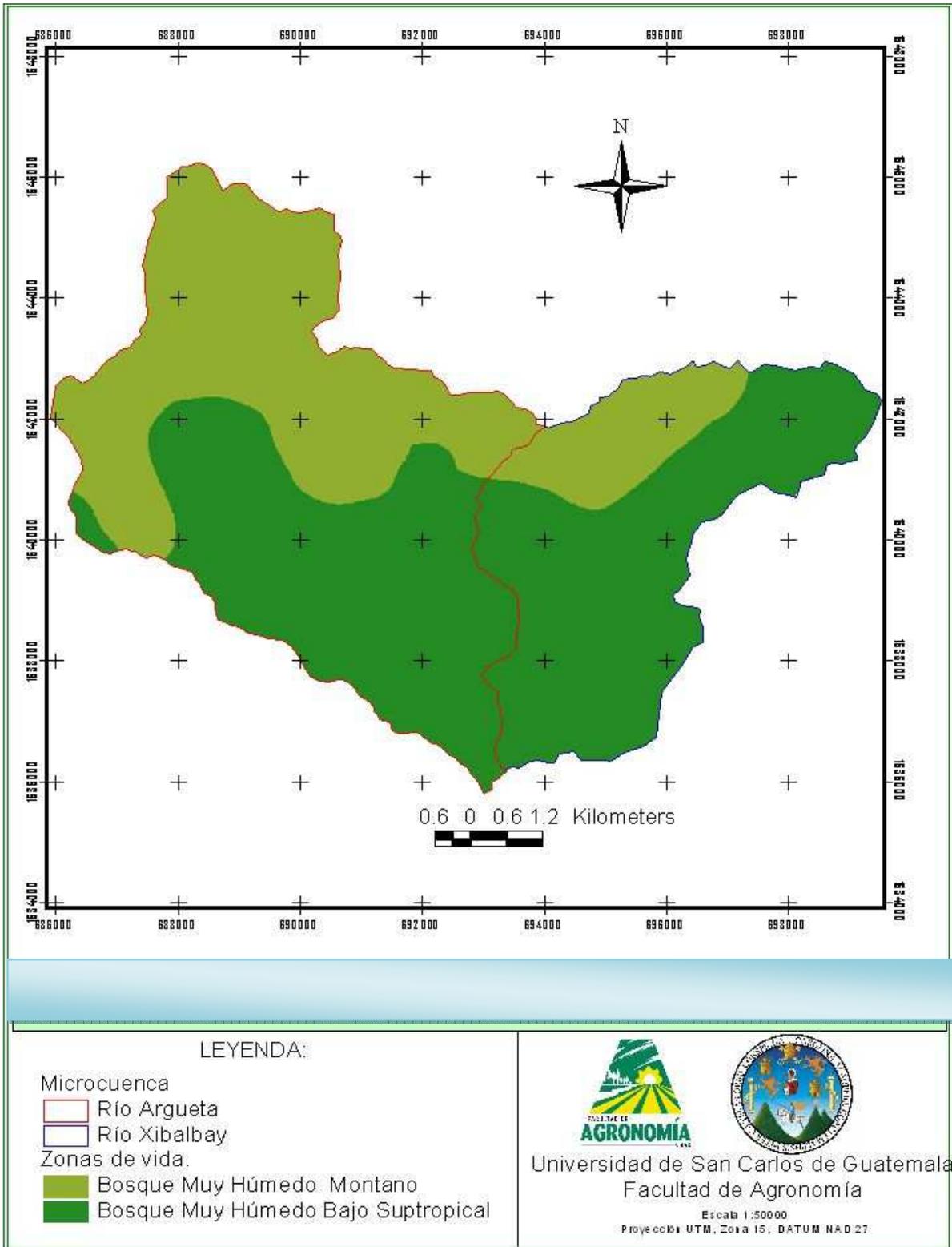


Figura 4. Climadiagrama de la estación El Tablón, Sololá, período de 1994 a 2007.

Fuente: Elaboración propia con datos del INSIVUMEH.



Fuente: IGN

Figura 5. Mapa de zonas de vida de las microcuencas Argueta y Xibalbay

## B. Zonas de vida

Se lograron ubicar dos zonas de vida en cada microcuenca según el sistema de Clasificación de Holdridge y modificado por (De la Cruz 1973), se ubico en la parte alta la zona de vida: Bosque Muy Húmedo Montano; en la parte baja: Bosque Muy Húmedo Montano Bajo Subtropical, correspondiendo a las siguientes áreas.

Cuadro 4. Área y porcentaje de las zonas de vida del área de estudio

Microcuenca	Símbolo	Zonas de Vida	Km. <sup>2</sup>	%
Río Xibalbay	bmh-			
	MB	Bosque Muy Húmedo Montano Bajo Subtropical	18.55	27.76
	bmh-M	Bosque Muy Húmedo Montano	4.89	7.50
Río Argueta	bmh-			
	MB	Bosque Muy Húmedo Montano Bajo Subtropical	20.75	31.76
	bmh-M	Bosque Muy Húmedo Montano	21.14	32.66
Total			65.33	100

Fuente: Capas digitales MAGA-Asprede, Esc: 1:250,000

## C. Suelos

### Geología

En la parte alta y baja media, encontramos predominancia de rocas ígneas y metamórficas del periodo terciario y cuaternario. Son rocas volcánicas sin dividir, predominantemente del Mio-Plioceno, incluye tobas, coladas de lava, material lahárico y sedimentos volcánicos (Tv).

### Fisiografía

División Fisiográfica – geomorfológico.

Región Fisiográfica Tierras Altas Volcánicas.

En Guatemala, ha existido actividad volcánica desde el Paleozoico, la que se intensificó durante el Terciario. En esta región, las erupciones de todo tipo de grietas lanzaron cantidades de material – principalmente basalto y riodacitas- que cubrieron las formaciones de tierras preexistentes, desarrolladas sobre el basamento cristalino y sedimentario que se encuentra hacia el norte. La formación de esta región volcánica fue seguida por fallas causadas por la tensión local, la cuál quebró y movió el material de la superficie como, por ejemplo, el valle hendido (graven) en que está localizada la ciudad de Guatemala.

Varias cuencas de esta región han sido llenadas parcialmente o cubiertas con pómez cuaternaria, lo que proporciona un paisaje muy contrastante con las áreas volcánicas escabrosas que las rodean. Los valles en los que se localizan las ciudades de San Marcos, Quetzaltenango, Sololá, Chimaltenango y la ciudad de Guatemala, son ejemplos de lo anterior y han sido centros de asentamiento cultural indígena

Sub Región Zona Montañosa Occidental (Tacaná-Tecpan) Se ubica y localiza esta unidad fisiográfica desde la línea fronteriza con México, en el norte de los Departamentos de Quetzaltenango y San Marcos, hasta el este en los Departamentos de Totonicapán, Sololá, y Chimaltenango, y al sur del Departamento de Quiché representa el relieve más alto de Guatemala con alturas de 1,000 a 4,000 msnm. Muy complejo. Es un ambiente volcánico por excelencia.

El drenaje superficial se observa del tipo dendrítico, subdendrítico, paralelo, subparalelo, trellis y trezado. Los principales materiales geológicos son rocas volcánicas, lavas, brechas, conglomerados y cenizas volcánicas; coladas de lava, lapilli, andecitas, basaltos, materiales piroclásticas, sedimentos aluviales. En este ambiente hay geoformas del Plioceno, Pleistoceno, Holoceno; Terciario Superior, Cuaternario Tardío y Cuaternario. (SENACYT, 2007)

Gran Paisaje: Montañas volcánicas altas de Occidente. Se localiza en el entorno del poblado de Tacaná y se extiende hacia el Este y al Sur del municipio de El Quetzal en el Departamento de San Marcos, Quetzaltenango y Totonicapán. La unidad está formada por una topografía accidentada propia de las coladas de lava, de forma escarpada (pendientes mayores al 50%), con alturas superiores a los 3,000 msnm, correspondiendo a algunos cerros a antiguos conos volcánicos que se extendieron de Oeste a Este en el país, siendo esto evidente por la forma cónica. El patrón de drenaje es dendrítico, siendo los espacios ínter fluvial angosto. (SENACYT, 2007)

Las principales rocas son tipo andesítico-basáltico y basaltos. En algunos lugares la cubierta superior es ceniza, pero en su mayor parte hay lava y lapilli. El origen y forma de esta unidad se debe a la actividad volcánica del Terciario superior (Mioceno-Plioceno). La erosión casi no ha tenido que ver con el modelado de la forma. La edad considerada para esta unidad es del Terciario superior (Plioceno). (SENACYT, 2007)

Gran Paisaje: Caldera del Lago de Atitlán. Se encuentra en el Departamento de Sololá, incluyendo los volcanes de San Pedro y Tolimán. La unidad muestra un borde semicircular. De paredes escarpadas hacia el norte, con una altura de 500 metros sobre el espejo de agua del lago de Atitlán, con pendientes mayores al 40% Ver anexo 1 (mapa de pendientes). Hacia el sur, el borde se interrumpe por el cono del volcán Atitlán, con una elevación de 3,537 msnm, con mayor altitud que los volcanes Tolimán con 3,158 msnm y San Pedro con 2,995 msnm. La caldera tiene un diámetro de aproximadamente 18 km, y un 50%, le corresponde al espejo de agua. Esta cuenca es producto del colapso volcánico y es abastecida por los ríos que se ubican principalmente al Norte de Sololá. El lago se cree que drena de forma subterránea hacia el Sur. (SENACYT, 2007)

Las rocas que forman el borde Norte son lavas andesíticas y riolíticas del Terciario, mientras que en la parte Sur los conos volcánicos están formados por lavas recientes existiendo una cubierta de cenizas volcánicas.

Esta unidad es el producto de la explosión de un antiguo volcán en el lugar que hoy ocupa el lago de Atitlán; por la salida de una gran cantidad de productos principalmente ácidos, se vació la cámara magmática y dio como resultado el colapso del antiguo volcán. La fuerte actividad volcánica post-caldera construyó al Sur los conos de San Pedro, Tolimán y Atitlán, apoyados en la estructura de la caldera que ya se había formado con depósitos de cenizas, lavas, lapilli y lahares, sobre el relieve erosionado antiguo. (SENACYT, 2007)

Gran Paisaje: Relleno Piroclástico alrededor de la Caldera de Atitlán. La unidad se extiende desde Nahualá en Sololá hacia el Este hasta llegar a San Martín Jilotepeque en Chimaltenango. Su forma es irregular, las pendientes son de 3 a 18%, siendo las mayores pendientes las que se presentan en las laderas de los ríos, donde han sido erosionados los rellenos piroclásticos Ver anexo 1 (mapa de pendientes). En esta unidad es donde se asientan varios de los poblados de Occidente del país: Nahualá, Tecpán Guatemala, Patzun, Patzicía, Santa Cruz Balanyá, Comalapa y San Martín Jilotepeque. Los ríos que cortan esta unidad presentan un patrón de drenaje subdendrítico y subparalelo debido al grado de fallamiento orientado de NE-SO y NO-SE.

La unidad esta compuesta por piroclastos de pómez tipo lapilli. Con espesores de hasta 200 metros. Su origen esta en la caída de grandes volúmenes piroclásticos de pómez y fragmentos de

rocas volcánicas arrojadas por el colapso ocasionado por la explosión de la caldera del lago de Atitlán, principalmente hacia el Norte, los que rellenaron valles antiguos de rocas volcánicas terciarias. De acuerdo al análisis fisiográfico geomorfológico, se formuló la leyenda fisiográfica de las microcuencas del río Argueta y río Xibalbay. (SENACYT, 2007)

Cuadro 6. Leyenda Fisiográfica del área de estudio

Región Fisiográfica	Zonas de Vida	Gran Paisaje	Paisaje	Sub-Paisaje	Elementos del paisaje
<b>Tierras Altas Volcánicas</b>	Bosque Muy Húmedo Montano Subtropical	<i>Montañas Volcánicas Altas de Occidente(alta)</i>	Montañas altas de Argueta y Xibalbay	Región Montañosa Este	Escarpe alto del cerro Maria Tecún
					Deposiciones intercolinares del río Argueta
				Región Montañosa Oeste	Escarpes Altos del río Parracana
					Escarpes Altos del Cerro Tzampual
			Altiplanicie degradada		
	Bosque Muy Húmedo Montano Bajo Subtropical	<i>Relleno Piroclástico alrededor de la Caldera de Atitlán</i>	Depósitos aluviales y piroclásticos medios	Aluviones Medios del río Argueta	Aluvión medio del río Pamacha
					Escarpes aluviales del Cerro san Marcos
					Aluviones del río Chuiscalera
				Aluviones Medios del río Xibalbay	Escarpes medios del río Xibalbay
					Aluviones medios de El Tablón
Deposiciones Aluviales del río Xibalbay					

Fuente (SENACYT, 2007)

### **Series de suelos**

En cuanto a la taxonomía de suelos encontramos el suborden Udands, Ustands y Orthents.

Udands (Dd), presenta propiedades andicas, un régimen de humedad Udico, una fertilidad regular a alta, la presencia de humedad es bastante adecuada, alta presencia de materiales minerales, una regular a alta saturación de bases, contenido de materia orgánica medio – alto y su principales limitantes radican en una alta retención de fosfatos y presencia de erodabilidad. (SENACYT, 2007)

El suborden Ustands (Ds), al igual que Udands presenta propiedades andicas, varia en su régimen de humedad ya que este posee un régimen Ustico, su fertilidad de regular a alta, esencialmente formado por materiales minerales, alta saturación de bases, regular a alto contenido de materia orgánica y posee factores limitantes tales como una deficiencia de humedad y la alta retención de fosfatos. (SENACYT, 2007)

- El suborden Orthents (Eo), posee un fertilidad bastante baja, esencialmente constituido por materiales minerales, una saturación de bases muy variable, contenido de materia orgánica bastante bajo y sus principales limitantes la constituyen la pedregosidad y la escasa o nula profundidad

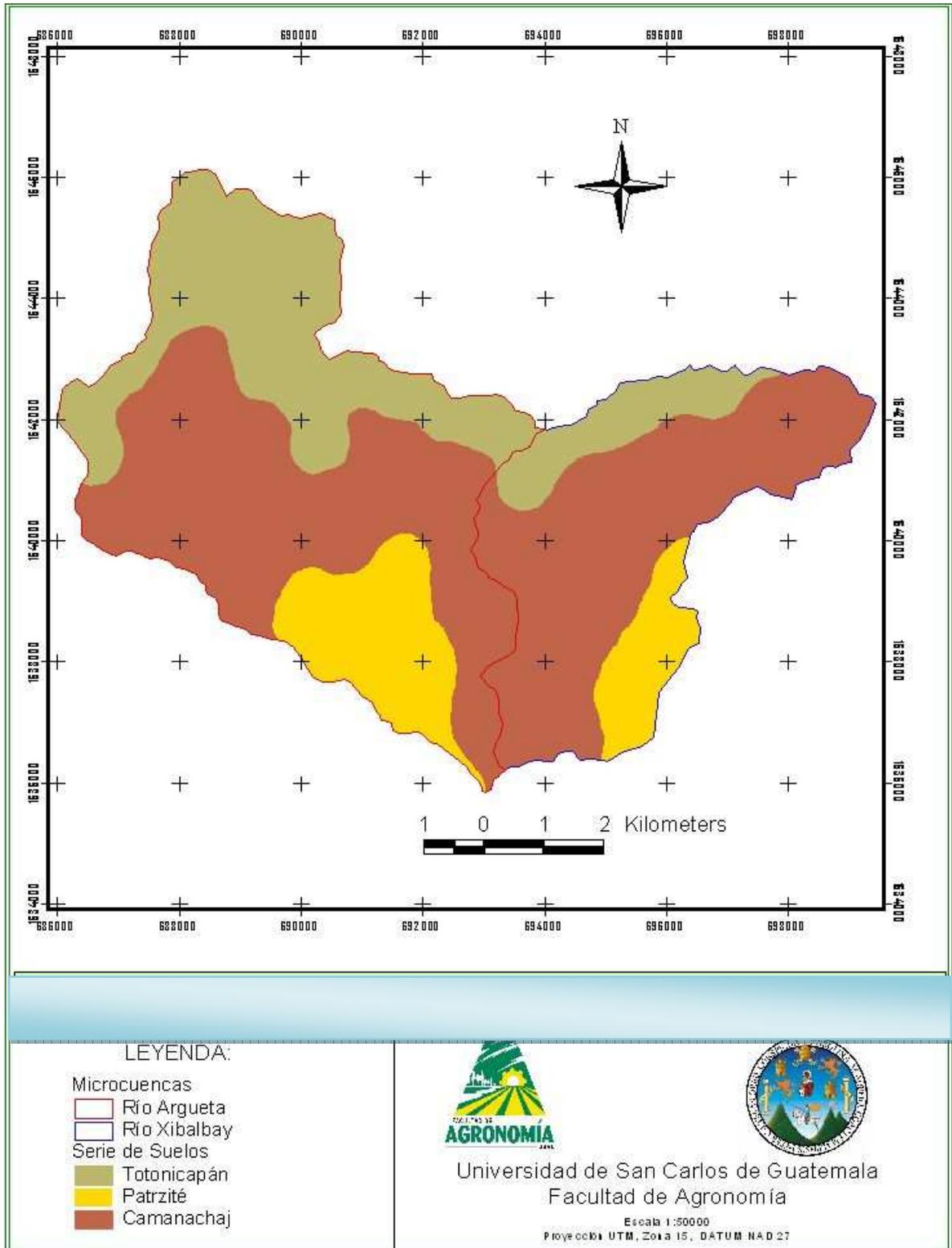
Se ubicaron 3 series de suelos como se muestra en el siguiente cuadro:

Cuadro 7. Series de suelos presentes en las microcuencas del río Argueta y río Xibalbay.

<b>Símbolo</b>	<b>Serie</b>	<b>%</b>
Cm.	Camancha	57
Tp	Totonicapán	29
Pz	Patzité	14

Fuente: Capas digitales MAGA-Asprede, Esc: 1:250,000

Para visualizar la distribución de series de suelos en la subcuenca ver el siguiente mapa de la serie de suelos.



Fuente: IGN

Figura 6. Mapa de serie de suelos de las microcuencas

- **Camancha (Cm)**

La serie de suelos Camancha se encuentra localizada en la parte media de la cuenca. Sus principales características son: Su Formación es de ceniza volcánica, en altitudes de 2300 metros sobre el nivel del mar, relieve de planicies suaves a fuertemente onduladas, buen drenaje, color café muy oscuro, textura media, Ph neutro (6.30), regular a bajo riesgo de erosión, regular a alto potencial de fertilidad. (Simmons et al ,1959)

- **Totonicapán (Tp)**

La serie de suelos Totonicapán se encuentra localizada en la parte alta en la orientación Norte. Sus principales características son: El Material Original son cenizas volcánicas, encontrado arriba de los 2400 metros sobre el nivel del mar, relieve suave, buen drenaje, color negro o café muy oscuro, textura moderadamente fina, Ph ligeramente ácido (5.95), riesgo de erosión alto, potencial de fertilidad regular. (Simmons et al ,1959)

- **Patzité (Pz)**

Sus principales Características son: El material Original proviene de cenizas volcánicas pomácea, en altitudes entre 1800 a 2400 metros sobre el nivel del mar, relieve inclinado, buen drenaje, color café oscuro, textura media, Ph neutro (6.25), riesgo de erosión alto, potencial de fertilidad regular. (Simmons et al ,1959)

### **Uso actual**

El siguiente cuadro se presenta los principales usos de la tierra para ambas microcuencas. No obstante en la figura se presenta el mapa de uso de la tierra, donde se puede apreciar la distribución de los mismos.

Cuadro 8. Principales usos de la tierra dentro de la Subcuenca del río Quiscab.

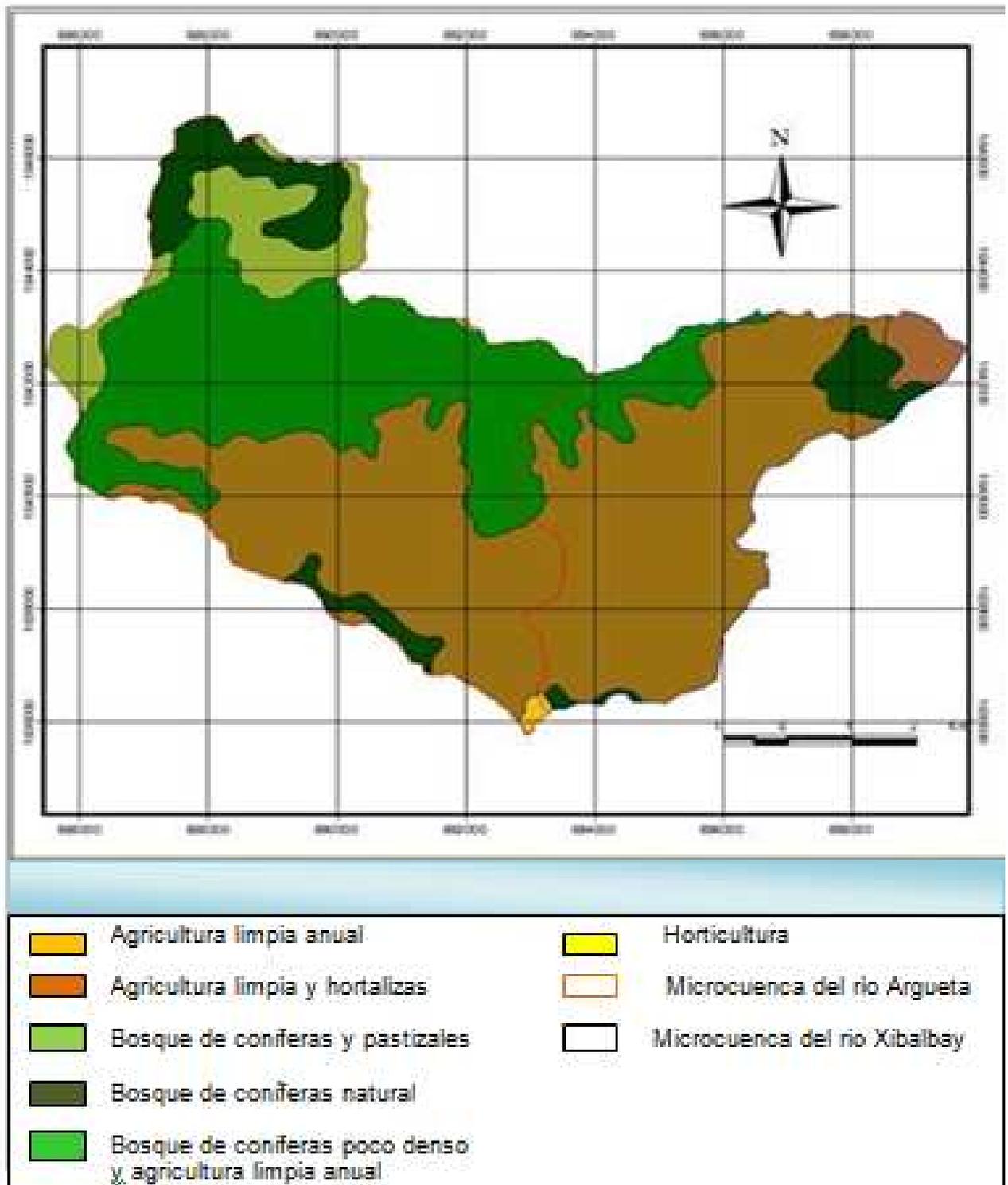
<b>Tipo de uso</b>	<b>% de área</b>
Agricultura anual (maíz y frijol)	23.64
Áreas degradadas	8.91
Bosque de conifera denso	7.32
Bosque de coníferas poco denso	17.49
Bosque mixto poco denso	6.01
Hortalizas de clima templado	8.71
Poblados rurales	27.92
Total	

Fuente: Fotografías aéreas MAGA 2006

La zona de mayor porcentaje de uso en la subcuenca es la de las poblaciones rurales que representan un 27.92 % mientras que para el uso agrícola en su mayoría es de los cultivos de maíz y frijol ocupando un 23.64 %; los cultivos de hortalizas y café ocupan un 8.71 %, el área ocupada de bosques de coníferas es de 24.81 %, de los bosques de latifoliadas es de 7.2 % y bosques mixtos es de 6.01 %.

De acuerdo al uso del suelo se puede notar que existe un aumento en el crecimiento demográfico, este fenómeno produce el cambio de uso de los suelos a zonas habitacionales, en su mayoría en zonas de riesgo como las partes altas. Dentro de la subcuenca existe bastante actividad agrícola, siendo un porcentaje menor al del uso de bosque, en los últimos años la cobertura boscosa a disminuido principalmente para su uso como fuente energética y en la industria como la carpintería.

Dentro de la subcuenca han existido alteraciones biofísicas, causadas por el mal manejo de los recursos naturales, lo cual se ha intensificado con los fenómenos naturales, estos fenómenos han provocado el cambio en el uso de los suelos.



Fuente: IGN

Figura 7. Mapa de uso del suelo

## D. Recurso hídrico

### Hidrografía

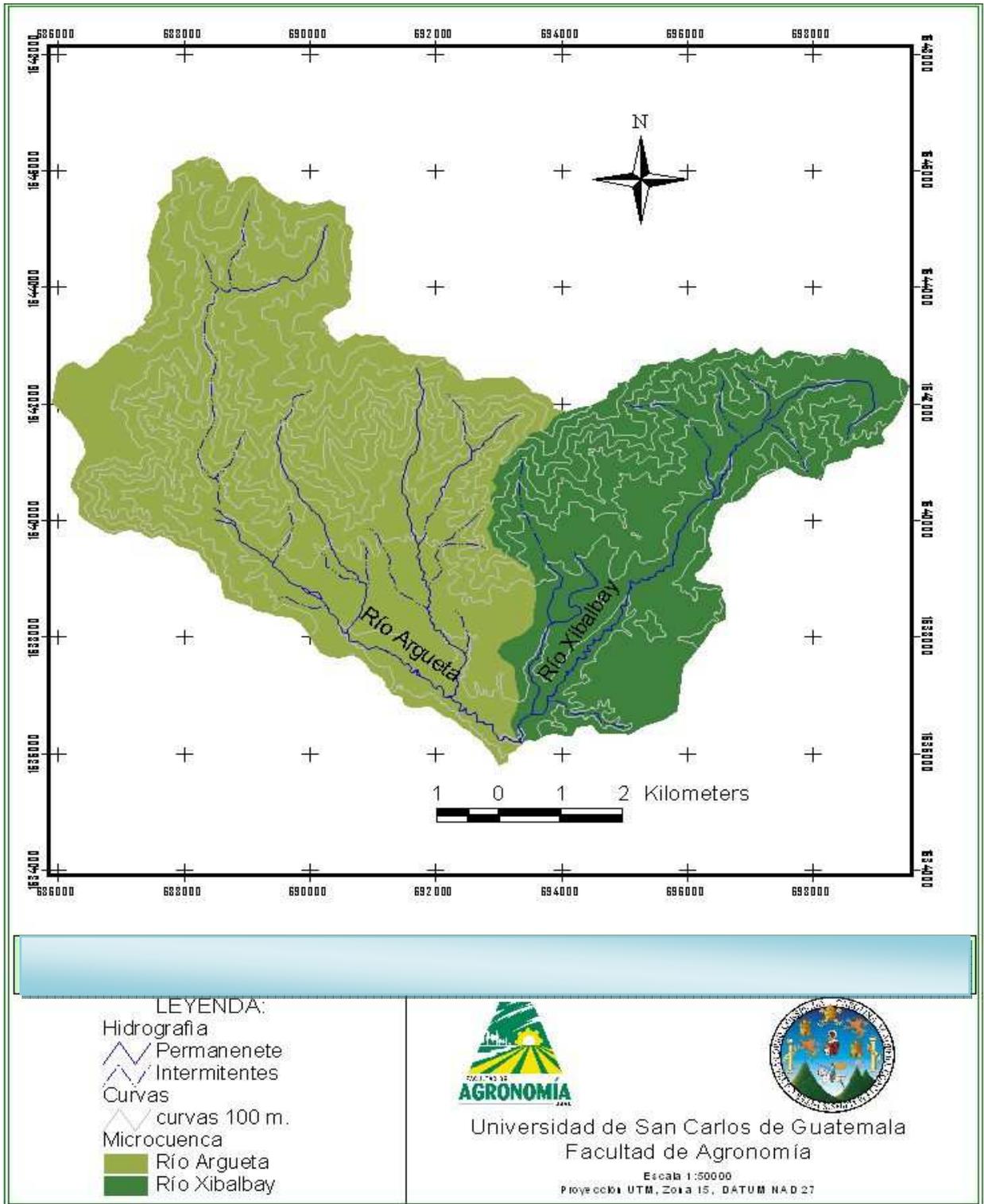
La microcuenca del río Argueta tiene un perímetro de 37.54 km. Y la microcuenca del río Xibalbay posee un perímetro de 21.67 km, ambas microcuencas cuentan solamente con estos ríos: Molino, Pagualtuj, Pamachaj, Pagualchalib, Parracana, Quebrada Santa Rita, río Argueta, Riachuelo La Esperanza, Quebrada de Barraneche, Xaquijya, Xibalbay; lo que indica una baja red drenajes.

### Hidrometría

Para tener referencias del caudal que poseen las corrientes de las microcuencas, se realizaron aforos época lluviosa (junio a noviembre) y seca (diciembre a mayo) que a continuación se presentan:

Cuadro 5. Aforos realizados en el área de estudio.

Aforo	Ubicación	Altitud	Época seca	Época lluviosa	Aumento
Río Argueta	N14,792282 W 91,261412	2,329.6 msnm	401.66 lts/seg	1523.68 lts/seg	79%
Río Xibalbay	0693908 m 1634620 m	2,180 msnm	123.48 lts/seg	437.89 lts/seg	90 %



Fuente: IGN

Figura 8. Mapa hidrográfico de las microcuencas del río Argueta y Xibalbay

En el aforo del río Xibalbay que se encuentra río abajo del de Panimajá se determinó un caudal de  $0.19\text{m}^3/\text{s}$  comparativamente con el caudal del río Panimaja que fue de  $0.26\text{m}^3/\text{s}$ , esto se debe a las pérdidas por carga por fricción, evaporación, perdidas por percolación profunda hacia los mantos freáticos, además de los aprovechamientos que se realizan para riego y consumo humano que en total suman  $0.07\text{m}^3/\text{s}$ . Debido al abastecimiento subterráneo, es decir a la cantidad de manantiales que drenan los ríos, dentro del área los ríos son efluentes. (SENACYT, 2007)

### **E. Cobertura y vegetación**

El uso de la tierra que posee mayor extensión es la agricultura, en esta actividad sobresale por su extensión los cultivos de temporada, localizados en la parte norte entre Concepción, el Tablón y río Xibalbay; entre Argueta y la Concordia; también son importantes los cultivos tales como hortalizas y ornamentales. (SENACYT, 2007)

El tipo de bosque que predomina por su extensión es el latifoliado mixto y de coníferas. El bosque de coníferas predomina en la parte norte de la subcuenca hacia María Tecún y el bosque mixto también predomina en la parte norte, en el área de la cooperativa Corazón del Bosque. (SENACYT, 2007)

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. GENERAL**

1. Caracterizar el proceso de escorrentía superficial en las microcuencas de los ríos Argueta y Xibalbay.

### **5.2. ESPECÍFICOS**

1. Estimar los parámetros geomorfológicos de mayor incidencia en la escorrentía superficial.
2. Realizar el análisis regional de crecidas para el área donde se ubican las microcuencas.
3. Estimar caudales de diseño para diversos sitios de interés en las microcuencas de los ríos Argueta y Xibalbay.
4. Realizar la simulación hidráulica en el cauce principal de la microcuenca del río Xibalbáy.

## 6. METODOLOGÍA

### 6.1 Delimitación del área de estudio

Se procedió a delimitar las microcuencas en estudio a escala 1:50,000. Posteriormente se continuó con la realización de los mapas temáticos respectivos.

### 6.2 Geomorfología

#### 6.2.1 Descripción del sistema fluvial

##### A. Parámetros lineales

- Para medir la longitud del perímetro se utilizó un curvímetro.
- Para delimitar la clase de corrientes permanentes, intermitentes y efímeras, se utilizó la información cartográfica.
- Para determinar el orden de las corrientes se utilizó la clasificación de corrientes de Horton.
- Luego se continuó estimando la longitud de corrientes de cada orden determinado en la cuenca.
- Se procedió por la determinación de la sinuosidad de las corrientes Monsalve (1,999), define sinuosidad  $S$  como la relación entre la longitud del río principal a lo largo de su cauce  $L$  y la longitud del valle del río principal medida en línea curva o recta,  $L_t$ . Se expresa en la siguiente ecuación:

$$S = L/L_t$$

##### B. Parámetros de superficie

###### Área de la cuenca

Para calcular el área de la cuenca  $A$  es probablemente la característica geomorfológica más importante para el diseño. Está definida como la proyección horizontal de toda el área de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido directa o indirectamente a un mismo cauce natural. El área es un parámetro geomorfológico muy importante, debido a las siguientes razones: (ULA, sf)

- Es un valor que se utiliza para muchos cálculos en varios modelos hidrológicos.
- Para una misma región hidrológica o regiones similares, se puede decir que a mayor área mayor caudal medio.
- Bajo las mismas condiciones hidrológicas, cuencas con áreas mayores producen hidrógrafas con variaciones en el tiempo más suaves y más llanas. Sin embargo, en cuencas grandes, se pueden dar hidrógrafas picudas cuando la precipitación fué intensa y en las cercanías, aguas arriba, de la estación de aforo.
- El área de las cuencas se relaciona en forma inversa con la relación entre caudales extremos: mínimos / máximos.
- Estadísticamente se ha demostrado que el factor "área" es el más importante en las relaciones entre escorrentía y las características de una cuenca.

Para la determinación del área existen varios métodos, entre ellos, planímetro, pesada y cuadrícula. El área de la microcuenca en estudio se determina utilizando un planímetro, por considerarse uno de los más exactos.

### **Parámetros de forma de la cuenca**

La forma de la cuenca es una característica importante, ya que se relaciona con el tiempo de concentración, el cual es el tiempo necesario, desde el inicio de la precipitación para que toda la hoya contribuya a la sección de la corriente en estudio, o en otras palabras, el tiempo que toma el agua desde los límites más extremos de la cuenca hasta llegar a la salida de la misma. (Monsalve, 1999)

- Factores de forma de Horton

Horton citado por Herrera (2004) sugirió un factor adimensional de forma  $R_f$  como índice de la forma de una cuenca según la ecuación:

$$R_f = A/Lc^2$$

Donde:

A = Área de la cuenca en estudio (km<sup>2</sup>)

Lc = Longitud del cauce principal, medida desde el nacimiento del cauce hasta el punto de aforo.

Este índice y su recíproco han sido usados como indicadores de la forma del hidrograma unitario. (ULA). De acuerdo con Herrera (2,004), se tienen valores diferentes de relaciones de forma, según forma geométrica de la cuenca, donde para un círculo es de 0.73; para un cuadrado, con la salida en el punto medio de uno de lados igual a 1, y para el cuadrado con la salida en una esquina igual a 0.5; por lo que generalmente las cuencas ovaladas tienen valores alrededor de 0.4 a 0.5 y en las cuencas largas tienen relaciones de forma menores de 0.3.

Otros factores de forma utilizados, descritos por Herrera (2,004), son los siguientes:

- Relación circular  $R_c$

Definido como la relación entre el área de la cuenca y el área de un círculo de igual perímetro al de la cuenca. A medida que este factor se aproxima a la unidad, indica que la cuenca es de forma redondeada y por lo tanto más propensa a la formación de crecidas.

- Radio de elongación  $R_e$

Se define como la relación entre el diámetro de un círculo de área igual al de la cuenca  $\emptyset CA$  y la longitud del cauce principal  $L_c$ .

- Coeficiente de compacidad o índice de Gravelius

El coeficiente de compacidad de acuerdo con Monsalve (1999), se define como la relación entre el perímetro de la cuenca  $P$  y la longitud de la circunferencia de un círculo de área igual al de la misma  $L_o$ , expresado en la siguiente ecuación:

$$K_c = 0.28 P/A^{1/2}$$

Cuanto más irregular sea la cuenca mayor será su coeficiente de compacidad. Una cuenca circular posee el coeficiente mínimo igual a uno, lo que indica que hay mayor tendencia a las crecientes en la medida en que este número sea próximo a la unidad.

### **c. Densidad de drenaje $D_D$**

Marín (2,002), define densidad de drenaje como la relación entre la longitud total de las corrientes de agua de la cuenca y su área total, expresada en  $\text{km}/\text{km}^2$ . Valores bajos de densidad de drenaje generalmente están asociados con regiones de alta resistencia a la erosión, muy permeables y de bajo relieve. Valores altos fundamentalmente son encontrados en regiones de suelos impermeables, con poca vegetación y de relieve montañoso. (ULA, sf)

De acuerdo con Aparicio (2,001), las densidades de drenaje pequeñas se observan donde los suelos son resistentes a la erosión o muy permeables, donde estos indicadores son elevados, los suelos se erosionan fácilmente o son relativamente impermeables, las pendientes son altas y la cobertura es escasa. Linsley (1,988), menciona que una densidad de drenaje alta refleja una cuenca muy bien drenada que debería responder relativamente rápido al influjo de la precipitación, una cuenca con baja densidad refleja un área pobremente drenada con respuesta hidrológica muy lenta.

### **Densidad de corrientes ( $D_s$ )**

Según Aparicio (2,001), se define como el número de corrientes perennes e intermitentes por unidad de área.

## **C. Parámetros de relieve**

### **Perfil del cauce**

Se procedió a realizar la medición del perfil de ambos cauces, el mismo también se utilizó para la estimación de la pendiente media de ambos cauces.

### **Curva hipsométrica**

Para la realización de la curva hipsométrica de las microcuencas se midió el área entre curvas utilizando un planímetro.

## **6.2.2. Análisis regional de crecidas**

### **A. Generalidades**

De acuerdo con Monsalve (1,999), una crecida se define como una elevación normal del nivel de agua dentro del lecho de la corriente de agua. En general es un fenómeno de ocurrencia de caudales relativamente grandes.

Lluvias muy intensas provocan crecidas en pequeñas cuencas, las lluvias de menor intensidad pero de duración y cubrimiento grande provocan crecidas en grandes cuencas. Orozco (2,003), menciona que los factores que propician la formación de crecidas son climáticos (precipitación, viento, evapotranspiración) y aspectos relacionados con la cuenca tributaria (parámetros geomorfológicos, relieve, suelos, contenido de humedad, etc.). Actualmente un factor importantísimo 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 registrada por un determinado río anualmente, o sea el máximo nivel instantáneo alcanzado por 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 es mejor. El objetivo de dicho análisis consiste en determinar factores de frecuencia para ciertos periodos de retorno (para distintas distribuciones de frecuencia) y aplicarlos para estimar el caudal en cualquier punto de la cuenca en función de dichos factores y 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 determinado longitud. Sin embargo en nuestro medio, existe el inconveniente de que no se cuenta con suficiente información disponible, además hay que hacer notar que las estimaciones de caudales máximos son estimadas en base a ecuaciones calibradas para caudales mucho menores, por lo que en la mayoría de los casos dichos valores de crecidas poseen significativos márgenes de error.

También hay que hacer notar, que el análisis regional de crecidas se realiza para regiones donde los fenómenos que producen la lluvia y por lo tanto la escorrentía son homogéneos, en base a lo anterior, Guatemala está dividida en 8 regiones hidrológicas, nominadas del I al VIII. Para realizar el análisis se utilizó información de 86 estaciones hidrométricas ubicadas en todo el país, cuyas series de caudales máximos instantáneos anuales tienen longitudes superiores a ocho años. El número de estaciones por región es de 11, 10, 10, 4, 12, 17, 5 y 17 para las regiones del I al VIII, respectivamente (INSIVUMEH, 2004).

### **B. Región hidrológica**

Las microcuencas en estudio, se ubican en la región hidrológica II, de acuerdo con INSIVUMEH (2,004). Se tiene la desventaja de que en ambas no existen ni han existido estaciones hidrométricas operadas por INSIVUMEH o INDE.

### **C. Análisis regional de crecidas**

En términos generales, el procedimiento utilizado para realizar el análisis regional de crecidas correspondientes a registros de 12 estaciones hidrométricas fue el siguiente:

- a. Obtención de las series de caudales máximos instantáneos anuales de las estaciones hidrométricas, oscilando entre 4 y 35 años de longitud de registro.
- b. Obtención del área correspondiente a la cuenca tributaria de acuerdo a la ubicación de la estación hidrométrica en estudio. (la información de los incisos a y b fue proporcionada por el catedrático del curso).
- c. Estimación del caudal índice, mediante la ecuación  $Q_I = \sum Q_a/n$ , o sea el promedio de los caudales máximos instantáneos de cada serie. El caudal índice es llamado también Caudal Máximo Medio o Crecida Índice (QMM).

- d. Relación en papel a escala log-log del área versus el caudal índice y obtención de la ecuación  $QI = BA^n$ , donde B y n son los parámetros de ajuste de la ecuación y A es el área correspondiente a la cuenca tributaria.
- e. Trazo de la una curva envolvente.
- f. Estandarización de las crecidas máximas instantáneas anuales de cada serie mediante la ecuación  $K = Q/Q_I$ .
- g. Ajuste de las curvas de frecuencia Normal, Log-Normal, Gumbel, Log-Gumbel, Pearson III y Log-Pearson III a las series estandarizadas.
- h. Obtención de los factores para distintos periodos de retorno  $K_{TR}$ , mediante ponderación. Por ejemplo para estimar el  $K_{100}$ , para todas las estaciones se obtiene un K promedio de 100 años, mediante la ecuación:

$$K_{100} = K_{100i} \frac{(n)}{N}$$

n = Datos de la serie.

N = Datos totales.

- i. Obtención de la ecuación  $Q_{TR} = K_{TR} * Q_I$

#### **D. Distribuciones teóricas de frecuencia**

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

#### **6.2.3. Simulación hidráulica**

##### **A. Generalidades**

Los objetivos de realizar una simulación hidráulica en el tramo de un determinado cauce de un río son estimar las planicies de inundación (mediante la estimación de las alturas para diversos caudales de diseño) y las velocidades del flujo en cada uno de los tramos considerados la simulación.

En el primer caso, se estiman las áreas susceptibles a inundación considerando todos los afluentes en el punto de interés para realizar actividades de planificación con fines de mitigar o prevenir daños a las actividades económicas y principalmente a los habitantes. La estimación de la velocidad de flujo es de utilidad para conocer el tiempo de viaje de una onda de crecida de un punto de control hacia otro de interés, principalmente para alertar a las comunidades sobre riesgos de inundaciones, el cual fue el principal objetivo de la simulación para los fines del estudio.

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

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

## **B. Secciones representativas y datos geométricos e hidráulicos**

En cada cauce se seleccionó aproximadamente 6 secciones transversales, para simular los niveles obtenidos para diversos caudales de diseño en los sitios de interés que se seleccionaron. Los coeficientes de rugosidad ( $n$ ) de la ecuación de Manning que se utilizaron fueron de 0.035 en el cauce principal y 0.040 en planicies de inundación. En lo que respecta a coeficientes de contracción y expansión del cauce se utilizaron 0.10 y 0.30 respectivamente.

## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 7.1 Descripción del sistema fluvial

#### 7.1.1 Patrón de drenaje superficial

El patrón de drenaje superficial predominante en ambas microcuencas en estudio, es del tipo dentrítico está constituido por materiales homogéneos en su composición, sin control estructural y constituye uno de los patrones más comunes y se presenta en diversidad de ambientes. Aunque también existe en menor proporción el drenaje paralelo, el cual de acuerdo con Marín (2002), este tipo de drenaje se presenta en áreas dominadas por una pendiente regional, lo cual le impone una dirección predominante con cauces paralelos, este patrón es común en algunos pies de montes y laderas estructurales plegadas. En los aforos realizados se observa un comportamiento en el incremento del caudal comparando la época seca de la lluviosa en el Argueta un 79% y río Xibalbay 90%

#### 7.1.2 Tipo de cauce y transporte de sedimentos

Schumm citado por Marín (2002), clasifica los cauces por su naturaleza en dos tipos, siendo: cauces de lechos rocosos y cauces aluviales. En el caso los cauces principales de las microcuencas se clasifican como lechos rocosos. y De acuerdo con Méndez (2004), la función principal de este tipo de ríos es el transporte de agua y sedimentos, con un rango amplio de tamaño y distribución de los mismos, siendo los modos principales de transporte en suspensión y de fondo.

El comportamiento de las microcuencas con respecto a la calidad del agua según los análisis realizados en el Laboratorio de Ingeniería de la Universidad de San Carlos reporta tanto en la época seca (abril) y lluviosa (octubre) río Argueta: turbidez (2.1 y 10 UNT), olor (inodoro), aspecto (claro) y sólidos disueltos totales (73 y 108 mg/l) y el río Xibalbay: turbidez (154 y 187), olor (a tierra), aspecto (turbio) y sólidos disueltos totales (177 y 406 mg/l) principal origen del sedimento es el lecho del río, aunque en el caso de la microcuenca del río Xibalbay, tiene significativa influencia la erosión debido a la poca adopción de prácticas de conservación de suelos. Taboada (2003), menciona que los sedimentos en suspensión son transportados sin tocar fondo y los de fondo son los que se transportan deslizándose o rodando sobre el lecho del cauce.

## 7.2 Geomorfología

### 7.2.1 Red de drenaje

#### A. Perímetro

La microcuenca del río Argueta posee un perímetro de 37.54 km, mientras que la microcuenca del río Xibalbay posee un perímetro de 21.67.

#### B. Aspectos lineales

A continuación se ilustran las principales características de la red de drenaje superficial de las microcuencas:

Cuadro 9. Orden, número y longitud de corrientes en la microcuenca del río Xibalbay.

Orden de corrientes (u)	Número de Corrientes (Nu)	Longitud de corrientes (Lu)*	Longitud media de corrientes*
1	36	10.34	0.29
2	15	8.00	0.53
3	6	7.40	1.23
4	2	6.35	3.18
5	1	0.45	0.45

Fuente: INSIVUMEH (2008).

Cuadro 10. Orden, número y longitud de corrientes en la microcuenca del río Argueta.

Orden de corrientes (u)	Número de corrientes (Nu)	Longitud de corrientes (Lu)*	Longitud media de corrientes*
1	54	16.45	0.30
2	31	13.40	0.43
3	16	8.90	0.56
4	3	7.34	2.45
5	1	6.45	6.45

Fuente: INSIVUMEH (2008).

Como se observa anteriormente, ambas microcuencas son de orden 5 (de acuerdo a la clasificación de Horton). En lo que concierne a la longitud del cauce principal, se estima en 19.87 y 10.12 km respectivamente para las microcuencas del río Argueta y Xibalbay.

### C. Sinuosidad

La sinuosidad de los cauces principales de las microcuencas en estudio se estima en 1.2 y 1.17 respectivamente, clasificándose de acuerdo con Aparicio (2001), de alineamiento recto, dada la pendiente predominante en el área.

#### 7.2.2 Aspectos de Relieve

Un resumen de los principales parámetros de área estudiados en las microcuencas, se presentan en los siguientes cuadros:

Cuadro 11. Aspectos de relieve en la microcuenca del río Xibalbay.

Aspecto	Valor	Unidad
Área	23.44	km <sup>2</sup>
Relación de forma	0.23	Adimensional
Relación circular	0.63	Adimensional
Radio de elongación	0.54	Adimensional
Coefficiente de compacidad	1.25	Adimensional
Densidad de drenaje	1.37	km corriente/km <sup>2</sup>
Frecuencia de drenaje	2.53	Número corrientes/km <sup>2</sup>

Fuente: Elaboración propia (2008).

Los parámetros de forma indican que la cuenca del río Xibalbáy tiende a ser ovalada, comprobándose con el coeficiente de compacidad (mayor a 1), de acuerdo con Monsalve (1,999), este tipo de cuencas es menos susceptible a la formación de crecidas, sin embargo, existen factores importantes que inciden en las mismas, principalmente el cambio de uso de la tierra.

La densidad y frecuencia de drenaje indican que la cuenca posee un drenaje superficial moderado, con una respuesta media a eventos de precipitación.

Los aspectos de superficie son similares en ambas microcuencas en estudio, tal como se muestra en el siguiente cuadro:

Cuadro 12. Aspectos de relieve en la microcuenca del río Argueta.

Aspecto	Valor	Unidad
Área	41.89	km <sup>2</sup>
Relación de forma	0.11	Adimensional
Relación circular	0.37	Adimensional
Radio de elongación	0.37	Adimensional
Coefficiente de compacidad	1.62	Adimensional
Densidad de drenaje	1.25	km corriente/km <sup>2</sup>
Frecuencia de drenaje	2.51	número corrientes/km <sup>2</sup>

Fuente: INSIVUMEH (2008).

### 7.2.3 Perfil del cauce principal

El perfil del cauce principal de las microcuencas en estudio se muestra a continuación:

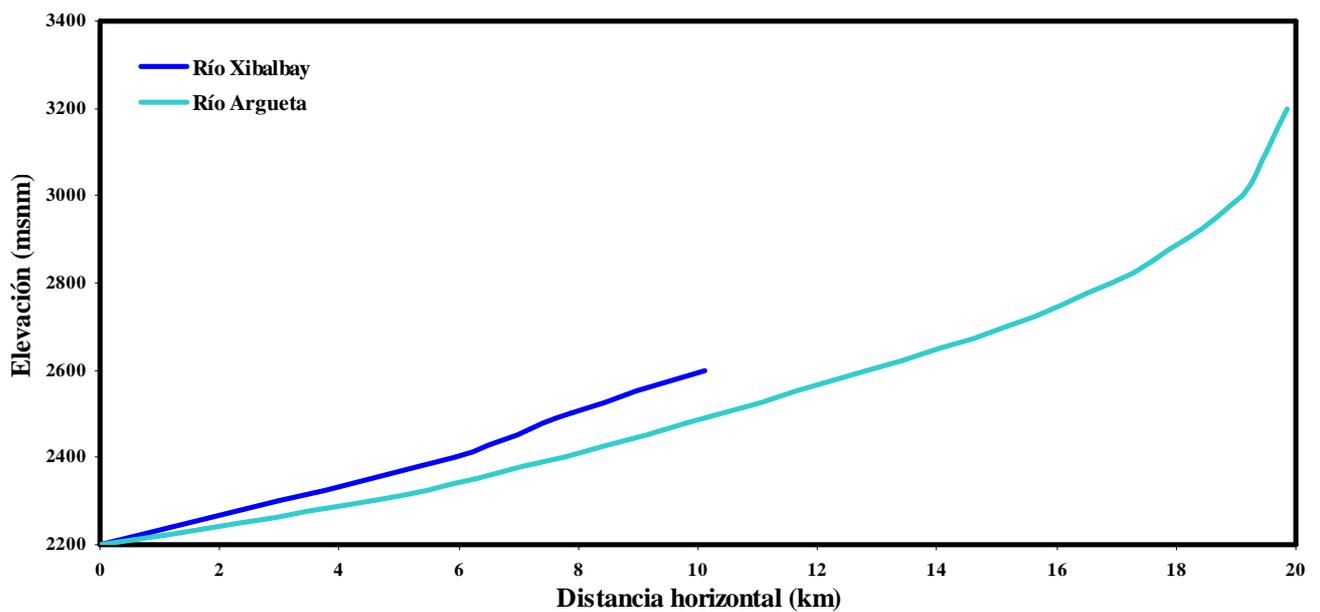


Figura 9. Perfil del cauce principal de los ríos Xibalbay y Argueta.

Como se observa en el perfil de los cauces la pendiente es alta, estimándose en 40 y 50% aproximadamente para los cauces principales de los ríos Xibalbay y Argueta. Ambas presentan en el ultimo punto de aforo una altura de 2,200 msnm y la parte mas alta de la microcuenca del río Argueta se encuentra a los 3200 msnm y la del río Xibalbay a 2800 msnm

### 7.3 Análisis regional de crecidas

#### 7.3.1 Estaciones hidrométricas

Las estaciones hidrométricas localizadas en la región hidrológica I de acuerdo a INSIVUMEH (2,004), que se consideraron en el análisis regional de crecidas para la obtención de factores de frecuencia son los siguientes:

Cuadro 13. Características de las estaciones hidrométricas utilizadas en el análisis regional de crecidas.

Estación	Río	Cuenca	Elevación msnm	Área km <sup>2</sup>	Años de registros
Cunláj	Coatán	Coatán	2120.00	140.68	21
Cantel	Samalá	Samalá	2253.77	701.04	35
Sta. C. Ixtahuacán	Nahualate	Nahualate	1563.00	144.70	9
El Potrero	Panajachel	Panajachel	1888.97	38.29	13
Panibaj	Madre Vieja	Madre Vieja	1497.03	165.23	10
Santo Tomás	Santo Tomás	Madre Vieja	1103.17	22.12	9
Jaibal	Quiscab	Lago de Atitlán	1550.00	146.50	5
Corral Grande	Naranjo	Suchiate	600.00	167.50	12
La Presa	Xayá	Coyolate	2041.54	82.82	6
Alotenango	Guacalate	Achiguate	1350.00	328.05	26
San Luis Las Carretas	Guacalate	Achiguate	1580.04	145.36	4

Fuente: INSISVUMEH (2,008).

En total se recopiló 150 caudales máximos de las estaciones hidrométricas consideradas, para lo cual se recurrió a registros históricos de la Sección de Hidrología del Departamento de Investigación y Servicios Hídricos de INSIVUMEH.

#### 7.3.2. Relación área Vrs. caudal índice

Los caudales máximos instantáneos utilizados se muestran en el cuadro A. Al relacionar el caudal índice ( $Q_I$ ) con el área de la cuenca tributaria, se una ecuación de tipo potencial expresada como  $y = 0.1629x^{0.8842}$ . Al sustituir, caudal índice y el área, se obtiene que  $QI = 0.1629(A)^{0.8842}$ , con un coeficiente de determinación de 0.70, lo que indica que el área explica el 70% del caudal índice,

mientras que el restante 30% se debe a otros factores, incluido el margen de error implicado en la estimación de los caudales máximos instantáneos. Los resultados obtenidos coinciden con lo que establece el INSIVUMEH (2004), para dicha región hidrológica. En la gráfica siguiente se muestran los resultados obtenidos al analizar las estaciones hidrométricas consideradas:

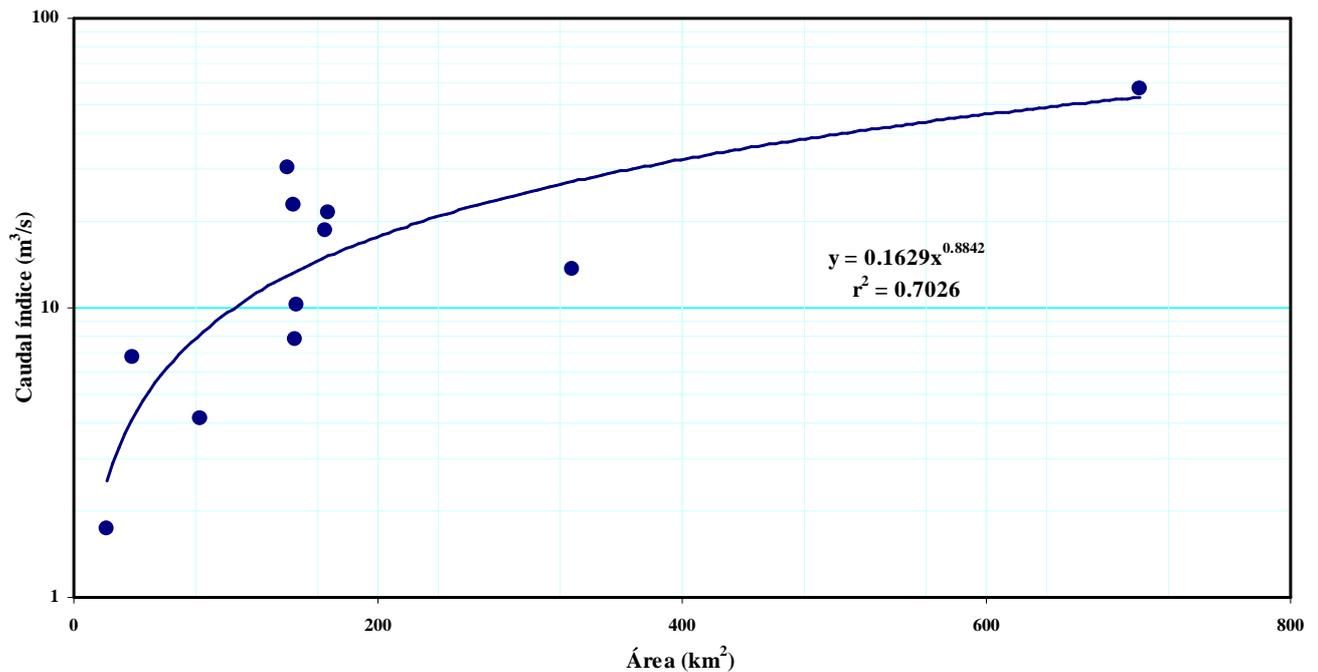


Figura 10. Caudal índice vs. área de 11 cuencas hidrográficas localizadas en la región hidrológica I.

### 7.3.3. Estandarización de las series

Los caudales estandarizados (K), se muestran en el cuadro A. Como se observa, la media aritmética en todas las series de caudales estandarizados es de 1.00. Dichos valores son a los que se les realizó el análisis de distribuciones de frecuencia.

### 7.3.4. Ajuste de curvas de frecuencia a series estandarizadas

Como se mencionó anteriormente, el análisis de frecuencia se realizó a las series estandarizadas, utilizando las distribuciones teóricas de frecuencia Normal, Log-Normal, Gumbel, Log-Gumbel, Pearson III y Log-Pearson III (momentos lineales y convencionales), estimando los factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ), para periodos de retorno de 1.01, 1.05, 1.25, 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 1,000

años. El ajuste de los datos estandarizados de las 11 estaciones hidrométricas a curvas teóricas de distribución de frecuencia se muestra en la siguiente figura:

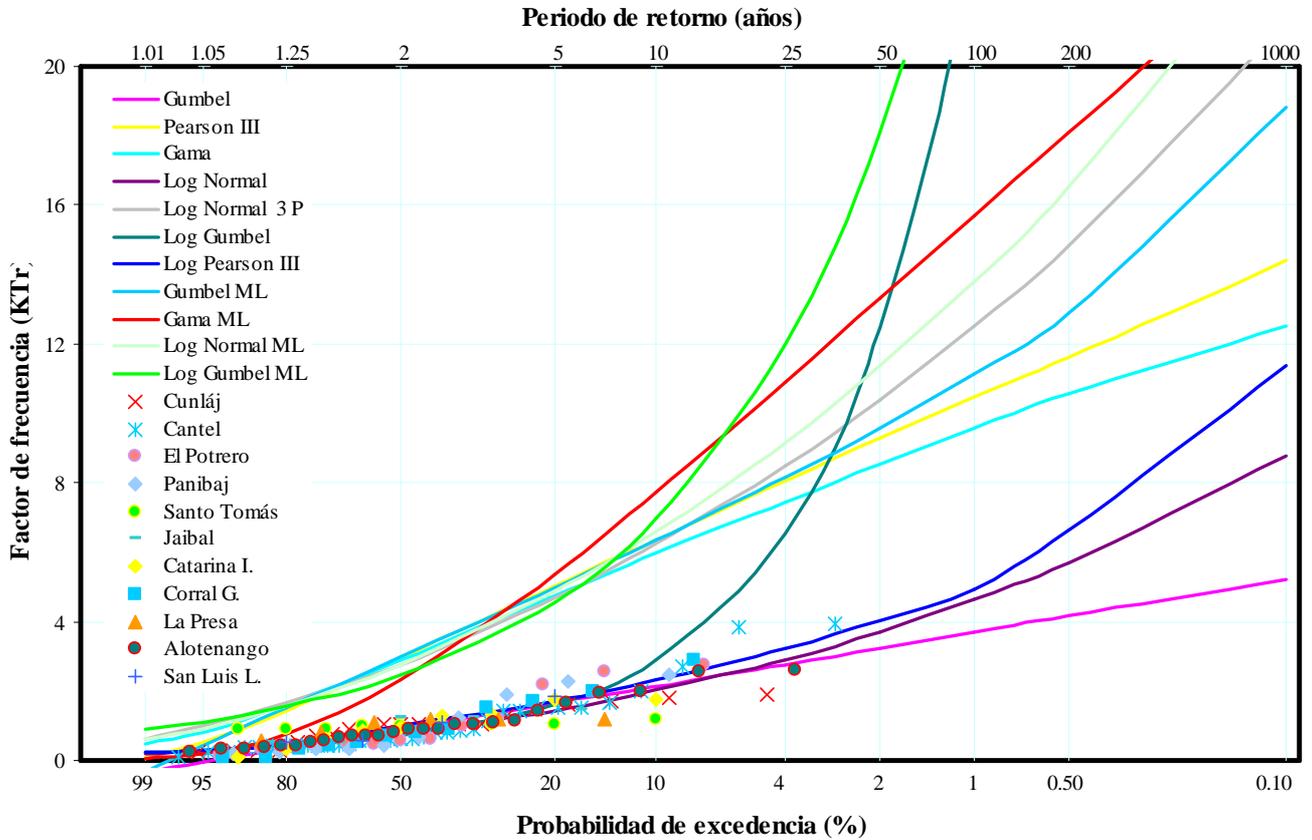


Figura 11. Ajuste de datos estandarizados de caudales máximos anuales a curvas teóricas de distribución de frecuencia.

Se observa que los datos se ajustan a las distribuciones teóricas de frecuencia de Gumbel, Log Normal y Log Pearson III, coincidiendo con lo que INSIVUMEH (2004) recomienda para dicha región hidrológica. Las demás distribuciones teóricas de frecuencia no presentan buen ajuste a las series estandarizadas de caudales máximos anuales, en especial la distribución Log Gumbel (con parámetros estimados con momentos convencionales y lineales), donde se tienden a sobreestimar los factores de frecuencia.

**7.3.5. Factores de frecuencia**

Los factores de frecuencia inferidos para las distintas distribuciones son los siguientes:

Cuadro 14. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos convencionales.

Periodo de Retorno (años)	Probabilidad de excedencia (%)	Distribución teórica de frecuencia						
		Gumbel	Pearson III	Gama	Log Normal	Log Normal 3 parámetros	Log Gumbel	Log Pearson III
2	50	0.90	2.93	2.91	0.78	2.76	0.71	0.97
5	20	1.65	5.00	4.74	1.44	4.69	1.61	1.69
10	10	2.15	6.37	5.95	2.02	6.23	2.91	2.30
25	4	2.77	8.05	7.44	2.91	8.49	6.56	3.21
50	2	3.24	9.28	8.52	3.71	10.39	12.45	4.01
100	1	3.70	10.46	9.57	4.64	12.50	24.21	4.93
200	0.5	4.16	11.63	10.59	5.70	14.83	48.10	6.63
1000	0.1	5.22	14.42	12.52	8.78	21.23	253.19	11.37

Fuente: Elaboración propia (2008).

Cuadro 15. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos lineales.

Periodo de Retorno (años)	Probabilidad de excedencia (%)	Distribución teórica de frecuencia			
		Gumbel	Gama	Log Normal	Log Gumbel
2	50	2.99	2.31	2.74	2.45
5	20	5.00	5.37	4.86	4.57
10	10	6.36	7.74	6.59	6.96
25	4	8.16	10.90	9.16	12.00
50	2	9.58	13.30	11.36	18.12
100	1	11.12	15.71	13.80	27.50
200	0.5	12.89	18.11	16.53	42.05
1000	0.1	18.80	23.62	24.07	117.19

Fuente: Elaboración propia (2008).

Los factores de frecuencia estimados para diversos caudales de diseño de las 11 estaciones hidrométricas se muestran en el anexo.

### 7.3.6. Caudales de diseño

Los caudales de diseño estimados para diversos sitios de interés en las microcuencas, se obtuvieron a partir de los cuantiles obtenidos del análisis regional de crecidas son los siguientes:

Cuadro 16. Caudales de diseño para diversos sitios de interés en la microcuenca del río Argueta.

Sitio	Tr (años)	Probabilidad (%)		Log Pearson III	Log Normal	Gumbe I	Log Gumbel
		excedencia	no excedencia				
Puente Príncipe de Paz	2	50	50	1.35	1.09	1.26	0.99
	5	20	80	2.36	2.01	2.30	2.23
	10	10	90	3.20	2.80	2.98	4.05
	25	4	96	4.46	4.05	3.85	9.11
	50	2	98	5.57	5.16	4.50	17.30
	100	1	99	6.85	6.45	5.14	33.65
	200	0.5	99.5	9.21	7.92	5.78	66.86
	1000	0.1	99.9	15.81	12.20	7.26	351.97
Puente ruta Interamericana	2	50	50	2.11	1.70	1.96	1.54
	5	20	80	3.67	3.12	3.58	3.48
	10	10	90	4.98	4.37	4.65	6.30
	25	4	96	6.95	6.31	6.00	14.19
	50	2	98	8.68	8.04	7.01	26.95
	100	1	99	10.66	10.04	8.00	52.40
	200	0.5	99.5	14.35	12.33	9.00	104.13
	1000	0.1	99.9	24.62	19.00	11.30	548.16
Intersección Río Argueta y Xibalbay	2	50	50	4.31	3.47	4.00	3.15
	5	20	80	7.50	6.39	7.31	7.11
	10	10	90	10.18	8.93	9.51	12.89
	25	4	96	14.21	12.90	12.28	29.03
	50	2	98	17.75	16.44	14.33	55.12
	100	1	99	21.81	20.53	16.37	107.18
	200	0.5	99.5	29.35	25.22	18.40	212.98
	1000	0.1	99.9	50.35	38.87	23.11	1121.09

Fuente: Elaboración propia (2008).

Cuadro 17. Caudales de diseño para diversos sitios de interés en la microcuenca del río Xibalbay.

Sitio	Tr (años)	Probabilidad (%)		Log	Log	Gumbe I	Log
		excedenci a	no excedencia	Pearson III	Normal		Gumbel
Puente Tzorín	2	50	50	0.60	0.48	0.56	0.44
	5	20	80	1.04	0.89	1.02	0.99
	10	10	90	1.42	1.24	1.32	1.79
	25	4	96	1.98	1.79	1.71	4.04
	50	2	98	2.47	2.29	1.99	7.67
	100	1	99	3.03	2.86	2.28	14.91
	200	0.5	99.5	4.08	3.51	2.56	29.62
	1000	0.1	99.9	7.00	5.41	3.21	155.93
Puente Ruta Interamerican a	2	50	50	1.59	4.89	1.48	1.16
	5	20	80	2.78	8.19	2.70	2.63
	10	10	90	3.76	10.42	3.52	4.77
	25	4	96	5.26	13.36	4.54	10.74
	50	2	98	6.56	15.69	5.30	20.38
	100	1	99	8.07	18.22	6.05	39.64
	200	0.5	99.5	10.85	21.10	6.81	78.77
	1000	0.1	99.9	18.62	30.79	8.55	414.62
Puente 2	2	50	50	1.93	5.93	1.79	1.41
	5	20	80	3.36	9.91	3.28	3.18
	10	10	90	4.56	12.62	4.26	5.78
	25	4	96	6.37	16.18	5.50	13.00
	50	2	98	7.95	19.00	6.42	24.69
	100	1	99	9.77	22.06	7.33	48.01
	200	0.5	99.5	13.14	25.56	8.24	95.40
	1000	0.1	99.9	22.55	37.30	10.35	502.16
Intersección Rio Argueta y Rio Xibalbay	2	50	50	2.60	7.99	2.42	1.90
	5	20	80	4.53	13.37	4.42	4.30
	10	10	90	6.15	17.02	5.74	7.79
	25	4	96	8.59	21.82	7.42	17.54
	50	2	98	10.72	25.62	8.66	33.30
	100	1	99	13.18	29.76	9.89	64.75
	200	0.5	99.5	17.73	34.47	11.12	128.66
	1000	0.1	99.9	30.42	50.30	13.96	677.27

Se observa significativamente que la magnitud de los caudales de diseño estimados utilizando los cuantiles de la distribución teórica de frecuencia Log Gumbel, es mayor que la magnitud de los caudales estimados con las demás distribuciones.

En términos generales la distribución Log Gumbel tiende a sobreestimar las magnitudes de los eventos hidrológicos, no siendo de aplicabilidad en la república de Guatemala. Las distribuciones recomendadas son las de Log Normal, Log Pearson III y Gumbel, estimando los parámetros con momentos convencionales.

#### **7.4 Simulación hidráulica**

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

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

El programa permite modelar tanto las secciones transversales de cauces naturales como la curvatura en la definición en planta, definiendo distancia entre secciones en el centro y en ambos laterales. Asimismo permite el modelo de estructuras hidráulicas, por mencionar algunas, como puentes, diques, presas, entre otras. Los resultados que se calculan incluyen además de la definición

de la superficie libre, las velocidades y energías en cada una de las secciones, así como otros datos de interés, como pendiente de energía, pérdidas de energía, etc.

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, distanciadas por lo menos un kilómetro. Los coeficientes de rugosidad ( $n$ ) de la ecuación de Manning que se utilizaron fueron de 0.035 en el cauce principal y 0.040 en planicies de inundación. En lo que respecta a coeficientes de contracción y expansión del cauce se utilizaron 0.10 y 0.30 respectivamente.

Se simularon caudales estimados con períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 1,000 años obtenidos mediante los cuantiles derivados del análisis regional de crecidas utilizando la distribución teórica de frecuencia Gumbel, estimando los parámetros con momentos convencionales.

Los niveles simulados en los sitios de interés que se evaluaron, siendo en este caso los puentes Príncipe de Paz y el que se encuentra ubicado en la ruta interamericana, además de la intersección con el río Xibalbáy se muestran a continuación:

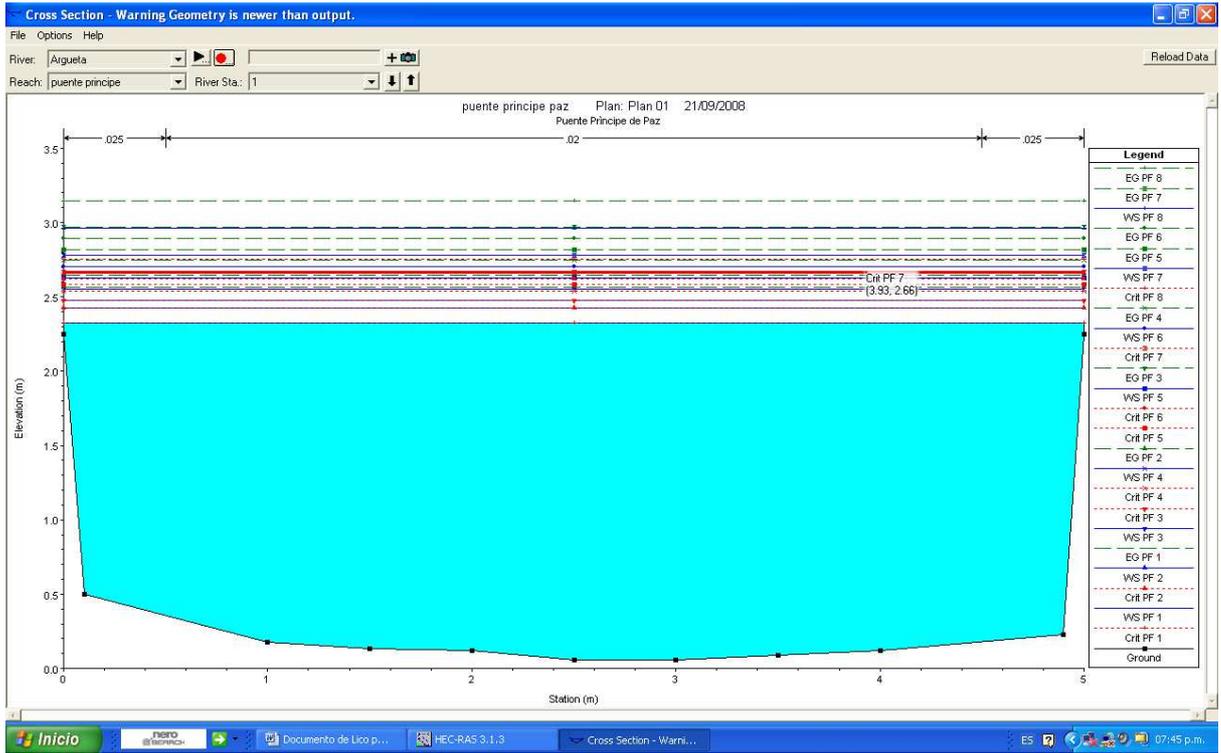


Figura. 12 Perfiles simulados para diversos periodos de diseño en el puente Príncipe de Paz

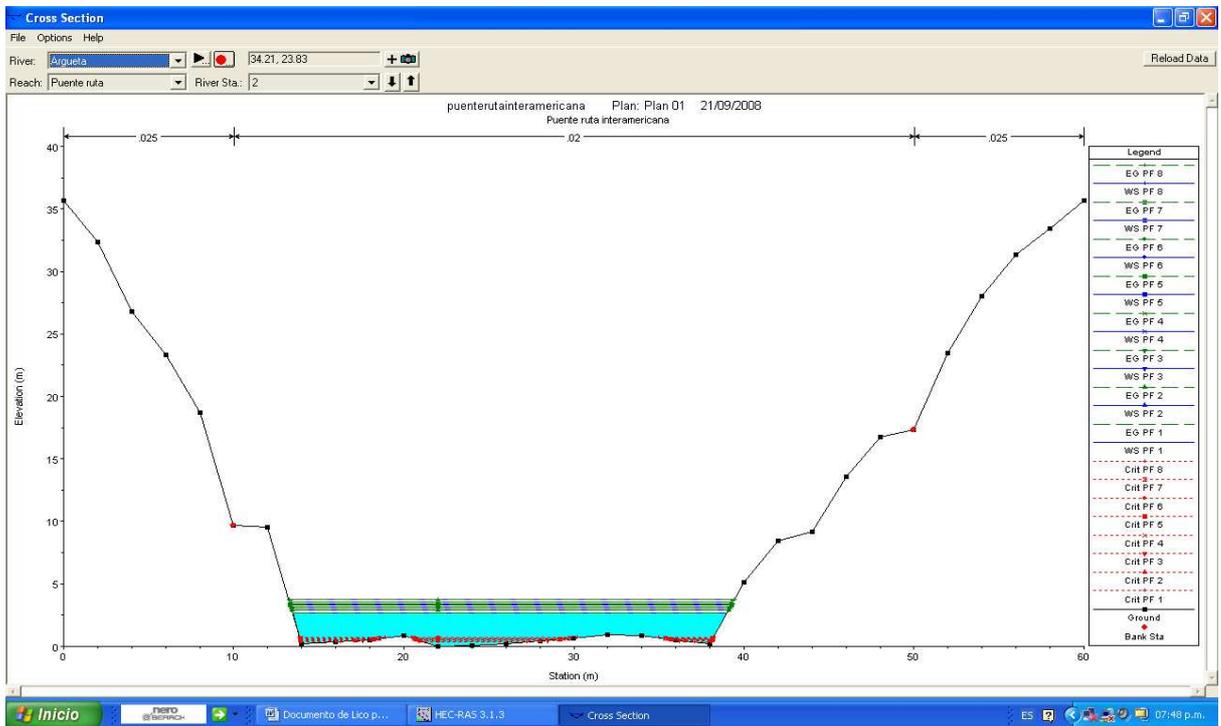


Figura. 13 Perfiles simulados para diversos periodos de diseño en el puente ubicado en la ruta Interamericana.

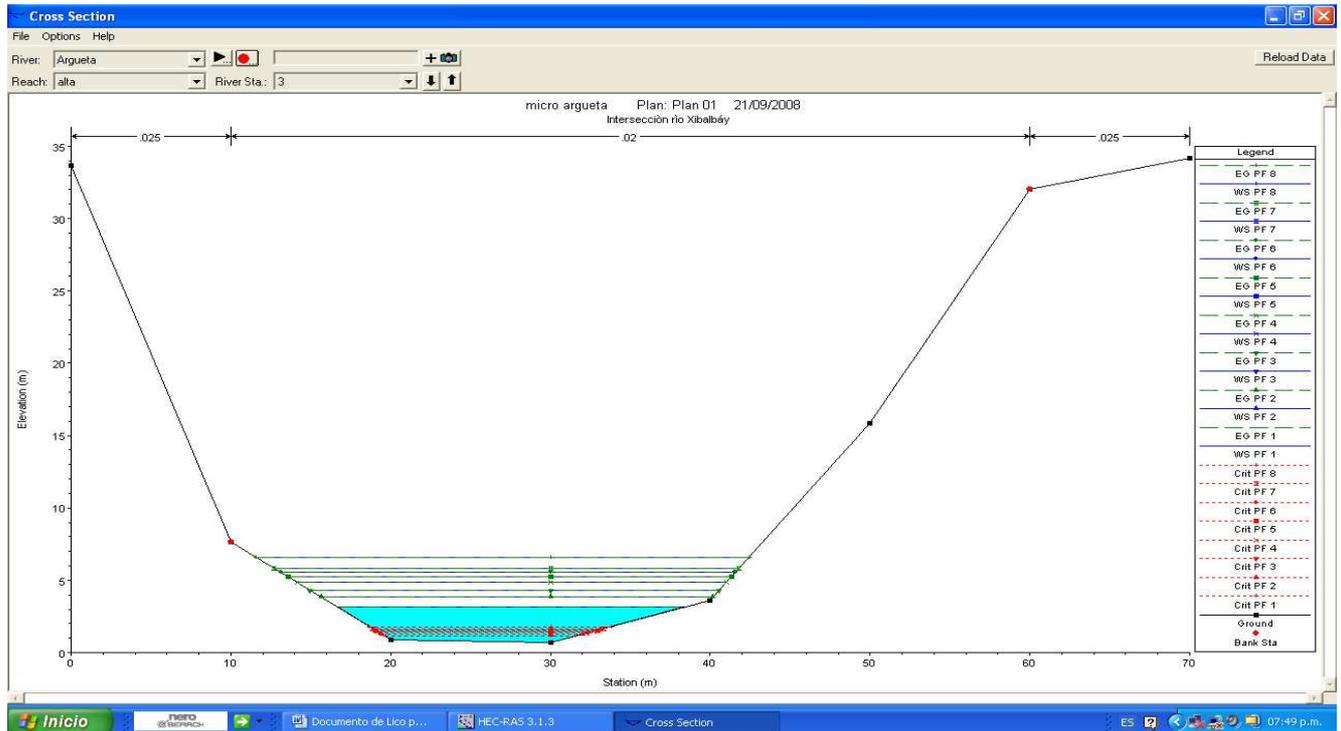


Figura. 14 Perfiles simulados para diversos periodos de diseño en la unión de los ríos Xibalbáy y Argueta.

En el puente Príncipe de Paz, se observa que a partir de caudales de diseño con periodo de retorno a partir de 5 años, se excede el umbral del mismo, por lo que el mismo posee riesgo latente de colapso. Caso contrario se observa en el puente ubicado en la ruta Interamericana, donde dada la configuración del cauce, el mayor tirante obtenido con un caudal de diseño con periodo de retorno de 1,000 años no excede los 5 m.

Es importante, mencionar que en el presente trabajo el objetivo de la simulación hidráulica fue el de realizar preliminarmente el comportamiento del cauce bajo distintas condiciones de flujo. La próxima fase será la de realizar la simulación a un nivel más detallado, que incluya un mayor número de secciones, tanto en el río Xibalbáy como en el río Argueta, microcuencas de la subcuenca del río Quiscáb. Además, hay que considerar modelos hidrológicos para simular los procesos de erosión en la cuenca, tanto a nivel de ladera como a nivel de cauce.

## 8. CONCLUSIONES

- 8.1. Las microcuencas de los ríos Argueta y Xibalbay poseen una respuesta moderada a eventos de precipitación, tal como lo indican los parámetros geomorfológicos estimados, observándose un incremento en el escurrimiento superficial ya que los caudales en la época lluviosa con respecto a la época seca es de (79% y 90%) en cada una de las microcuencas. uno de los factores que incide es el cambio de uso de la tierra.
- 8.2. Dado el relieve predominante, los cauces principales de los ríos Argueta y Xibalbay son de alineamiento recto.
- 8.3. El coeficiente de determinación para la estimación del caudal índice (0.70), se considera aceptable, influyendo el restante 30% a otros factores.
- 8.4. Los resultados del análisis físico de las muestras de agua realizados (en la época seca (abril) y lluviosa (octubre) en las dos microcuencas, indican que el agua de la microcuenca del río Argueta presenta características: turbidez (2.1 y 10 UNT), olor (inodoro), aspecto (claro) y sólidos disueltos totales (73 y 108 mg/l) y el río Xibalbay: turbidez (154 y 187 UNT), olor (a tierra), aspecto (turbio) y sólidos disueltos totales (177 y 406 mg/l,) esto se debe principalmente al origen de los sedimentos procedentes de la erosión de los suelos y del lecho del río, ya que en el caso de la microcuenca del río Xibalbay, tiene significativa influencia la erosión debido que su uso es agrícola y con poca adopción de prácticas de conservación de suelos, lo que repercute directamente en la calidad del agua
- 8.5. El análisis regional de crecidas indica que las distribuciones teóricas de frecuencia a la que mejor se ajustan los datos son Gumbel, Log Normal y Log Pearson III, estimando los parámetros con momentos convencionales.
- 8.6. Los resultados obtenidos del análisis regional de crecidas coinciden con lo recomendado por el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.

- 8.7. La distribución Log Gumbel III (estimando los parámetros tanto con momentos convencionales como lineales), no se recomienda para la república de Guatemala, siendo de aplicabilidad nula.
- 8.8. La simulación hidráulica indica que el puente Príncipe de Paz es sobrepasado por caudales de diseño con periodos de retorno iguales o mayores a cinco años.

## **9. RECOMENDACIONES**

- 9.1. En el análisis regional de crecidas considerar el mayor número de estaciones hidrométricas posibles, además de que posean series de un mínimo 8 valores de caudales máximos anuales.
- 9.2. La distribución Log Gumbel (estimando los parámetros con momentos convencionales y lineales) no se recomienda para la república de Guatemala.
- 9.3. Considerar el monitoreo constante del escurrimiento superficial y de la calidad del agua en los cauces principales de las microcuencas de los ríos Argueta y Xibalbay.
- 9.4. Considerar el presente estudio como una primera fase para la implementación de un modelo hidrológico con énfasis en la estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica. Además, de la realización de una simulación hidráulica mucho más detallada que incluya tanto el cauce del río Argueta como del río Xibalbáy.

## 10. BIBLIOGRAFIA

- 10.1. Aparicio, M. 2001. Fundamentos de hidrología de superficie. México, Limusa. 303 p.
- 10.2. Custodio, E; Llamas, MR. 2001. Hidrología subterránea. 2 ed. Barcelona, España, Omega. v. 1, 1157 p.
- 10.3. Cruz S, JR De la. 1982. Clasificación de zonas de vida de Guatemala, basada en el sistema Holdridge. Guatemala, Instituto Nacional forestal. 42 p.
- 10.4. 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.
- 10.5. Fuentes, M. 2006. Estimación del riesgo de erosión hídrica en la microcuenca del río Concepción, cuenca del lago de Atitlán, Sololá: estudio preliminar. *In* Curso de Seminario de Investigación. Guatemala, USAC, Facultad de Ingeniería. 25 p.
- 10.6. Gárfias, J. 2002. Introducción a la modelación: flujo y transporte de contaminantes (correspondencia personal). México, Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Interamericano de Recursos del Agua.
- 10.7. González, ME. 2005. Evaluación preliminar del efecto de cuatro porcentajes de cobertura boscosa de una plantación de *Pinus maximinoi*\_H.E. Moore, sobre la erosión hídrica del suelo, en la finca Río Frío, Santa Cruz Verapaz; Alta Verapaz. Tesis Ing. Agr. Guatemala, USAC. 146 p.
- 10.8. Herrera Ibáñez, I. 2004. Manual de hidrología. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 241 p.
- 10.9. IGN (Instituto Geográfico Nacional, GT). 2000. Mapa geológico de república de Guatemala; hoja Chichicastenango, no. 1,960-IG. Guatemala. Esc. 1:50,000. Color.
- 10.10. IGN (Instituto Geográfico Nacional, GT). 2000. Mapa geológico de república de Guatemala; hoja Sololá, no. 1,960-IIG. Guatemala. Esc. 1:50,000. Color.
- 10.11. IGN (Instituto Geográfico Nacional, GT). 1962. Mapa topográfico de república de Guatemala; hoja Sololá, no. 1,960-II. Guatemala. Esc. 1:50,000. Color.
- 10.12. IGN (Instituto Geográfico Nacional, GT). 1962. Mapa topográfico de república de Guatemala; hoja Chichicastenango, no. 1,960-I. Guatemala. Esc. 1:50,000. Color.
- 10.13. INSIVUMEH (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, Departamento de Investigación y Servicios Hídricos, GT). 2004. Análisis regional de crecidas en la república de Guatemala: resumen ejecutivo. Guatemala. 3 p.

- 10.14. Linsley, A. 1988. Hidrología para ingenieros. 2 ed. México, McGraw-Hill. 386 p.
- 10.15. Marín, G. 2002. Hidráulica fluvial. Bogotá, Colombia, Ingeniería Colombiana de Consulta y Desarrollo. 169 p.
- 10.16. Méndez, N. 2004. Transporte de sedimentos: aplicaciones en ingeniería de riegos e ingeniería de ríos (correspondencia personal). Venezuela, Universidad Centro Occidental “Lisandro Alvarado”, Profesor titular. 24 p.
- 10.17. Monsalve, SG. 1999. Hidrología en la ingeniería. México, Alfaomega. 383 p.
- 10.18. NOVIB (Organización Holandesa para la Cooperación Internacional al Desarrollo, ND); Fundación Solar, GT. 2001. Estado del agua en Guatemala 2000. Guatemala. 55 p.
- 10.19. Orozco, E. 2003. Análisis estadístico de eventos extremos: crecidas y lluvias extremas (correspondencia personal). Guatemala, USAC, ERIS. 13 p.
- 10.20. Revolorio, A. 2003. Notas del curso manejo y conservación de suelo y agua (Correspondencia personal). Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. s.p.
- 10.21. Sandoval, J. 2007. Notas del curso de modelos en hidrología (correspondencia personal). Guatemala, USAC, ERIS, Maestría en Recursos Hidráulicos.
- 10.22. SENACYT (Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología, GT). 2007. Caracterización de la subcuenca del río Quiscab, cuenca del lago de Atitlán, Sololá. 150 p.
- 10.23. Simmons, C; Tárano, JM; Pinto, JH. 1959. Clasificación de reconocimiento de los suelos de la república de Guatemala. Trad. Pedro Tirado Sulsona. Guatemala, José De Pineda Ibarra. 1000 p.
- 10.24. Taboada, B. 2003. Dinámica de sedimentos en cuencas hidrográficas. Tesis Ing. Irrigación. Chapingo, México, Universidad Autónoma Chapingo. 178 p.
- 10.25. ULA (Universidad de Los Andes, VE). s.f. Geomorfología de cuencas, capítulo 4. Venezuela. Consultado 16 mayo 2008. Disponible en: [http:// webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/oguerre/4\\_Geomorfologia.pdf](http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/oguerre/4_Geomorfologia.pdf)
- 10.26. \_\_\_\_\_ . 2006. Notas del curso de hidrología, capítulo 5 (Correspondencia personal). Guatemala, USAC, ERIS, Maestría en Recursos Hidráulicos. 35 p.
- 10.27. \_\_\_\_\_ . 2007. Notas del curso de hidrología estocástica: análisis regional de crecidas. Guatemala, USAC, ERIS, Maestría en Recursos Hidráulicos. s.p.

## 11. ANEXOS

Cuadro 18A. Parámetros estadísticos de la serie estandarizada correspondiente a caudales máximos instantáneos anuales en la estación hidrométrica Cunláj.

1	2	3	4	5	6	7	8
m	X Q	Y log Q			Prob. empírica m/N+1	Tr (años)	y <sub>T</sub>
1	0.23	-0.64	-1.129	2.735	0.045	1.048	-1.129
2	0.29	-0.53	-0.875	1.959	0.091	1.100	-0.875
3	0.29	-0.53	-0.689	1.475	0.136	1.158	-0.689
4	0.29	-0.53	-0.533	1.121	0.182	1.222	-0.533
5	0.52	-0.28	-0.393	0.843	0.227	1.294	-0.393
6	0.72	-0.14	-0.262	0.619	0.273	1.375	-0.262
7	0.75	-0.13	-0.136	0.437	0.318	1.467	-0.136
8	0.88	-0.06	-0.012	0.288	0.364	1.571	-0.012
9	0.91	-0.04	0.112	0.171	0.409	1.692	0.112
10	1.04	0.02	0.238	0.083	0.455	1.833	0.238
11	1.05	0.02	0.367	0.025	0.500	2.000	0.367
12	1.06	0.03	0.501	0.001	0.545	2.200	0.501
13	1.06	0.03	0.642	0.014	0.591	2.444	0.642
14	1.06	0.03	0.794	0.072	0.636	2.750	0.794
15	1.06	0.03	0.960	0.189	0.682	3.143	0.960
16	1.28	0.11	1.144	0.383	0.727	3.667	1.144
17	1.47	0.17	1.355	0.689	0.773	4.400	1.355
18	1.60	0.21	1.606	1.168	0.818	5.500	1.606
19	1.71	0.23	1.920	1.945	0.864	7.333	1.920
20	1.80	0.26	2.351	3.332	0.909	11.000	2.351
21	1.89	0.28	3.068	6.465	0.955	22.000	3.068
Total	21	21	0.5252	1.1436			
Media	1.00	-0.07	Y <sub>N</sub> =	S <sub>N</sub> =			
Desv. Est. =	0.51	0.28					
Cesgo =	0.12	-0.86					

Cuadro 19A. Parámetros estadísticos de la serie estandarizada correspondiente a caudales máximos instantáneos anuales en la estación hidrométrica Cantel.

1	2	3	4	5	6	7	8
m	X Q	Y log Q			Prob. empírica m/N+1	Tr (años)	y <sub>T</sub>
1	0.08	-1.12	-1.276	3.300	0.028	1.029	-1.276
2	0.24	-0.61	-1.061	2.566	0.056	1.059	-1.061
3	0.25	-0.60	-0.910	2.104	0.083	1.091	-0.910
4	0.37	-0.43	-0.787	1.762	0.111	1.125	-0.787
5	0.39	-0.40	-0.680	1.489	0.139	1.161	-0.680
6	0.41	-0.38	-0.583	1.262	0.167	1.200	-0.583
7	0.42	-0.37	-0.493	1.068	0.194	1.241	-0.493
8	0.43	-0.37	-0.408	0.900	0.222	1.286	-0.408
9	0.43	-0.37	-0.327	0.752	0.250	1.333	-0.327
10	0.43	-0.37	-0.248	0.621	0.278	1.385	-0.248
11	0.44	-0.36	-0.170	0.505	0.306	1.440	-0.170
12	0.45	-0.35	-0.094	0.402	0.333	1.500	-0.094
13	0.46	-0.33	-0.018	0.312	0.361	1.565	-0.018
14	0.55	-0.26	0.057	0.233	0.389	1.636	0.057
15	0.56	-0.25	0.133	0.166	0.417	1.714	0.133
16	0.57	-0.24	0.210	0.109	0.444	1.800	0.210
17	0.57	-0.24	0.287	0.064	0.472	1.895	0.287
18	0.60	-0.23	0.367	0.030	0.500	2.000	0.367
19	0.62	-0.21	0.448	0.009	0.528	2.118	0.448
20	0.67	-0.18	0.531	0.000	0.556	2.250	0.531
21	0.81	-0.09	0.618	0.006	0.583	2.400	0.618
22	0.81	-0.09	0.708	0.028	0.611	2.571	0.708
23	0.86	-0.06	0.803	0.069	0.639	2.769	0.803
24	0.89	-0.05	0.903	0.131	0.667	3.000	0.903
25	1.13	0.05	1.009	0.219	0.694	3.273	1.009
26	1.42	0.15	1.123	0.339	0.722	3.600	1.123
27	1.44	0.16	1.246	0.498	0.750	4.000	1.246
28	1.53	0.19	1.381	0.707	0.778	4.500	1.381
29	1.54	0.19	1.531	0.982	0.806	5.143	1.531
30	1.54	0.19	1.702	1.349	0.833	6.000	1.702
31	1.64	0.21	1.900	1.849	0.861	7.200	1.900
32	2.00	0.30	2.139	2.555	0.889	9.000	2.139
33	2.71	0.43	2.442	3.615	0.917	12.000	2.442
34	3.85	0.59	2.862	5.390	0.944	18.000	2.862
35	3.91	0.59	3.569	9.176	0.972	36.000	3.569

Total =	35	35	0.5403	1.2735
Media =	1.00	-0.14	$Y_N =$	$S_N =$
Desv. Est =	0.92	0.35		
Cesgo =	2.03	-0.01		

Cuadro 20A. Parámetros estadísticos de la serie estandarizada correspondiente a caudales máximos instantáneos anuales en la estación hidrométrica Catarina Ixtahuacán.

1	2	3	4	5	6	7	8
m	X Q	Y log Q			Prob. empírica m/N+1	Tr (años)	y <sub>T</sub>
1	0.11	-0.97	-0.834	1.753	0.100	1.111	-0.834
2	0.34	-0.47	-0.476	0.933	0.200	1.250	-0.476
3	0.61	-0.21	-0.186	0.457	0.300	1.429	-0.186
4	0.83	-0.08	0.087	0.162	0.400	1.667	0.087
5	0.95	-0.02	0.367	0.015	0.500	2.000	0.367
6	1.29	0.11	0.672	0.033	0.600	2.500	0.672
7	1.34	0.13	1.031	0.292	0.700	3.333	1.031
8	1.77	0.25	1.500	1.020	0.800	5.000	1.500
9	1.77	0.25	2.250	3.098	0.900	10.000	2.250

Total =	9	9	0.4902	0.8627
Media =	1.00	-0.11	$Y_N =$	$S_N =$
Desv. Est. =	0.59	0.40		
Cesgo =	-0.07	-1.44		

Cuadro 21A. Parámetros estadísticos de la serie estandarizada correspondiente a caudales máximos instantáneos anuales en la estación hidrométrica Panibáj.

1	2	3	4	5	6	7	8
m	X Q	Y log Q			Prob. empírica m/N+1	Tr	y <sub>T</sub>
1	0.17	-0.77	-0.875	1.876	0.091	1.100	-0.875
2	0.25	-0.60	-0.533	1.058	0.182	1.222	-0.533
3	0.31	-0.51	-0.262	0.573	0.273	1.375	-0.262
4	0.31	-0.51	-0.012	0.257	0.364	1.571	-0.012
5	0.41	-0.38	0.238	0.066	0.455	1.833	0.238
6	0.67	-0.17	0.501	0.000	0.545	2.200	0.501
7	1.24	0.09	0.794	0.089	0.636	2.750	0.794
8	1.88	0.27	1.144	0.421	0.727	3.667	1.144
9	2.27	0.36	1.606	1.234	0.818	5.500	1.606
10	2.48	0.39	2.351	3.443	0.909	11.000	2.351

Total =	10	10	0.4952	0.9018
Media =	1.00	-0.18	$Y_N =$	$S_N =$
Desv. Est. =	0.90	0.43		
Cesgo =	0.78	0.20		

Cuadro 22A. Parámetros estadísticos de la serie estandarizada correspondiente a caudales máximos instantáneos anuales en la estación hidrométrica El Potrero.

1	2	3	4	5	6	7	8
m	X Q	Y log Q			Prob. empírica m/N+1	Tr (años)	$y_T$
1	0.14	-0.86	-0.970	2.183	0.071	1.077	-0.970
2	0.31	-0.51	-0.666	1.375	0.143	1.167	-0.666
3	0.37	-0.43	-0.432	0.882	0.214	1.273	-0.432
4	0.42	-0.37	-0.225	0.536	0.286	1.400	-0.225
5	0.46	-0.34	-0.029	0.287	0.357	1.556	-0.029
6	0.46	-0.34	0.166	0.116	0.429	1.750	0.166
7	0.57	-0.24	0.367	0.020	0.500	2.000	0.367
8	0.63	-0.20	0.581	0.005	0.571	2.333	0.581
9	0.97	-0.01	0.817	0.096	0.643	2.800	0.817
10	1.20	0.08	1.089	0.339	0.714	3.500	1.089
11	2.18	0.34	1.422	0.838	0.786	4.667	1.422
12	2.54	0.40	1.870	1.857	0.857	7.000	1.870
13	2.76	0.44	2.602	4.390	0.929	14.000	2.602

Total =	13	13	0.5070	0.9943
Media =	1.00	-0.16	$Y_N =$	$S_N =$
Desv. Est. =	0.90	0.39		
Cesgo =	1.19	0.17		

Cuadro 23A. Parámetros estadísticos de la serie estandarizada correspondiente a caudales máximos instantáneos anuales en la estación hidrométrica San Luis Las Carretas.

1	2	3	4	5	6	7	8
m	X Q	Y log Q			Prob. empírica m/N+1	Tr (años)	$y_T$
1	0.53	-0.28	-0.476	0.850	0.200	1.250	-0.476
2	0.56	-0.25	0.087	0.128	0.400	1.667	0.087
3	1.08	0.03	0.672	0.051	0.600	2.500	0.672
4	1.84	0.26	1.500	1.111	0.800	5.000	1.500

Total =	4	4	0.4458	0.5350
Media =	1.00	-0.06	$Y_N =$	$S_N =$
Desv. Est. =	0.61	0.26		
Cesgo =	1.15	0.65		

Cuadro 24A. Parámetros estadísticos de la serie estandarizada correspondiente a caudales máximos instantáneos anuales en la estación hidrométrica Santo Tomás.

1	2	3	4	5	6	7	8
m	X	Y			Prob. empírica	Tr	$y_T$
	Q	log Q			m/N+1	(años)	
1	0.90	-0.05	-0.834	1.753	0.100	1.111	-0.834
2	0.90	-0.04	-0.476	0.933	0.200	1.250	-0.476
3	0.92	-0.04	-0.186	0.457	0.300	1.429	-0.186
4	0.98	-0.01	0.087	0.162	0.400	1.667	0.087
5	1.00	0.00	0.367	0.015	0.500	2.000	0.367
6	1.01	0.00	0.672	0.033	0.600	2.500	0.672
7	1.03	0.01	1.031	0.292	0.700	3.333	1.031
8	1.06	0.03	1.500	1.020	0.800	5.000	1.500
9	1.19	0.07	2.250	3.098	0.900	10.000	2.250

Total =	9	9	0.4902	0.8627
Media =	1.00	0.00	$Y_N =$	$S_N =$
Desv. Est. =	0.09	0.04		
Cesgo =	0.96	0.75		

Cuadro 25A. Parámetros estadísticos de la serie estandarizada correspondiente a caudales máximos instantáneos anuales en la estación hidrométrica Jaibal.

1	2	3	4	5	6	7	8
m	X	Y			Prob. empírica	Tr	$y_T$
	Q	log Q			m/N+1	(años)	
1	0.51	-0.30	-0.583	1.086	0.167	1.200	-0.583
2	0.51	-0.29	-0.094	0.306	0.333	1.500	-0.094
3	1.25	0.10	0.367	0.009	0.500	2.000	0.367
4	1.25	0.10	0.903	0.197	0.667	3.000	0.903
5	1.48	0.17	1.702	1.546	0.833	6.000	1.702

N =	5	5	0.4588	0.6285
-----	---	---	--------	--------

Media =	1.00	-0.04	$Y_N =$	$S_N =$
Desv. Est. =	0.46	0.23		
Cesgo =	-0.41	-0.53		

Cuadro 26A. Parámetros estadísticos de la serie estandarizada correspondiente a caudales máximos instantáneos anuales en la estación hidrométrica Corral Grande.

1	2	3	4	5	6	7	8
m	X	Y			Prob. empírica m/N+1	Tr (años)	$y_T$
	Q	log Q					
1	0.09	-1.05	-0.942	2.089	0.077	1.083	-0.942
2	0.09	-1.04	-0.627	1.278	0.154	1.182	-0.627
3	0.31	-0.51	-0.383	0.785	0.231	1.300	-0.383
4	0.45	-0.35	-0.164	0.446	0.308	1.444	-0.164
5	0.51	-0.30	0.046	0.210	0.385	1.625	0.046
6	0.71	-0.15	0.257	0.061	0.462	1.857	0.257
7	0.79	-0.10	0.480	0.001	0.538	2.167	0.480
8	0.91	-0.04	0.723	0.048	0.615	2.600	0.723
9	1.51	0.18	1.000	0.247	0.692	3.250	1.000
10	1.72	0.23	1.338	0.696	0.769	4.333	1.338
11	2.01	0.30	1.789	1.654	0.846	6.500	1.789
12	2.90	0.46	2.525	4.087	0.923	13.000	2.525

N =	12	12	0.5035	0.9668
Media =	1.00	-0.20	$Y_N =$	$S_N =$
Desv. Est. =	0.86	0.49		
Cesgo =	1.05	-0.67		

Cuadro 27A. Parámetros estadísticos de la serie estandarizada correspondiente a caudales máximos instantáneos anuales en la estación hidrométrica La Presa.

1	2	3	4	5	6	7	8
m	X	Y			Prob. empírica m/N+1	Tr (años)	$y_T$
	Q	log Q					
1	0.56	-0.25	-0.666	1.288	0.143	1.167	-0.666
2	0.79	-0.10	-0.225	0.482	0.286	1.400	-0.225
3	1.07	0.03	0.166	0.092	0.429	1.750	0.166
4	1.17	0.07	0.581	0.012	0.571	2.333	0.581
5	1.20	0.08	1.089	0.385	0.714	3.500	1.089
6	1.21	0.08	1.870	1.962	0.857	7.000	1.870

N =	6	6	0.4690	0.7035
Media =	1.00	-0.02	$Y_N =$	$S_N =$
Desv. Est. =	0.26	0.13		
Cesgo =	-1.16	-1.40		

Cuadro 28A. Parámetros estadísticos de la serie estandarizada correspondiente a caudales máximos instantáneos anuales en la estación hidrométrica Alotenango.

1	2	3	4	5	6	7	8
m	X Q	Y log Q			Prob. empírica m/N+1	Tr (años)	$y_T$
1	0.26	-0.59	-1.193	2.975	0.037	1.038	-1.193
2	0.33	-0.48	-0.957	2.216	0.074	1.080	-0.957
3	0.33	-0.48	-0.787	1.740	0.111	1.125	-0.787
4	0.39	-0.41	-0.647	1.390	0.148	1.174	-0.647
5	0.42	-0.38	-0.523	1.112	0.185	1.227	-0.523
6	0.42	-0.38	-0.408	0.884	0.222	1.286	-0.408
7	0.54	-0.27	-0.300	0.692	0.259	1.350	-0.300
8	0.56	-0.25	-0.196	0.530	0.296	1.421	-0.196
9	0.67	-0.18	-0.094	0.392	0.333	1.500	-0.094
10	0.71	-0.15	0.007	0.276	0.370	1.588	0.007
11	0.71	-0.15	0.108	0.180	0.407	1.688	0.108
12	0.71	-0.15	0.210	0.104	0.444	1.800	0.210
13	0.79	-0.10	0.313	0.048	0.481	1.929	0.313
14	0.88	-0.06	0.420	0.012	0.519	2.077	0.420
15	0.88	-0.06	0.531	0.000	0.556	2.250	0.531
16	0.88	-0.05	0.648	0.013	0.593	2.455	0.648
17	1.04	0.02	0.771	0.057	0.630	2.700	0.771
18	1.06	0.02	0.903	0.137	0.667	3.000	0.903
19	1.09	0.04	1.046	0.264	0.704	3.375	1.046
20	1.16	0.06	1.204	0.451	0.741	3.857	1.204
21	1.42	0.15	1.381	0.721	0.778	4.500	1.381
22	1.65	0.22	1.586	1.110	0.815	5.400	1.586
23	1.93	0.29	1.830	1.686	0.852	6.750	1.830
24	1.98	0.30	2.139	2.582	0.889	9.000	2.139
25	2.58	0.41	2.564	4.131	0.926	13.500	2.564
26	2.62	0.42	3.277	7.535	0.963	27.000	3.277

N =	26	26	0.5321	1.2015
Media =	1.00	-0.08	$Y_N =$	$S_N =$
Desv. Est. =	0.66	0.28		
Cesgo =	1.15	0.11		

Cuadro 29A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos convencionales en la estación hidrométrica Cunláj.

Periodo de retorno (años)	Probabilidad de excedencia %	Distribución teórica de frecuencia						
		Gumbel	Pearson III	Gama	Log Normal	Log Normal 3 parámetros	Log Gumbel	Log Pearson III
2	50	0.93	0.99	0.90	0.85	1.00	0.78	0.93
5	20	1.43	1.42	1.41	1.46	1.41	1.47	1.47
10	10	1.76	1.65	1.75	1.93	1.63	2.24	1.78
25	4	2.18	1.91	2.15	2.61	1.87	3.80	2.12
50	2	2.49	2.07	2.44	3.17	2.02	5.65	2.33
100	1.0	2.80	2.22	2.73	3.78	2.16	8.35	2.51
200	0.5	3.11	2.36	3.00	4.43	2.29	12.34	3.60
1000	0.1	3.82	2.65	3.60	6.17	2.55	30.46	9.77

Cuadro 30A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos lineales en la estación hidrométrica Cunláj.

Periodo de retorno (años)	Probabilidad de excedencia %	Distribución teórica de frecuencia			
		Gumbel	Gama	Log Normal	Log Gumbel
2	50	0.91	0.81	0.85	0.76
5	20	1.39	1.52	1.44	1.36
10	10	1.70	2.02	1.91	2.01
25	4	2.10	2.65	2.57	3.27
50	2	2.40	3.12	3.11	4.70
100	1.0	2.69	3.57	3.69	6.73
200	0.5	2.99	4.02	4.33	9.63
1000	0.1	3.66	5.04	5.99	22.08

Cuadro 31A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos convencionales en la estación hidrométrica Cantel.

Periodo de retorno (años)	Probabilidad de excedencia %	Distribución teórica de frecuencia						
		Gumbel	Pearson III	Gama	Log Normal	Log Normal 3 parámetros	Log Gumbel	Log Pearson III
2	50	0.87	0.71	0.81	0.72	0.73	0.65	0.72
5	20	1.69	1.56	1.53	1.44	1.42	1.34	1.44
10	10	2.24	2.20	2.03	2.06	2.00	2.16	2.06
25	4	2.92	3.02	2.66	3.02	2.89	3.97	3.02
50	2	3.43	3.69	3.12	3.87	3.66	6.24	3.87
100	1.0	3.93	4.33	3.58	4.83	4.52	9.76	4.83
200	0.5	4.44	4.98	4.03	5.92	5.49	15.25	5.92
1000	0.1	5.60	6.47	3.58	9.01	8.19	42.85	9.01

Cuadro 32A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos lineales en la estación hidrométrica Cantel.

Periodo de retorno (años)	Probabilidad de excedencia %	Distribución teórica de frecuencia			
		Gumbel	Gama	Log Normal	Log Gumbel
2	50	0.87	0.50	0.72	0.63
5	20	1.59	1.65	1.42	1.32
10	10	2.07	2.64	2.02	2.15
25	4	2.68	4.03	2.94	3.99
50	2	3.13	5.11	3.75	6.32
100	1.0	3.58	6.22	4.66	9.96
200	0.5	4.02	7.33	5.69	15.66
1000	0.1	5.06	9.93	8.59	44.77

Cuadro 33A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos convencionales en la estación hidrométrica Catarina Ixtahuacán.

Periodo de retorno (años)	Probabilidad de excedencia %	Distribución teórica de frecuencia						
		Gumbel	Pearson III	Gama	Log Normal	Log Normal 3 parámetros	Log Gumbel	Log Pearson III
2	50	0.92	1.01	0.85	0.77	0.81	0.68	0.95
5	20	1.69	1.50	1.49	1.65	1.65	2.23	1.64
10	10	2.21	1.75	1.93	2.47	2.46	4.92	1.97
25	4	2.86	2.02	2.48	3.78	3.75	13.38	2.26
50	2	3.34	2.19	2.88	4.98	4.93	28.10	2.40
100	1.0	3.82	2.34	3.27	6.39	6.31	58.68	2.50
200	0.5	4.29	2.65	3.65	8.01	7.90	122.21	2.71
1000	0.1	5.40	2.68	4.51	12.80	12.56	668.60	5.22

Cuadro 34A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos lineales en la estación hidrométrica Catarina Ixtahuacán.

Periodo de retorno (años)	Probabilidad de excedencia %	Distribución teórica de frecuencia			
		Gumbel	Gama	Log Normal	Log Gumbel
2	50	0.66	0.70	0.77	0.67
5	20	1.51	1.61	1.63	1.48
10	10	2.59	2.28	2.42	2.51
25	4	5.16	3.18	3.67	4.88
50	2	8.58	3.85	4.80	8.01
100	1.0	14.23	4.52	6.12	13.10
200	0.5	23.56	5.19	7.65	21.37
1000	0.1	75.72	6.71	12.08	66.42

Cuadro 35A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos convencionales en la estación hidrométrica El Potrero.

Periodo de retorno (años)	Probabilidad de excedencia %	Distribución teórica de frecuencia						
		Gumbel	Pearson III	Gama	Log Normal	Log Normal 3 parámetros	Log Gumbel	Log Pearson III
2	50	0.87	0.83	0.79	0.70	0.68	0.61	0.87
5	20	1.90	1.66	1.55	1.48	1.43	1.70	1.46
10	10	2.58	2.21	2.08	2.18	2.13	3.33	2.22
25	4	3.44	2.88	2.75	3.32	3.26	7.79	3.50
50	2	4.07	3.36	3.26	4.35	4.29	14.65	4.73
100	1.0	4.71	3.83	3.75	5.55	5.50	27.42	6.22
200	0.5	5.34	4.29	4.24	6.93	6.91	51.18	8.00
1000	0.1	6.80	5.30	5.34	10.97	11.06	217.33	13.54

Cuadro 36A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos lineales en la estación hidrométrica El Potrero.

Periodo de retorno (años)	Probabilidad de excedencia %	Distribución teórica de frecuencia			
		Gumbel	Gama	Log Normal	Log Gumbel
2	50	0.85	0.39	0.70	0.60
5	20	1.64	1.63	1.51	1.39
10	10	2.17	2.79	2.26	2.44
25	4	2.83	4.48	3.48	4.95
50	2	3.32	5.83	4.60	8.38
100	1.0	3.80	7.21	5.92	14.14
200	0.5	4.29	8.62	7.44	23.79
1000	0.1	5.41	11.92	11.94	79.45

Cuadro 37A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos convencionales en la estación hidrométrica Panibáj.

Periodo de retorno (años)	Probabilidad de excedencia %	Distribución teórica de frecuencia						
		Gumbel	Pearson III	Gama	Log Normal	Log Normal 3 parámetros	Log Gumbel	Log Pearson III
2	50	0.87	0.88	0.76	0.66	0.61	0.57	0.64
5	20	2.00	1.70	1.57	1.52	1.44	1.99	1.50
10	10	2.75	2.20	2.14	2.35	2.30	4.55	2.40
25	4	3.70	2.79	2.89	3.75	3.82	12.95	4.01
50	2	4.40	3.20	3.45	5.06	5.33	28.12	5.62
100	1.0	5.10	3.59	3.99	6.64	7.19	60.72	7.68
200	0.5	5.79	3.96	4.54	8.51	9.47	130.75	10.25
1000	0.1	7.40	4.77	5.77	14.19	16.75	772.82	18.88

Cuadro 38A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos lineales en la estación hidrométrica Panibáj.

Periodo de retorno (años)	Probabilidad de excedencia %	Distribución teórica de frecuencia			
		Gumbel	Gama	Log Normal	Log Gumbel
2	50	0.85	0.68	0.66	0.55
5	20	1.68	1.62	1.59	1.44
10	10	2.23	2.33	2.52	2.74
25	4	2.93	3.28	4.12	6.15
50	2	3.44	3.99	5.66	11.20
100	1.0	3.95	4.71	7.53	20.32
200	0.5	4.47	5.43	9.78	36.77
1000	0.1	5.65	7.06	16.76	145.34

Cuadro 39A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos convencionales en la estación hidrométrica Santo Tomás.

Periodo de retorno (años)	Probabilidad de excedencia %	Distribución teórica de frecuencia						
		Gumbel	Pearson III	Gama	Log Normal	Log Normal 3 parámetros	Log Gumbel	Log Pearson III
2	50	0.99	0.98	0.95	1.00	0.98	0.98	0.99
5	20	1.11	1.07	1.07	1.07	1.06	1.11	1.07
10	10	1.19	1.12	1.11	1.12	1.11	1.19	1.12
25	4	1.29	1.19	1.15	1.16	1.18	1.32	1.19
50	2	1.36	1.23	1.18	1.20	1.23	1.42	1.24
100	1.0	1.43	1.28	1.21	1.22	1.29	1.52	1.28
200	0.5	1.51	1.32	1.23	1.25	1.34	1.63	1.33
1000	0.1	1.68	1.41	1.28	1.31	1.47	1.93	1.44

Cuadro 40A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos lineales en la estación hidrométrica Santo Tomás.

Periodo de retorno (años)	Probabilidad de excedencia %	Distribución teórica de frecuencia			
		Gumbel	Gama	Log Normal	Log Gumbel
2	50	0.98	1.04	1.00	0.98
5	20	1.07	1.11	1.08	1.07
10	10	1.13	1.17	1.12	1.13
25	4	1.20	1.24	1.17	1.21
50	2	1.25	1.28	1.20	1.28
100	1.0	1.30	1.32	1.23	1.34
200	0.5	1.36	1.36	1.26	1.42
1000	0.1	1.48	1.44	1.32	1.60

Cuadro 41A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos convencionales en la estación hidrométrica Jaibal.

Periodo de retorno (años)	Probabilidad de excedencia %	Distribución teórica de frecuencia						
		Gumbel	Pearson III	Gama	Log Normal	Log Normal 3 parámetros	Log Gumbel	Log Pearson III
2	50	0.93	1.03	0.94	0.90	0.90	0.83	0.90
5	20	1.76	1.39	1.34	1.41	1.41	2.17	1.41
10	10	2.31	1.57	1.59	1.78	1.77	4.08	1.78
25	4	3.00	1.74	1.89	2.28	2.27	9.06	2.28
50	2	3.51	1.84	2.11	2.68	2.66	16.38	2.68
100	1.0	4.02	1.93	2.31	3.09	3.07	29.49	3.09
200	0.5	4.53	2.11	2.50	3.53	3.51	52.98	3.53
1000	0.1	5.71	3.54	2.93	4.63	4.60	205.75	4.63

Cuadro 42A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos lineales en la estación hidrométrica Jaibal.

Periodo de retorno (años)	Probabilidad de excedencia %	Distribución teórica de frecuencia			
		Gumbel	Gama	Log Normal	Log Gumbel
2	50	0.92	0.84	0.90	0.83
5	20	1.36	1.49	1.42	1.32
10	10	1.65	1.93	1.80	1.80
25	4	2.01	2.48	2.31	2.65
50	2	2.29	2.88	2.72	3.54
100	1.0	2.56	3.28	3.15	4.71
200	0.5	2.82	3.66	3.60	6.27
1000	0.1	3.45	4.52	4.74	12.14

Cuadro 43A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos convencionales en la estación hidrométrica Corral Grande.

Periodo de retorno (años)	Probabilidad de excedencia %	Distribución teórica de frecuencia						
		Gumbel	Pearson III	Gama	Log Normal	Log Normal 3 parámetros	Log Gumbel	Log Pearson III
2	50	0.88	0.85	0.75	0.64	0.74	0.54	0.72
5	20	1.89	1.65	1.58	1.64	1.53	2.03	1.67
10	10	2.56	2.16	2.18	2.69	2.18	4.85	2.42
25	4	3.41	2.78	2.96	4.55	3.16	14.60	3.44
50	2	4.04	3.22	3.54	6.40	3.99	33.07	4.21
100	1.0	4.66	3.64	4.12	8.70	4.91	74.46	4.97
200	0.5	5.29	4.05	4.70	11.51	5.92	167.16	11.83
1000	0.1	6.73	4.96	6.00	20.52	8.71	1087.98	21.94

Cuadro 44A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos lineales en la estación hidrométrica Corral Grande.

Periodo de retorno (años)	Probabilidad de excedencia %	Distribución teórica de frecuencia			
		Gumbel	Gama	Log Normal	Log Gumbel
2	50	0.85	0.37	0.64	0.52
5	20	1.65	1.62	1.68	1.52
10	10	2.18	2.82	2.80	3.07
25	4	2.85	4.57	4.82	7.49
50	2	3.35	5.98	6.84	14.52
100	1.0	3.84	7.43	9.37	28.00
200	0.5	4.33	8.90	12.50	53.86
1000	0.1	5.47	12.37	22.64	245.13

Cuadro 45A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos convencionales en la estación hidrométrica La Presa.

Periodo de retorno (años)	Probabilidad de excedencia %	Distribución teórica de frecuencia						
		Gumbel	Pearson III	Gama	Log Normal	Log Normal 3 parámetros	Log Gumbel	Log Pearson III
2	50	0.96	1.05	0.98	0.96	0.96	0.92	1.03
5	20	1.39	1.22	1.22	1.25	1.25	1.52	1.25
10	10	1.67	1.29	1.35	1.43	1.44	2.11	1.33
25	4	2.03	1.34	1.51	1.66	1.66	3.20	1.40
50	2	2.29	1.37	1.62	1.82	1.83	4.35	1.43
100	1.0	2.55	1.39	1.73	1.98	1.99	5.91	1.45
200	0.5	2.82	1.43	1.82	2.14	2.15	8.02	2.09
1000	0.1	3.42	1.75	2.03	2.50	2.52	16.27	1.89

Cuadro 46A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos lineales en la estación hidrométrica La Presa.

Periodo de retorno (años)	Probabilidad de excedencia %	Distribución teórica de frecuencia			
		Gumbel	Gama	Log Normal	Log Gumbel
2	50	0.95	0.95	0.96	0.91
5	20	1.20	1.30	1.25	1.21
10	10	1.37	1.51	1.43	1.46
25	4	1.58	1.75	1.65	1.86
50	2	1.73	1.93	1.81	2.21
100	1.0	1.89	2.09	1.97	2.63
200	0.5	2.04	2.25	2.13	3.14
1000	0.1	2.39	2.59	2.49	4.69

Cuadro 47A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos convencionales en la estación hidrométrica Alotenango.

Periodo de retorno (años)	Probabilidad de excedencia %	Distribución teórica de frecuencia						
		Gumbel	Pearson III	Gama	Log Normal	Log Normal 3 parámetros	Log Gumbel	Log Pearson III
2	50	0.91	11.82	11.79	0.82	11.28	0.75	0.81
5	20	1.53	20.20	18.95	1.41	19.03	1.38	1.40
10	10	1.95	25.73	23.62	1.87	24.96	2.05	1.88
25	4	2.47	32.57	29.33	2.52	33.32	3.40	2.58
50	2	2.86	37.51	33.44	3.06	40.12	4.94	3.17
100	1.0	3.24	42.31	37.42	3.64	47.42	7.16	3.83
200	0.5	3.62	46.99	41.28	4.27	55.24	10.37	4.53
1000	0.1	4.51	57.40	49.86	5.93	75.64	24.44	6.56

Cuadro 48A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos lineales en la estación hidrométrica Alotenango.

Periodo de retorno (años)	Probabilidad de excedencia %	Distribución teórica de frecuencia			
		Gumbel	Gama	Log Normal	Log Gumbel
2	50	12.16	9.59	11.22	10.02
5	20	20.12	21.89	19.51	18.39
10	10	25.40	31.14	26.07	27.48
25	4	32.06	43.32	35.50	45.65
50	2	37.00	52.51	43.33	66.53
100	1.0	41.90	61.67	51.84	96.69
200	0.5	46.79	70.79	61.08	140.32
1000	0.1	58.11	91.61	85.67	332.49

Cuadro 49A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos convencionales en la estación hidrométrica San Luis Las Carretas.

Periodo de retorno (años)	Probabilidad de excedencia %	Distribución teórica de frecuencia						
		Gumbel	Pearson III	Gama	Log Normal	Log Normal 3 parámetros	Log Gumbel	Log Pearson III
2	50	0.91	6.92	7.15	0.87	5.99	0.80	6.41
5	20	2.21	11.35	10.82	1.44	9.91	2.80	10.93
10	10	3.07	14.23	13.14	1.87	13.84	6.43	15.00
25	4	4.15	17.75	15.95	2.46	20.62	18.34	21.68
50	2	4.96	20.28	17.94	2.95	27.15	39.93	27.95
100	1.0	5.75	22.73	19.86	3.46	35.10	86.42	35.53
200	0.5	6.55	25.10	21.72	4.01	44.66	186.52	44.64
1000	0.1	8.40	36.76	25.80	5.44	74.43	1108.32	73.04

Cuadro 50A. Factores de frecuencia ( $K_{TR}$ ) de distribuciones teóricas donde los parámetros se estimaron con momentos lineales en la estación hidrométrica San Luis Las Carretas.

Periodo de retorno (años)	Probabilidad de excedencia %	Distribución teórica de frecuencia			
		Gumbel	Gama	Log Normal	Log Gumbel
2	50	6.93	5.28	6.83	6.11
5	20	11.67	12.64	11.79	11.12
10	10	14.80	18.27	15.69	16.53
25	4	18.76	25.74	21.29	27.29
50	2	21.70	31.42	25.91	39.57
100	1.0	24.62	37.09	30.93	57.23
200	0.5	27.52	42.75	36.37	82.65
1000	0.1	34.25	55.70	50.79	193.68