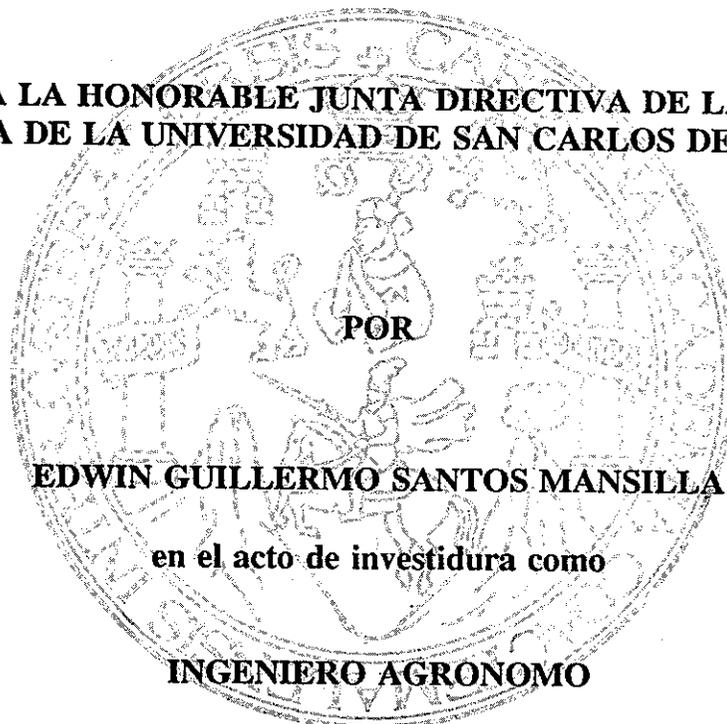


**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMIA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGRONOMICAS**

**SIMULACION HIDROLOGICA PARA LA CALIBRACION DE PARAMETROS
DE ESCORRENTIA, EN LA CUENCA DEL RIO LA VIRGEN,
SAN ANDRES ITZAPA, CHIMALTENANGO.**

TESIS

**PRESENTADA A LA HONORABLE JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE
AGRONOMIA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



POR

EDWIN GUILLERMO SANTOS MANSILLA

en el acto de investidura como

INGENIERO AGRONOMO

EN

RECURSOS NATURALES RENOVABLES

EN EL GRADO ACADEMICO

DE LICENCIADO

Guatemala, Marzo de 1,997.

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMIA**

RECTOR

Dr. JAFETH ERNESTO CABRERA FRANCO

JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE AGRONOMIA

**DECANO
VOCAL I
VOCAL II
VOCAL III
VOCAL IV
VOCAL V
SECRETARIO**

**Ing. Agr. Rolando Lara Alecio
Ing. Agro. Juan José Castillo Mont
Ing. Agr. William Roberto Escobar López
Ing. Agr. Alejandro Arnoldo Hernández Figueroa
Br. Estuardo Enrique Lira Prera
Br. Mynor Joaquín Barrios Ochaeta
Ing. Agr. Guillermo Edilberto Méndez Beteta**

Guatemala,
Marzo de 1,997.

Honorable Junta Directiva
Honorable tribunal examinador
Facultad de Agronomía
Universidad de San Carlos de Guatemala

Respetados señores:

De conformidad con las normas establecidas en la ley orgánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala, tengo el honor de someter a vuestra consideración el trabajo de tesis titulado:

"SIMULACION HIDROLOGICA PARA LA CALIBRACION DE PARAMETROS DE ESCORRENTIA, EN LA CUENCA DEL RIO LA VIRGEN, SAN ANDRES ITZAPA, CHIMALTENANGO".

Trabjo que presento como requisito previo a optar el título de Ingeniero Agrónomo en Recursos Naturales Renovables, en el grado académico de Licenciado.

A la espera de una resolución favorable me despido de ustedes.

Atentamente,



Edwin Guillermo Santos Mansilla

ACTO QUE DEDICO

A

DIOS:

MIS PADRES:

Rúl Guillermo Santos Borrayo y María Amanda Mansilla Castro.

MI ESPOSA

Sinthia Beraliz Barrios Casasola

MIS HERMANOS

Héctor Raúl Santos Mansilla y Silvia Nineth Santos Mansilla

MIS ABUELOS, TIOS Y PRIMOS

TESIS QUE DEDICO

A

GUATEMALA

COLEGIO "EL HOGAR" (Mixco)

COLEGIO SALESIANO DON BOSCO

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE AGRONOMIA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

MIS COMPAÑEROS DE LA CARRERA DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

AGRADECIMIENTOS

SINCEROS AGRADECIMIENTOS A:

Ing. Agr. Msc. Víctor Cabrera de la Cruz e Ing. Civil Msc. Juan José Sandoval por su asesoría en la realización en este trabajo de tesis.

Ing. Agr. Msc. Hugo Tobías e Ing. Agr. Isaac Herrera, por su apoyo en el análisis de información generada en las estaciones hidrometeorológicas.

Instituto de Investigaciones Agronómicas por su valiosa colaboración en el apoyo para las actividades del campo y a los integrantes del proyecto de la cuenca del río Itzapa, Estuardo Véliz, Raúl Zuñiga, Alejandro Santos, Erick Motta y Carlos López por su colaboración en el campo.

La información presentada en esta tesis pertenece al proyecto **"INVESTIGACION BASICA PARA LA PLANIFICACION DE LA CUENCA DEL RIO ITZAPA"**, del Instituto de Investigaciones Agronómicas de la Facultad de Agronomía y la Dirección General de Investigación de la Universidad de San Carlos de Guatemala

CONTENIDO

	PAGINA
Resumen	v
1. Introducción	1
2. Justificación	2
3. Marco Teórico	3
3.1 Marco Conceptual	3
3.1.1 El concepto de un modelo	3
3.1.2 Clasificación de modelos hidrológicos	7
3.1.3 Naturaleza estocástica de los procesos	14
3.1.4 Calibración y optimización de modelos	14
3.1.5 Simulación de caudales en computador	15
3.1.6 Modelos matemáticos de simulación hidrológica	15
3.1.7 Modelos matemáticos de simulación hidráulica	19
3.1.8 Modelo matemático de simulación hidrológica e hidráulica	20
A) Módulos del programa	20
a) El modulo de información (HIS)	21
b) El modulo (HBV)	21
3.1.9 Aplicaciones de modelos	33
3.1.10 Cuenca hidrológica	37
3.1.11 Análisis de información hidrometeorológica	37
3.1.12 Determinación de precipitación media	38
3.1.13 Hidrogramas	40
3.1.14 Relación precipitación-escorrentía	43
3.1.15 Morfometría de cuencas	44
3.1.16 Ciclo hidrológico	44
3.1.17 Evaporación	45
3.1.18 Evapotranspiración potencial	45
3.1.19 Balance hidrológico	46

	PAGINA
3.2 Marco Referencia	47
3.2.1 Ubicación	47
3.2.2 Superficie	47
3.2.3 Relieve	47
3.2.4 Hidrología	47
3.2.6 Información hidrológica e hidrométrica	49
3.2.7 Clima	50
3.2.8 Geología	51
3.2.9 Suelos	51
3.2.10 Características socioeconómicas	53
A) Población	53
B) Accesibilidad	53
4. Objetivos	55
5. Metodología	56
5.1 Recopilación y generación de información meteorológicas	56
5.2 Arreglo de la información	57
5.3 Análisis de doble masa	58
5.4 Trazo y utilidad de polígonos de Thiessen	59
5.5 Curva de duración de caudales	59
5.6 El calculo de la rutina del suelo húmedo	60
5.8 Calibración de parámetros de la cuenca	61
6. Resultados y discusión	63
7. Conclusiones	85
8. Recomendaciones	86
9. Bibliografía	87
10. Apéndice	91

INDICE DE FIGURAS

	PAGINA
Figura 1. Clasificación de modelos	8
Figura 2. Modelo de procesos individuales	9
Figura 3. Modelos de componentes	10
Figura 4. Modelos integrados	11
Figura 5. Modelos globales	11
Figura 6. Concepto de operación de un sistema	13
Figura 7. Diagrama de flujo del modelo MIKE 11	22
Figura 8. Hidrograma y sus componentes	25
Figura 9. Relación evapotranspiración actual y potencial	28
Figura 10. Representación de la dinámica de los parámetros	29
Figura 11. Ubicación geográfica de la cuenca	49
Figura 12. Accesibilidad	54
Figura 13. Intensidad de lluvia estación El Recuerdo	64
Figura 14. Intensidad de lluvia estación Alameda	66
Figura 15. Intensidad de lluvia estación Chicazanga	69
Figura 16. Descarga en m ³ /seg. Estación El Puente	70
Figura 17. Análisis de doble masa. Estación Alameda y Chicazanga	71
Figura 18. Análisis de doble masa. Estación Chicazanga y Recuerdo	72
Figura 19. Análisis de doble masa. Estación Alameda y Recuerdo	73
Figura 20. Curva de duración de caudales. El Puente. 1991-1995	77
Figura 21. Curva de duración de caudales. El Puente. 1983-1995.	78
Figura 22. Curva de calibración, caudales observados y calculados.	82
Figura 23. Curva de caudales acumulados observados y calculados.	82
Figura 24A. Ubicación de estaciones hidrometeorológicas	92
Figura 25A. Polígonos de Thissen	93
Figura 26A. Zonas de vida	94
Figura 27A. Geología	95

	PAGINA
Figura 28A. Suelos de Simmons, Tarano y Pinto	96
Figura 29A. Uso de la tierra.	97
Figura 30A. Caudales observados y calculados. Año 1994.	98
Figura 31A. Almacenamientos del ciclo hidrológico. Año 1994.	98

INDICE DE CUADROS

	PAGINA
Cuadro 1. Precipitación en mm/año. Estación El Recuerdo.	63
Cuadro 2. Precipitación en mm/año. Estación Alameda.	65
Cuadro 3. Precipitación en mm/año. Estación Chicazanga.	67
Cuadro 4. Datos de evaporación mm/año. Estación Alameda.	68
Cuadro 5. Datos de evaporación mm/año. Estación Chicazanga.	68
Cuadro 6. Caudal medio anual en lts/seg. Estación El Puente.	69
Cuadro 7. Areas que cubren los polígonos de Thissen.	75
Cuadro 8. Cálculo de la precipitación media de la cuenca.	75
Cuadro 9. Caudales característicos. Estación El Puente. 1991-1995	76
Cuadro 10. Caudales característicos. Estación El Puente. 1983-1995	78
Cuadro 11. Parámetros que afectan el volumen de escorrentía	80
Cuadro 12. Parámetros que afectan la forma del hidrograma	81
Cuadro 13. Datos generados del cálculo precipitación-escorrentía	83

SIMULACION HIDROLOGICA PARA LA CALIBRACION DE PARAMETROS DE ESCORRENTIA, EN LA CUENCA DEL RIO LA VIRGEN, SAN ANDRES ITZAPA, CHIMALTENANGO.

SIMULATION HIDROLOGICAL OF CALIBRATION PARAMETERS RUNOFF, VIRGEN IN THE RIVER WATERSHED, SAN ANDRES ITZAPA, CHIMALTENANGO.

RESUMEN

El presente estudio se llevó a cabo en la cuenca hidrográfica del río La Virgen, San Andrés Itzapa, Chimaltenango. El trabajo de investigación consistió en la simulación hidrológica para la calibración de los parámetros de escorrentía, generando un modelo que calculó un hidrograma a través de los datos de precipitación y se comparó con un hidrograma observado. El modelo genera el ciclo hidrológico facilitando la planificación del recurso hídrico y conociendo la respuesta de éste a cambios que sucedan dentro de la cuenca hidrográfica. Para calibrar el modelo se generó y recopiló datos hidrometeorológicos para cinco años de las estaciones: Hidrométrica "El Puente", meteorológicas "Chicazanga", "Alameda" y "El Recuerdo". Los datos fueron de precipitación diaria en mm., evaporación mensual en mm. y caudales medios diarios en lts/seg. El análisis de la información se realizó con cálculos de doble masa entre estaciones obteniendo un factor de corrección de 0.65 se observó una consistencia aceptable en la información. Para la precipitación media de la cuenca se utilizó el método de polígonos de Thissen, el peso asignado a cada estación fue: Para Chicazanga de 0.533, La Alameda con 0.3485 y El Recuerdo 0.1185. Se observó que la estación más importante es la de Chicazanga. La precipitación media de la cuenca fue de 1,169.89 mm./año. Posteriormente para la estación hidrométrica El Puente se construyó la curva de duración de caudales y el hidrograma de escorrentía en los cuales se observó una pendiente fuerte en la curva indicando un difícil desarrollo exitoso con el agua superficial de la cuenca en época de estiaje siendo necesario el almacenamiento o utilización de pozos para aprovechar el agua subterránea. Para el período de los años de 1,991-1,995 el caudal que excede un 50% del año o es igualado corresponde al caudal medio y es de 35 lts/seg. El caudal máximo para este período fue de 400 lts/seg. presentándose un 2.74 % de tiempo durante el año y el mínimo fue de 18 lts/seg presentándose un 97.3 % de tiempo durante el año.

La diferencia es significativa para el período de 1983-1995 son los caudales máximos, que excede o es igualado a $1.10 \text{ m}^3/\text{seg}$ en el 1 % del tiempo, equivalente a 3 días/año.

Para el cálculo de la relación precipitación-escorrentía se gráfico el hidrograma observado y el calculado, éste fue generado mediante afirmaciones empíricas representadas por ecuaciones matemáticas lineales y parámetros que representan el comportamiento del sistema natural y el efecto a cambios dentro de él. Los parámetros se calibraron mediante el método de prueba y error. Los parámetros que afectaron el volumen de escorrentía fueron los siguientes:

$$S_{sm} = 0, S_{uz} = 0, S_{lz} = 13 \text{ mm}, Fc = 300 \text{ mm.}, Lp = 0.6, \beta = 4.$$

Los parámetros que influyeron en la forma del hidrograma son: $K_0 = 0.2, K_1 = 0.1, K_2 = 0.10, K_3 = 0.010, K_4 = 0.005, U_{z10} = 20 \text{ mm.}, U_{z11} = 10 \text{ mm}$ y $U_{z12} = 5 \text{ mm.}$

El cálculo de la precipitación media de 1094.1 mm/año en la cuenca y los parámetros iniciales dieron como resultado un caudal generado de 63.1 mm/año correspondiendo a 5.7% del total de precipitación al año. Para el flujo base se calculó 43.5 mm/año correspondiendo a 68.93 % del caudal generado y para el caudal pico se obtuvo 1.2 mm/año correspondiendo a 1.90 %.

El balance hídrico de la cuenca se calculó restando a la precipitación las salidas siguientes: evapotranspiración actual y caudal generado, esto es igual a la suma de contenido de humedad en el suelo húmedo y almacenamiento en el suelo representado por:

$$P - E_{act} - Q_{gen} = d(S_{sm} + S_{uz} + S_{lz}) - P.$$

El resultado del cálculo en la ecuación descrita para el año de 1,994 dentro de la cuenca fue:

$$1094.1\text{mm} - 810.12\text{mm} - 91.10\text{mm} = 809.59\text{mm} + 41.855\text{mm} + 49.7745\text{mm} - 1094.1\text{mm}$$

$$192.88\text{mm} = -192.88\text{mm}$$

La comprobación del balance hídrico se llevó acabo a través de la hoja electrónica (QPRO) mediante la relación precipitación escorrentía. La modificación de parámetros por cambios notorios en el uso de la tierra en la cuenca, afecta el ciclo hidrológico principalmente se presentan fuertes escorrentías en época de lluvia y caudales bajos en época de estiaje. El modelo puede utilizarse para una cuenca con características morfométricas y biofísicas similares a la estudiada, pero es necesario que se tengan algunos aforos de dicha cuenca para representar los caudales calculados.

1. INTRODUCCION

La creciente demanda de los Recursos Naturales Renovables y no Renovables junto al subdesarrollo que atraviesa Guatemala ha provocado un uso y aprovechamiento irracional de la vegetación acompañado de un agotamiento del agua y pérdida del suelo.

Este deterioro ambiental en las cuencas hidrográficas contamina y disminuye las fuentes de agua a tal grado que en época de estiaje es escaso el recurso hídrico el cual juega un papel vital para la existencia de cualquier ser vivo en la tierra.

Es necesario un estudio del comportamiento hídrico de las cuencas a cambios que sucedan dentro de ella, esto se puede llevar acabo, mediante metodologías modernas como lo es la aplicación de modelos hidrológicos en computador que nos proporciona una representación matemática del sistema hidrológico para duplicar la esencia del sistema natural.

En hidrología la modelación en computador en la actualidad, juega un papel primordial ya que se pueden analizar un volumen de operaciones mucho mayor y detallado que el trabajo manual, ofreciendo mejoras por ser más rápido, utilizando bastante información hidrometeorológica y menos sujeta a errores.

En la cuenca del río Achíguate se encuentra la subcuenca del río Itzapa ubicada en la parte alta y al noroeste de la misma. Dicho lo anterior es de mucha importancia el manejo de los recursos en la cuenca del río Itzapa que mediante investigación se formularan modelos que se podrían extrapolar a otras subcuencas.

En la presente investigación se calibró el modelo de simulación hidrológica MIKE 11 con su modulo "HIS" (Hydrological Information System), y modulo "HBV" (Swedish of the Hydrological Bureau Water Balance Division).

El modelo se corrió en la cuenca del Río Itzapa con apoyo de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria (ERIS), mediante la generación de registros hidrometeorológicos por parte de la Dirección General de Investigación y el Instituto de Investigaciones Agronómicas (DIGI-IIA-FAUSAC), también se recopiló información generada por el Instituto Nacional de Vulcanología, Meteorología e Hidrometeorología (INSIVUMEH).

2. JUSTIFICACION

La falta de información sobre el comportamiento hidrológico de las cuencas hidrográficas impide el desarrollo de las comunidades que carecen del recurso hídrico para cubrir sus necesidades generando problemas de salud, socioeconómicos y ecológicos disminuyendo el nivel de vida de sus habitantes. En la actualidad el problema del ordenamiento de los recursos naturales renovables en cuencas hidrográficas, se hace más sencillo con estudios de modelos que se calibran a través del ajuste de parámetros que mejor representen el sistema prototipo. Al realizar un estudio hidrológico podríamos facilitarnos el problema de planificar usos múltiples del agua en cuencas donde el régimen hídrico no es muy variado. Se pueden plantear soluciones como el tratamiento de aguas negras, generación de energía, riego y agua potable.

Los modelos hidrológicos están jugando un papel primordial en resolver problemas para planificar y darle un uso sostenido al recurso hídrico que a través de afirmaciones empíricas y principios teóricos de leyes generales representando de una forma sencilla y simplificada la respuesta del sistema a cambios o condiciones impuestas.

En la cuenca del río Itzapa, el recurso hídrico en época de estiaje es escaso y en época lluviosa se presentan altas escorrentías con gran cantidad de sedimentos por excesiva erosión del suelo, poca infiltración y alta contaminación del agua como respuesta al cambio de uso en los suelos. Esta problemática se extiende a lo largo de la cuenca del río Achiguate con asolvamientos del cauce en las partes bajas e inundaciones severas.

3. MARCO TEORICO

3.1 Marco Conceptual

3.1.1 El concepto de un modelo

Un modelo es una descripción física o matemática de un sistema físico, incluyendo la interacción con el mundo que lo rodea, que puede utilizarse para simular el efecto de los cambios en el sistema mismo, o el efecto de los cambios en las condiciones impuestas sobre el (Verwey, A. 1995). En el desarrollo de un modelo matemático, puede distinguirse los siguientes elementos:

A) Definición de objetivos del modelo

La definición de objetivos, es un elemento subestimado muy frecuentemente en el proceso de decisión, el cual guía el uso de un modelo. La primera pregunta es, si un modelo puede añadir información importante entendida acerca de un sistema. También involucra la estimación de la posibilidad de salvar costos del proyecto utilizando un modelo y el valor económico que puede estar incluido en el desarrollo y uso del modelo. El uso de modelos está asociado generalmente a su aplicación para simulaciones y revisión de consistencia de información hidrometeorológica (Verwey, A. 1995). Como ejemplos típicos de objetivos del modelo en los campos de diseño ambiental, hidráulico y hidrológico se puede mencionar:

- Simular en balance hídrico de las cuencas hidrográficas,
- Conocer la respuesta del sistema hidrológico a cambios que sucedan.
- Control de penetración de sal en estuarios,
- Simulación de los impactos de rompimiento en la presa,
- Simulación de los impactos de inundaciones,
- Diseño de predicción en crecidas de sistemas urbanos y crecidas
- Estimación del abastecimiento de agua en campos de irrigación,
- Efectos ecológicos del calor en centrales eléctricas,
- Efectos de trabajos hidráulicos,
- Estimación de la sedimentación en reservorios (Verwey, A. 1995).

B) Esquematización de modelos

Al estudiar estos procesos en todos sus detalles, la abstracción del sistema físico sigue a causa de la complejidad de los procesos y el interés económico. El uso de modelos simplificados, basados en una descripción simplificada de los procesos físicos, es solamente justificada si los resultados del modelo aún pueden utilizarse confiadamente en el proceso de diseño. En otras palabras, si los resultados caen aún dentro del rango de confiabilidad de la información utilizada, por el diseñador. Todos los procesos en la naturaleza son de naturaleza tridimensional e inestable (Verwey, A. 1995). La alternativa en la esquematización del modelo es principalmente: La elección de un número de dimensiones espaciales y la elección de la variabilidad del tiempo.

C) Ecuaciones y condiciones de frontera

Un modelo matemático está basado principalmente en la elección de ecuaciones que describan el estado del sistema físico. El nivel del agua, la descarga, las velocidades, las temperaturas, las salinidades etc., son llamadas variables de estado o variables dependientes. Una ecuación es necesaria para cada una de estas variables, describiendo el estado del sistema físico. La mayoría de estas ecuaciones son ecuaciones de balance de masas simplificada o de volúmenes. Otras ecuaciones están basadas en balances de otras cantidades físicas, como los momentos, la energía o las turbulencias o formas simplificadas de estos. Las ecuaciones son idealizadas describir procesos en espacio y tiempo dentro de nuestro dominio computacional (Verwey, A. 1995).

D) Solución de algoritmos

Las ecuaciones de balance en espacio y tiempo no son provistas, generalmente, con ecuaciones diferenciales parciales. Estas ecuaciones son transformadas de una forma continua computacional. Tales formulaciones están basadas en diferencias finitas, elementos finitos o integrales de frontera, y proveen sistemas de ecuaciones lineales. Complementadas con una formulación linealizada de condiciones fronterizas y elementos especiales, como estructuras hidráulicas, el sistema de ecuaciones lineales pueden resolverse con una variedad de algoritmos, variando desde la simple eliminación Gaussiana como una matriz de solución directa, hasta técnicas iterativas como el método conjugado del gradiente (Verwey, A. 1995).

E) Software

Para la mayoría de estudios ambientales, están disponibles las herramientas de software estándar. Para problemas simples los ingenieros proceden, generalmente, sobre paquetes de hojas electrónicas, mientras que para problemas relacionados con el flujo en canal abierto, reservorios, flujo en tubos, sistemas de desagüe, cálculos de ondas cortas, ciclo hidrológico etc., están disponibles varios productos de software, desarrollados en institutos especializados en investigación hidráulica (Verwey, A. 1995).

F) Recolección de Datos

En los últimos años, se han gastado esfuerzo en forma creciente, en la recolección de toda clase de datos, procesamiento y almacenamiento de estas informaciones en bases de datos. Sin embargo, para el desarrollo del modelo, la información disponible en bases de datos no es siempre suficiente, porque la calibración de modelos frecuentemente requiere información medida sobre períodos cortos, disponibles en diferentes ubicaciones simultáneamente. Por esta razón, los modelos generalmente son adaptados con cualquier información disponible en una base de datos estándar, completada con información recopilada en el campo (Verwey, A. 1995).

G) Calibración y verificación del modelo

Parte de la información requerida para un modelo, puede recopilarse directamente en el campo. Alguna información, puede ser recopilada solamente con un cierto grado de incertidumbre como los detalles de la topografía en los planos de inundación. Otros tipos de información no puede medirse del todo, tal información puede solamente estimarse sobre la base de un sólido juicio de ingeniería, basado en la interpretación de valores registrados de otras variables y parámetros. Mientras más incertidumbre tenemos en los parámetros del modelo, más dependientes somos de un buen conjunto de calibración de datos. Para la calibración del modelo, se selecciona generalmente un número de eventos, que son complementarios unos a otros en función de los parámetros de la calibración. Por ejemplo, una calibración del modelo de un río comenzará típicamente con la calibración del flujo mínimo y acabará con la calibración de algunos eventos de crecidas típicas (Verwey, A. 1995).

H) Simulaciones

Según Ackoff, la simulación es un proceso que duplica la esencia de un sistema ó actividad, sin reproducir la realidad de sí mismo. El mismo autor dice que los planificadores han utilizado la simulación, debido a que a menudo es el único método efectivo para lograr resolver largos y complejos sistemas que desafían una solución analítica ó que no puede ser reproducida por experimentación en los sistemas actuales (Ackoff. R.L. 1961). La simulación hidrológica es una técnica para analizar respuestas de sistemas físicos siendo una manera muy útil para resolver problemas de diversas índoles, en algunos casos se puede representar en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Esta técnica a desarrollado muy rápido en lo que es la investigación en el análisis de sistema, asociados a los avances de la electrónica computacional. La síntesis de sistemas hidrológicos, involucra la selección de un modelo hidrológico apropiado y la operación de tal modelo por medio de un análisis. Cuando el modelo hidrológico apropiado ha sido seleccionado, éste puede ser usado para predecir posibles entradas hidrológicas a los componentes estructurales de un sistema de recursos hidráulicos (Aparicio M.F. 1989).

D) Utilidad de la simulación

La simulación es obviamente útil en cualquier situación en que se requiera el cálculo de escorrentía a partir de datos de precipitación. Su mayor utilidad puede estar en el análisis de los cambios que sucedan dentro de la cuenca. La consecuencias de un aumento en la precipitación, puede simularse comparando los caudales calculados a partir de los datos históricos aumentados por medio de algún procedimiento apropiado. Así, también se pueden calcular los efectos de cambios en el patrón del uso de la tierra a través de un período largo, mediante la modificación adecuada de los parámetros necesarios como: La urbanización modifica la permeabilidad del área y el sistema de drenaje, la construcción de drenajes modifica las distancias y pendientes de escorrentía superficial, los cambios de vegetación, intercepción y rugosidad de la superficie provoca mayor escorrentía superficial (Haan, C.T. 1982).

3.1.2 Clasificación de Modelos Hidrológicos

Para el uso de los modelos, se tienen que entender mejor los fenómenos naturales bajo ciertas condiciones que pueden ser hechas por predicciones dentro de un sentido determinístico ó probabilístico. El comprender un evento, implica que se pueda dar una explicación efectiva de este (Hempel, C.G. 1963). La esencia de esta definición es una explicación científica: Se supone que se tiene una afirmación, la cual describe algún fenómeno a ser explicado. Entonces, si esta afirmación puede ser inferida de un grupo, de leyes generales ó principios teóricos, y de un grupo de afirmaciones de circunstancias empíricas, se puede decir que este fenómeno ha sido explicado. De esta definición se sigue, que los modelos formales son requeridos para las investigaciones científicas. Los modelos usados en cualquier disciplina, pueden ser categorizados como formales o materiales, ver figura 1.

A) Modelo Material

Es una representación física de un sistema complejo que es asumido más simple que el sistema prototipo; y también asume tener propiedades similares a las del sistema prototipo (Ozga Zielinska, M. 1976). Los modelos materiales, incluyen modelos icónicos y modelos analógicos. En la figura 1, se presenta la clasificación de modelos.

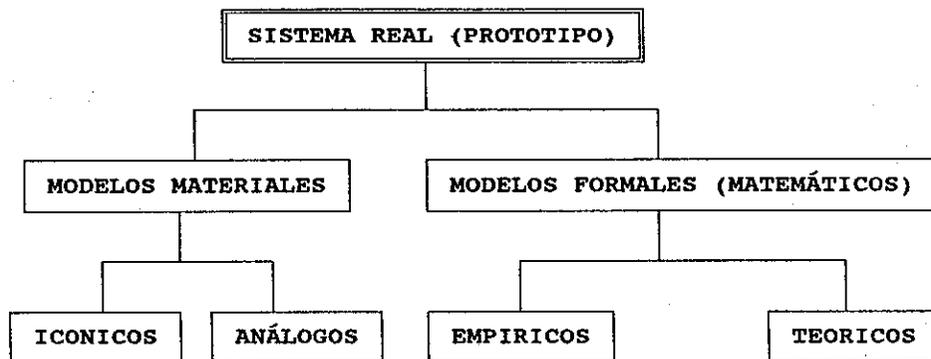


Figura 1. Clasificación de modelos (Ozga - Zielinska 1,973).

a) Modelo Iconico

Es una versión simplificada el sistema del mundo real y requiere los mismos materiales que el sistema real (Ozga Zielinska, M. 1976).

b) Modelo Analógico

Las cantidades medidas son con sustancias físicamente diferentes que en el modelo real (prototipo). Por ejemplo, el flujo de una corriente eléctrica, puede representar el flujo de agua. La validez de un modelo analógico depende de la existencia de idénticas relaciones matemáticas describiendo ambos sistemas, el real el análogo (Ozga Zielinska, M. 1976).

B) Modelo Formal o intelectual

Es un símbolo usualmente una representación matemática de una situación idealizada que tiene la estructura importante de las propiedades del sistema real. En cuencas hidrológicas todos los modelos formales son matemáticos: pueden ser divididos en modelos teóricos y empírico (Ozga Zielinska, M. 1976).

a) Modelo Teórico

Incluye un grupo de leyes generales ó principios teóricos, y un grupo de afirmaciones de circunstancias empíricas. Todos los modelos teóricos simplifican un sistema físico, por tanto, son más ó menos incorrectos. En modelación de cuencas, los ejemplos de simplificación de modelos teóricos abundan. El flujo superficial de agua en una cuenca, es generalmente descrito por la ley de conservación de la masa y la ecuación de conservación del momento, las cuales contienen datos de hidráulica empírica. Bajo ciertas condiciones, la ecuación de momentos es simplificada con la ecuación cinemática. Teoría y empirismo están generalmente así interrelacionados en la mayoría de los modelos hidrológicos, por tanto son híbridos que incluyen ambos componentes, teóricos y empírico (Ozga Zielinska, M. 1976).

b) Modelo Empírico

Omite las leyes generales y es en realidad sólo una representación de datos (Ozga Zielinska, M. 1976). Los modelos hidrológicos, pueden todavía ser clasificados de acuerdo a los siguientes criterios:

b.1) Estructura del modelo y materia de la simulación

El primer criterio de clasificación, relaciona parte a parte el ciclo hidrológico, incluyendo los modelos y su nivel de abstracción (Ozga Zielinska, M. 1976). Los siguientes niveles pueden ser identificados:

i) Un modelo de procesos individuales

Es una descripción matemática de uno de los procesos físicos del ciclo hidrológico. Por ejemplo, modelos de evaporación de agua superficial, flujo en un medio poroso no saturado, etc. (Ozga Zielinska, M. 1976). Como lo mostrado en la figura 2, estos son de forma:

$$Y(t) = Q [X(t)]$$

Donde: Y(t) = salida, X(t) = entrada y Q = operador del proceso.

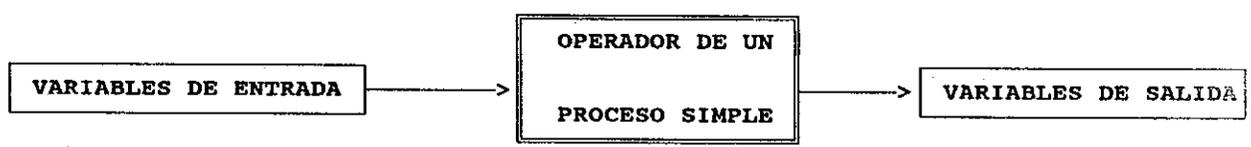


Figura 2. Modelo de procesos individuales

ii) Los modelos de componentes

Están ilustrados en la figura 3, incluyen modelos vinculados a procesos individuales con un componente operador que distribuye el caudal de agua a los procesos individuales en el orden y magnitud apropiados (Juárez Quim, D.H. 1987). Estos describen procesos ocurridos en el subespacio del sistema de la cuenca. Ejemplo de modelos de componentes, incluyen evapotranspiración, escorrentía superficial directa, erosión y flujo superficial (Ozga Zielinska, M. 1976).

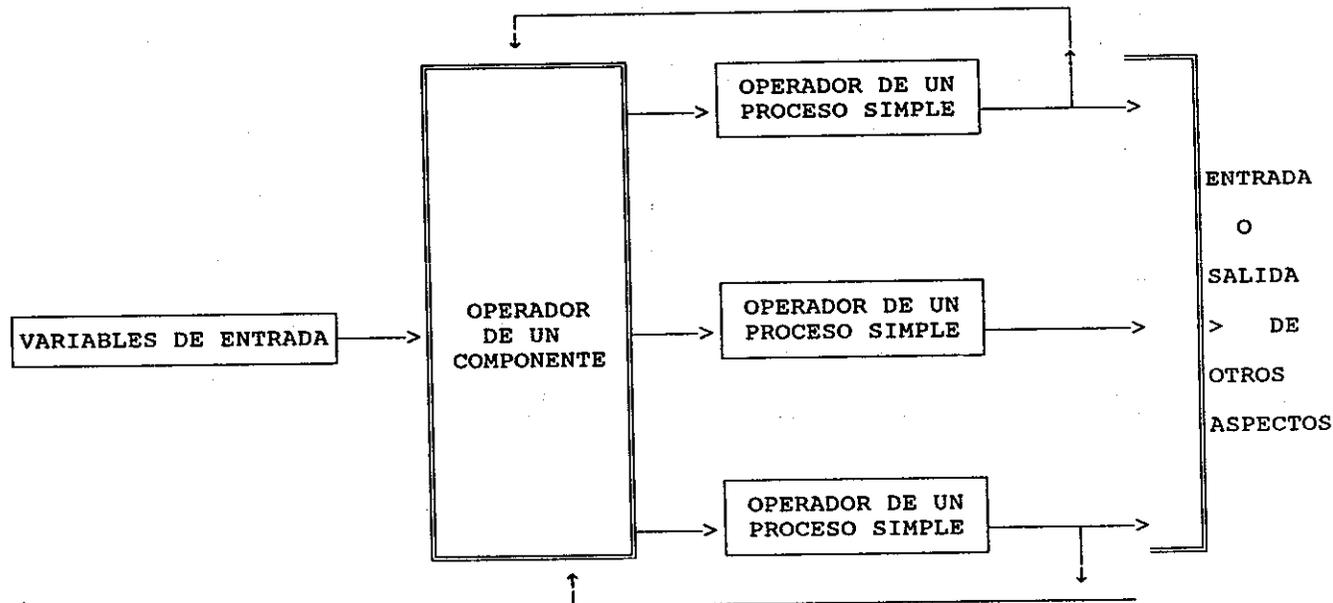


Figura 3. Modelos de componentes

iii) Modelo integrado

Es un ejemplo de modelo extensivo de cuencas. Como está ilustrado en la figura 4, un modelo integrado consisten en un grupo de componentes vinculados a un operador que distribuye el caudal a componentes individuales en el orden y magnitud apropiados. A menudo, los modelos integrados incluyen componentes de varios grados de abstracción ó implicación. Los modelos integrados están desarrollados para procesos de síntesis de componentes y tienen una estructura bien definida, que usualmente están determinada por los conceptos de quien concibe el modelo con respecto a la naturaleza física de la cuenca (Ozga Zielinska, M. 1976).

i) Los Modelos Estáticos

Incluyen varias ecuaciones empíricas y modelos de regresión en los cuales el tiempo no es una variable independiente. Un modelo de regresión relaciona la descarga media anual de una corriente a factores climáticos y fisiográficos, como un modelo estático (Ozga Zielinska, M. 1976).

ii) Los Modelos Dinámicos

Requieren ecuaciones diferenciales con el tiempo como una variable independiente para mostrar la variabilidad del tiempo en los resultados (Ozga Zielinska, M. 1976).

b.3) Valor Cognoscitivo de un Modelo

Dos categorías resultan cuando se considera el tercer criterio de clasificación y son:

i) Los modelos basados en la física

Son aquellos en los cuales gobiernan las leyes física y la estructura del modelo es bien conocida y puede ser descrita por ecuaciones de matemática y física (Ozga Z., M. 1976).

ii) Los modelos conceptuales

Pueden ser usados cuando la estructura del modelo y las leyes físicas son desconocidas, ó el modelo físico es tan complicado, que es más apropiado a una gran simplificación del comportamiento del modelo. Modelos lineales ó o no lineales de almacenamiento, pueden ser clasificados como conceptuales (Juárez , A. 1991).

b.4) El carácter de los resultados

El carácter de los resultados obtenidos de un modelo, pueden ser clasificados como estocásticos o determinísticos (Ozga Zielinska, M. 1976).

i) Modelo Estocástico

Si cualquiera de las variables en el modelo matemático es una variable aleatoria con una distribución de probabilidad definida o no, entonces es un modelo estocástico (Ozga Zielinska, M. 1976).

ii) Modelo Determinístico

Si todas las variables son consideradas libres de una variación aleatoria, entonces el modelo es determinístico (Clarke, R.T. 1973)

b.5) Aproximación Aplicada y Método de Solución

El quinto criterio de clasificación, se traslapa un poco con el criterio de valor cognoscitivo del modelo, pero introduce una terminología diferente. Los sistemas pueden estar referidos como sistemas de caja blanca, gris ó sistemas de caja negra, dependiendo si la relación es horizontal ó vertical como se muestra en la figura 6 (Eagleson, P. 1970). La relación horizontal de aproximación de caja negra, trata el sistema como un operador el cual transforma los datos de entrada y los datos de salida (Ozga Zielinska, M. 1976).

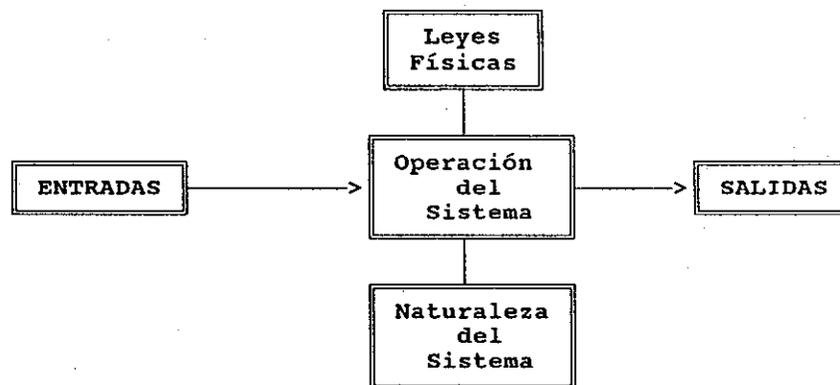


Figura 6. Concepto de la Operación de un Sistema Doodge.

La aproximación de la caja blanca, indicada por la relación vertical, implica que las leyes físicas naturales del sistema están comprendidos y pueden ser sintetizados en un sistema de operador sin auxilio de observaciones de entrada ó salida. La aproximación de caja gris posee parte relaciones verticales y horizontales (Doodge, J.C. 1973). Ver figura 6.

b.6) Propiedades de las funciones de operador

El último criterio de clasificación, relaciona las propiedades matemáticas de las funciones del operador. Los modelos pueden ser clasificados como lineales ó no lineales, en discretos ó distribuidos y estacionarios ó no estacionarios. De acuerdo a Clark (1973), el uso del término lineal tiene dos significados: Un modelo es lineal si en la teoría del sistema el principio de superposición es válido. El principio de superposición establece que si $Y_1(t)$ y $y_2(t)$ son las salidas del sistema correspondiente a las entradas $X_1(t)$ y $X_2(t)$ respectivamente, entonces la respuesta a $X_1(t) + X_2(t)$ es $Y_1(t) + Y_2(t)$. La más comúnmente usada en hidrología (Doodge, J.C. 1973).

- Una alternativa del significado de linealidad y no linealidad es el sentido estadístico. En este, en los modelos lineales los parámetros a ser estimados deben ser lineales.
- Un operador determinístico es estacionario, si la forma de sus parámetros son invariables con el tiempo; de otra manera, no es estacionario. Un modelo estocástico es estacionario, si sus propiedades no cambian con el tiempo (Basterrechea D. M. 1978).

3.1.3 Naturaleza Estocástica de los procesos hidrológicos

Una característica importante de los procesos hidrológicos, es su sentido impredecible y determinístico. Es decir, no se puede predecir con certeza cuanta lluvia caerá mañana ó cuanta escorrentía producirá, solamente se puede predecir la estructura probable de estos procesos. La naturaleza estocástica de los fenómenos hidrológicos, juega un papel importante en la hidrología aplicada (Eagleson, P. 1970; Juárez Quim, D.H. 1987).

3.1.4 Calibración y optimización de modelos hidrológicos

Algunos de los parámetros hidrológicos se deben determinar mediante tanteos en los cuales los caudales observados y los calculados se comparan iterativamente hasta que se encuentre un ajuste apropiado. La infiltración y el flujo base son los principales parámetros que determinan la forma del hidrograma cuando. Una vez terminada la calibración, el programa debe estar en capacidad de suministrar volúmenes de escorrentía anual muy aproximados (Lumb, A.M. 1975).

3.1.5 Simulación de Caudales en Computador

En la simulación hidrológica se trata de reproducir los fenómenos hidrológicos con el mayor detalle posible de acuerdo con el conocimiento actual y con las restricciones de el uso del computador. Finalmente el proceso debe reproducir registros de escorrentía con base de datos observados de lluvia. El procedimiento es la simulación o sea la representación en el computador de un sistema hidrológico por un matemático que pueda reproducir el comportamiento del sistema (Linsley, R.K. 1988). Los modelos se han convertido en herramientas utilizadas frecuentemente para estudios en hidrología, hidráulica y manejo ambiental. Mientras que en el pasado muchos ingenieros se dirigían a modelos físicos, actualmente los modelos se realizan en una forma idealizada a través de un computador (Linsley, R.K. 1988).

A) Estructura de un programa de Simulación

Uno de los primeros modelos fue el modelo de Cuencas Hidrográficas de Stanford, en este modelo lo principal es la precipitación horaria y la evaporación diaria. El modelo es basado en el cálculo de balance de agua (Linsley, R.K. 1988).

B) Aplicación de simulación en Hidrología

Predice condiciones futuras en la cuenca. Se puede anticipar cambios en el uso de la tierra, condición de canales como físicas e hidráulicos, control de inundaciones (Linsley, R.K. 1988).

Un modelo es una afirmación matemática de la respuesta de un sistema, el cual toma las entradas al sistema y las transforma en salidas del mismo (Avalos Lingam, R. 1983).

3.1.6 Modelos de simulación hidrológica (precipitación-escorrentía)

Estos modelos son muy utilizados en hidrología para conocer los la escorrentía proveniente de la precipitación. Entre los modelos que se pueden adaptar al área tropical y subtropical (centro y sur américa) están:

A) Modelo hidrológico, Model Hydrological System (ARHYMO)

Es un modelo matemático de simulación hidrológica de tipo determinístico, lineal con parámetros concentrados y de eventos aislados. El modelo realiza el cálculo de hidrogramas para áreas rurales, efectúa tránsitos de crecidas en cauces naturales o artificiales y por embalses, suma hidrogramas, compara hidrogramas calculados y observados (Maza, J. 1994).

B) Modelo hidrológico, Hydrologic Engineering Center (HEC-1)

El modelo HEC-1 del Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE.UU., es un paquete adaptado para estudios hidrológicos de cuencas y cálculos de la relación precipitación-escorrentía y operaciones hidrológicas de traslados de crecientes en ríos y embalses (Sánchez Azofeita, A.R. 1990). El modelo HEC-1 es un lenguaje orientado a la hidrología, y puede realizar distintas operaciones como: Hidrograma de superficies, flujo base, avance de ondas de crecientes en ríos y en embalses, cálculo de precipitación media sobre la cuenca y su distribución temporal, interceptación e infiltración, optimización de parámetros, análisis de seguridad de embalses, estudios regionales, análisis de daños por crecientes y operaciones adicionales (Guzmán, J.L. 1983).

C) Modelo hidrológico, Modeling approach water pollution from a soil erosion point of view (EROFGM)

El modelo sirve para la simulación de los procesos hidrológicos, transporte de sedimentos y de erosión en cuencas para eventos lluvia-escorrentía (2 a 20 días) en cuencas relativamente grandes (mayores de 100 km²). La base para este programa es el modelo hidrológico FGMOD, que fue desarrollado en el Instituto de Recursos Hidráulicos, Hidrología y de Obras Hidráulicas en la Agricultura de la Universidad de Hannover, Alemania. Ha sido ampliado por (Juárez 1,991) adaptado a condiciones especiales que prevalecen en las áreas tropicales y subtropicales, tales como información limitada y el carácter agresivo de las lluvias y es llamado EROFGM. El modelo se basa en la división de la cuenca en subcuencas más pequeñas, de un área menor de 100 km². El criterio más importante es la intensidad, duración y frecuencia de ocurrencia de un evento. El archivo de datos del modelo, ha sido diseñado para utilizar la mayor cantidad de información

disponible (mapas topográficos, vegetación, tipos de suelos, etc.) (Juárez, A. 1991; Juárez, Q. D.H. 1987). El modelo separa el caudal en tres áreas: Caudal base, interflow y caudal directo. Para calibrar el modelo simula el proceso hidrológico en base a datos de precipitación y las características de la cuenca. Los resultados de la simulación deben ser calibrados a los datos observados y posteriormente verificar los parámetros de calibración con otro evento. Para calibrar se utiliza el método de prueba y error ó el de optimización (Juaréz, A. 1992).

D) Modelo hidrológico PREVIK + MUSRA (Precipitación-escorrentía)

Los fines que se persiguen aplicando los modelos Previk + Musra, son especialmente para experimentar la manipulación, su funcionamiento y su desempeño con la simulación de hidrogramas de crecidas (Avalos Lingam, R. 1983). El modelo analiza de la siguiente manera:

a) Modelo hidrológico PREVIK (Precipitación-escorrentía)

El modelo Previk, forma parte de los llamados modelos conceptuales determinísticos o paramétricos y se utiliza para el estudio de hidrogramas de crecidas. Dicho modelo fue elaborado por la Sociedad Grenobienne de Aplicaciones Hidráulicas (SOGREAH) de Francia; esta sociedad ha aplicado el modelo en Francia y varios países. El modelo Previk más un sistema de alerta, puede construir el modelo de previsión de crecidas. Este modelo realiza la reconstitución de los hidrogramas de crecidas mediante la transformación de la precipitación a caudal. Este modelo consta de dos partes fundamentales; la función de producción y la función de transferencia ó modulación. Mediante estas dos funciones., el modelo trata de simular conceptualmente y paramétricamente la realidad de lo que ocurren en el proceso de crecidas (Avalos Lingam, R. 1983).

b) Modelo hidrológico MUSRA (Precipitación-escorrentía)

Este modelo realiza el tránsito de los caudales provenientes de las cuencas elementales (subcuencas) a lo largo de la red hidrográfica. El tránsito es realizado mediante la ecuación de continuidad.

E) Modelo hidrológico BILIK + MUSRA (Precipitación-escorrentía)

El modelo Bilik utiliza la reconstrucción de caudales junto con la ayuda de Musra que obtendrá caudales en cuencas pequeñas como se describe de la siguiente manera:

a) Modelo hidrológico BILIK (Precipitación-escorrentía)

El modelo Bilik pertenece a los llamados modelos conceptuales. Fue desarrollado por el SOGREAH de Francia, Bilik utiliza el proceso de balance hídrico para reconstitución de caudales, consta también de dos partes fundamentales: la función de producción y la función de transferencia ó modulación. La información necesaria para el modelo son la precipitación la evapotranspiración potencial (ETP) (Avalos Lingam, R. 1983).

b) Modelo hidrológico MUSRA (Precipitación-escorrentía)

Cuando la cuenca es grande, es conveniente dividirla en áreas hídricas y aplicar el modelo Bilik en cada una de esas área. El caudal es la salida de toda la cuenca y se obtiene con ayuda del modelo Musra; el cual por lo general no realiza propagación de caudales en las cuencas, el modelo realiza simplemente una transferencia de caudales por simple adición paa cada cuenca (Avalos Lingam, R. 1983).

F) Modelo hidrológico SGSIN (Precipitación-escorrentía)

Este modelo es la combinación del concepto de áreas y tiempos de concentración y el Método del Hidrograma Unitario.

Como en otros modelos, el proceso es dividido en traslación de la precipitación de cualquier parte de la cuenca a un punto de control y el efecto de retención ó retardamiento del almacenamiento de la cuenca en escorrentía directa. La escorrentía directa de una crecida, puede ser estimada a partir de la precipitación efectiva transformada PI (se calcula con los valores precipitación, utilizando coeficientes de escorrentía incrementados linealmente desde un valor mínimo al principio de la tormenta a un valor constante después de un tiempo dado) (Guzmán, J.L. 1983).

G) Modelo hidrológico Hydrological modeling of small (CLS)

El modelo CLS (System hidrological), trata de evaluar la respuesta de una determinada cuenca a los impulsos creados por la lluvia que cae dentro de la misma, mediante la relación siguiente (Perez Gavila, D. 1978):

$$Q = \vec{H} * \vec{U} + \vec{E}(e)$$

U = Vector columna de longitud NK que consiste de la N respuesta al impulso, cada una de las cuales de longitud K.

Q = Vector columna de longitud M que consiste de las salidas de medidas en los intervalos de tiempo dt.

E = Vector columna de error, de longitud M.

H = Matriz (M, NK) cuyos elementos son los datos de entrada.

3.1.7 Modelos de simulación hidráulica

Estos modelos son muy utilizados en el diseño de estructuras para riego y drenaje, en drenes urbano etc. Entre los modelos utilizados en Centroamérica están:

A) Modelo de simulación hidráulica Hydrologic Engenieering Center (HEC-2)

El modelo HEC-2 desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (H.E.C.) del U.S.Corps of Engineers calcula perfiles de superficie libre en régimen permanente gradualmente variado en cauces naturales o artificiales.

El procedimiento computacional está basado en la solución de la ecuación de energía unidimensional y las pérdidas de energía se evalúan por la ecuación de Manning. El método de cálculo es el conocido como estandard por pasos. El modelo está también diseñado para estudios de manejo de planicies inundables o de seguros contra crecidas. Se pueden evaluar el comportamiento hidráulico de puentes, alcantarillas, defensas de márgenes, etc.

La operación del modelo puede requerir hasta 27 tarjetas diferentes de entrada, las cuales se pueden clasificarse en cinco grupos: documentación, control, cambios, secciones transversales y puentes (Maza, J. 1994).

B) Modelo de simulación hidráulica Program Flood hydraulic (DUFLOW)

Para el desarrollo de este modelo se tuvo la participación de tres instituciones de Holanda siendo; El Instituto Internacional de Ingeniería Hidráulica y Ambiental (IHE), Delft, El Rijkswaterstaat (Depto. de Obras Públicas), División de aguas de marea, La Haya, y La Universidad Tecnológica de Delft, Facultad de Ingeniería Civil. El paquete como un todo se llama DUFLOW. El modelo puede ser usado por varias categorías de usuarios como administradores de agua y diseñadores y ha probado ser una herramienta muy útil en la educación. DUFLOW está diseñado para cubrir un rango grande de aplicaciones, tales como propagación de mareas en esteros, ondas de crecida en ríos, operación de sistemas de riego y drenaje, etc. Básicamente se simula el flujo libre en sistemas de canales abiertos, donde pueden incluirse estructuras de control como vertederos, bombas, alcantarillas y sifones. Una relación simple de precipitación - escorrentía es parte de la construcción. En conclusión podemos decir que DUFLOW simula el comportamiento del flujo en redes de canales (Spaans, W. 1989)..

3.1.8 Modelo de simulación hidrológica e hidráulica MIKE 11

Modelación de Sistemas para ríos y canales Mike 11 es un Software de Ingeniería profesional para la simulación de flujos, calidad de agua, transportación de sedimentos en estuarios y ríos, sistemas de riego, canales y otras características del agua. Debido a esa excepcional flexibilidad y velocidad el Mike 11 provee una completa y efectiva estructura para el diseño en el medio de Ingeniería en el recurso hídrico en lo que respecta a calidad, manejo y planificación del agua. El modelo Mike 11 es apropiado para la aplicación eficiente para análisis hídrico en relación al bajo costo y gran funcionamiento en microcomputadoras sobre MS-DOS o UNIX (Danish Hydraulic Institute, 1993). Los modelos matemático y formulas empleadas en Mike 11 han sido aplicadas y desarrolladas desde los años 1960s.

A) Módulos del programa

Entre los módulos que tiene el programa incluye básicamente para: análisis de datos en hidrología, precipitación-escorrentía, hidrodinámica, dispersión en transporte de sedimentos calidad de agua y cohesión en transporte de sedimentos (Danish Hydraulic Institute, 1993).

La estructura modular ofrece una gran flexibilidad entre sus características están:

- Cada modulo se puede manejar por separado.
- La transferencia de datos entre los módulos es automática.
- El proceso físico de acoplamiento (morfología de ríos, sedimentos en suspensión, calidad de agua) se facilita.
- La implementación de nuevos módulos es rápida y mejora el modelo.

Los modulos más importantes son los siguientes:

a) El modulo de información hidrológica (HIS)

Este paquete es exclusivamente para el análisis de información obtenida en el campo y contiene lo siguiente: Cambio, procedimiento y análisis de series de datos en el tiempo, calculo de curvas de duración, análisis de Doble Masa, análisis de extensas cantidades de Curvas, análisis de Valores Extremos, plotear series de tiempo (hidrológicos y metereológicos), el modulo "HIS" puede usarse independientemente del Mike 11 (Danish Hydraulic Institute, 1993).

b) El modulo "HBV", precipitación-escorrentía.

El modelo Mike 11 está conformado por varios módulos pero uno de los principales es el Modulo "HBV" (Swedish of th Hydrolical Bureau Water Balance División).

Este modelo es de tipo determinístico - conceptual, típico de los modelos con las siguientes características:

- Simple estructura
- Los parámetros necesarios del modelo son pocos y requieren un ingreso moderado de datos.
- Es necesario obtener datos de precipitación diaria y evaporación mensual.

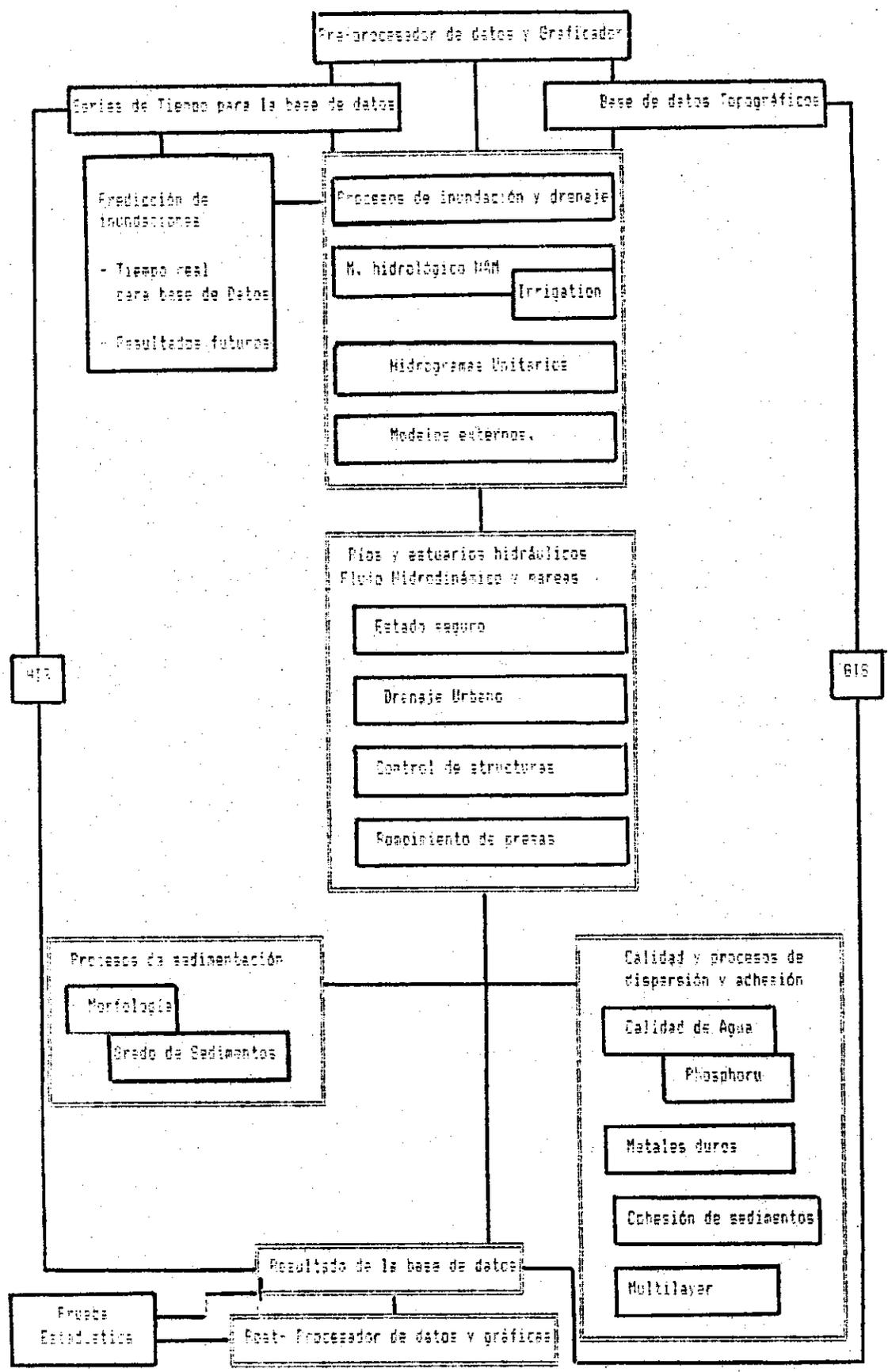


Figura 7. Diagrama de flujo del Modelo MIKE 11

El "HBV" es utilizado en varios países de los cinco continentes en distintas actividades de investigación y planificación. Entre los trabajos que se han llevado a cabo en distintos países se pueden describir los siguientes; el pronóstico de series de tiempo en cortos y largos períodos, simulación del flujo del agua, análisis del balance hídrico en cuencas, pronóstico de crecidas y simulación de los efectos en el cambio del clima. Estos trabajos se realizan con distintos objetivos de planificación del recurso hídrico. Desde el diseño de un sistema de riego hasta el diseño de hidroeléctricas.

b.1) Estructura del modelo "HBV"

Como un modelo determinístico conceptual el "HBV" posee parámetros estimados que ejecutan la calibración, mediante entradas y salidas de series de tiempo. El "HBV" conceptualiza el ambiente natural a través una estructura física y de ecuaciones con relaciones semi-empíricas. El modelo simula en las cuencas hidrográficas los procesos de precipitación - escorrentía. Los tres principales componentes de la estructura del "HBV" son:

b.2) Rutina del suelo

Esta basado en una relación empírica que transporta un eslabón de incrementos de descarga (Q) y lluvia (R) a contenido de humedad del suelo (S_{sm}), capacidad de retención de humedad (FC) y un coeficiente "B" acorde a la siguiente ecuación:

$$Q = R * (S_{sm}/Fc)^b. \text{ ----> ecuación 1.}$$

La lluvia ingresada en esta rutina es repartida en dos partes; una contribuye a la rutina de respuesta o descarga y la otra forma parte de la contribución a el suelo húmedo (S_{sm}).

La contribución de la escorrentía desde la lluvia es pequeña cuando el suelo esta seco y grande cuando el suelo esta húmedo. La evapotranspiración actual decrece cuando el suelo esta seco por fuera, está rutina es representada mediante la ecuación siguiente;

$$E_{act} = S_{sm} / (L_p * F_c) * E_{pot} \text{ -----> ecuación 2.}$$

Cuando $S_{sm} > L_p * F_c$

Eact = Evapotranspiración actual

Epot = Evapotranspiración potencial.

Ssm = Contenido de humedad del suelo.

Lp = Límite de evapotranspiración potencial.

Fc = Máxima humedad del suelo almacenado en la cuenca.

Los parámetros más importantes del suelo húmedo que afectan el volumen de escorrentía son Fc, Lp y β . Los parámetros más importantes que afectan la forma del hidrograma son K_n , U_{zln} y Perc..

b.3) Respuesta de la escorrentía

La rutina en la transformación de la escorrentía o exceso de agua en la rutina del suelo húmedo. La rutina consiste en una sencilla ecuación linear de reservorios con los siguientes parámetros libres:

- Cinco coeficientes de recesión k_0, k_1, k_2, k_3, k_4 y una constante de percolación. Estos parámetros juntos generan y controlan el flujo rápido y lento de la escorrentía. Los componentes del hidrograma serán:

$$Q_{gen} = Q_0 + Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \text{ -----} > \text{ecuación 3}$$

$$Q_0 = K_0 * (S_{uz} - U_{z10}) \text{ -----} > \text{ecuación 4}$$

$$Q_1 = K_1 * (S_{uz} - U_{z11}) \text{ -----} > \text{ecuación 5}$$

$$Q_2 = K_2 * (S_{uz} - U_{z12}) \text{ -----} > \text{ecuación 6}$$

$$Q_3 = K_3 * (S_{uz} - U_{z13}) \text{ -----} > \text{ecuación 7}$$

$$Q_4 = K_4 * (S_{tz}) \text{ -----} > \text{ecuación 8}$$

Q_{gen} = Caudal generado

Q_0 = Caudal pico y recesión

$Q_1 =$ Flujo medio entre el pico y flujo base
 $Q_2 =$ Flujo medio entre el pico y flujo base
 $Q_3 =$ Flujo medio entre el pico y flujo base

El flujo medio
 Q_2 y Q_3 es
 $>$ representado
 por
 " Q_1 "

$Q_4 =$ Flujo base

$S_{uz} =$ Almacenamiento en la zona superior del acuífero.

$S_{bz} =$ Almacenamiento en la zona baja del acuífero.

$Uz_{l_0} =$ Limite en la parte baja del reservorio.

$Uz_{l_1} =$ Limite en la parte superior del reservorio.

En la siguiente figura 8, se muestra la forma de un hidrograma y sus componentes básicos de acuerdo a la nomenclatura anterior.

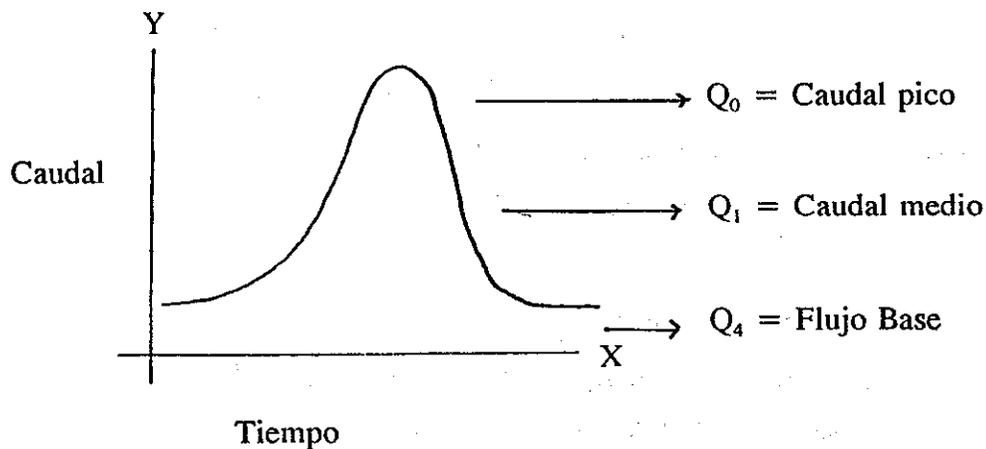


Figura 8. Hidrograma y sus componentes.

i) Transformación de la rutina

En esta rutina la escorrentía generada es representada por un hidrograma propio de los parámetros generados. Esta transformación puede ser cambiada mediante la substitución de un valor en los parámetros.

b.4) Técnica de calibración

Todos los modelos empíricos y conceptuales como el "HBV" contienen parámetros cuyo valores son estimados mediante una calibración. Los métodos que utiliza para la calibración el modelo son los siguientes:

- Prueba y error
- Automático y
- Combinación de los dos primeros.

b.5) Prueba y error

Se usa en todos los modelos mediante el cual se ingresan manualmente los parámetros asumidos para correr la simulación.

b.6) Automático

Los parámetros son obtenidos mediante una optimización o minimización en los valores numéricos mediante criterios propios del modelo. El método automático posee ventajas sobre el de prueba y error, porque éste último tiene algunas desventajas ya que son datos numéricos que se ingresan con criterios propios de la persona que está modelando.

b.7) Combinación de Prueba y error con automático

Inicialmente se pueden ajustar los parámetros con prueba y error y se termina comparando con el método automático. La combinación de los métodos puede tener resultados satisfactorios más sin embargo no es muy utilizado en la práctica.

b.8) Calibración del modelo

La calibración del "HVB" es preferible iniciar con el método de prueba y error manual, procurando adquirir un buen ajuste en medio del caudal generado y el observado, ajustando los valores de los parámetros del modelo. Mediante la calibración, de los datos de la cuenca

característica como; precipitación, escorrentía y evapotranspiración. Se puede obtener las condiciones iniciales mediante la construcción del hidrograma generado a través de los parámetros asumidos inicialmente. Los resultados nos deberán reflejar las características de la cuenca y si se puede dividir en subcuencas mediante la versión más reciente del modelo se puede describir el uso de la tierra.

b.9) Estructura de la base de datos

La resolución de los datos de precipitación a ingresar dependerá de los objetivos del estudio. Para el análisis de la información ingresada de las estaciones propuestas es necesario plotearlas y analizarlas mediante el método de doble masa. Luego se calcula el área que tienen cada estación sobre la cuenca mediante polígonos de Thiessen usando el peso de cada estación. Finalmente se define el factor de corrección de la precipitación y se obtiene la precipitación media.

b.10) Condiciones iniciales

Lo mas importante de las condiciones iniciales es el contenido inicial de agua en el suelo, porque tiene significativa influencia en las distintas variaciones del hidrograma. Los valores iniciales de la zona inferior del suelo tienen significancia en el flujo base por largo tiempo.

b.11) Parámetros del modelo Mike 11, modulo "HBV"

El modelo "HBV" posee solamente doce parámetros a calibrar. Inicialmente, los valores preliminares están basados en la experiencia en la modelación y el conocimiento. Los parámetros más importantes mencionados anteriormente del suelo húmedo que afectan el volumen de escorrentía son F_c , L_p y β . Estos parámetros se deben de calibrar en el siguiente orden: Los parámetros F_c , L_p y β son los mas claros que afectan el volumen de escorrentía, con la precipitación de las estaciones elegidas.

Los valores típicos de F_c son en intervalos entre 100 - 300 mm. Como podemos observar en la figura siguiente el limite de evapotranspiración L_p está entre 50 - 100 % de F_c , y β generalmente debe estar entre 1 - 4 .

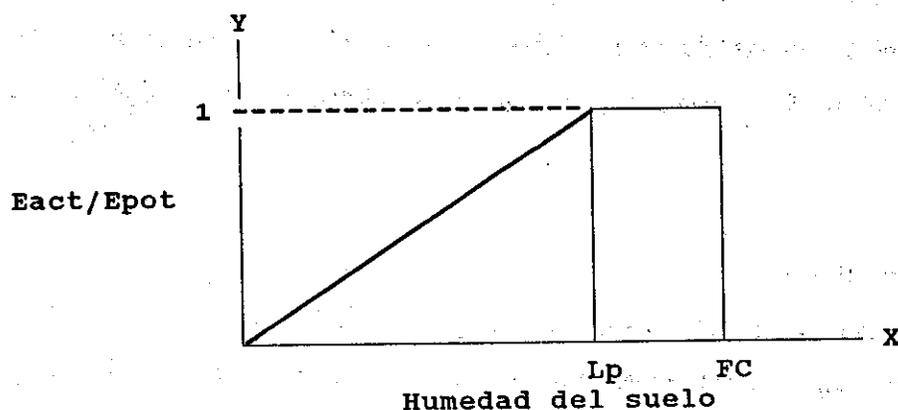


Figura 9. Relación Evapotranspiración actual y potencial con la humedad del suelo.

Los parámetros mencionados anteriormente que afectan la forma del hidrograma y no el volumen de escorrentía son K_n , Uz_l_n y $Perc$. El parámetro K_0 junto con el parámetro Uz_0 determina la magnitud y recesión de el caudal pico y flujo base.

Finalmente los coeficientes adimensionales k_1 , k_2 y k_3 , con Uz_{l_1} , Uz_{l_2} , y Uz_{l_3} determinan el flujo medio entre el flujo base y el pico, por lo general estarán representados solo por K_1 y Uz_{l_1} .

Los parámetros descritos anteriormente se pueden representar en la figura 10 donde se observa la representación dinámica de cada uno en una forma sencilla y sintetizada para poder comprender como el ciclo hidrológico el modelo. Hay que tomar en cuenta que son escasos los modelos que utilizan el almacenamiento en los acuíferos para el análisis del balance hídrico pero el Mike 11 a base de pruebas y experiencias de aplicación determino el como poder aplicar estos factores muy importantes en el comportamiento de una cuenca hidrográfica.

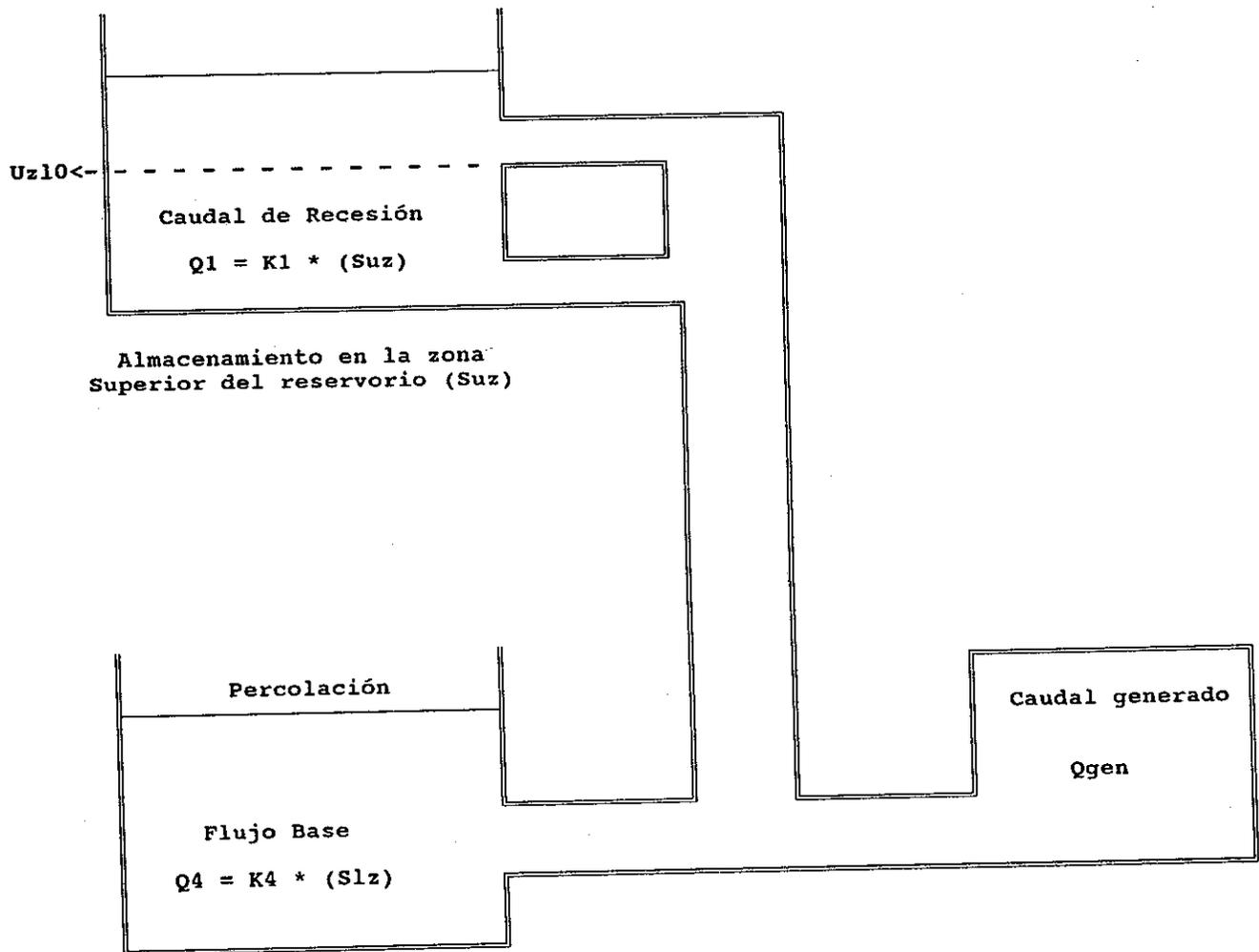


Figura 10. Representación de la dinámica de los parámetros.

b.12) Condiciones para una representación manual del modelo

Un cálculo manual en una hoja electrónica de la esorrentía y balance hídrico es sencillo siguiendo los pasos del modelo. Las suposiciones son las siguientes:

- Para una cuenca
- El tiempo del proceso es de 24 hrs.
- Todas las variables están dadas en mm. (excepto el caudal convertido).
- Solamente se utiliza Q_0 y Q_1 desde la zona superior descartando el K_2 y K_3 por consiguiente se descarta U_{z11} y U_{z12} .

b.12.1) El calculo de la rutina del suelo húmedo es el siguiente

i) Determinación de la contribución de la precipitación a la escorrentía

i.1) Calculo de la contribución (dQ) a la escorrentía desde la precipitación (dP)

$$dQ = (S_{sm}/FC)^{\beta} * dP \quad \text{cuando } dP > 0 \text{ ----> ecuación 9.}$$

Nota: El modelo "HBV" agrega la precipitación en mm. por mm. (dP es 1 mm), pero este procedimiento sería demasiado extenso y debemos de llevar acabo el calculo de la precipitación por día (dP es P). Este método es muy buena aproximación cuando el suelo está saturado. Para comenzar el análisis debemos tener los parámetros iniciales S_{sm} , S_{uz} , S_{lz} , U_{z10} , β , Perc., Fc, Lp, K_0 , K_1 , y K_4 .

i.2) Sumando la contribución de dQ:

$$dS_{uz} = dS_{uz} \text{ inicial} + dQ \text{ ----> ecuación 10.}$$

i.3) Modificando el estado del suelo húmedo (S_{sm})

$$S_{sm} = S_{sm} \text{ inicial} + (dP - dQ) \text{ ----> ecuación 11.}$$

Nota: Se deben utilizar los valores de S_{sm} en el inciso "a" para agregar la precipitación en mm. y calcular.

ii) Calculo de la evapotranspiración actual en relación a la evapotranspiración potencial

ii.1) Calculo de la evapotranspiración actual

$$E_{act} = E_{pot} \quad \text{Cuando } S_{sm} > LP * FC \text{ ----> ecuación 12}$$

$$E_{act} = S_{sm}/(LP*FC) * E_{pot} \quad \text{Cuando } S_{sm} < LP * FC \text{ ----> ecuación 13}$$

ii.2) Corrección del suelo húmedo:

$$S_{sm}^* = S_{sm} - E_{act} \text{ ----> ecuación 14}$$

iii) Procedimiento del modelo "HBV" para la transformación de caudales y balance hídrico

Para agregar la contribución de la escorrentía desde la rutina del suelo húmedo en la zona superior (S_{uz}) se analiza de la siguiente forma:

$$dS_{uz} = S_{uz} \text{ inicial} + S_{uz} \text{ ----> ecuación 15.}$$

Nota: El S_{uz} que se utiliza es el asumido inicialmente.

iv) La percolación en el suelo

iv.1) La percolación desde la zona inferior a la zona superior:

$$\text{Perc.} = \text{Perc.} \text{ -----} > \text{ Cuando } S_{uz} > \text{Perc.} \text{ ----} > \text{ ecuación 16.}$$

$$\text{Perc.} = S_{uz} \text{ -----} > \text{ Cuando } S_{uz} < \text{Perc.} \text{ ----} > \text{ ecuación 17.}$$

iv.2) Corrige el estado de a zona superior:

$$S_{uz} = S_{uz} - \text{Perc} \text{ ----} > \text{ ecuación 18.}$$

iv.3) Agrega la percolación a la zona inferior:

$$S_{lz} = S_{lz} + \text{Perc} \text{ ----} > \text{ ecuación 19.}$$

v) Calculo de escorrentía

v.1) Calcular la escorrentía desde la zona superior:

$$Q_0 = K_0 * (S_{uz} - U_{z10}) \text{ ----} > \text{ Cuando } S_{uz} > U_{z10} \text{ ----} > \text{ ecuación 20.}$$

$$Q_1 = K_1 * S_{uz} \text{ ----} > \text{ ecuación 21.}$$

$$S_{uz}^* = S_{uz} - Q_0 - Q_1 \text{ ----} > \text{ ecuación 22.}$$

v.2) Calcula la escorrentía desde la zona inferior

$$Q_4 = K_4 * S_{lz} \text{ ----} > \text{ ecuación 23.}$$

$$S_{lz}^* = S_{lz} - Q_4 \text{ ----} > \text{ ecuación 24.}$$

vi) Suma los componentes de escorrentía generada por precipitación

$$Q_{gen} = Q_0 + Q_1 + Q_4 \text{ ----} > \text{ ecuación 25.}$$

y luego lo convertimos a m³/seg. por medio de

$$Q_{comp} = Q_{gen} * \text{Area}/86.4 \quad (\text{Area} = \text{km}^2) \text{ ----} > \text{ ecuación 26.}$$

o también se puede combertir en lts/seg.

vii) Chequeo del balance hídrico

Para obtener el balance hídrico tendremos que restarle a la precipitación las salidas como evaporación actual y caudal generado y esto debe ser igual a la suma de contenido de humedad en el suelo húmedo, diferencia de almacenamiento en la parte superior e inferior del reservorio esto se representa de la ecuación 27:

$$P - E_{act} - Q_{gen} = d(S_{sm} + S_{uz} + S_{lz}) - P \text{ ecuación ----} > 27.$$

b.12.2) Para continuar con el siguiente día en los cálculos se procede de la siguiente manera

$dS_{uz} = 0$ -----> iniciar en el inciso b.13, i, i.1

Nota: Para cada día utilizar los mas recientes valores de las variables S_{sm}^* , S_{uz}^* , y S_{lz}^* que son los valores finales de cada día.

c) Otras aplicaciones de los modulos del modelo MIKE 11

Entre las aplicaciones de los modulos del MIKE 11 está el modulo hidrodinámico (HD) contiene implícito diferentes finalidades en computación en cuanto a flujos de agua en estuarios y ríos, pronóstico de inundaciones drenes urbanos, control de estructuras, simulación del flujo como transporte de sedimentos. El modulo hidrográfico (UHM) simula inundaciones desde solo algunos eventos usando unidades hidrográficas. El modulo de dispersión y adhesión (AD) está basado en una ecuación bidimensional de conservación de masas de un disolvente o suspensión de material (salinidad o cohesión de sedimentos). El modulo de la calidad del agua (WQ) se puede utilizar para pronósticos de calidad de agua. El módulo tiene la descripción de: Nitrificación, la influencia de la vegetación, sedimentación y resuspensión, reducción química de oxígeno. Para los metales simula: Adsorción y deposición de metales, la sedimentación y resuspensión de partículas de metal, la difusión de transporte de disolvente de metales en los sedimentos del agua, el transporte de disolventes y partículas de metal en las columnas con dispersión de sedimentos. Simula un número de procesos físicos, químicos y biológicos, relacionados con el ambiente y los problemas de contaminación por los metales (Danish Hydraulic Institute, 1993).

d) Los Sistemas de Información Geográfica (GIS) en Mike 11

El sistema de información Geográfica compatible con Mike 11 es Arc/Info y trabaja de la siguiente manera: Digitalizando y editando trabajos de Mike 11, generando y desplegando cambios en el agua superficial, flujo y profundidad de contornos inundados, sección y perfiles de Agua superficial, daño del flujo en los cauces de los ríos (Danish Hydraulic Institute, 1993).

e) Manejo del Menú

Mike 11 es operado a través de un sistema eficiente que contiene un menú con lógicas secuencias y sistemáticos lineamientos. Ver figura 7. Posee un Help (ayuda) en cada estación del menú (Danish Hydraulic Institute, 1993).

f) Gráficas sofisticadas

Posee un avanzado graficador a color, facilita el chequeo de datos visuales y presentación de información de la base de datos. El mismo paquete de gráficos sirve para análisis y presentación de datos (Danish Hydraulic Institute, 1993).

g) Requerimientos de Hardware

Mike 11 corre con 16 bit y 32 bit en Microcomputadores, opera con el sistema MSDOS y UNIX. El mismo hardware requiere lo siguiente: 640 Kbyte de memoria, 10 Mbyte de disco duro, impresora de gráficas y puede instalarse un plotter con procesador matemático. En la figura 7 observaremos un procedimiento lógico desde el ingreso de datos hasta su salida en MIKE 11.

3.1.9 Aplicaciones de modelos

Actualmente la aplicación de modelos hidrológicos e hidráulicos es determinante en trabajos de investigación y podemos mencionar los siguientes:

A) Aplicación del modulo HBV del MIKE 11 en la reevaluación de seguridad de la represa hidrológica en suecia

Hay al rededor de 1000 estaciones de energía hidráulica en los ríos suecos y al rededor de 140 represas más altas de los 15 metros. En 1990 nuevas normas para la determinación de proyectos de inundación fueron presentados en Suecia. Las inundaciones ocasionadas por las compuertas atoradas en las represas motivo el estudio mediante el análisis de modelos hidrológicos. Para poder llevar acabo este trabajo se necesito el análisis de datos climatológicos en toda el área y cubrió cada observación de las corrientes en los historiales oficiales secos entre 1881 y 1988. Entre los análisis de precipitación incluía un estudio de la relación entre intensidad, duración y

frecuencia. Según las normas, la simulación de diseño de inundación deben estar basadas, en un modelo hidrológico relativamente completo y el modelo que reúne estos requisitos es el "HBV" (Norstedt, U. 1990).

B) Elaboración y aplicación de modelos para la explotación de recursos hídricos, el proyecto del SUSA

El proyecto responde al nombre de un río y una cuenca Hidrológica de Dinamarca, al sudoeste de la capital del país, Copenhague. (De 1,977 a 1,981). En la cuenca del SUSA para poder planificar se tomo en cuenta múltiples intereses y necesidades de diversa índole como: el abastecimiento público de agua y el que tiene fines industriales, el riego, la calidad de agua, la eliminación de aguas de desecho y conservación de húmedas.

Se analizaron datos de una extensa red de precipitaciones para determinar las variaciones regionales del aporte de las precipitaciones a la zona de captación y comprender el comportamiento e interacciones aguas superficiales y subterráneas. Los resultados obtenidos en el modelo de simulación permitió ensayar toda una serie de planes de desarrollo, lo que se obtuvo combinando diferentes medios de satisfacer las demandas del recurso hídrico en la cuenca del SUSA. El estudio de SUSA es un ejemplo de proyecto de investigación hidrológica aplicable, que tiene su origen en un agudo problema de recursos hídricos; en este caso, los intereses encontrados entre los usos del agua en la corriente y los usos que requieren captaciones de agua (Eggert, H. 1981)

C) "Aplicación de modelos matemáticos de simulación hidrológica e hidráulica para estudios de ordenamiento territorial y uso del suelo", Catamarca Argentina.

El arroyo Fariñango, al igual que sus afluentes La Gruta, Choya y La Florida, atraviesan el área urbana del Departamento Capital (Pcia. de Catamarca, Argentina), ocasionando numerosos inconvenientes durante las esporádicas crecidas producidas por intensas tormentas convectivas en las temporadas estivales y la expansión urbana hacia el norte. Con el objetivo de obtener parámetros de diseño para obras de sistematización de los cauces, también para planificar el uso del suelo, se desarrollo la metodología para los estudios hidrológicos pertinentes que consistieron en la determinación de variables hidrometeorológicas y fisiográficas de las cuencas, las que luego

fueron utilizadas como datos de entrada a los modelos matemáticos de simulación hidrológica. Los caudales así obtenidos, asociados con probabilidad de ocurrencia, fueron datos de entrada al modelo (Maza, J. 1994).

D) Aplicación del Modelo HEC-1

El modelo HEC-1 del Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE.UU. se realizaron corridas correspondientes a los tiempos de retorno y duración de tormenta (Maza, J. 1994). Aprovechando la opción "Semejanza de la Relación Lámina-Area de Precipitación" de este modelo, también se realizaron las corridas bajo esta modalidad. Este procedimiento permite obtener como resultado un hidrograma de crecida generado por la relación lámina precipitada vrs. área de la cuenca, ya que de esa manera se evita buscar el centrado del núcleo de la tormenta de proyecto para generar el hidrograma más desfavorable. Utiliza un procedimiento de interpelación semilogarítmico se puede asumir como un método de "aproximación" (US ARMY CORPS OF ENGINEERING, 1987; SANCHEZ AFOFEITA, A.R.).

E) Aplicación del modelo matemático de simulación hidráulica HEC-2, San Fernando Catamarac.

El modelo HEC-2 desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (H.E.C.) del U.S. Corps of Engineers calcula perfiles de superficie libre en régimen permanente gradualmente variado en cauces naturales o artificiales. Para la aplicación del modelo HEC-2 en la ciudad de se contó con 79 perfiles transversales de los cauces correspondientes a los arroyos que atraviesan el área urbana, como así también con el relevamiento de la geometría de 16 puentes y alcantarillas. Para la determinación de los coeficientes de Manning se compararon fotografías de las secciones transversales además se tuvieron en cuenta otros varios factores. Los resultados de las corridas de HEC-2 han permitido confeccionar mapas de áreas inundables en escala 1:50,000 para el evento de TR = 100 años (Maza, J. 1994).

F) Aplicación del modelo "NETA" para evaluar la recarga de acuíferos implementado un SIG, Guanajuato (México)

Todo plan hidráulico es acorde con programas de manejo de cuencas y uso eficiente del agua, requiere fundamentarse en una caracterización hidrográfica confiable. Cuando se desarrolla algún modelo de evaluación o manejo para una región, que involucra datos espacialmente distribuidos, en la actualidad resulta inmejorable la ayuda de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), organizando y analizando la información espacial, combinando elementos de manejadores de bases de datos, mapeo, procesamiento de imágenes y análisis estadístico. El SIG, por ejemplo, podrá determinar la distribución espacial de la disponibilidad de agua de cierta región geográfica, de acuerdo a sus características y a las condiciones actuales de explotación del recurso. Dada la naturaleza del problema, la investigación comprendió dos aspectos fundamentales: en primer lugar, el planteamiento de la metodología para cuantificar los volúmenes de recarga hacia los acuíferos, así como su implementación al Sistema de Información Geográfica; y en segundo, la definición de criterios para el análisis y adecuación de los datos hidrológicos y fisiográficos regionales, para su manejo más conveniente dentro del SIG. Este último aspecto es ilustrado con claridad a través de la aplicación del modelo de recarga a un caso real de la región centro de México, como parte del estudio integral que realizó la empresa mexicana Eco-Ingeniería, Guanajuato (Kohdr, N.M. 1994).

G) Calibración del modelo EROFGM en la cuenca del río Serchil.

Los parámetros iniciales de modelación utilizados para calibrar fueron los obtenidos en la calibración de la cuenca del Río Chixoy, los parámetros no variaron mucho. El parámetro que fue más sensible al proceso en el modelo fue el coeficiente de caudal en cada subcuenca (PSI), es decir, la fracción de lluvia que contribuye efectivamente al caudal. Un mayor coeficiente, significa que se tienen menos pérdidas por filtración e interflow. El valor final de PSI fue de 0.145, es decir que el 14.5% de la lluvia efectiva contribuye al caudal. Cuando igualaron el pico del hidrograma calculado al del hidrograma observado, se logró casi instantáneamente, con el cambio de PSI aunque con menos influencia que en el volumen de escorrentía) y el estudio de los coeficientes de tiempo. Los resultados que se obtuvieron en la calibración del modelo EROFGM, fueron

satisfactorios a pesar de la mala calidad de información. El modelo utilizado es muy flexible a las condiciones de cuencas tropicales y subtropicales (Lopez Ramos, A.D. 1992).

3.1.10 Cuenca hidrológica

Es la unidad básica del estudio de la hidrológia pudiendo evaluar cuantitativamente con exactitud el recurso hídrico. Una cuenca es un territorio drenada por una corriente o un sistema de corrientes cuyas aguas fluyen a un mismo punto o bien a un río, lago, o mar (Herrera Ibañez, I.R. 1975).

3.1.11 Análisis de información hidrometereológica

La estimación de datos faltantes y verificación de la consistencia de la información generada en el campo, nos sirve para generar parámetros hidrológicos que son necesarios para la planificación del recursos hídrico. Los métodos que se pueden utilizar son los siguientes:

A) Promedio aritmético

Este método estima la precipitación de una estación a través de la estimación del promedio de tres estaciones cercanas con información. Si la precipitación normal anual de las estaciones está dentro del 10% del promedio de la estación que no posee información podemos utilizar promedios (Herrera Ibañez, I.R. 1975).

B) Proporción normal

Cuando la precipitación de las estaciones con registro sobrepasa el 10% del promedio de la estación que no posee información es necesario un análisis de la relación normal a través de la formula siguiente: $P_x = \left\{ \left[\frac{1}{3} * \frac{N_x}{N_A} P_A \right] + \left(\frac{N_x}{N_B} \right) P_B + \left(\frac{N_x}{N_C} \right) P_C \right\}$

P_x = Dato Faltante, N_x = Precipitación normal de la estación en estudio.

$N_A, N_B,$ y N_C = Precipitación Anual de estaciones indices

$P_A, P_B,$ y P_C = Precipitación de estaciones indices durante el mismo tiempo del dato faltante.

C) Correlación lineal

Por medio de este método podemos llevar a cabo el cálculo de datos faltantes relacionando dos estaciones trazando una línea o plano que mejor se ajuste a la información existente para ambas estaciones. Este método se puede llevar a cabo analíticamente por medio de una gráfica (Herrera Ibañez, I.R. 1975).

D) Análisis de doble masa

Los cambios en la localización de un pluviómetro, exposición, instrumentación, o procedimiento observacional, puede conllevar un cambio relativo en la cantidad captada por el pluviómetro. Para poder verificar la consistencia del registro en una estación, comparando la precipitación acumulada bien sea anual o estacional, con valores concurrentes, acumulados, de precipitación media para un grupo de estaciones localizadas en los alrededores. Un cambio debido únicamente a causas meteorológicas, no produciría un cambio de pendiente, puesto que todas las estaciones utilizadas para la comparación serían afectadas similarmente. Es necesario verificar la consistencia del registro para cada una de las estaciones base, y aquellas que muestren registros inconsistentes deben desecharse antes de que las otras estaciones se verifiquen o ajusten. Los puntos en el gráfico del análisis de doble masa se desvían alrededor de la línea media, y los cambios en pendiente deben ser aceptados únicamente cuando son marcados están sostenidos por alguna otra evidencia (Herrera Ibañez, I.R. 1975).

E) Curvas de calibración

Las mediciones periódicas de caudal y las observaciones simultáneas de nivel suministran la información básica para una curva de calibración llamada Curva de Caudal o relación nivel-caudal. Una curva efectiva es aquella que posee un alto grado de dispersión de los puntos de caudal medidos alrededor de la línea media (Linsley, R.K. 1988).

3.1.12 Determinación de Precipitación media

Para el diseño de estructuras de aforo, drenaje y planificación del recurso hídrico en una cuenca especificada es necesario conocer la precipitación media del lugar. A través de los datos

de precipitación podremos determinar el balance hídrico y generar un modelo mediante la calibración de los parámetros de interés. Los métodos para obtener la precipitación media de un área son los siguientes:

A) Promedio aritmético

Método inseguro en relieves inclinados y bueno en relieves planos con pluviómetros bien distribuidos. Es sencillamente un promedio de la lluvia caída en determinados pluviómetros (Herrera Ibañez, I.R. 1975).

B) Polígonos de Thiessen

Método aplicable a relieves escarpados e inclinados y consiste en dibujar triángulos entre estaciones con mediatrices, para sacar polígonos en cada estación, luego se determina el área de influencia de la estación y este se multiplica por la precipitación registrada, así para las demás posteriormente se saca la sumatoria de las estaciones de interés dividido el área total de las estaciones (Herrera I. I.R. 1975).

C) Método de curvas de Isoyetas

Es el método más exacto, constituye en trazar líneas entre estaciones interpolando los datos para dibujar las curvas de precipitación, la precipitación media entre curvas y luego se multiplica por el área entre cada curva, hasta sacar la sumatoria del área de influencia (Herrera Ibañez, I.R. 1975).

D) Método de la red de puntos

Consiste en el cálculo del peso en cada estación, trazando sobre cada punto un eje de coordenadas x, y determinado para cada cuadrante la estación más próxima. Se determina el peso de esa estación para ese punto y se ajusta. Se le da un peso de uno y no se considera otra, esto se repite para cada punto calculando la precipitación media al igual que los polígonos de Thiessen (Herrera Ibañez, I.R. 1975).

3.1.13 Hidrogramas:

Un hidrograma es el gráfico de nivel o caudal contra el tiempo. Se han utilizado diferentes medios para representarlo gráficamente, según el propósito del gráfico; las medias anuales y mensuales o el caudal total se utiliza para mostrar el registro de la escorrentía que pasa por una estación. En el se puede observar la escorrentía superficial, filtraciones de aguas subterráneas, drenaje y precipitación de canal (Savenije, H.H.G. 1975). El hidrograma tiene dos componentes principales, una franja clara cerca del eje del tiempo que representa el flujo base aportado por el agua subterránea, y el área restante arriba del flujo base, la escorrentía superficial, producida por una tormenta.

Al inicio de la lluvia el caudal del río es bajo y pasa un período de tiempo antes de que el río empiece a subir. Durante este período la precipitación es interceptada por la vegetación o absorbido por el suelo para restituir el déficit de humedad del suelo. La duración del retardo antes de que el río crezca depende de la humedad de la cuenca antes de la tormenta y de la intensidad de la lluvia misma. Cuando la precipitación haya restituido los déficit de la cuenca y cuando las superficies y suelos esté saturados, la lluvia empieza a contribuir al flujo de la corriente. La proporción de la precipitación que encuentra su camino hacia el río se conoce como precipitación efectiva, el resto es pérdida por evaporación, detención en la superficie o retención en el suelo. El pico del hidrograma se alcanza después de que la precipitación efectiva haya alcanzado su máximo. La diferencia de tiempo entre la máxima intensidad de precipitación efectiva y la escorrentía máxima se denomina tiempo de retardo. El limite entre la escorrentía superficial y el flujo base es difícil de definir y depende fuertemente de la estructura geológica y composición de la captación. Durante el curso de un evento de precipitación individual, el componente de flujo base continúa bajando aún después que los niveles del río hayan empezado a subir, y solamente cuando a precipitación haya tenido tiempo para percolarse hacia la napa freática el flujo base empieza a incrementarse. El componente de flujo base usualmente termina en un nivel mayor al final de la tormenta en el ascenso del hidrograma, y de esta manera el escurrimiento del río debido a filtraciones de agua subterránea. El agua subterránea provee el flujo total de la curva de recesión hasta el próximo período de precipitación (Savenije, H.G. 1975).

- Factores que afectan la forma del hidrograma:

La forma de distribución de tiempo del escurrimiento es influenciado por factores climáticos, topográficos y geológicos. Los topográficos y climáticos afectan principalmente el limbo de ascenso mientras que los geológicos determinan el limbo de recesión (Savenije, H.H.G. 1975).

A) Factores climáticos

- Intensidad de la precipitación

Para una duración de precipitación, un incremento en intensidad aumentará el caudal pico y el volumen de escorrentía, con la condición de que la tasa de infiltración del suelo sea excedida.

- Duración de la precipitación

Para una lluvia de intensidad dada, la duración de la precipitación determina, en parte, el flujo pico. Si una tormenta dura lo suficiente, eventualmente casi toda la precipitación viene a ser escorrentía, el flujo pico se aproximará a una tasa igual al producto $i \cdot A$, donde i es la intensidad de la precipitación y A el área.

- Distribución de la precipitación en la cuenca

Si un área de alta precipitación esta cerca de la salida de la cuenca, un ascenso rápido, pico agudo y recesión rápida del hidrograma usualmente se manifiesta. Pero si la mayor cantidad de precipitación ocurre en los tramos superiores de una cuenca, el hidrograma exhibe un pico más bajo y más ancho.

- dirección del movimiento de la tormenta

La dirección del movimiento de la tormenta con respecto a la orientación de la cuenca afecta a ambos la magnitud del flujo pico y duración de la escorrentía superficial. La dirección de la tormenta tienen un mayor efecto en cuencas alargadas, las tormentas se mueven aguas arriba tienden a producir picos más bajos de una duración mayor que tormentas que se mueven aguas abajo.

- tipo de tormenta : La tormenta con tempestad produce flujos pico en pequeñas cuencas, mientras que grandes tormentas ciclónicas o tipo frontal son generalmente determinantes en cuencas grandes (Savenije, H.H.G. 1975).

B) Factores topográficos y geológicos

Los factores topográficos y geológicos que afectan a la escorrentía representan las características físicas de la cuenca (Savenije, H.H.G. 1975). Los factores dominantes son:

- Tamaño de la captación

Entre mayor área en una cuenca el tiempo base del hidrograma es alargado. El tiempo requerido para que el área de captación total contribuya a la escorrentía pico es mayor.

- Forma de la captación

Si tenemos la misma área de captación pero con forma distinta podemos observar que la cuenca alargada necesita mayor tiempo para alcanzar el pico que una cuenca en forma de medio círculo u ovalada.

- Distribución de los cursos de agua

El patrón y arreglo de los cursos de corrientes naturales determinan la eficiencia del sistema de drenaje. Para otros factores constantes, el tiempo requerido por el agua para fluir una distancia dada es directamente proporcional a la longitud.

- Pendiente de la captación.

Mientras mayor sea la pendiente de la captación viajará más rápidamente la escorrentía superficial. El tiempo al pico será más corto. La capacidad de infiltración en pendientes altas es muy baja.

- Almacenamiento de la captación

Ya que el almacenamiento debe llenarse primero antes de vaciarse, éste tiene un efecto retardatorio y modificador en la forma del hidrograma.

- Geología de la captación

La pedología y geología de la cuenca influyen primordialmente al componente de agua subterránea y las pérdidas. Altas tasas de infiltración reducen la escorrentía superficial. El tipo de corriente predominante en una cuenca puede tener impacto substancial en la forma del hidrograma.

- Uso de la tierra

El uso de la tierra puede influenciar fuertemente el coeficiente de escorrentía. Áreas urbanizadas pueden tener un coeficiente del 100%, la vegetación natural puede tener baja

escorrentía. Laboreo, drenaje, intensidad de cultivos, plantación de bosques, etc. también tienen un efecto considerable en la escorrentía (Savenije, H.H.G. 1975).

3.1.14 Relaciones entre precipitación y escorrentía

El flujo en un río está controlado primordialmente por variaciones en la precipitación y escorrentía y los métodos para distribuir la escorrentía a través del tiempo, son la base para un predicción eficaz de la operación de proyectos hidráulicos, para la extensión de registros de caudal en ríos con estaciones limnimétricas y para la estimación de caudales en ríos sin estaciones de medida. Se hace una distinción entre las relaciones precipitación-escorrentía de corta y larga duración. Las relaciones precipitación-escorrentía de corta duración describen el proceso de como la precipitación extrema se convierte en escorrentía directa. Esta produce flujos pico e hidrogramas que pueden usarse para el diseño de estructuras. La relación de larga duración pretende el establecimiento del rendimiento de la captación con propósitos de evaluación de recursos hídricos (Linsley, R.K. 1988).

A) Escorrentía pico de corta duración:

Para determinación de la escorrentía directa de tormenta se puede usar el modelo de la captación simplificada de Doodege: La precipitación neta escurre sobre el suelo (precipitación efectiva) y el resto se filtra. La escorrentía superficial, también llamada escorrentía directa, contribuye al caudal total del río, el agua se infiltrada restaura el déficit de humedad del suelo o, si no hay déficit, recarga el sistema de agua subterránea. La humedad del suelo afecta la infiltración, de tal forma que hay una retroalimentación de la situación de la humedad del suelo en la división de la precipitación efectiva e infiltración. La humedad del suelo puede evapotranspirarse o fluir hacia el sistema de agua subterránea. El flujo desde el acuífero hacia el río se llama flujo base. Para determinar la escorrentía directa, se requiere de la precipitación efectiva como dato de entrada. Toda esta descripción se puede representar: $\text{Precipitación efectiva} = \text{Precipitación} - \text{Filtración}$

Existen varios métodos empíricos para determinar el coeficiente de escorrentía o las pérdidas como El Análisis de Correlación Coaxial, el método de la Curva Número. Los mejores resultados,

sin embargo, se obtienen por la simulación de procesos relevantes (evapotranspiración, interceptación, flujo no saturado, etc.). Si no existen registros disponibles para evaluar la relación entre precipitación y caudal pico, existen varios métodos para llegar a la escurrentía pico y la forma del hidrograma (Linsley, R.K. 1988).

B) Rendimiento de cuenca de larga duración

Los ingenieros de recursos hídricos se preocupan principalmente con los rendimientos de la cuenca y usualmente estudian los registros hidrométricos mensuales. Se debe comparar la precipitación y la escurrentía. Para ese propósito, los caudales mensuales se convierten primero a volúmenes y luego a profundidad equivalente R sobre el área de captación. Estando la precipitación P y escurrentía R en las mismas unidades pueden entonces compararse (Linsley, R.K. 1988). Se puede escribir así:

$$R = P - \text{Pérdidas} - S(\text{mm})$$

3.1.15 Morfometría de una cuenca

Los aspectos morfométricos como; densidad de drenaje, longitud de drenaje, tipo de suelo, cobertura vegetal y área de captación en la cuenca influyen en el comportamiento hidrológico de la misma a la vez el sistema hídrico de la cuenca determina las características de una cuenca.

Lo anterior nos dice que los aspectos físicos de la cuenca nos podrían dar información sobre la respuesta hídrica de una cuenca pero según Linsley hasta el momento los resultados son cualitativos y no cuantitativos (UNEPAR, 1981).

3.1.16 Ciclo Hidrológico

El ciclo hidrológico inicia con la evaporación del agua en los océanos transportándose hacia los continentes a través de masas móviles de aire que bajo condiciones adecuadas se condensan y forman nubes o también puede transformarse en precipitación. La precipitación se dispersa parte es retenida por el suelo regresando a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas. Otra porción viaja por la superficie en forma de escurrentía y una pequeña parte llega a los acuíferos en forma de agua subterránea. Por gravedad tanto el agua superficial como la subterránea

llega en algún momento a ser parte de los océanos aunque hay pérdidas por evaporación en el trayecto. En el ciclo hidrológico destacan cuatro fases: Precipitación, evaporación, transpiración, escorrentía superficial y subterránea (UNEPAR, 1981).

3.1.17 Evaporación

El fenómeno físico de la evaporación no es más que el paso del agua al estado de vapor a la temperatura ambiente y constituye un proceso de suma importancia porque contribuye como un factor dinámico en el ciclo hidrológico del agua. Según Costumer dice que la evaporación depende de la energía calorífica recibida por el sol, de la temperatura, de la humedad del ambiente, de la velocidad del viento y dirección, de la constitución química del agua, de la presión barométrica del agua (Basso, E. 1967). El efecto del viento es el de remover las masas de aire húmedo en contacto con la superficie evaporante, facilitando la llegada de aire más seco. Es por ello que existe un incremento de la evaporación a medida que los valores de temperatura y viento son mayores. La humedad relativa influye en una forma inversamente proporcional en la evaporación, ya que la tensión del vapor que se manifiesta cuando la atmósfera se satura de humedad actúa frenando la tasa de evaporación o sea que a una mayor humedad relativa del ambiente el proceso evaporativo se dificulta. En general, la reducción de la presión atmosférica aumenta la evaporación, este factor no es muy importante. Otro factor que tiene influencia lo constituye el tamaño de la superficie evaporante. La unidad de medida de la evaporación es en mm. evaporado se emplea para medir la precipitación pluvial interpretándose que cada milímetro evaporado o bien registrado como lluvia es equivalente a un litro por metro cuadrado (Basso, E. 1967).

3.1.18 Evapotranspiración potencial

El término de evapotranspiración potencial se define como la cantidad de agua que se evapora de las superficies de agua y del suelo húmedo más aquella transpiración de las plantas y la usada para su crecimiento, constituyendo la pérdida de humedad que ocurriría al no existir deficiencias de agua, algunos autores afirman que la misma equivale a la evaporación de superficies libres. Para que se manifieste la evapotranspiración de una superficie de terreno cubierta con vegetación, se necesita de disponibilidad de agua en el suelo, de energía para cambiar el estado

físico del agua de líquido a vapor y un mecanismo de transporte desde el suelo a la atmósfera. La radiación solar provee la fuente de energía, la precipitación o el riego artificial, la periódica reposición del agua en diferentes partes del sistema suelo-planta y el mecanismo de transmisión es posible a través del suelo por el movimiento de la circulación del agua hacia la superficie evaporante (Perez Espinoza, M. 1967).

La evaporación potencial definida como la máxima evaporación posible en las condiciones existentes puede medirse con un buen grado de precisión por una diversidad de métodos como: métodos directos e indirectos.

Entre los métodos directos están Lisimétrico, método de integración, método gravimétrico en parcelas experimentales, método de entradas y consumo de agua, métodos micrometeorológicos, método aerodinámico, método de balance de energía y métodos combinados.

Entre los métodos indirectos están: Método de Penman, método de Thornthwaite, método de Blaney-Marin, método de Blaney-Cridle, método de Turc, método de Hargreaves, método de Jensen y Haise, método de Bouchet y por medio de modelos hidrológicos los métodos indirectos requieren de datos climáticos históricos se debe de contar con series estadísticas meteorológicas (Perez Espinoza, M. 1967).

3.1.19 Balance Hídrico

Constituye un aspecto necesario para la determinar la cantidad necesaria a suplementar en áreas irrigadas así mismo, proporciona información sobre los procesos de agotamiento de la humedad del suelo, almacenamiento del agua precipitada, variación de precipitación y la evapotranspiración. Esencialmente el balance hídrico trata de determinar en función de la precipitación, evapotranspiración y tipo de terreno en qué lapso de la precipitación supera a la evaporación o viceversa (Perez Espinoza, M. 1967).

3.2 Marco referencial

3.2.1 Ubicación

La microcuenca del Río Itzapa está localizada en la cabecera noroeste de la cuenca del Río Achiguate, la cual se localiza en el municipio de San Andrés Itzapa en el departamento de Chimaltenango, ver figura 11. Colindando con la cabecera departamental de Chimaltenango al norte, con el municipio de Parramos al este, con el cerro de las Minas, la Montaña el Soco y con el municipio de Zaragoza al Oeste, y al Sur con el cerro El Chino, finca Santa Rosa y el caserío El Ciprés. Sus coordenadas geográficas son $90^{\circ} 49' 21''$ a $90^{\circ} 54' 07''$ de longitud oeste y $14^{\circ} 34' 37''$ a $14^{\circ} 38' 56''$ de latitud norte y una altura media de 2,099 msnm (Herrera Ibañez, I.R. 1975). Esta microcuenca también forma parte de la región fisiográfica de las tierras altas volcánicas del país (Informe final, FAUSAC. 1995)

3.2.2 Superficie

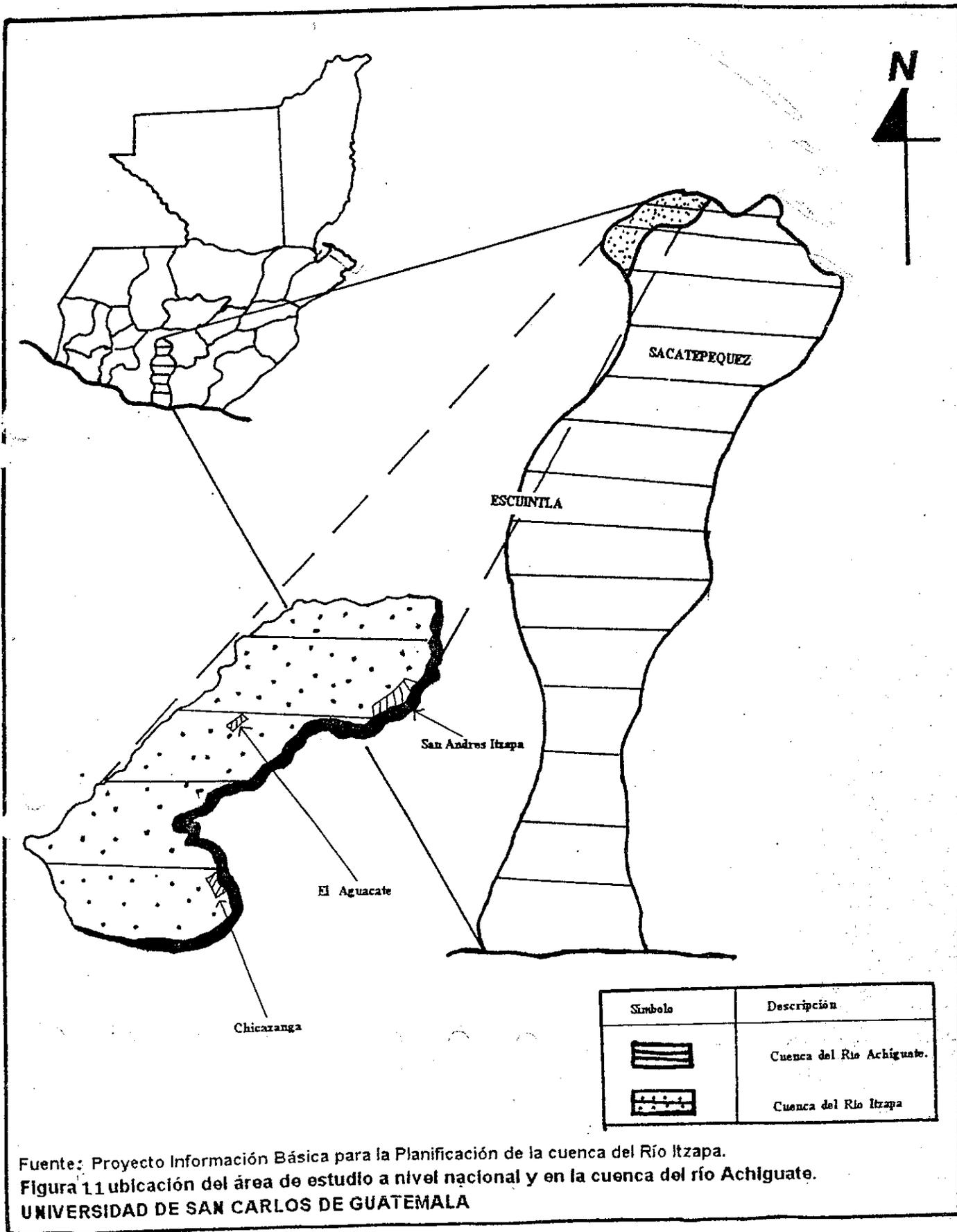
La cuenca tiene un área aproximada de 26.71 km² que corresponde a 2,671 hectáreas, constituyendo el 1.8% de la extensión total de la Cuenca del Río Achiguate (Informe final, FAUSAC. 1995)

3.2.3 Relieve

La altura máxima de la cuenca es 2,668 msnm. montaña "El Soco" con relieves escarpados hasta accidentados y la parte baja posee una altura mínima de 1,740 msnm. con relieves planos (Informe final, FAUSAC. 1995)

3.2.4 Hidrología

La cuenca del río Itzapa drena sus aguas al río La Virgen, nombre que toma el cauce principal al pasar por la población de San Andrés Itzapa, parte baja de la cuenca, está a su vez drena las aguas hacia el Río Achiguate y Guacalate que desemboca en la vertiente del Pacífico. El origen del Río Itzapa se encuentra en la montaña "El Soco" parte alta, se encuentra a una elevación de 2,663 msnm. La subcuenca del río Itzapa es de orden cuatro dentro de la macrocuenca del río Achiguate, ver figura 24A (Informe final, FAUSAC. 1995)



Fuente: Proyecto Información Básica para la Planificación de la Cuenca del Río Itzapa.
 Figura 11 ubicación del área de estudio a nivel nacional y en la cuenca del río Achiguate.
 UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

3.2.5 Información Hidrometeorológica

Entre la red de información hidrometeorológica de la cuenca del río de Itzapa se encuentran las siguientes estaciones:

A) Estaciones de la Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía, Instituto de Investigaciones Agronómicas (FAUSAC-IIA)

En la parte alta de la cuenca está la estación meteorológica "Chicazanga", ubicada a $14^{\circ} 35' 30''$ latitud norte y $90^{\circ} 52' 30''$ longitud oeste a una altura de 2,320 msnm. (figura 24A). Entre los aparatos que posee están un pluviómetro, pluviógrafo, tanque evaporímetro, psicrómetro, veleta y termómetro. Los datos que reporta son: Datos de precipitación, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, intensidad de lluvias y temperatura desde septiembre de 1,993 hasta 1,995.

En la parte media de la cuenca esta la estación meteorológica "Xipacaya" ubicada a $14^{\circ} 37' 24''$ latitud norte y $90^{\circ} 51' 00''$ longitud oeste a una altura de 1,880 msnm (figura 24A). Los aparatos son: Un pluviógrafo, pluviómetro, termómetro de máxima y de mínima y tanque de evaporación. Entre los datos que reporta están: Datos de precipitación, temperatura, intensidad de lluvia y evaporación; esta estación empezó a funcionar en mayo de 1995.

En la parte media de la cuenca se posee una estación limnimétrica "Xipacay" ubicada a $14^{\circ} 42' 26.11''$ latitud norte y $90^{\circ} 48' 8.55''$ longitud oeste a una altura de 1,840 msnm. (figura 24A). Posee un limnómetro que registra datos de caudales medios diarios, esta fue construida y comenzó a funcionar desde julio de 1996 (Informe final, FAUSAC. 1995)

B) Estaciones del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrometeorología (INSIVUMEH)

En la parte alta de la cuenca esta la estación pluviométrica "El Recuerdo" ubicada en latitud $14^{\circ} 37' 00''$ y longitud $90^{\circ} 54' 53''$ a una altura de 2,240 msnm. (figura 24A). Los aparatos que posee son un pluviómetro y termómetro. Entre los datos que reporta están: Datos de precipitación y temperatura desde septiembre de 1,968 hasta 1,995.

En la parte baja de la cuenca esta la estación metereológica "La Alameda" tipo "a" ubicada en la latitud 14 38' 02" y longitud 90 48' 12" a una altura de 1,766 msnm. (figura 24A). Los aparatos que posee son los siguientes: Un pluviógrafo, pluviómetro, heliógrafo, lisímetro, limnógrafo, hidrotérmetro, termómetro de máxima y de mínima tanque de evaporación y evaporímetro de balanza a la sombra. Los datos generados son de precipitación, temperatura, evaporación y humedad desde enero de 1,970 hasta 1,996 (Informe final, FAUSAC. 1995)

C) Estación limnimétrica de la Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía, Instituto de Investigaciones Agronómicas e Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrometeorología

En la parte baja de la cuenca se encuentra la estación limnimétrica "El Puente" ubicada a 14° 38' 31" latitud norte y 90° 49' 17" longitud oeste a una altura de 1,740 msnm. (figura 24A). Posee un limnómetro tipo venturí y un limnógrafo. Entre los datos que reporta están: Datos de caudal medio diario y caudales mínimos y máximos (Informe final, FAUSAC. 1995)

3.2.6 Clima

Según la clasificación de Thornwaite el clima de la cuenca es B2'B'Bi, o sea: templado según las jerarquías de la temperatura (B2') y con invierno benigno en cuanto a la variación de la temperatura (b'). Según las jerarquías de humedad es húmedo (B) y el tipo de distribución de la lluvia es con invierno seco (i) (Mapa climatológico, 1975).

De acuerdo con el sistema de clasificación de zonas de vida de Holdrige, en la cuenca se encuentran las zonas de vida denominadas: Bosque Húmedo Montano Bajo Subtropical (bh-Mb) que abarca principalmente las partes media y baja de la cuenca y alta de la misma. Las especies indicadoras que se pueden encontrar en la cuenca son; *Pinus Montezumae* y *Quercus sp.*. El Bosque muy Húmedo Montano Bajo Subtropical cubre la parte alta de la cuenca, posee las siguientes especies indicadoras; *Alnus arguta*, *Chiranthodendron pentadactylon*, *Urtica sp.* y *Oreopanax xalapensis*. ver figura 26A (Mapa de zonas de vida, 1983).

La precipitación media anual en la cuenca es de 1,202.85 mm, los cuales se distribuyen durante los meses de mayo a octubre. La temperatura media anual es de 23° C; la humedad relativa es de 70% a 75%, la velocidad media del viento es de 3 Km/hr. con dirección oeste.

3.2.7 Geología

Los suelos de la microcuenca del Río Itzapa se caracterizan por materiales geológicos constituidos principalmente por rocas volcánicas sin dividir, predominante del Mio-Pioceno. Incluye tobas, coladas de lava, material lahárico y sedimentos volcánicos del período terciario y material ígneo y metamórfico del período cuaternario. En la parte baja de la cuenca se observan en las terrazas del río aluviones representados por "Qal". Desde la parte media de la cuenca a la parte baja posee Thepra sobre yacimiento de rocas volcánicas no divididas, avalanchas de lodo y cenizas con pómez transportadas por aire representada por "Qtd". En la parte alta posee Thepra, pómez gris a blanco y ceniza gris a negra interstratificada con paleosols representado por "Qt", Ver figura 27A (Mapa geológico, 1975).

3.2.8 Suelos

Según Simmos, Tarano y Pinto, los suelos dentro de la microcuenca abarcan las siguientes series (figura 28A):

A) Suelos Tecpán

Los cuales se caracterizan por ceniza volcánica de color claro como material madre, con un relieve casi plano a ondulado, poseen un buen drenaje interno. El suelo superficial es de color café oscuro con una textura y consistencia franco arcillosa friable y un espesor aproximado de 30 a 50 cm. El subsuelo es café amarillento, de consistencia friable y textura franco arcillosa, con un espesor aproximado de 50 a 100 cm (Simmons C.H. 1959).

B) Suelos Patzicía

Caracterizados por ceniza volcánica pomácea de color claro como material madre con relieve inclinado y drenaje interno bueno. Suelo superficial café oscuro de textura y consistencia franco

arcillosa suelta y de 25 a 160 cm. de espesor. El subsuelo se caracteriza por ser de color café, de consistencia suelta a friable y de textura franco arenosa, con un espesor aproximadamente de 160 a 60 cm (Simmons C.H. 1959).

C) Suelos Alotenango

Los cuales se caracterizan por tener un material madre constituido por ceniza volcánica máfica de color oscuro. Son de relieve inclinado a muy inclinado con un drenaje interno excesivo. El suelo superficial es de color café oscuro a café muy oscuro, de textura y consistencia franca suelta y de un espesor aproximado de 25 a 160 cm. El subsuelo es de color café grisáceo oscuro y la consistencia es suelta, su textura es franco arenosa y presenta un espesor aproximado de 160 a 50 cm (Simmons C.H. 1959).

D) Capacidad de Uso de la Tierra

La capacidad de uso de la tierra dentro de la subcuenca, predomina en su mayor parte la clase VIII que se refieren a tierras no aptas para cultivos, únicamente para bosques nacionales, recreación y vida silvestre y para protección de cuencas de hidrográficas. Sin embargo, en cuanto a su uso actual, presentan una cobertura caracterizada por cultivos de maíz, frijol en menor escala y bosque denso (Mapa de capacidad de uso, 1980).

E) Uso de la Tierra

Según los datos de 1,994 el uso de la tierra en la cuenca de río Itzapa es el siguiente: 17.93% (4.7 km²) bosque de coníferas abierto; 22.9% (6.01 km²) horticultura, cultivos anuales y praderas; 2.4% (0.63 km²) bosque de coníferas denso y 0.93% (0.25 km²) bosque latifoliar abierto; 2.32% (0.61 km²) cultivo permanente de café; 0.57% (0.15 km²) horticultura, cultivos anuales y centros urbanos; 4.31 % (1.13 km²) centro poblado urbano; 0.27 % (0.07 km²) bosque abierto de coníferas y café; 3.39% (0.89 km²) cultivos anuales y horticultura; 0.19% (0.05 km²) bosque latifoliar bajo; 15.77% (4.14 km²) bosque latifoliar denso; 0.80% (0.21 km²) cultivos anuales y permanentes; 11.58% (3.04 km²) bosque mixto bajo; 0.8101% (0.21 km²) cultivos anuales; 1.90% (0.50 km²) cultivos anuales y bosques de coníferas; 1.48% (0.39 km²) bosque mixto abierto; 3.92%

(1.03 km²) bosque latifoliar disperso; 3.90% (0.89 km²) horticultura, cultivos anuales y centro poblado rural; 2.63% (0.69 km²) praderas no mejoradas y cultivos anuales y 2.51% (0.66 km²) bosque latifoliar disperso, horticultura y cultivos anuales. Ver figura 29A.

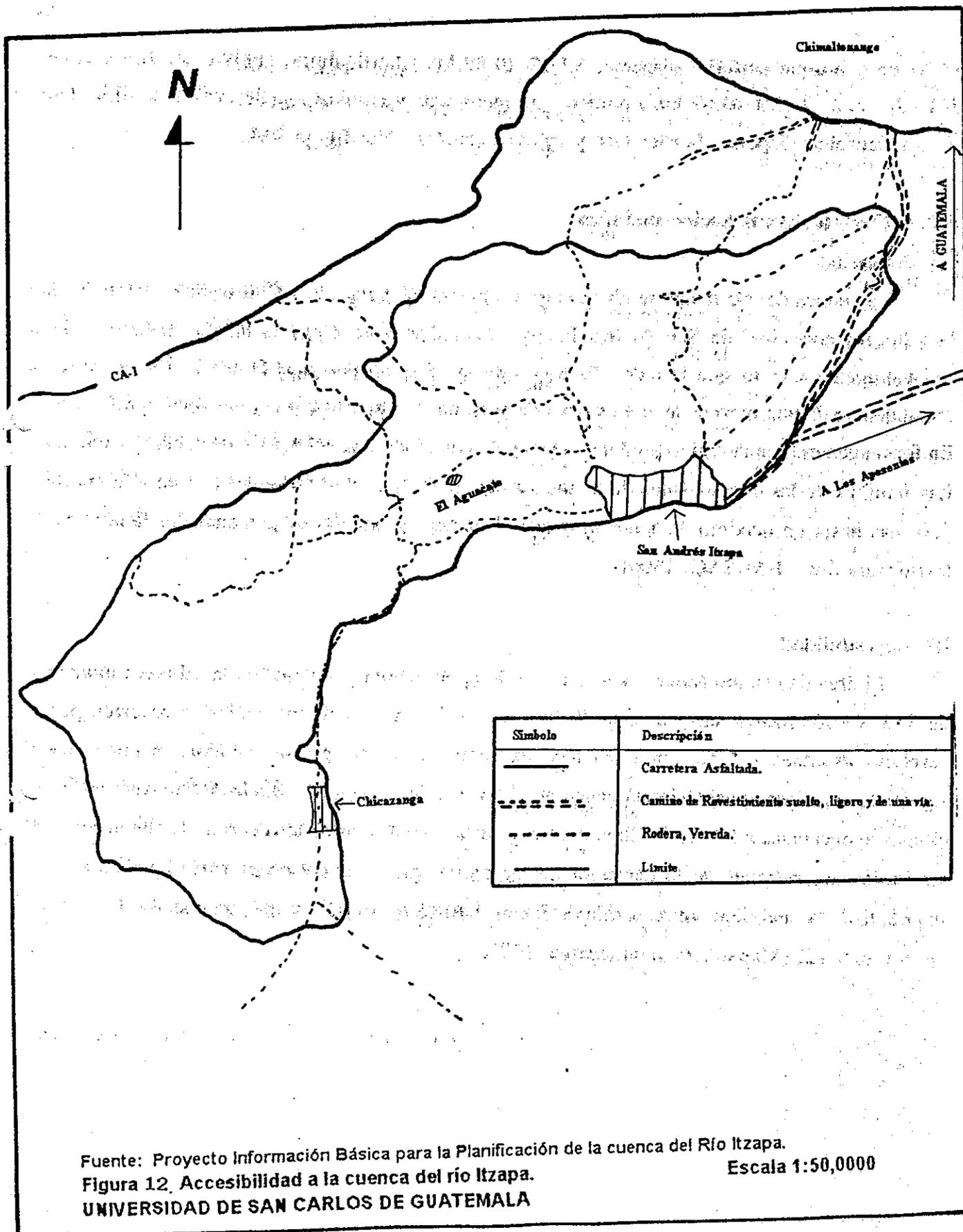
3.2.9 Características Socioeconómicas

A) Población

La cuenca del río Itzapa se ubica entre las aldeas El Aguacate y Chicazanga y parcialmente la cabecera municipal de San Andrés Itzapa. La aldea Chicazanga la habitan personas Maya Cackchiquel, en tanto que la aldea El Aguacate la forman personas ladinas. En la cabecera municipal se da una mezcla de ambos tipos de personas predominando los indígenas Cackchiquel. En forma general, en la región predomina una población indígena del 6.73% de habla Cackchiquel. Las familias de las comunidades de la cuenca del río Itzapa están formadas por un mínimo de 3 personas hasta un máximo de 5 mientras que el número promedio de personas por familia es de 6 (Informe final, FAUSAC. 1995)

B) Accesibilidad

El área de estudio (microcuenca del río Itzapa), abarca parcialmente la cabecera municipal de San Andrés Itzapa, la cual dista 60 km. de la ciudad capital, los cuales se recorren por la carretera asfaltada CA-1. Para ubicarse exactamente en el área de estudio, se puede hacer siguiendo la ruta nacional Chimaltenango no. 7 que conduce hasta el poblado de San Andrés Itzapa, el cual se encuentra a 5 km. de Chimaltenango; esta carretera es de terracería. También se puede seguir la ruta a través de la carretera de terracería que se inicia en el parque nacional "Los Aposentos", la cual tiene un recorrido de 3 km. hasta San Andrés Itzapa como se puede observar en la figura 12. (Mapa de Chimaltenango, 1977.)



Fuente: Proyecto Información Básica para la Planificación de la cuenca del Río Itzapa.

Figura 12. Accesibilidad a la cuenca del río Itzapa.
 UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Escala 1:50,000

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo General

Simular el comportamiento hidrológico de la cuenca del río la Virgen, Itzapa, para la obtención y calibración de los parámetros de precipitación-escorrentía, a través de la relación del hidrograma calculado y el observado.

4.2 Objetivos Específicos

- Determinar la consistencia de información de los datos de precipitación a través del análisis de doble masa entre las estaciones.
- Conocer el comportamiento de la cuenca por medio de la curva de duración y el hidrograma observado.
- Simulación mediante la relación precipitación-escorrentía.
- Generar índices para obtener los parámetros que afectan el volumen de escorrentía; F_c (Máxima humedad que el suelo almacena en la cuenca), S_{sm} (Contenido inicial del suelo), S_{uz} (Almacenamiento en la zona superior), S_{lz} (Almacenamiento en la zona inferior), L_p (Límite de evapotranspiración potencial) y " β " (Coeficiente empírico).
- Generar los parámetros que afectan la forma del hidrograma K_0 (coeficiente empírico) junto con U_{zl0} (límite inferior del reservorio) determinan la magnitud y recesión del flujo pico, K_1 , K_2 , y K_3 (coeficientes empíricos), junto con U_{zl1} , U_{zl2} y U_{zl3} (límites superior del reservorio) determinan el flujo medio entre el flujo base y pico, finalmente el K_4 (coeficiente empírico) determina el flujo base.
- Determinar el balance hídrico en la cuenca dado por $P - E_{act} - Q_{gen} = d(S_{sm} + S_{uz} + S_{lz})$ -----> ecuación 27.

5. METODOLOGIA

5.1 Recopilación y generación de Información de las estaciones meteorológicas

La recopilación y generación de información se llevó a cabo en las estaciones más cercanas y dentro de la cuenca siendo las siguientes:

5.1.1 Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrometeorología (INSIVUMEH)

A) Estación "Alameda"

La estación Alameda es tipo "A", inició en el año de 1,970 hasta la fecha, la información meteorológica que se recopiló útil para el modelo fue:

- * Precipitación diaria en milímetros, desde el año de 1,970 hasta 1,995.
- * Evaporación mensual en milímetros, desde el año de 1,970 hasta 1,995.

B) Estación "El Recuerdo"

Es una estación tipo "B", comenzó a generar información en el año de 1,968 hasta la fecha, los datos meteorológicos útiles para el modelo son:

- * Precipitación diaria en milímetros desde el año de 1,968 hasta 1,995.

5.1.2 Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía, Instituto de Investigaciones Agronómicas (FAUSAC-IIA)

A. Estación "Chicazanga"

La estación es de tipo "A", se instaló en el año de 1,993 hasta la fecha, la información meteorológica que se generó para el modelo es la siguiente:

Precipitación diaria y evaporación mensual, desde 1993 (sep.) a 1,995.

5.1.3 Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía, Instituto de Investigaciones Agronómicas (FAUSAC-IIA) e Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrometeorología (INSIVUMEH)

A) Estación Limnimétrica "El Puente"

Comenzó a generar información limnimétrica en el año de 1,982 hasta la fecha, la información que se generó y se ingresó al modelo fueron los caudales medios diarios del río Itzapa.

5.2 Arreglo de la Información.

Los datos se ingresaron de la siguiente forma: primero los de precipitación diaria, posteriormente los de evaporación mensual y por último los caudales medios diarios observados en la estación limnimétrica "El Puente".

5.2.1 Datos de precipitación diaria en (mm.)

Los datos ingresados pertenecen a los de precipitación diaria en todas las estaciones para obtener una mayor confiabilidad y exactitud en la información.

- Estación el Recuerdo (INSIVUMEH) se ingresó datos de precipitación desde el año de 1,968 hasta 1,995.
- Estación La Alameda (INSIVUMEH) se ingresó datos de precipitación desde el año de 1,970 hasta 1,995.
- Estación Chicazanga (FAUSAC) se ingresó datos de precipitación desde el año de 1,993 (sep) hasta 1,995.

Nota: Para correr el modulo "HBV" se eligió cinco años de registro consecutivos y de los más recientes siendo desde 1991 a 1995. Se ingresó los datos en una hoja electrónica y se grabó en un archivo con extensión .PRN, posteriormente se les cambio la extensión a .TXT como archivos editores y se corrieron en el modelo. Después de correr los datos en el modelo se observó los resultados en un graficador.

5.2.2 Datos de Evaporación (mm.)

Los datos recopilados y generados son los de Evaporación total mensual y fueron los siguientes:

- Estación La Alameda (INSIVUMEH) se obtuvo datos de Evaporación desde el año de 1,970 hasta 1,995.
- Estación Chicazanga (FAUSAC) se generó datos de Evaporación desde el año de 1,993 hasta 1,995.

Nota: Se ingresó los datos en una hoja electrónica y se grabó en un archivo con extensión .PRN, posteriormente se les cambio la extensión a .TXT como archivos editores y se corrió en el modelo.

5.2.3 Datos de caudales medios diarios en (lts/seg)

Los datos recopilados y generados fueron los caudales medios diarios. Se elaboró el hidrograma observado y curva de duración de caudales, el hidrograma observado sirvió para comparar y calibrar los datos de caudales calculados provenientes de la relación precipitación y escorrentía.

Para la estación limnimétrica "El Puente" (FAUSAC-INSIVUMEH) se ingresó datos de caudales desde el año de 1982 hasta 1995 en un archivo. Se ingresó al modelo a través de un archivo editor con extensión .TXT. Después de correr los datos en el modelo se observan en un graficador.

5.3 Análisis de doble masa

Mediante el modulo "HIS" se llevó acabo el análisis de la calidad de información generada para las estaciones. Por el método de doble masa acumulado, se reviso la consistencia de la información de precipitación. Los datos de precipitación de una estación se comparó con los datos generados de otra estación patrón, representándolas con un gráfico cartesiano, colocando en los ejes los valores acumulados de las estaciones en estudio, los cambios en las pendientes demuestran la consistencia de los datos. Para el modelo el factor de corrección de precipitación = $Tan\beta/Ttan\alpha$ este factor tiene que estar entre (0.5-1.5). Los análisis de doble masa se llevaron acabo para los períodos de 1,991 a 1,995 entre las siguientes estaciones:

- Estación de Chicazanga y Alameda,
- Estación de Alameda y Recuerdo,
- Estación de Chicazanga y Recuerdo.

5.4 Trazo y utilidad de polígonos de Thiessen entre estaciones

A. Para obtener la precipitación media de la cuenca y observar el peso en porcentaje de área que cada estación posee dentro de la misma, fue necesario el trazo de polígonos de Thiessen entre estaciones meteorológicas. El trazo de los polígonos se llevó a cabo mediante la unión de las estaciones Alameda, Chicazanga y Recuerdo, con trazos rectos, formando triángulos, luego se trazó mediatrices de todos los lados, formando un polígono alrededor de cada estación. Posteriormente se le determinó el área de ponderación para cada estación expresada en porcentaje. Por último se ingreso al modulo "HBV" los pesos en porcentaje de cada estación y el modelo multiplico el peso de cada estación por cada dato de precipitación diario, sacando el total anual y posteriormente calculo el promedio entre los años de cada estación, sumando las tres estaciones y determinando la precipitación media.

5.5 Curva de duración de caudales característicos

Para los caudales de la estación limnimétrica "El Puente", se construyó una curva de duración de caudales característicos para el período comprendido de 1,991 a 1,995 y para el período de 1,983 a 1,995. Estas curvas representaron el comportamiento y disponibilidad de agua en la cuenca. El modelo ordenó los datos de los caudales medios diarios en forma descendente por año completo, luego determinó el número de clases con $N = 1 + 3.3 * \log N$. También calculo el rango con el dato mayor menos el dato menor, esto le sirvió al modelo para sacar el intervalo de clase que es igual al rango dividido en número de clases. Fija un limite menor y uno mayor para cada intervalo y determina la frecuencia para cada clase. Luego gráfica en papel aritmético con el propósito de tener idea de la pendiente general de la curva, se coloca a los caudales en el eje de las ordenadas y el tiempo en el eje de las abscisas. Por último se obtuvo la información de los caudales característicos máximos, medios y de estiaje. El graficador del modelo genero las curvas de duración de caudales.

5.6 El calculo de la rutina del suelo húmedo en el modelo fue de la siguiente forma

A. Se determinó la contribución de la precipitación a la escorrentía

Se inicia el calculo asumiendo valores de S_{sm} , S_{uz} , S_{iz} , U_{z10} , β , Perc., Fc, Lp, K_0 , K_1 , y K_4 .

a) Se calculó la contribución (dQ) a la escorrentía desde la precipitación (dP)

$$Q = (S_{sm}/FC)^{\beta} * P \quad \text{cuando } dP > 0 \quad \text{-----} > \text{ecuación 9}$$

Nota: El modelo "HBV" agregó la precipitación en mm. por mm. (dP es 1 mm).

b) El modelo sumó la contribución de dQ

$$dS_{uz} = dS_{uz\text{inicial}} + dQ \quad \text{-----} > \text{ecuación 10}$$

c) El modelo modificó el estado del suelo húmedo (S_{sm})

$$S_{sm} = S_{sm\text{inicial}} + (dP - dQ) \quad \text{-----} > \text{ecuación 11}$$

Nota: Se utilizó los valores de S_{sm} en el inciso "a" para agregar la precipitación en mm. y calcular.

B. Se calculó la evapotranspiración actual en relación a la evapotranspiración potencial

a) Se calculo la evapotranspiración actual mediante la siguiente relación

$$E_{act} = E_{pot} \quad \text{Cuando } S_{sm} > LP * FC \quad \text{-----} > \text{ecuación 12}$$

$$E_{act} = S_{sm}/(LP*FC) * E_{pot} \quad \text{Cuando } S_{sm} < LP * FC \quad \text{-----} > \text{ecuación 13}$$

b) La corrección del suelo húmedo se computó de la siguiente forma

$$S_{sm}^* = S_{sm} - E_{act} \quad \text{-----} > \text{ecuación 14}$$

5.7 Procedimiento del modulo "HBV" para la transformación de caudales y balance hídrico

Para agregar la contribución de la escorrentía desde la rutina del suelo húmedo en la zona superior (S_{uz}), se utilizó la siguiente formula:

$$S_{uz} = S_{uz\text{inicial}} + dS_{uz} \text{ ecuación } 15$$

Nota: El S_{uz} que se utilizó fue el asumido inicialmente.

A. La percolación en el suelo

a) La percolación desde la zona inferior a la zona superior

$$\text{Perc.} = \text{Perc.} \text{ -----} > \text{ Cuando } S_{uz} > \text{Perc.} \text{ -----} > \text{ ecuación 16}$$

$$\text{Perc.} = S_{uz} \text{ -----} > \text{ Cuando } S_{uz} < \text{Perc.} \text{ -----} > \text{ ecuación 17}$$

b) El modelo corrigió el estado de a zona superior de la siguiente forma

$$S_{uz} = S_{uz} - \text{Perc} \text{ -----} > \text{ ecuación 18}$$

c) Luego agregó la percolación a la zona inferior:

$$S_{lz} = S_{lz} + \text{Perc} \text{ -----} > \text{ ecuación 19}$$

B. Calculo la escorrentía

a) Calculó la escorrentía desde la zona superior:

$$Q_0 = K_0 * (S_{uz} - U_{z10}) \text{ ----} > \text{ Cuando } S_{uz} > U_{z10} \text{ -----} > \text{ ecuación 20}$$

$$Q_1 = K_1 * S_{uz} \text{ -----} > \text{ ecuación 21}$$

$$S_{uz}^* = S_{uz} - Q_0 - Q_1 \text{ -----} > \text{ ecuación 22}$$

b) Calculó la escorrentía desde la zona inferior

$$Q_4 = K_4 * S_{lz} \text{ ----} > \text{ ecuación 23}$$

$$S_{lz}^* = S_{lz} - Q_4 \text{ -----} > \text{ ecuación 24}$$

C. Suma los componentes de escorrentía generada por precipitación

$$Q_{gen} = Q_o + Q_1 + Q_4 \text{ -----} > \text{ecuación 25}$$

Luego lo convertimos a m³/seg. por medio de la ecuación 26.

$$Q_{comp} = Q_{gen} * \text{Area}/86.4 \quad (\text{Area} = \text{km}_2) \text{ -----} > \text{ecuación 26}$$

D. Chequeo del balance hídrico

El balance hídrico lo obtuvó mediante la resta de la precipitación a las salidas como evaporación actual y caudal generado y esto fue igual a la suma de contenido de humedad en el suelo húmedo, diferencia de almacenamiento en la parte superior e inferior del reservorio esto se representó de la siguiente forma:

$$P - E_{act} - Q_{gen} = d(S_{sm} + S_{uz} + S_{lz}) - P \text{ -----} > \text{ecuación 27}$$

E. Para continuar con el siguiente día en los cálculos se procedio de la siguiente manera

$$dS_{uz} = 0 \text{ -----} > \text{inicial}$$

Nota: Para cada día se utilizó los valores más recientes de las variables S_{sm}^* , S_{uz}^* , y S_{lz}^* que son los valores finales de cada día.

5.8 Calibración de los parámetros de la cuenca

Los parámetros más importantes a calibrar de la cuenca para la que afectan el volumen de escorrentía en época de lluvia son los factores iniciales " S_{sm} ", " S_{uz} ", " S_{lz} ", " Fc ", " Lp " y " β ". Los valores típicos de " Fc " tienen que estar entre 100 - 300 mm., el límite de evapotranspiración potencial " Lp " entre 50 - 100% de " Fc " y " β " generalmente se encuentra entre 1 - 4.

Los parámetros que determinan la forma del hidrograma y no afectan el volumen de escorrentía son K_n y $Uzln$. El parámetro " K_0 " determina la magnitud y recesión del flujo pico, " K_4 " determina el flujo base y finalmente los parámetros de recesión " K_1 ", " K_2 " y " K_3 " junto con $Uz1_1$, $Uz1_2$ y $Uz1_3$ determinan el flujo medio entre el flujo base y el pico. La calibración se llevo acabo por el método de prueba y error observandose los resultados en el graficador del modelo hasta obtener una de hidrograma calculado muy similar a el hidrograma observado.

6. RESULTADOS Y DISCUSION

6.1 Datos de precipitación diaria en (mm.)

El ingreso de los datos de precipitación diaria en (mm.) fue a través de un archivo editor con extensión .TXT, posteriormente fueron leídos por el modelo. Para conocer los resultados de la corrida se gráfico la precipitación diaria a través de la intensidad por día expresada en (mm/hr.)

A) Estación El Recuerdo

Se corrió en el modelo los datos de precipitación desde el año de 1,968 a 1,995, graficando desde el año de 1,991 a 1,995. Ver figura 13. Los resultados obtenidos en la corrida reflejaron que el año de 1,991 fue seco con 744 mm/año de precipitación, luego aumento la precipitación a 1,227 mm/anuales para el año de 1,992 y para el año de 1,993 fue de 1,282 mm/anuales posteriormente en el año de 1,994 y 1,995 hubo un aumento de lluvia con 1,314 mm/año y 1,347.2 mm/año respectivamente. La media de los años de 1991 a 1995 es de 1182.98 mm/año. Los resultados se pueden observar en el cuadro 1.

Cuadro 1 . Precipitación total anual en mm. estación de El Recuerdo, años de 1,991 a 1,995.

Año	1991	1992	1993	1994	1995
Cantidad en mm.	744.3	1227.0	1282.3	1314.1	1347.2

Fuente: Instituto Nacional de Vulcanología, Meteorología e Hidrometeorología (INSIVUMEH).

En el cuadro 1 se observo que el año con mayor precipitación fue el de 1,995 con 1347.2 mm/año. El año con menor precipitación fue 1,991 con 744.3 mm. La distribución de la lluvia como se puede observar en la figura 13, es mejor en el año de 1,995. Para los años en los cuales se presento menor precipitación las intensidades fueron mayores como en el año de 1,991 pero se

presentaron altas intensidades. La intensidad más alta se registraron en el año de 1994 con 3.5 mm/hr aproximadamente como se observa en la figura 13.

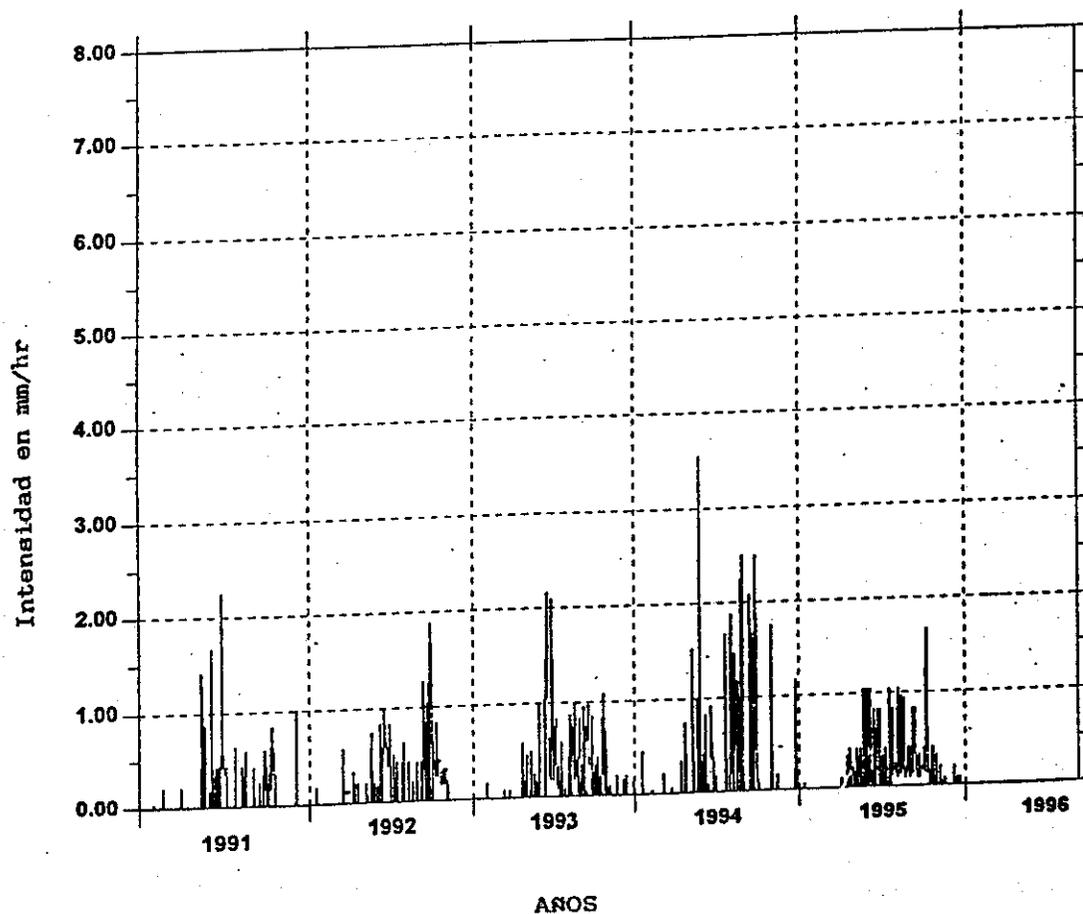


Figura 13. Intensidad de lluvia en mm/hr. Estación El Recuerdo. Período de 1,991 a 1,995.

B) Estación La Alameda

Para la Estación Alameda se corrieron datos de precipitación diaria desde el año de 1,970 al 1,995, graficando desde el año de 1,991 a 1,995. En el año 1,991 se presentó una precipitación de 720.30 mm/año siendo la más baja durante los últimos cinco años, para el año de 1,992 se tuvo una precipitación de 746 mm/año y para el año de 1,993 fue de 771 mm/año. La cantidad de lluvia en el año de 1,994 fue de 892 mm/año y para el año de 1,995 aumento considerablemente a 1104.1 mm/año siendo el año más lluvioso para los cinco años. La media de los años de 1991 a 1995 es de 846.82 mm/año. Los resultados se ilustran en el cuadro 2.

Cuadro 2. Precipitación total anual en mm. estación La Alameda, años de 1,991 a 1,995.

Año	1991	1992	1993	1994	1995
Cantidad en mm.	720.3	746.10	771.60	892.01	1104.1

Fuente: Instituto Nacional de Vulcanología, Meteorología e Hidrometeorología (INSIVUMEH).

En la figura 14 están representados para cada año los datos de precipitación diarios en intensidades (mm/hr). Se observa, un aumento en la precipitación los años de 1,994 y 1,995 con una mejor distribución de la precipitación durante el año de 1,995.

En el cuadro 2 se observa que en el año de 1991 se obtuvo la menor precipitación y en la figura 14 demuestra la más alta intensidad presentada para el año de 1991 con 3.75 mm/hr aproximadamente. En los años de 1,992 y 1,993 se presentaron intensidades de 2.55 mm/hr. y 2.80 mm/hr. respectivamente. El año de 1,994 presenta una buena distribución, pero 1,995 registro la máxima precipitación para los 5 años analizados y una mejor distribución de la lluvia durante el año. Ver figura 14.

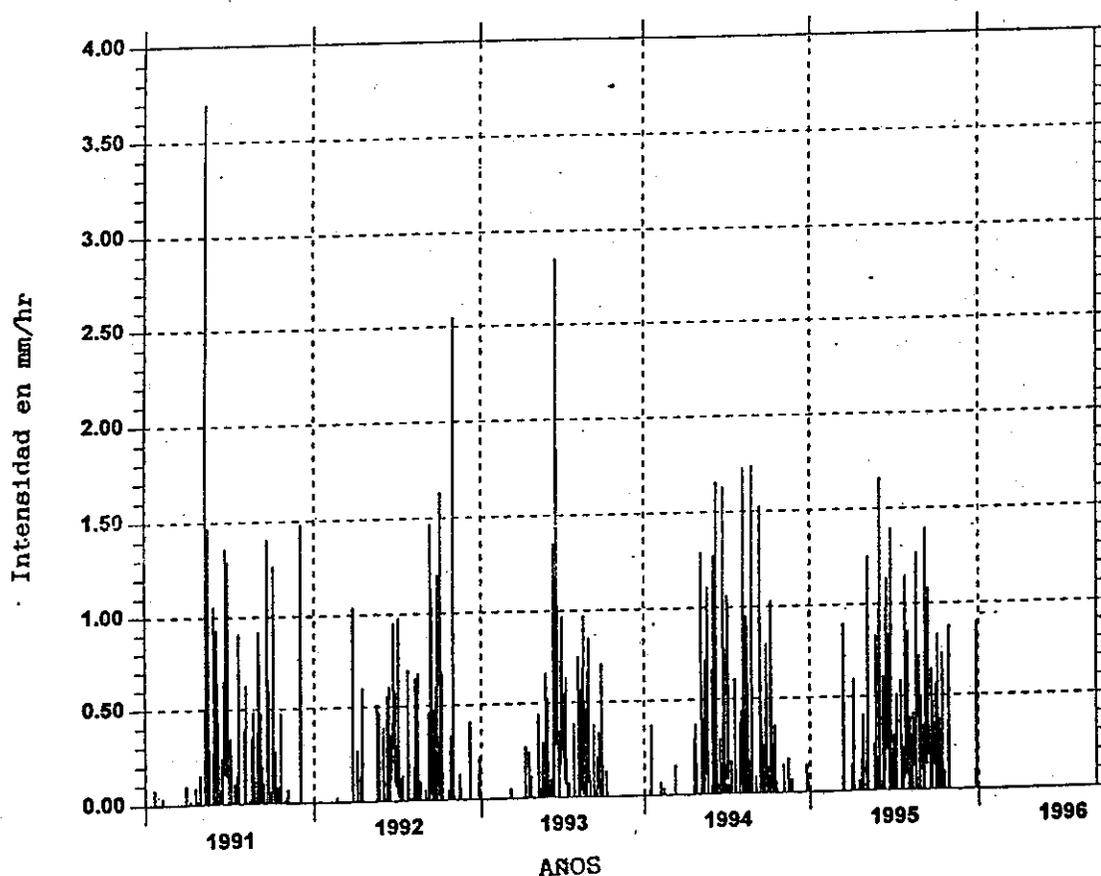


Figura 14. Intensidad de lluvia en mm/hr. Estación Alameda. Período de 1,991 a 1,995.

C) Estación Chicazanga

Para la estación Chicazanga se corrió los datos de precipitación diaria desde a mediados del año de 1,993 al 1,995. En el cuadro 3 se puede observar que los registros de precipitación para el año de 1,993 están incompletos por tener información del segundo semestre del año registrando 559 mm de precipitación. Para el año de 1,994 se registro una cantidad de 1,196.04 mm. de lluvia anual, presentándose un aumento en el año de 1995 con 1,275.14 mm de precipitación anual. La media para 1,994 y 1,995 es de 1,236 mm/año. La intensidad más alta se presento en el año de 1,994 con 2.85 mm/hr.

Cuadro 3. Precipitación total anual en mm. estación Chicazanga, septiembre 1,993 a 1,995.

Año	1993	1994	1995
Cantidad en mm.	559.0	1196.04	1275.14

Fuente: Instituto de Investigaciones, Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala (FAUSAC-IIA).

La estación de Chicazanga presenta un período de registro corto pero es la más importante por su peso en área obtenido en los polígonos de Thiessen, para solventar la falta de datos se llevo a cabo un análisis de doble masa entre estaciones aledañas calculado la precipitación media de la cuenca. En la figura 15 se observa una mejor distribución de la lluvia en el año de 1995.

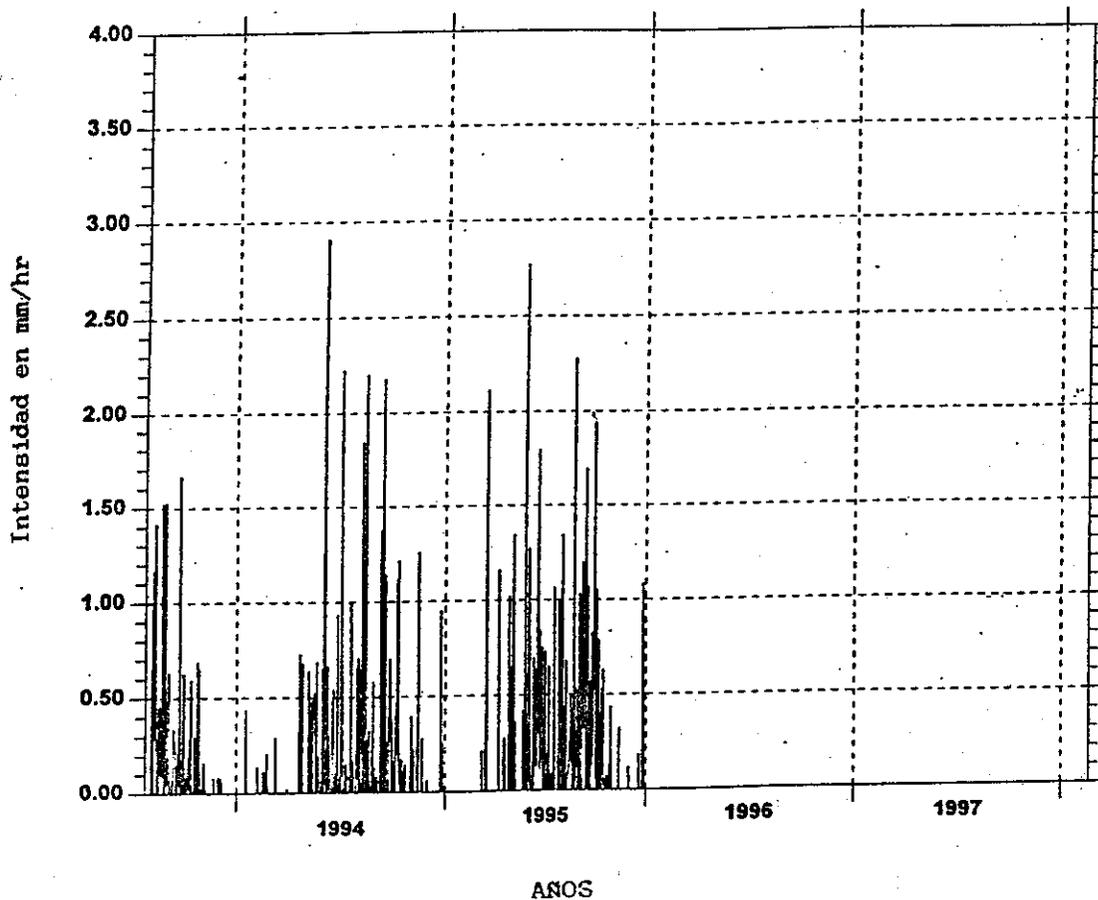


Figura 15 Intensidad de lluvia en mm/hr. Estación Chicazanga. Período de sep. 1,993 a 1,995.

6.2 Datos de Evaporación total mensual en (mm.)

Los datos corridos en el modelo fueron los de evaporación total mensual para las estaciones siguientes:

- Estación La Alameda (INSIVUMEH) se obtuvo datos de Evaporación desde el año de 1,970 a 1,995. Los datos utilizados en el modelo son los años de 1,991 a 1,995 obteniendo los siguientes resultados en el cuadro 4:

Cuadro 4. Evaporación total anual de la estación La Alameda, período de 1,991 a 1,995.

Año	1,991	1,992	1,993	1,994	1,995
Evaporación	1,406.1	1,370.9	1,446.7	1,057.6	1,337.8

Fuente: Instituto Nacional de Vulcanología, Meteorología e Hidrometeorología (INSIVUMEH).

La evaporación total anual más alta es registrada en 1993 con 1,446.70 mm. y la menor evaporación fue en el año de 1,994 con 1,057.6 mm. La evaporación media anual para los 5 años es de 1323.82 mm/año.

- Estación Chicazanga (FAUSAC) se generó datos de Evaporación desde el año de 1,993 a 1,995. Los resultados obtenidos se pueden observar en el cuadro 5.

Cuadro 5. Evaporación total anual estación Chicazanga, de septiembre 1,993 a 1,995.

Año	Sep. 1,993	1,994	1,995
Evaporación	402.3	1102.3	1050.01

Fuente: Instituto de Investigaciones, Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala (FAUSAC-IIA).

Se puede observar que la evaporación media para 1,994 y 1,995 es de 1,076.2 mm/año siendo menor que la estación Alameda por el cambio de altitud entre las dos estaciones siendo de 600 msnm. de diferencia en metros sobre el nivel del mar.

6.3 Datos de caudales medios diarios en (lts/seg), estación El Puente

Los datos recopilados y generados son los caudales medios diarios en lts/seg y se corrieron desde el año de 1,982 a 1,993 tomando solamente 5 años así en el modulo "HBV" precipitación y escorrentía se compararon con el hidrograma calculado para 1,991 a 1,995. En el cuadro 6 se presentan los resultados resumidos como promedios anuales de los caudales del 1,991 a 1,995. Ver figura 16.

Cuadro 6. Caudales medio anual en lts/seg estación de El Puente, de 1,991 a 1,995.

Año	1991	1992	1993	1994	1995
lts/seg	60	57	72.89	81.56	99.75

Fuente: Facultad de Agronomía, Instituto de Investigaciones Agronómicas, Universidad de San Carlos de Guatemala e Instituto de Vulcanología, meteorología e Hidrología. (FAUSAC-IIA-INSIVUMEH).

En el cuadro anterior se pudo observar un aumento del caudal en los años de 1,994 a 1,995, respuesta al aumento de precipitación en la zona. El máximo caudal registrado es de 99.75 lts/seg para el año de 1,995 y el menor es para el año de 1,992 de 57 lts/seg. La media para los cinco años es de 74.24 lts/seg.

En la figura 16 se puede observar el hidrograma de 5 años de registro desde 1991 a 1,995. Se puede observar una disminución de caudal para el año de 1,992 con 57 lts/seg. debido a la baja de precipitación en los años de 1,991 y 1,992. El máximo caudal registrado para la zona es de 790 lts/seg para el año de 1,995 respuesta de un aumento de precipitación.

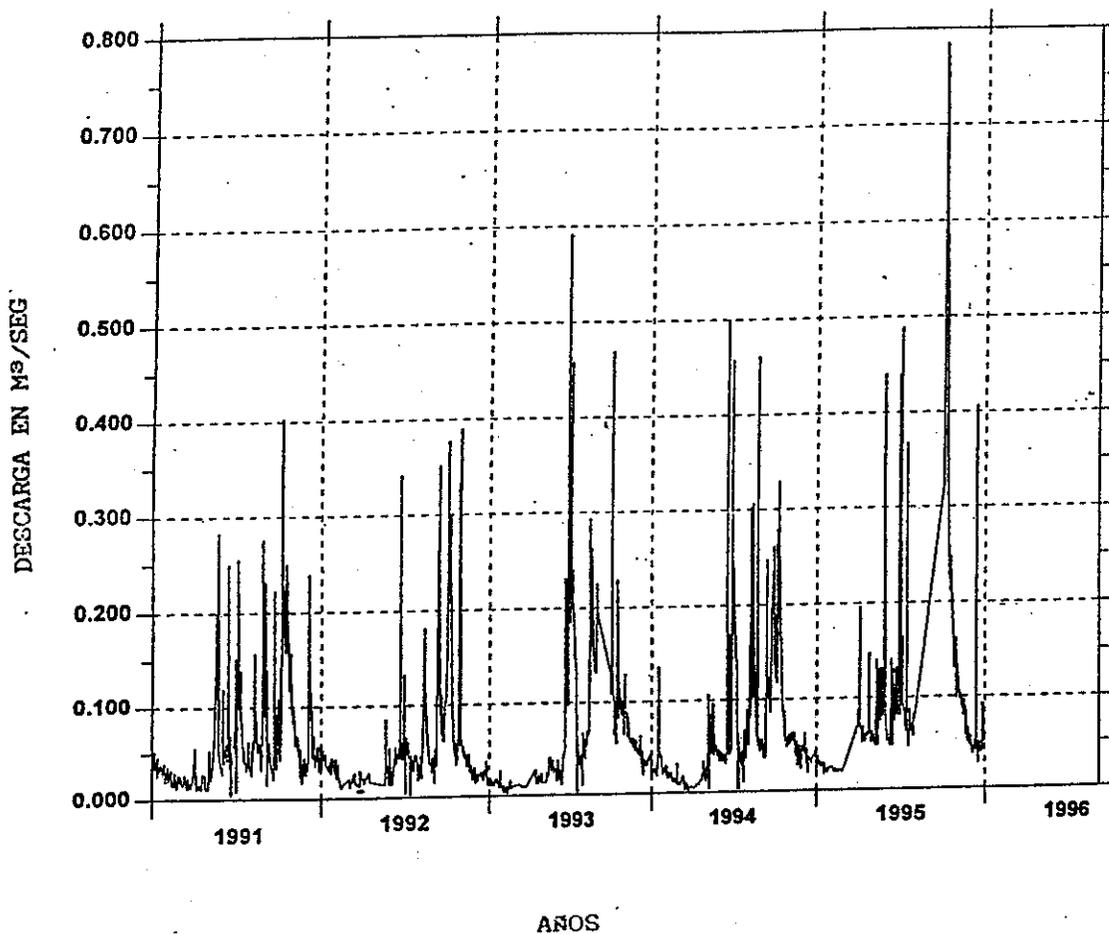


Figura 16. Descarga en $m^3/seg.$ Estación Limnimétrica El Puente. Período 1,991 a 1,995.

6.4 Análisis de doble masa

Para los datos de precipitación diaria en (mm.) el modulo "HIS" analizó la calidad de la información generada, comparando los datos de una estación los de otra estación patrón. El factor de corrección de la precipitación es igual $FC = \frac{Tan\beta}{Ttan\alpha} \rightarrow$ para el modelo está entre (0.5-1.5).

A) Estaciones Alameda y Chicazanga

Para el período de 1,993 a 1,995 el análisis de doble masa de la estación Chicazanga sumo 3,350 mm. de precipitación acumulada y para La Alameda es de 2,250 mm. como se observa en la figura 17. Se observó que la diferencia de altura de 600 msnm entre las dos estaciones influye en la cantidad de precipitación. La consistencia de la información entre estas dos estaciones es aceptable los datos son confiables.

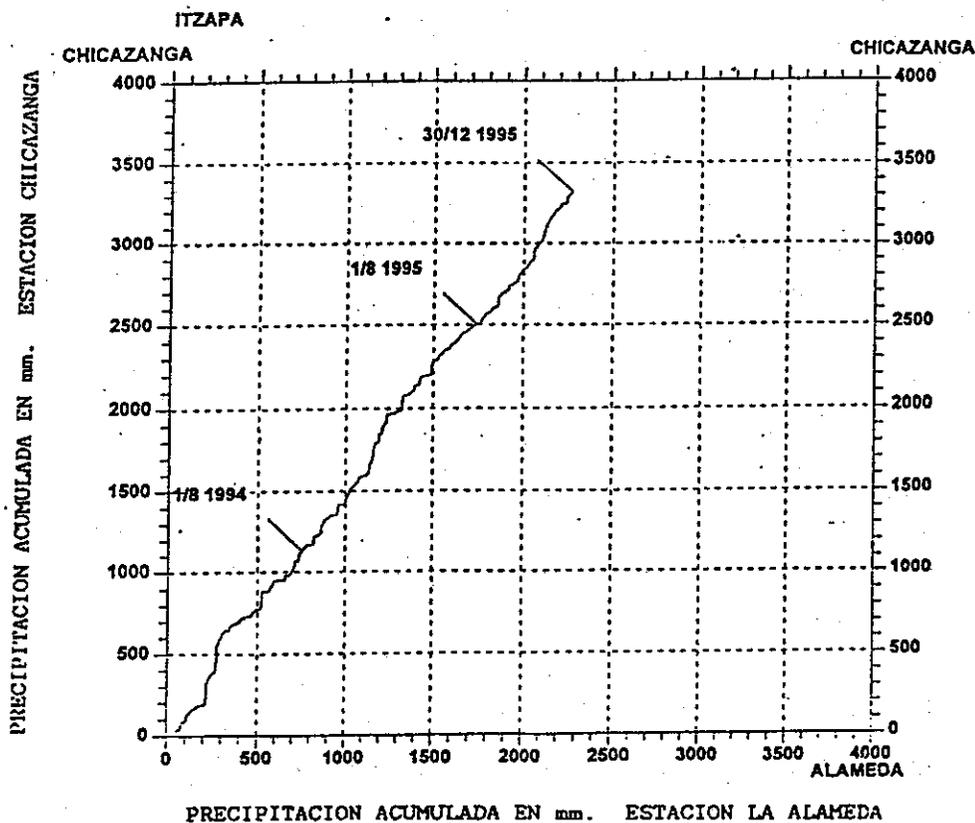


Figura 17. Análisis de Doble Masa de las estaciones Alameda y Chicazanga. Período sep. 1,993 a 1,995.

B) Estaciones Chicazanga y Recuerdo

Para el período comprendido desde 1,993 a 1,995 la estación El Recuerdo posee 3,650 mm. de precipitación acumulada en y la estación de Chicazanga posee 3,250 mm. de precipitación acumulada. La precipitación acumulada es bastante similar en las dos estaciones pero en la estación de Chicazanga es menor por no tener completo el año de 1,993. La consistencia de la información es aceptable con un coeficiente de corrección de precipitación de 0.65. Ver figura 18.

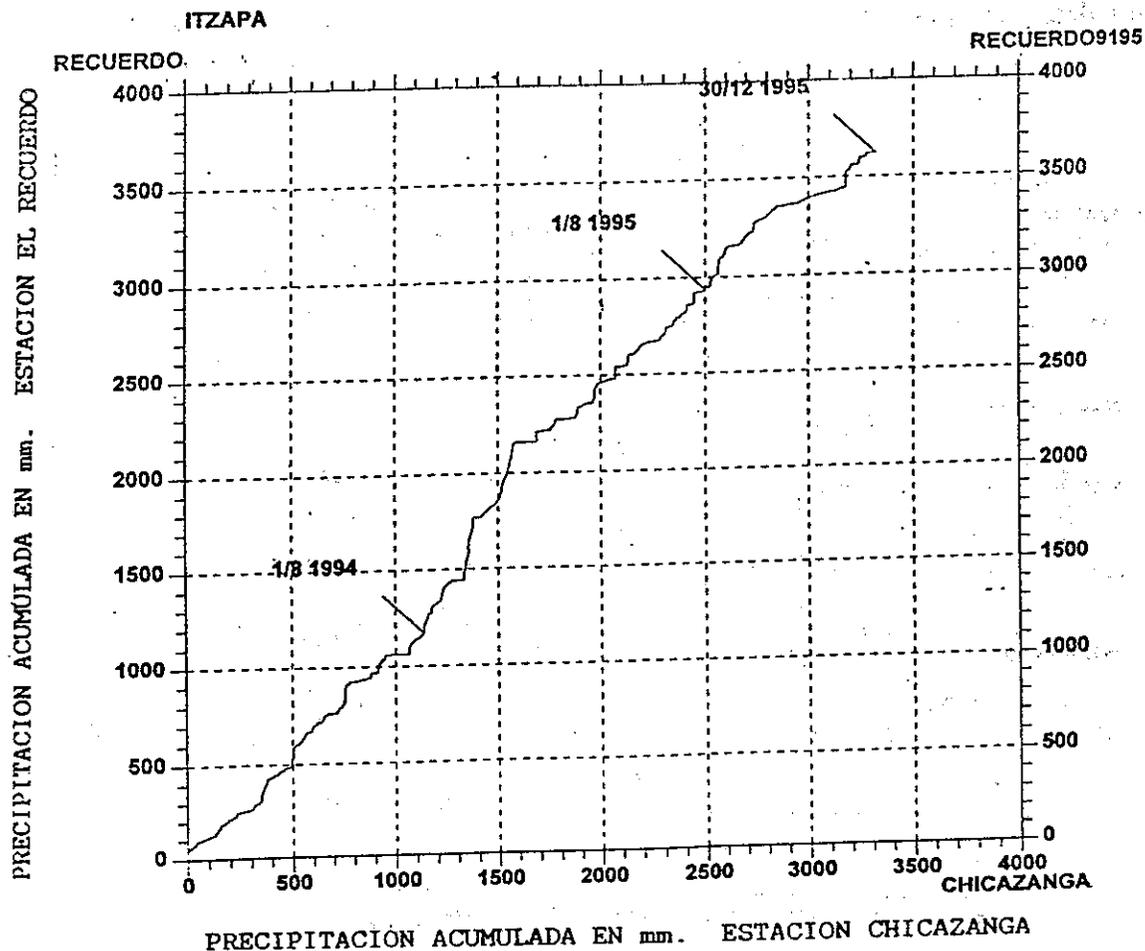


Figura 18. Análisis de Doble Masa de las estaciones Chicazanga y Recuerdo. Período sep. 1,993 a 1,995.

C) Estaciones Alameda y Recuerdo

Para la estación El Recuerdo su precipitación acumulada en 5 años es de 6,500 mm. y para la estación de La Alameda es de 4,300 mm.. La diferencia de altura de aproximadamente 498 msnm. marca la cantidad de precipitación entre las dos estaciones. La Alameda y El Recuerdo posee información aceptable y se observa mayor consistencia en la gráfica por tener más cantidad de información generada. Ver figura 19. El modelo toma un factor de corrección igual para las tres estaciones siendo de 0.65.

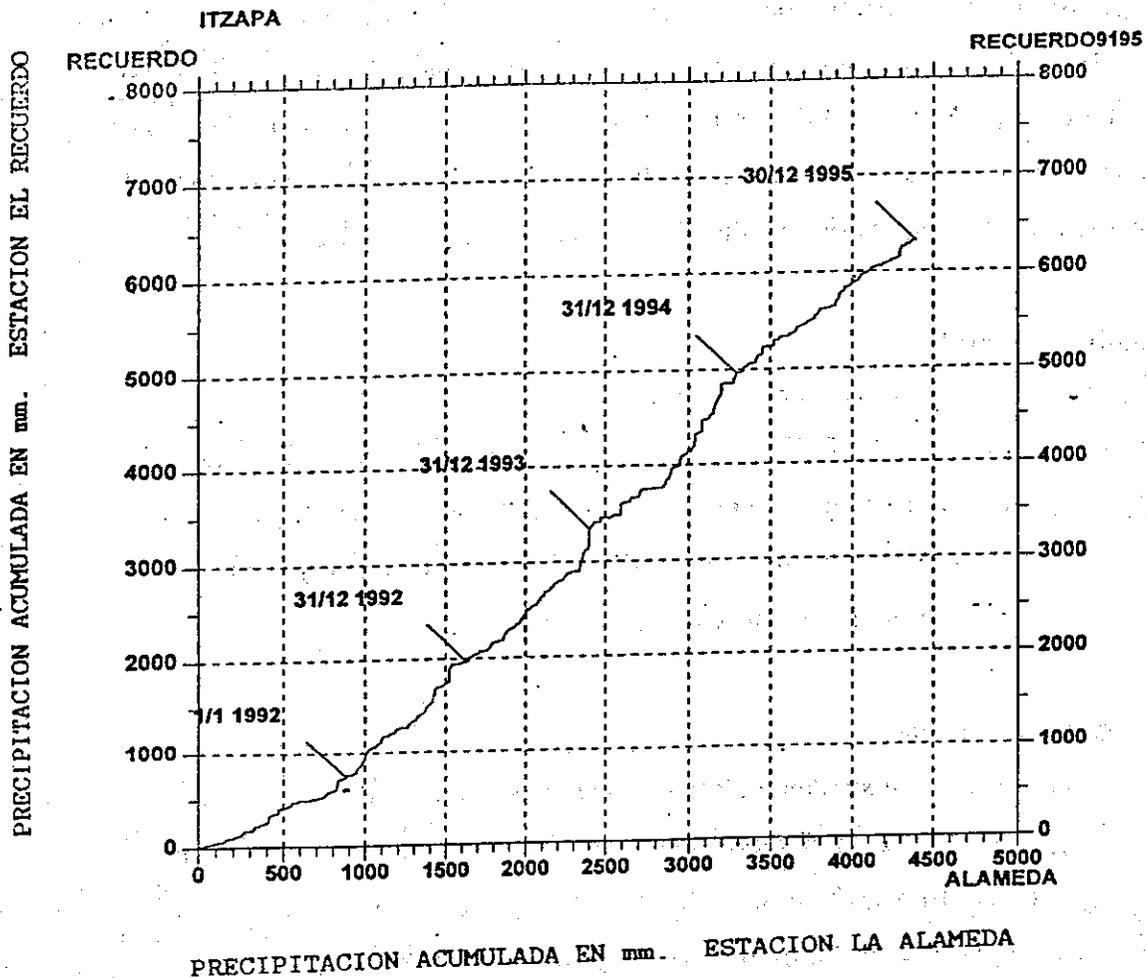


Figura 19. Análisis de Doble Masa de las estaciones Alameda y Recuerdo. Período sep. 1,993 a 1,995.

6.5 Trazo y polígonos de Thiessen entre estaciones en la cuenca

El trazo de polígonos de Thiessen permitió darle un peso de acuerdo a el porcentaje de área que ocupaba cada estación en la cuenca de área 26.71 km². Los resultados obtenidos para la cuenca fueron los siguientes:

A) Estación Chicazanga

El polígono de Thiessen de la estación Chicazanga abarca un área de 14.24 km² lo que corresponde al 53.30 % del total del área en la cuenca, se puede observar en el cuadro 7. Esto indica que la estación posee una mejor ubicación y por consiguiente es la de mayor importancia dentro de la cuenca. Además el área que cubre es la parte alta y media de la cuenca coincidiendo con el relieve que presenta la cuenca como se puede observar en la figura 25A. Es necesario la toma de datos metereologicos de la estación en una forma continua e indefinida.

B) Estación La Alameda

La estación La Alameda abarca un área de 9.31 km² como se puede observar en el siguiente cuadro lo que corresponde al 34.85 % del total del área en la cuenca. Esta estación al trazarle su polígono de Thiessen cubre todo lo que es el Valle de Itzapa (Parte baja de la cuenca) como se representa en la figura 25A. La importancia de está estación es el registro largo de información pluviométrica que posee y actualmente sigue funcionando.

C) Estación El Recuerdo

En el cuadro siguiente se puede observar que la estación El Recuerdo abarca un área de 3.16 km² lo que corresponde al 11.85 % del total del área, en la cuenca fisiográficamente abarca lo que es la montaña llamada "El Soco" como se observa en la figura 25A. Esta estación también posee un registro largo de información pluviométrica y aunque sea la que menos abarca en porcentaje es necesario tomarla en cuenta por lo indicado anteriormente.

Cuadro 7. Areas que cubre los polígonos de Thissen para las estaciones metereológicas de la cuenca del río Itzapa.

Estación	Area en Km ²	Peso	Porcentaje
Chicazanga	14.24	0.5330	53.30
Alameda	9.31	0.3485	34.85
Recuerdo	3.16	0.1185	11.85
Total	26.71	1	100.00

6.6 Precipitación media

Se determinó la precipitación media para cada estación y la multiplicó por el peso de cada estación dentro de la cuenca, la precipitación media fue de 1,094.1 m/año. Como se puede observar en el cuadro 8. La estación más importante dentro de la cuenca es Chicazanga aportando mayor peso en la cuenca con mayor influencia de lluvia que multiplicado por su peso la precipitación media aporta una cantidad de 658.8 mm. Por el contrario la estación de menor peso es la del Recuerdo que multiplicando la precipitación media por su peso dio una precipitación de 140.83 mm.

Cuadro 8. Cálculo de la precipitación media de la cuenca del río Itzapa por medio de polígonos de Thiessen.

Estación	Peso	Precipitación media	Peso por precipitación
Chicazanga	0.5330	1236	658.8
Alameda	0.3485	846.82	295.12
Recuerdo	0.1185	1182.98	140.183
Total	1		1094.1

6.7 Curva de duración de caudales característicos

Para la estación limnimétrica "El Puente", se construyó una curva de duración de caudales para el período de 1,991 a 1,995 y otra de 1,983 a 1,995. La curva de duración de caudales muestra el número de días en el cual un caudal es igualado o excedido.

A) Caudales característicos de la Curva de duración de caudales de 1,991 a 1,995

Como podemos observar en la figura 20 la curva de duración de caudales para el período de 1,991 a 1,995 presenta resultados siguientes: el caudal característico máximo es de 300 lts/seg. el cual es igualado o excedido 2.74 % del tiempo en todo el año, lo que corresponde a 10 días/año. El caudal medio es de 38 lts/seg y es excedido o igualado el 50 % o 182 días/año. El caudal de estiaje es de 15 lts/seg. el cual es igualado o excedido 97.30 % del tiempo correspondiendo a 355 días/año, como se observa en el cuadro 9.

Cuadro 9. Caudales característicos para la estación "El Puente" período 1,991 a 1,995.

Caudal Característico	Porcentaje de Tiempo	Caudal en lts/seg
Máximo	2.74	300
Medio	50	38
Estiaje	97.3	15
1 mes	8.34	200
3 meses	25	70
4 meses	75	25

En la figura 20. se puede observar que para la curva de 1,991 - 1,995 no hay registros mayores de 800 lts/seg. Por el contrario en la figura 21 del período de 1,983 - 1,995 hay pocos registros que excede esta cantidad.

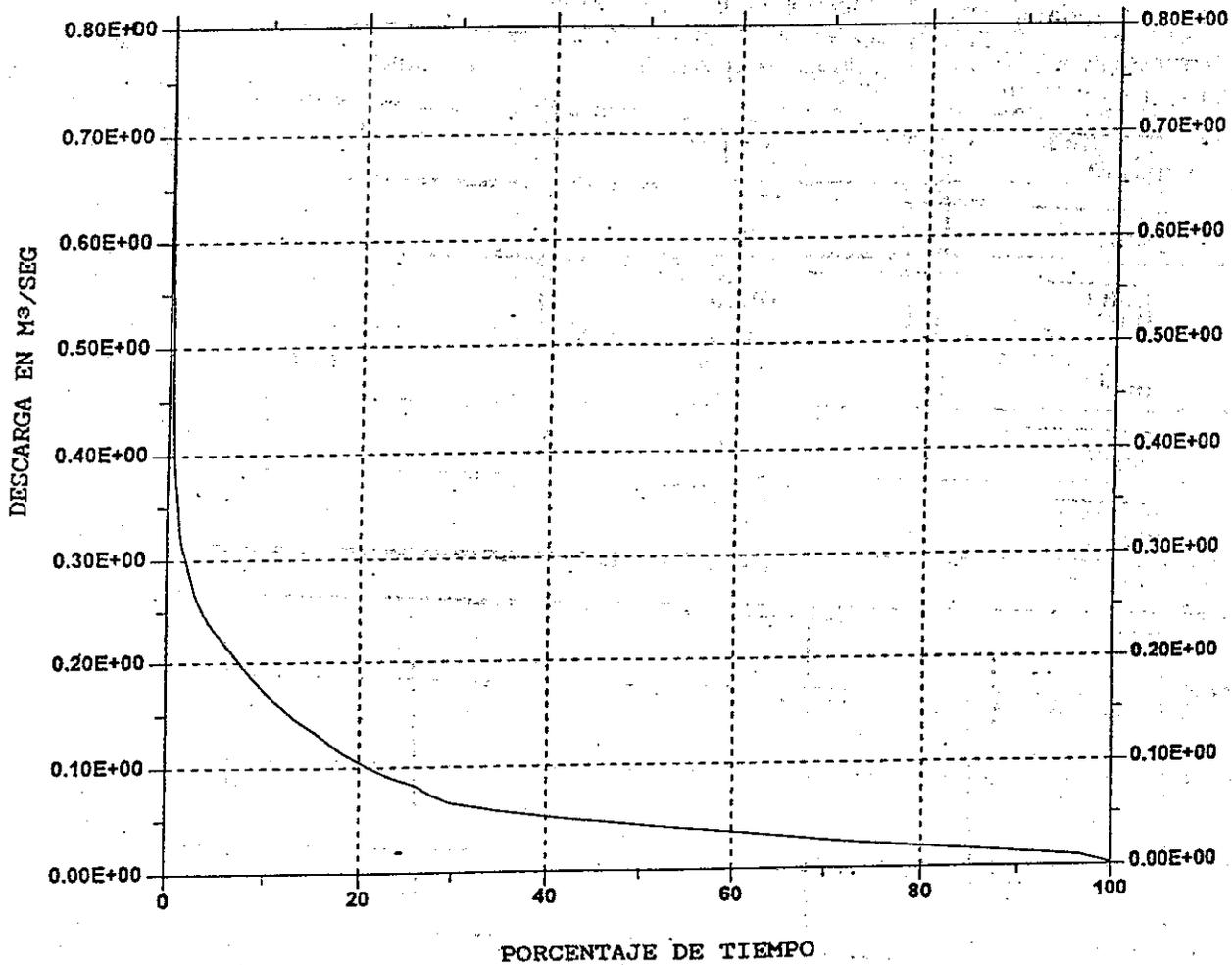


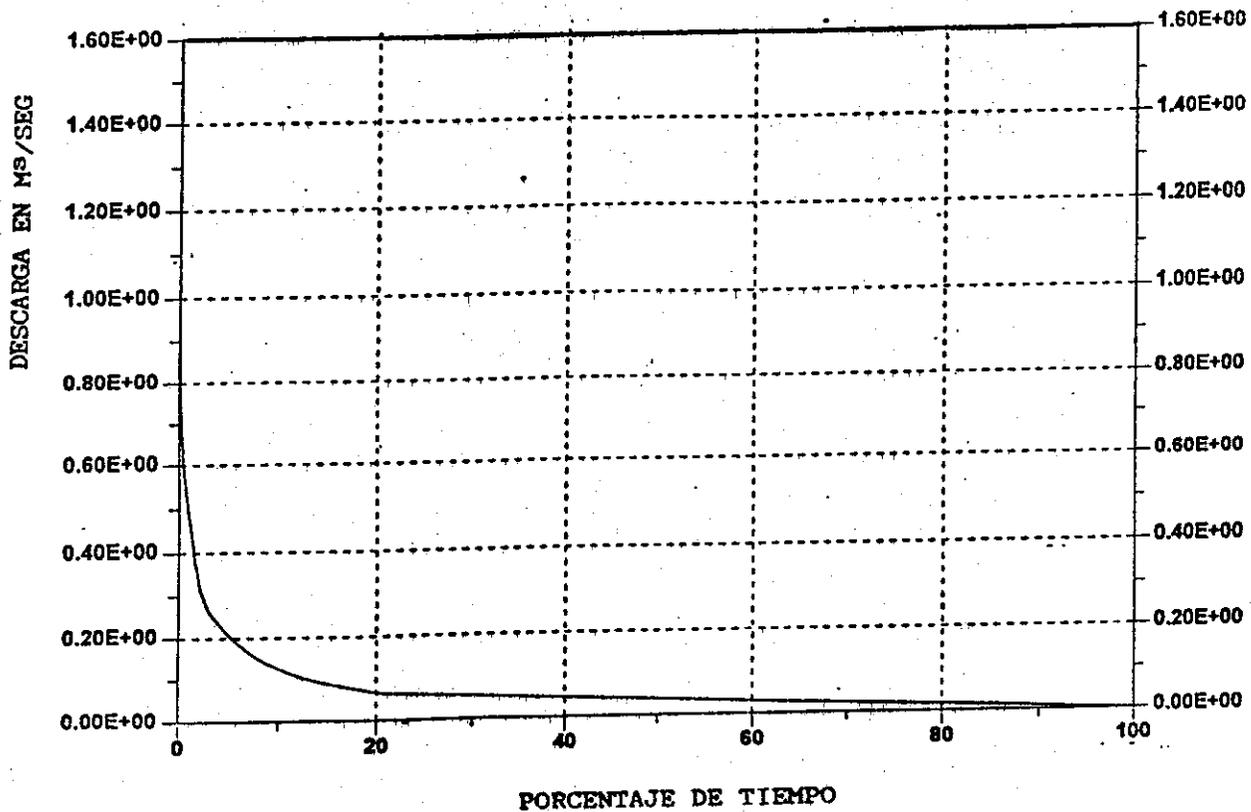
Figura 20. Curva de Duración de Caudales en m³/seg. Estación Limnimétrica El Puente. Período 1,991 a 1,995.

B) Caudales provenientes de la Curva de duración de caudales de 1,983 a 1,995

En la figura 21 se observa que de 1,983 a 1,995 la curva de duración presenta los resultados siguientes: el caudal característico máximo es de 400 lts/seg. el cual es igualado o excedido 2.74 % del tiempo en todo el año, aproximadamente 10 días/año se presentó o fue mayor. El caudal medio es de 35 lts/seg y es excedido o igualado el 50 % o 182 días/año se presenta este caudal. El caudal de estiaje es de 18 lts/seg. el cual es igualado o excedido un 97.30 % del tiempo correspondiendo a 355 días/año. Ver cuadro 10.

Cuadro 10. Caudales característicos estación "El Puente" período año 1,983 a 1,995.

Caudal Característico	Porcentaje de Tiempo	Caudal en lts/seg
Máximo	2.74	400
Medio	50	35
Estiaje	97.3	18
1 mes	8.34	170
3 meses	25	72
4 meses	75	27

Figura 21. Curva de Duración de Caudales en m³/seg. Estación Limnimétrica El Puente. Período 1,983 a 1,995.

La curva de duración de caudales de 1,991 a 1,995 se le puede llamar curva de baja duración por ser de 5 años de registros. La curva de 1,983 a 1,995 se le llama curva Típica por poseer 13 años de registros de caudales. Ambas curvas posee una pendiente muy fuerte en un principio indicando que el río no ofrece posibilidad de desarrollo exitoso sin contar con ciertos almacenamientos en las partes altas de la cuenca o aprovechamiento de agua subterránea, para así disponer de agua durante los períodos de bajo escurrimiento natural. Estas curvas son típicas de una corriente de régimen variable, con poco almacenamiento en el cauce y la mayor parte de caudales provienen de escorrentía superficial.

Hay que tomar en cuenta que la cuenca posee 26.71 km² y su respuesta a la lluvia está más influenciada por la variabilidad de esta que por el efecto regulador del cauce.

Los extremos superiores de las curvas demuestran que la pendiente es muy pronunciada, indicando poco almacenamiento en la zona de crecidas, siendo el río por consiguiente en lo que se refiere a avenidas tan variables como la lluvia misma, existiendo crecidas "relámpago o régimen torrencial". El extremo inferior refleja que el río recibe muy poco aporte de agua subterránea en la zona aunque el agua que fluye en época de estiaje es producto del agua subterránea. Ver figuras 20 y 21.

Básicamente la diferencia significativa entre las curvas de duración de caudales son los caudales máximos, representándose de una mejor forma en las figuras 20 y 21. Se puede observar que para el período de 1,983 - 1,995 el caudal que excede o es igualado a 1.10 m³/seg corresponde a 1 % del tiempo, equivalente a 3 días/año. Ver figura 21.

6.8 Calibración de parámetros para calcular escorrentía proveniente de la precipitación

A) Parámetros que afectan el volumen de escorrentía

Los parámetros más importantes que se calibraron y que afectan el volumen de escorrentía en época de lluvia son los factores iniciales:

"S_{sm}" (contenido de humedad inicial), "S_{uz}" (almacenamiento en la zona superior), "S_{lz}" (almacenamiento en la zona inferior), "Fc" (capacidad de campo), "Lp" (límite de ETP) y "β" (coeficiente empírico).



Los valores para estos parámetros se describe en el cuadro 11.

Cuadro 11. Parámetros que afectan el volumen de escorrentía para la Cuenca del río Itzapa, período de 1,991 - 1,995.

Parámetros	Calibración
S_{sm} Contenido de humedad	0 mm.
S_{uz} Almacenamiento zona superior	0 mm.
S_{lz} Almacenamiento zona inferior	13 mm.
Fc Capacidad de retención	300 mm.
Lp Límite de ETP	0.6
β Coeficiente empírico	4

Los valores típicos de "Fc" tienen que estar entre 100 - 300 mm., el límite de evapotranspiración potencial "Lp" entre 50 - 100% de "Fc" y "β" generalmente se encuentra entre 1 - 4.

Los valores del cuadro anterior presentan al hidrograma calculado muy similar al observado observándose un acercamiento muy bueno a lo que es el sistema real como se puede observar en la figura 22 y figura 23. Los parámetros del modelo se mantienen fijos pero cuando el manejo de la cuenca cambia notoriamente es necesario ajustarlos nuevamente. Es por esta razón que el monitoreo hidrológico en cuencas disturbadas debe de ser permanente.

En la cuenca del río Itzapa se pudo observar que a medida que cambiamos la capacidad de retención de la cuenca por un valor menor la escorrentía superficial aumenta presentándose caudales picos mayores de 1 m³/seg., excediendo rápidamente el límite en la parte baja del reservorio (U_{z10}).

Otro factor de mucha importancia es cuando el almacenamiento en la zona inferior del suelo (S_{lz}) disminuye por efecto de una baja en la percolación del suelo por altas escorrentías afecta considerablemente al flujo base del río hasta el grado de perderse el flujo base del río y presentándose flujo en el río solo en época de invierno.

B) Parámetros que afectan la forma del hidrograma

Los parámetros que determinan la forma del hidrograma y no afectan el volumen de escorrentía son K_n y U_{zln} . El parámetro " K_0 " determina la magnitud y recesión del flujo pico, " K_4 " determina el flujo base y finalmente los parámetros de recesión " K_1 ", " K_2 " y " K_3 " junto con U_{z11} y U_{z12} determinan el flujo medio entre el flujo base y el pico.

Cuadro 12. Parámetros calibrados que afectan la forma del hidrograma para la calculado, período de 1,991 - 1,995.

Parámetros	Coficiente
K_0 Caudal pico	0.2
K_1 Flujo de recesión	0.1
K_2 Flujo de recesión	0.010
K_3 Flujo de recesión	0.010
K_4 Flujo base	0.005
U_{z10} Límite parte baja reservorio	20
U_{z11}	10
U_{z12}	5

Estos factores afectan la forma del hidrograma para corregir o ajustar los caudales picos, de recesión y flujo base del río. La calibración se llevo acabo por el método de prueba y error observándose los resultados en el graficador del modelo hasta obtener un hidrograma calculado muy similar a el hidrograma observado. Cuando es menor el valor " K_1 " disminuye el caudal pico, cuando es mayor aumenta, también para " K_2 " y " K_3 " entre menor sea el valor más fuerte es la recesión del río. El k_4 afecta al flujo base y bastar muy influenciado por el parámetro S_{lz} que controla el flujo base.

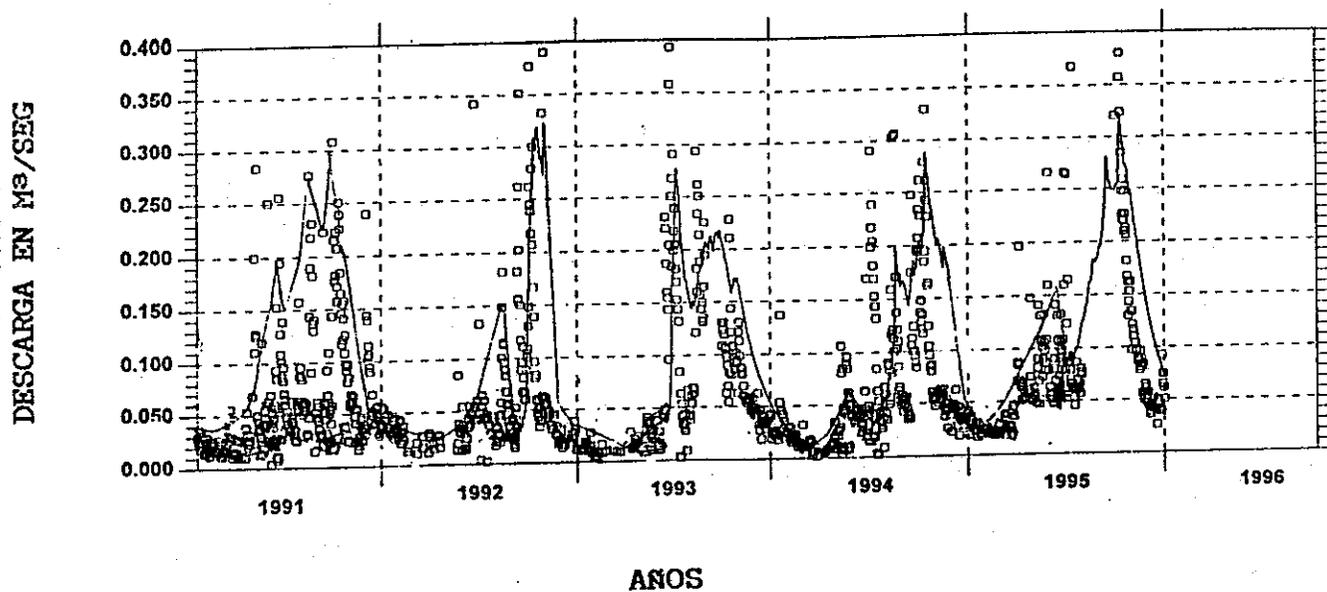


Figura 22. Curva de caudales calculados vs. caudales observados en m³/seg. Estación limnimétrica El Puente. Período 1,991 a 1,995.

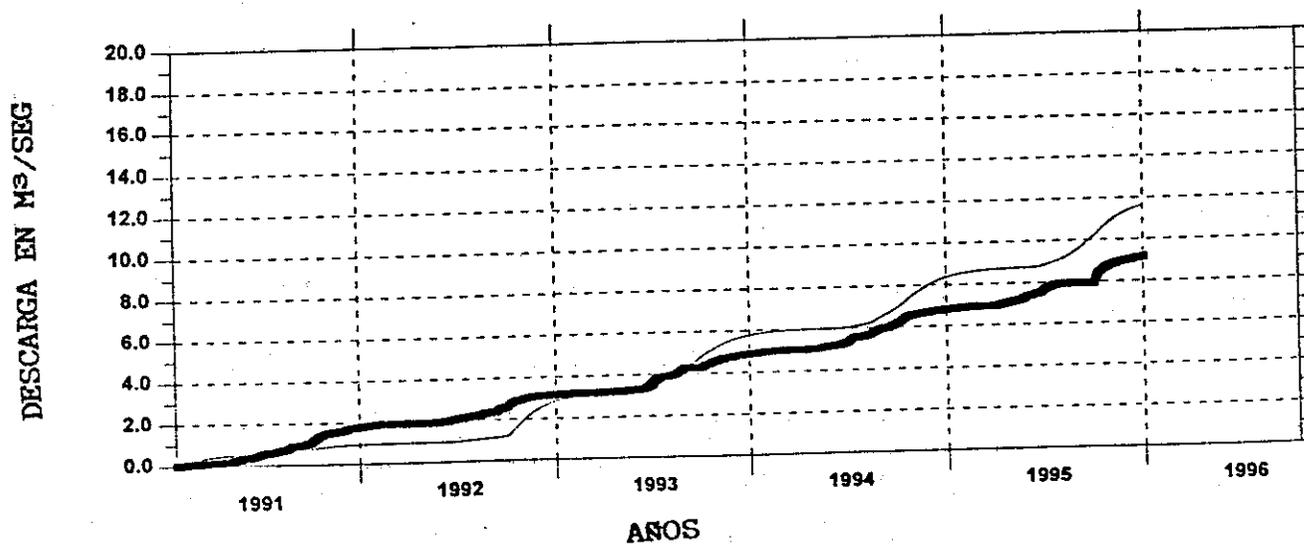


Figura 23. Curva de caudales acumulados calculados vs. caudales acumulados observados en m³/seg. Estación limnimétrica El Puente. Período 1,991 a 1,995.

6.9 Datos generados del calculo de precipitación escorrentía

A través del calculo del modelo con los datos de precipitación media de 1094.1 mm/año en la cuenca y los parámetros iniciales asignados se obtuvieron los resultados del caudal generado por escorrentía siendo 63.10 mm/año. lo que corresponde al 5.7 % del total de precipitación al año. Se obtuvo el flujo base con un 43.5 mm/año de un 68.93 % del caudal generado, caudal pico con 1.2 mm/año correspondiendo a 1.90 % como se puede observar en el siguiente cuadro.

Cuadro 13. Datos generados del calculo precipitación-escorrentía.

Parámetro obtenidos	milímetros/año
Precipitación	1094.1
Evapotranspiración Potencial	1319.4
Evapotranspiración Actual	810.12
Percolación	91.1
Q_0 = Caudal pico	1.2
Q_1 = Caudal de recesión	3.4
Q_2 = Caudal entre el pico y base	6.5
Q_3 = Caudal entre el pico y base	8.5
Q_4 = Caudal base	43.50
Q_{gen} = Caudal generado	63.10

6.10 Calculo del balance hídrico

El balance hídrico se verificó y programo en una hoja electrónica con los algoritmos del modelo descritos en la metodología.

Para obtener el balance hídrico se restó a la precipitación las salidas; evapotranspiración actual y caudal generado, esto fue igual a la suma de contenido de humedad en el suelo húmedo y almacenamientos en el suelo representado por la ecuación siguiente:

$$P - E_{act} - Q_{gen} = d(S_{sm} + S_{uz} + S_{lz}) - P;$$

El cálculo del balance hídrico para el año de 1,994 con una precipitación total anual de 1094.1 mm. mostró que se perdió de evapotranspiración 810.12 mm. y se aportó 91.10 mm. de lluvia para el caudal generado durante el año como podemos observar en el siguiente cálculo:

$$1094.1\text{mm} - 810.12\text{mm} - 91.10\text{mm} = 809.59\text{mm} + 41.855\text{mm} + 49.7745\text{mm} - 1094.1\text{mm}$$

$$192.88\text{mm} = -192.88\text{mm}$$

La capacidad de almacenamiento de la cuenca fue de 809.59 mm. y los almacenamientos en la zona superior e inferior del reservorio contribuirán al caudal generado y evapotranspiración de las plantas.

La figura 30A muestra el comportamiento del hidrograma observado y el calculado producto del cálculo del balance hídrico en una hoja electrónica para el año de 1,994 en la cual es necesario ingresar solamente los datos de precipitación de las estaciones que se encuentran dentro de la cuenca y los caudales de la estación hidrométrica del punto de aforo par el año de 1,994. Podemos observar que los resultados en la gráfica son iguales a los dados por el modelo en el momento de la calibración. En la figura 30A se demuestra que en el momento que pasa de 300 mm. de FC o capacidad de retención de la inician las crecidas.

También debemos tomar en cuenta que se puede analizar el comportamiento de los almacenamientos y el contenido de humedad del suelo durante el año de registro como podemos observar en la figura 31A. en la cual se demuestra que el contenido de humedad en el suelo varia conforme aumenta y disminuye conforme el comportamiento de la precipitación en la zona y el almacenamiento en la zona superior del reservorio es muy poca porque el agua se puede percolar para abastecer el acuífero o puede ser utilizado por las plantas en el proceso de evapotranspiración dentro de la cuenca.

7. CONCLUSIONES

- 7.1 Las estaciones meteorológicas de Chicazanga, Alameda y Recuerdo presentaron una aceptable consistencia de precipitación diaria.
- 7.2 La curva de duración de caudales permitió observar pendientes pronunciadas lo cual se concluye que el flujo del río es bastante inestable principalmente en época de invierno. Para la planificación del recurso hídrico proveniente del escurrimiento natural es necesario el almacenamiento de agua para la época de estiaje por el contrario es difícil la planificación y manejo de dicho recurso.
- 7.3 El peso asignado para cada estación mediante polígonos de Thiessen demostro que la estación de Chicazanga fue la de mayor influencia dentro de la cuenca y la del Recuerdo es la de menor importancia.
- 7.4 La modificación de parámetros por cambios notorios en el uso de la tierra en la cuenca, afecta el ciclo hidrológico principalmente se presentan fuertes escorrentías en época de lluvia y caudales bajos en época de estiaje.
- 7.5 El modelo demostró que debido a la poca infiltración y percolación del suelo produce un cambio en el almacenamiento en la zona inferior del reservorio por consiguiente podría causar una disminución del flujo base del río o conforme pasa el tiempo se puede eliminar el flujo base en época de estiaje.

8. RECOMENDACIONES

- 8.1 Para la investigación, planificación, diseño y operación de proyectos donde el recurso hídrico en cuencas hidrográficas juega un papel primordial es necesario y de mucha importancia la aplicación de un modelo hidrológico, que proporcionan información suficiente como para tomar criterios en el manejo sostenido de los recursos naturales.
- 8.2 La estación Chicazanga debe funcionar indefinidamente para generar registros de años secos y húmedos que se registran aproximadamente de cinco y diez años respectivamente, también por ser la más importante dentro de la cuenca del río Itzapa. El mal manejo de dicha cuenca implica un ciclo hidrológico cambiante año con año es por ello la necesidad de la generación de información hidrológica indefinidamente.
- 8.3 El modelo se puede utilizar para una cuenca con características morfométricas y biofísicas similares a la estudiada, pero es necesario que se tengan algunos aforos de dicha cuenca para representar los caudales calculados.

9. BIBLIOGRAFIA

1. ACKOFF, R.L. 1961. Progress in operation research. Ed. Jhon Willey. New York, McGraw-Hill. p. 36.
2. APARICIO MIJARES, F. 1989. Fundamentos de hidrología de superficie. México, D.F., Limusa. 50 p.
3. AVALOS LINGAM, R.; ULLOA MEJÍA, E. 1983. Modelos Previk + Musra y Bilik + Musra; experiencias en el desarrollo y aplicación de modelos matemáticos en hidrología y recursos hidráulicos en América Latina. En Simposio Hydromath (152., 1983, Tegucigalpa). Tegucigalpa, Honduras, UNESCO. p. 13-30.
4. BASSO, E. 1967. Medidas de evaporación, proyecto de mejoramiento hidrometeorológico Centroamericano. Tegucigalpa, Honduras, Universidad de Honduras. Publicación no. 9. 24 p.
5. BASTERRECHEA DIAZ, M. 1978. Inventario de modelos matemáticos en hidrología y recursos hídricos. Tesis Mag. Sc. Recursos Hidráulicos. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria. 213 p.
6. CLARKE, R. T. 1973. Mathematical models in hydrology, irrigation and drainage paer 19, fodd and agriculture. Rome, Italy, Organization of the United Nations. 42 p.
7. DANISH HYDRAULIC INSTITUTE. 1,993. Mike 11; un microcomputador para modelar sistemas de rios y canales. Horsholm, Dinamarca. p. 4.
8. DOODGE, J. C. 1973. Linear theory of hydrologic systems. Washington, EE.UU. D.C., USDA, Thecnical Bol. no. 1468. 133 p.
9. EAGLESON, P. 1970. Dynamic hydrology. EE.UU., Mc Graw- Hill. 120 p.
10. EGGERT, H. ; DYHR NIELSEN, M. 1981. El proyecto del Susa; elaboración de modelos para la explotación de recursos hídricos. Dinamarca, Universidad Técnica, Instituto de Ingeniería Hidrodinámica e Hidráulica. p. 10-18
11. ESTADOS UNIDOS. ARMY CORPS OF ENGINEERING. 1987. HEC-1 flood hydrograph package, users manual; generalized computer program. Washington, D.C., EE.UU. p. 11-20.

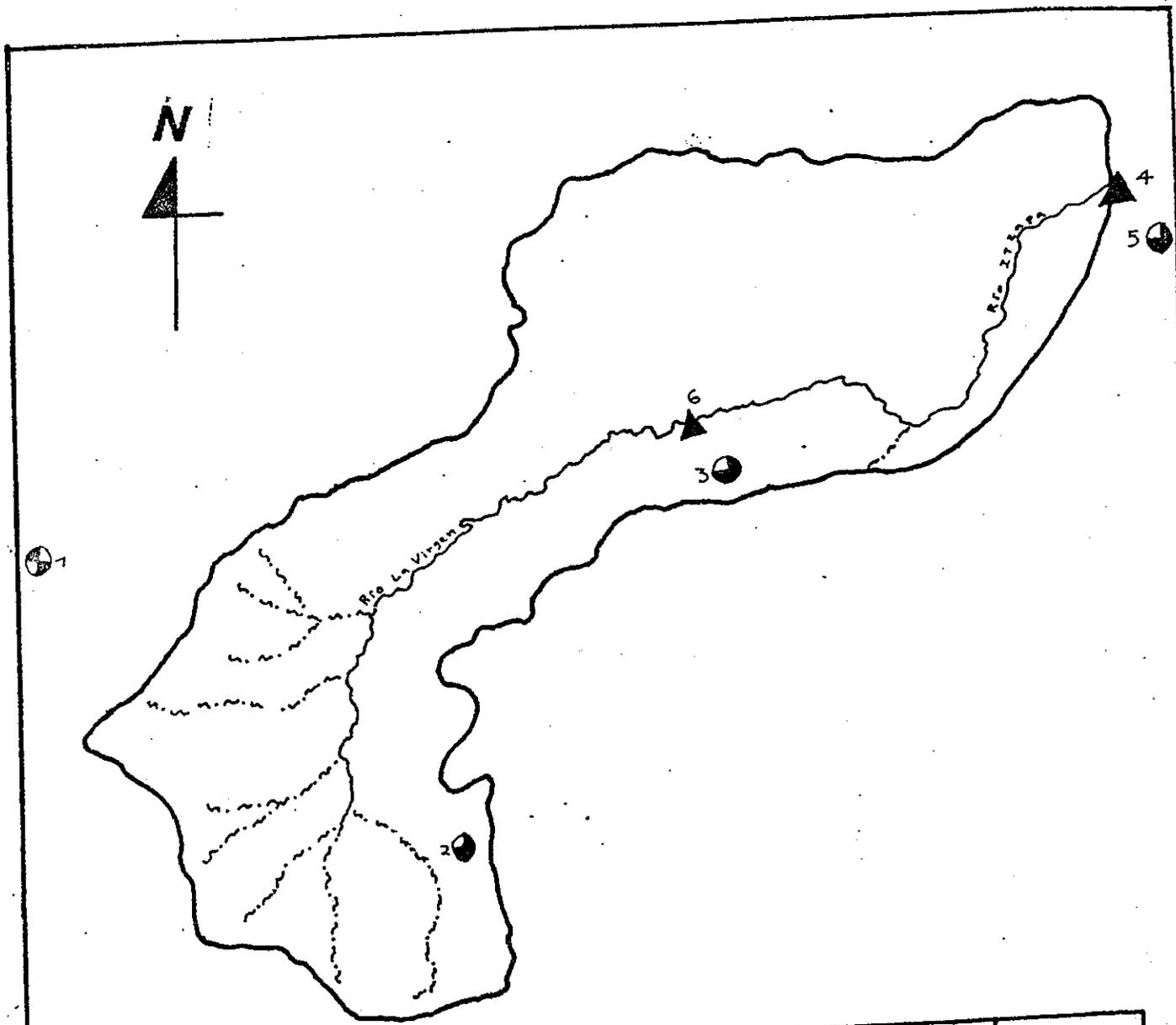
12. GUATEMALA. INSTITUTO GEOGRAFICO NACIONAL. 1975. Mapa climatológico preliminar de la república de Guatemala según el sistema Thornthwaite. Guatemala. Esc. 1:1000,000. Color.
13. ----- . 1975. Mapa geológico de la república de Guatemala, No. 2059 IVG. Guatemala. Esc. 1:50,000. Color.
14. ----- . 1977. Mapa de Chimaltenango de la república de Guatemala, No. 2059 IV. Guatemala. Esc. 1:50,000. Color.
15. ----- . INSTITUTO NACIONAL DE FOMENTO MUNICIPAL. UNIDAD EJECUTORA DE DESARROLLO DE PORYECTOS DE AGUA POTABLE RURAL. 1995. Diccionario hidrometereológico de Guatemala. Guatemala. p. 12.
16. ----- . INSTITUTO NACIONAL FORESTAL. 1983. Mapa de clasificación de zonas de vida de Guatemala a nivel de reconocimiento. Guatemala, Instituto Geográfico Militar. Esc. 1:600,000.
17. ----- . SECRETARIA GENERAL DEL CONSEJO NACIONAL DE PLANIFICACION ECONOMICA. 1980. Mapa de capacidad productiva de la tierra. Guatemala. Esc. 1:500,000. Color.
18. GUZMÁN, J. L.; GARCÍA, L. 1983. Modelos SGSIN, HEC-1 y CLS; experiencias en el desarrollo y aplicación de modelos matemáticos en hidrología y recursos hidráulicos en América Latina. *En* Simposio Hidrológico (152., 1983, Tegucigalpa). Tegucigalpa, Honduras, IAHS. p. 33.
19. HAAN, C.T. 1982. Hydrologico modeling of small watersheds. Michigan, EE.UU., American Society of Agricultural Engineers. 52 p.
20. HEMPEL, C.G. 1963. Explanation and prediction by covering laws; phylosophy of science. Ed. by Baumarin B. New York, EE.UU., McGraw-Hill. 148 p.
21. HERRERA IBAÑEZ, I. R. 1995. Manual de hidrológia. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía. 223 p.
22. HYDROLOGIC CONSEQUENCES OF RAIFALL AUGMENTATION, HYDRAULIC DIVISION. (97., 1975, London). 1975. Rainfall and Runoff. Ed. por A. M. Lumb. Inglaterra, London, HDHR. p. 12.
23. JUÁREZ, A. 1991. Modeling approach to prevent surface water pollution from a soil erosion point of view. Alemania, Universidad de Hannover, Institute of Hidrological. 42 p.

24. -----, 1992. Modelo EROFGM; un modelo de simulación matemática de los procesos hidrológicos y de erosión de cuencas; manual de la versión 1. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, ERIS. 38 p.
25. JUAREZ QUIM, D.H. 1987. Modelo paramétrico de simulación de caudales. Tesis Mag. Sc. Recursos Hidráulicos. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria. 79 p.
26. KOHDR, N.M. et al. 1994. Aplicación del modelo "neta" para evaluar la recarga de acuíferos implementado a sistemas de información geográfica. 2 ed. Guanajuato, México, Planificación de Recursos Hidráulicos. p 12.
27. LOPEZ RAMOS, A. D. 1993. Aplicación de un modelo hidrológico en la cuenca del río Serchil. Tesis Mag. Sc. Recursos Hidráulicos, Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, ERIS. 100 p.
28. LYNSLEY, R. K.; KOHLER, M.A.; PAULHUS JOSEPH, L.H. 1988. Hidrología para ingenieros. Trad. por Alejandro Deeb Jaime Iván Ordoñez y Fabio Castrillón. México, McGraw-Hill. 48 p.
29. MAZA, J. et al. 1993. Aplicación de modelos matemáticos de simulación hidrológica e hidráulica para estudios de ordenamiento territorial y uso del suelo; modelos ARHYMO, HEC1, HEC2. Catamarca, Argentina, RSL. p. 2.
30. NORSTEDT, U. et al. 1990. Reevaluación de las represas en Suecia y simulación mediante el Mike 11. Suecia, International Water Power and dam Construction. 10 p.
31. OZGA ZIELINSKA, M. 1976. Structure and operator functions of mathematical models of hydrologic systems, design of water resource system. Cambridge, EE.UU., Harvard University Press p. 19.
32. PEREZ ESPINOZA, M. 1967. Un paso más de C. W. Thornthwaite hacia una clasificación racional del clima. Ingeniería Hidráulica en México. 21(3):174-196.
33. PEREZ GAVILA, D. 1978. El modelo CLS; modelos de precipitación-escorrentía y taller de aplicación del modelo CLS. En Manual de Curso Corto (3., 1978, Guatemala). Guatemala, Universidad San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, ERIS. p. 31.
34. SÁNCHEZ AZOFEITA, A.R. 1990. Análisis hidrológico de crecidas con el modelo HEC-1. En Curso Regional Hidrología y Ciencias del Agua (2., 1990, C.R.). Costa Rica, Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería. p. 28.

35. SAVENIJE, H. H. G. 1995. Hidrología para ingenieros. En Curso Nacional de Drenaje Agrícola y Control de Inundación a Nivel de Postgrado (2., 1995, Guatemala). Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía. p. 35.
36. SIMMONS C.H.; TARANO J.M.; PINTO J.H. 1959. Clasificación a nivel de reconocimiento de los suelos de la república de Guatemala. Trad. por Pedro Tirado Sulsona. Guatemala, Ed. José de Pineda Ibarra. 1000 p.
37. SPAANS, W. et al. 1995. Duflow; un programa para microcomputadoras para la simulación de flujo unidimensional no estacionario en sistemas de canales abiertos. En Curso Nacional de Drenaje Agrícola y Control de Inudaciones a Nivel de Postgrado (2., 1995, Guatemala). Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía. p. 13.
38. UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA. FACULTAD DE AGRONOMIA, INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGRONOMICAS; DIRECCION GENERAL DE INVESTIGACION. 1995. Informe anual de 1995; proyecto de investigación básica para la planificación del manejo del a cuenca experimental del Río Itzapa. Guatemala. 50 p.
39. VANEGAS CHACON, E. A. 1993. Using "Saltmod" to predict desalinization in the Leziria Grande Polder, Portugal. Tesis Mag. Sc. of Science in Soil and Water, with a specialization in Land Drainage. Netherlands, Wageningen Agricultural University the Netherlands. 80 p.
40. VERWEY, A., 1995. Introducción a los modelos. En Curso Nacional de Drenaje Agrícola y Control de Inudaciones a Nivel de Postgrado (2., 1995, Guatemala). Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía. p. 8.



10. APENDICES



Número	Estación	Símbolo	Característica
1	Est. El Recuerdo	●	Pluviométrica
2	Est. Chicazanga	●	Meteorológica
3	Est. Xipacay	●	Meteorológica
4	Est. Xipacay	▲	Hidrométrica
6	Est. Ajameda	●	Meteorológica
6	Est. El Puente	▲	Hidrográfica

Fuente: Proyecto Información Básica para la Planificación de la cuenca del Río Itzapa.
 Figura 24A Ubicación de estaciones hidrometeorológicas.
 UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
 Escala 1:50,000

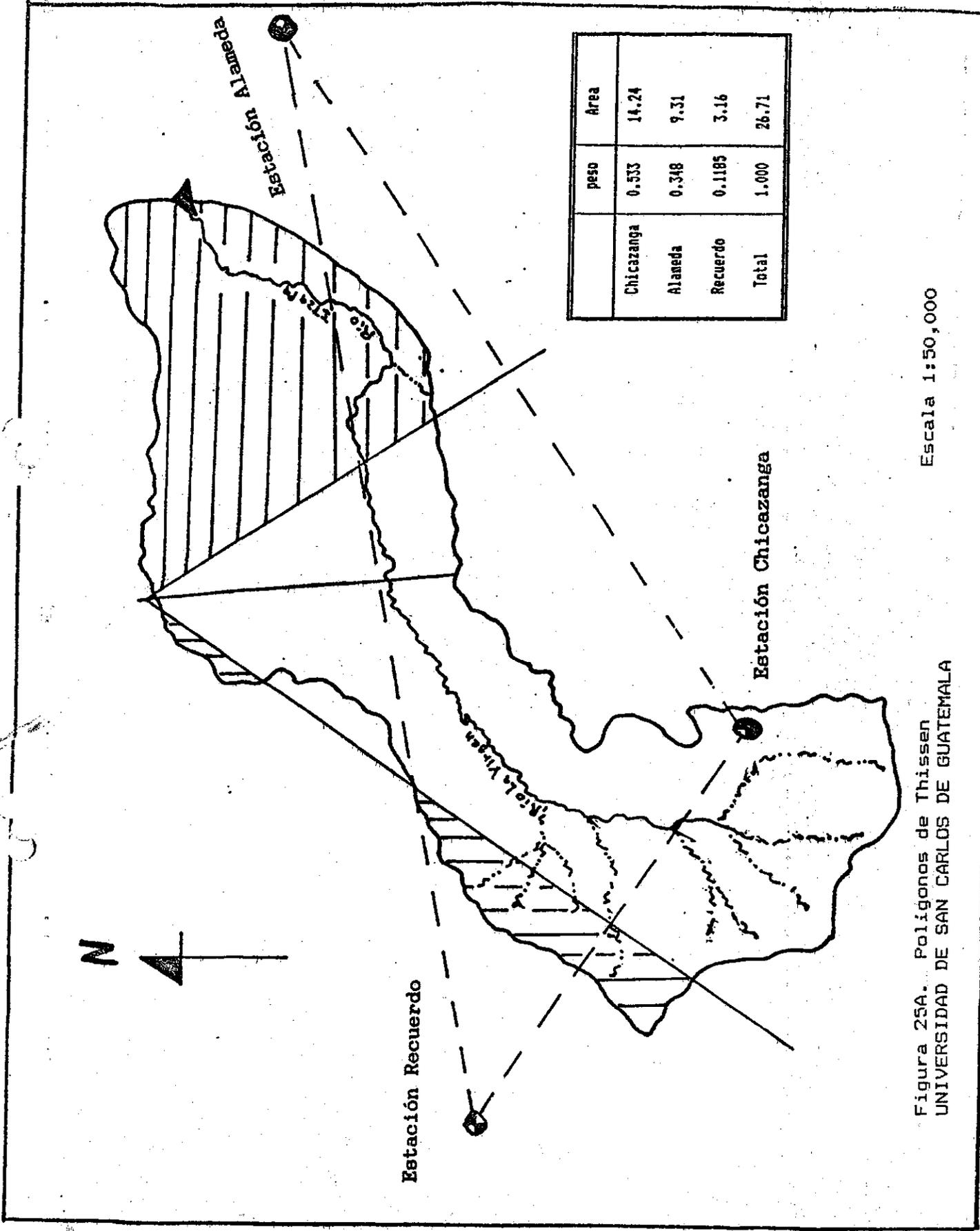
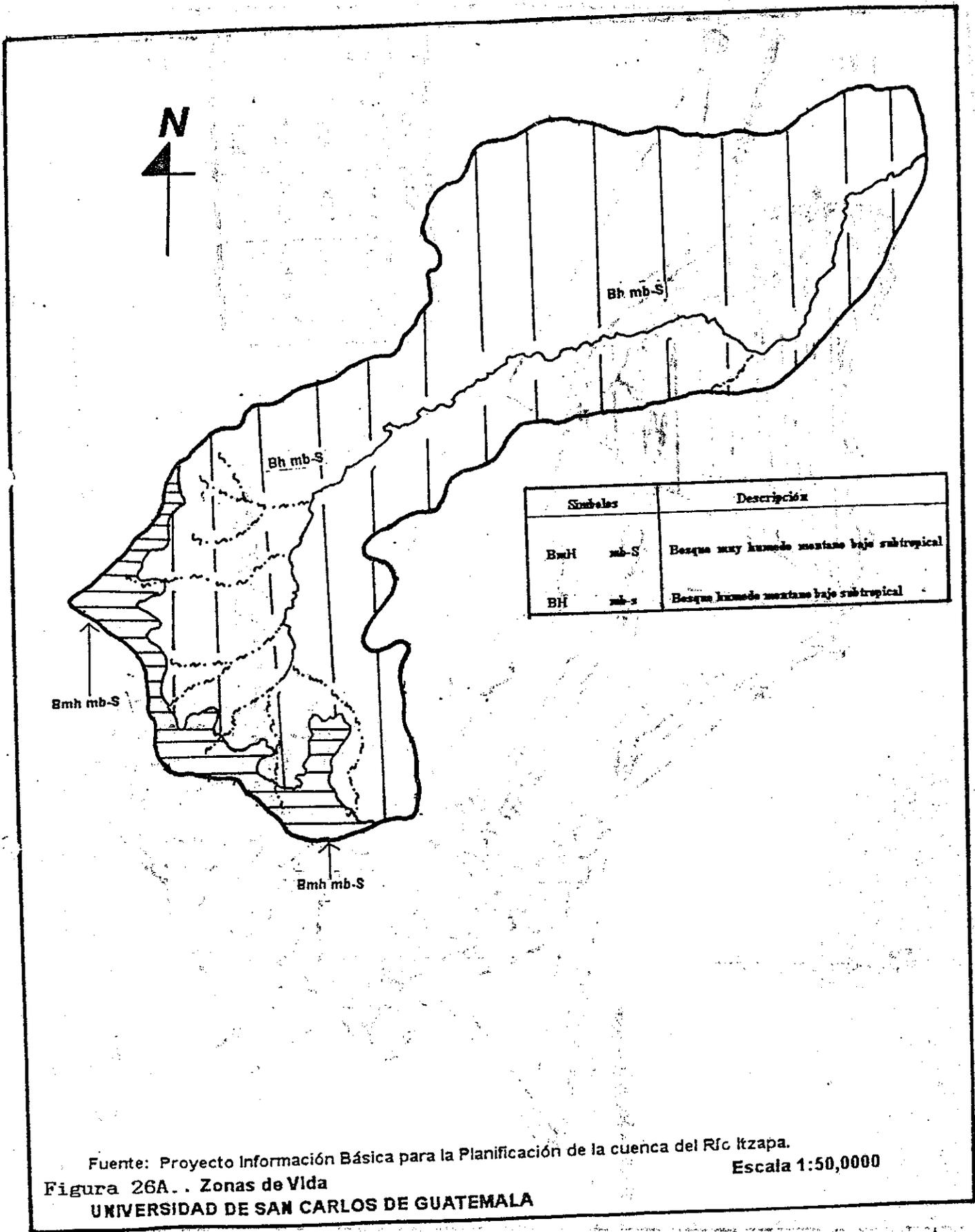


Figura 25A. Poligonos de Thissen
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Escala 1:50,000

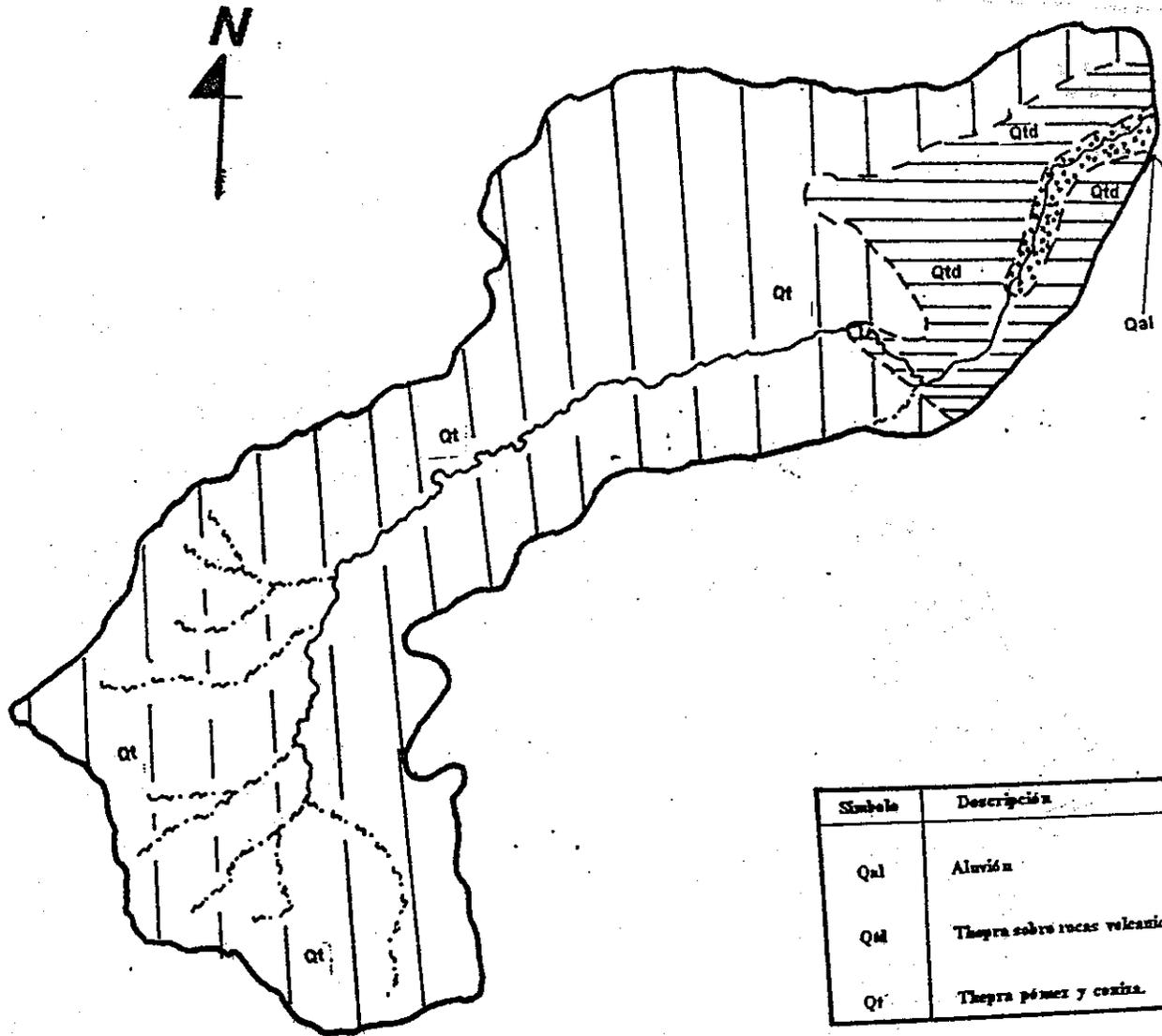


Fuente: Proyecto Información Básica para la Planificación de la cuenca del Rfo Itzapa.

Escala 1:50,000

Figura 26A.. Zonas de Vida

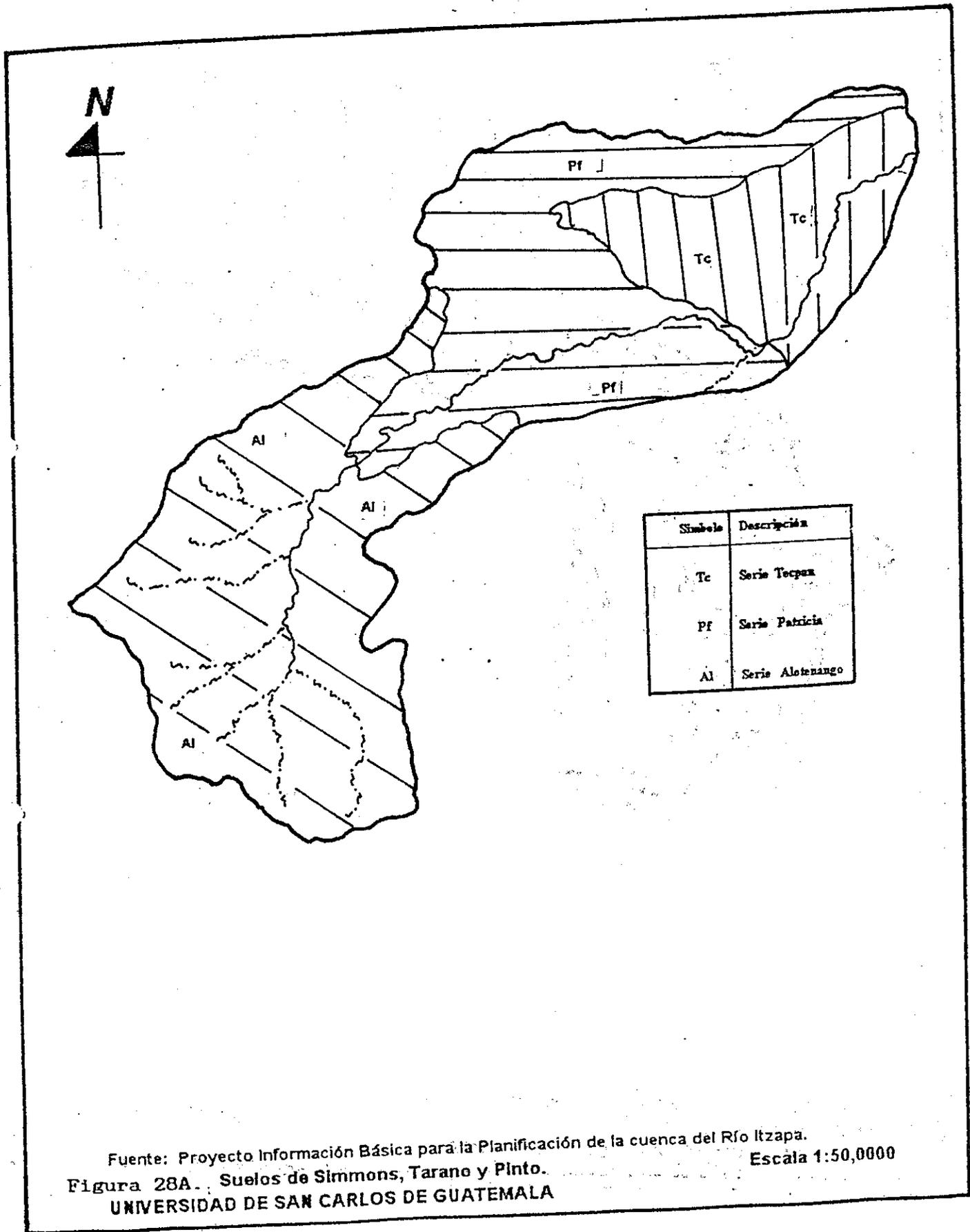
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



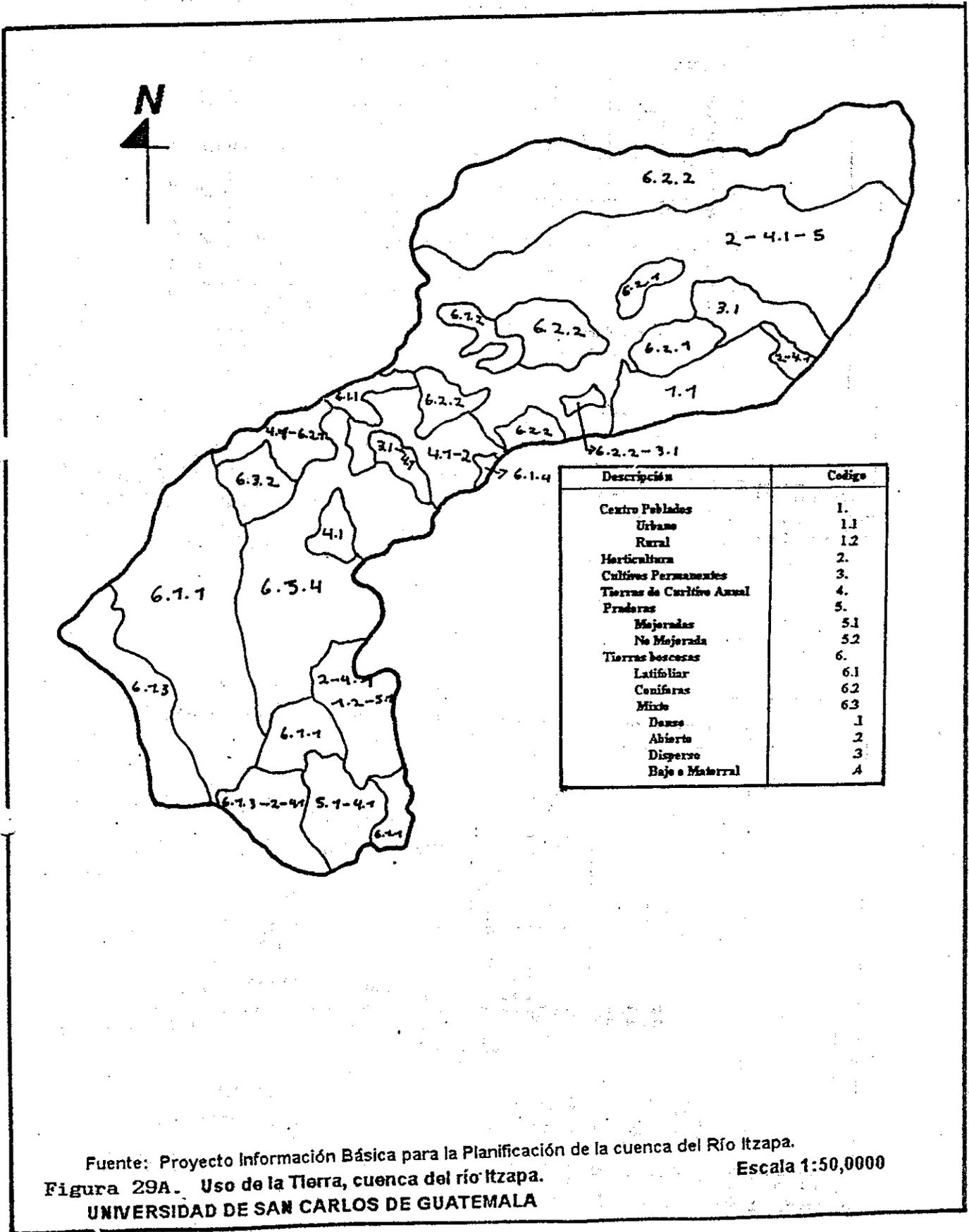
Símbolo	Descripción
Qal	Aluvión
Qtd	Tierra sobre rocas volcánicas.
Qt	Tierra pómez y ceniza.

Fuente: Mapa del Instituto Geográfico Nacional
 Figura 27A.- Geología
 UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Escala 1:50,000



Fuente: Proyecto Información Básica para la Planificación de la cuenca del Río Itzapa.
 Figura 28A. Suelos de Simmons, Tarano y Pinto.
 UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
 Escala 1:50,000



Fuente: Proyecto Información Básica para la Planificación de la cuenca del Río Itzapa.
 Figura 29A. Uso de la Tierra, cuenca del río Itzapa. Escala 1:50,000
 UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

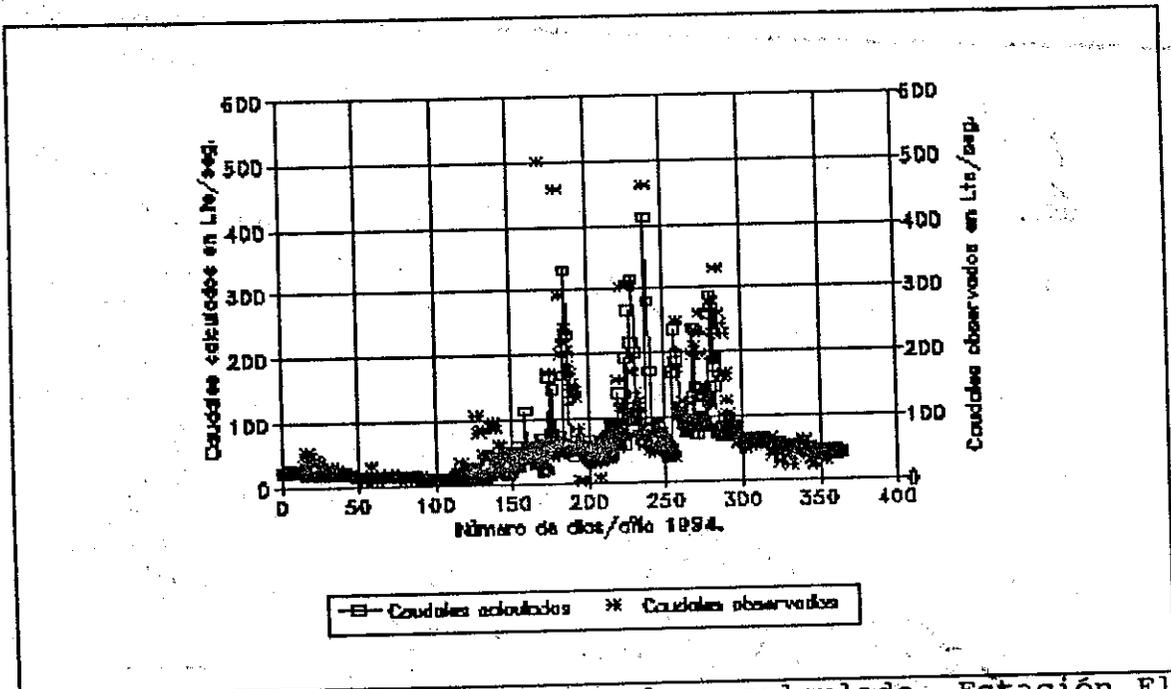


Figura 30A. Hidrograma observado y calculado, Estación El puente, cuenca río La Virgen, San Andrés Itzapa, Chimaltenango.

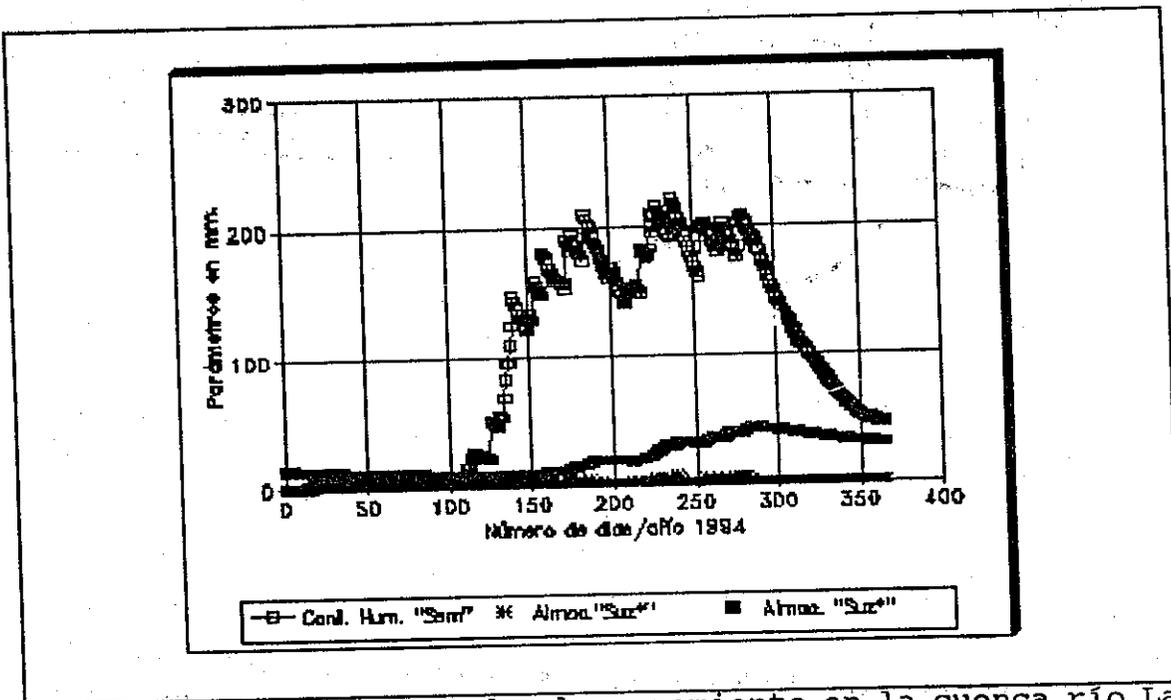


Figura 31A. Parámetros de almacenamiento en la cuenca río La Virgen San Andrés Itzapa, Chimaltenango.



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
 FACULTAD DE AGRONOMIA
 INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
 AGRONOMICAS

Sem-007/97

LA TESIS TITULADA: " SIMULACION HIDROLOGICA PARA LA CALIBRACION DE PARAMETROS DE ESCORRENTIA, EN LA CUENCA DEL RIO LA VIRGEN, SAN ANDRES ITZAPA, CHIMALTENANGO."

DESARROLLADA POR EL ESTUDIANTE: EDWIN GUILLERMO SANTOS MANCILLA

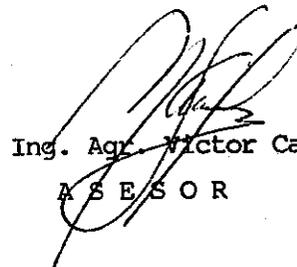
CARNET: 8515611

HA SIDO EVALUADA POR LOS PROFESIONALES: Ing. Agr. Eddy Vanegas
 Ing. Agr. Gustavo Mendez
 Ing. Agr. Isaac Herrera

Los asesores y las autoridades de la Facultad de Agronomía, hacen constar que ha cumplido con las normas Universitarias y Reglamentos de la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

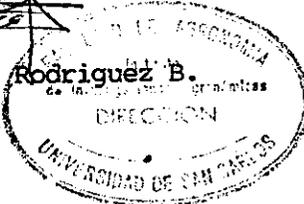

 Ing. Civil Juan Jose Sandoval

A S E S O R

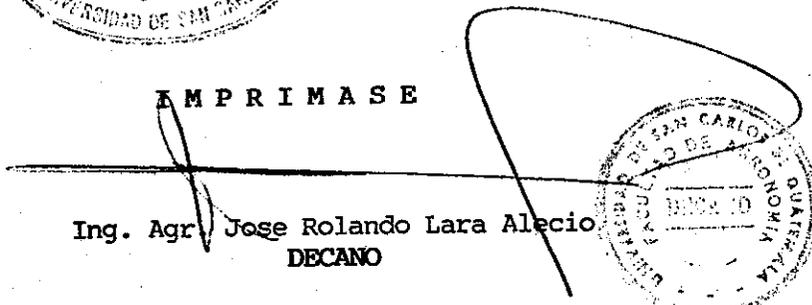

 Ing. Agr. Victor Cabrera

A S E S O R


 Ing. Agr. Fernando Rodríguez B.
 Director del IIA



IMP R I M A S E


 Ing. Agr. Jose Rolando Lara Alecio
 DECANO



cc Control acad/
 Archivo

APARTADO POSTAL 1545 • 01091 GUATEMALA, C. A.

TELEFONO: 769794 • FAX: (5022) 769770

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..