



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**MODELACIÓN LLUVIA – ESCURRIMIENTO DE
PARÁMETROS DISTRIBUIDOS PARA LA CUENCA
CHICOASÉN**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA :

PATRICIA LABRADA MONTALVO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA



Ciudad Universitaria

Marzo 2016

CDMX



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	ANTECEDENTES	8
1.2	OBJETIVO	9
2	MODELO PARA PRONÓSTICO DE ESCURRIMIENTO (MPE)	10
2.1	Descripción del proceso lluvia-escorrimento	10
2.2	Características fisiográficas principales	11
2.3	Concepto de sistema	12
2.4	Concepto de modelo	13
2.4.1	Clasificación de los modelos	14
2.4.2	Clasificación de los modelos matemáticos	14
2.5	Modelos de parámetros concentrados y de parámetros distribuidos	15
2.6	Modelo Distribuido MPE	18
2.7	Método empleado para el cálculo de la precipitación	18
2.8	Método empleado para la producción del escurrimiento	20
2.9	Método para el tránsito del escurrimiento	27
3	INFORMACIÓN DE LAS ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS E HIDROMÉTRICAS	33
3.1	Características generales	36
3.1.1	La precipitación y su importancia	43
3.2	Selección de las tormentas de análisis para la cuenca Chicoasén	45
4	OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS HIDROLÓGICOS MEDIANTE UN SIG PARA LAS CUENCAS BOQUERÓN, SANTO DOMINGO Y CHICOASÉN	50
4.1	Área de la Cuenca	52
4.1.1	Área de la cuenca Chicoasén	54
4.1.2	Área de la subcuenca Boquerón	55
4.1.3	Área de la subcuenca Santo Domingo	56
4.1.4	Área de la subcuenca Acala	57
4.2	Longitud del cauce principal	58
4.2.1	Cauce principal de la cuenca Chicoasén	59
4.2.2	Cauce principal de la subcuenca Boquerón	60

4.2.3	Cauce principal de la subcuenca Santo Domingo	61
4.2.4	Cauce principal de la subcuenca Acala	62
4.3	Pendiente del cauce principal	63
4.4	Tiempo de Concentración	64
4.5	Geología, Edafología y Cobertura vegetal	65
4.6	Determinación del número de curva.....	69
5	MODELO DE LLUVIA-ESCURRIMIENTO PARA LA CUENCA CHICOASÉN..	71
5.1	Análisis de la Cuenca Boquerón	72
5.2	Análisis de la Cuenca Santo Domingo	76
5.3	Análisis de la Cuenca Chicoasén	81
5.3.1	Obtención de los gastos de Chicoasén por cuenca propia.....	83
5.3.2	Tiempo de pronóstico	85
6	CONCLUSIONES	86
7	REFERENCIAS	87

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: DIVISIÓN DE LA CUENCA GRIJALVA.	2
FIGURA 2: SISTEMA HIDROELÉCTRICO EN EL RÍO GRIJALVA. CFE.	3
FIGURA 3: UBICACIÓN DE LA PRESA CHICOASÉN EN LA CUENCA GRIJALVA.	4
FIGURA 4: PRESA CHICOASÉN.	6
FIGURA 5: CICLO HIDROLÓGICO. FUENTE: SÁNCHEZ SAN ROMÁN. UNIVERSIDAD DE SALAMANCA (2011).	11
FIGURA 6: CONCEPTO DE SISTEMA.	12
FIGURA 7: MODELO DE CAJA NEGRA.	16
FIGURA 8: TABLA CON PARÁMETROS HIDROLÓGICOS PARA EL MPE. ARCVIEW.	26
FIGURA 9: MODELO DE ESCURRIMIENTO DIRECTO CONCEPTUAL DE MODCLARK PARA PARÁMETROS DISTRIBUIDOS.	27
FIGURA 10: CUENCAS HIDROLÓGICAS CON ESTACIONES HIDROMÉTRICAS Y CLIMATOLÓGICAS AUTOMÁTICAS DEL IIE	34
FIGURA 11: LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES DENTRO DE LA CUENCA CHICOASÉN. FUENTE: IIE	35
FIGURA 12. ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA.	36
FIGURA 13: ESTACIONES HIDROMÉTRICAS DE LA CUENCA CHICOASÉN.	38
FIGURA 14: PLUVIÓMETRO PROFESIONAL.	44
FIGURA 15: PLUVIÓGRAFO DE BALANCÍN.	44
FIGURA 16: DATOS DE LAS ESTACIONES HIDROMÉTRICAS Y CLIMATOLÓGICAS DEL AÑO 2011 DESCARGADOS DE LA PÁGINA DEL IIE.	46
FIGURA 17: GASTO Y PRECIPITACIÓN MEDIDO EN LA CUENCA HIDROMÉTRICA DE BOQUERÓN EN EL 2010, ÉPOCA DE LLUVIAS. PÁGINA DEL IIE.	47
FIGURA 18: HIETOGRAMA DE LA CUENCA CHICOASÉN.	48
FIGURA 19: HIDROGRAMA DE LA CUENCA CHICOASÉN DEL AÑO 2010.	48
FIGURA 20: MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES MDE DE CHICOASÉN. ARCVIEW.	51
FIGURA 21: TIPO DE ESTACIONES EN LA CUENCA CHICOASÉN. ARCVIEW.	53
FIGURA 22: CUENCA CHICOASÉN. ARCVIEW.	54
FIGURA 23: SUBCUENCA BOQUERÓN. ARCVIEW.	55
FIGURA 24: SUBCUENCA SANTO DOMINGO. ARCVIEW.	56

FIGURA 25: SUBCUENCA ACALA. ARCVIEW.....	57
FIGURA 26: CAUCE PRINCIPAL Y TRIBUTARIOS DE UNA CUENCA.	59
FIGURA 27: CAUCE PRINCIPAL DE LA CUENCA CHICOASÉN.	59
FIGURA 28: CAUCE PRINCIPAL DE LA SUBCUENCA BOQUERÓN.....	60
FIGURA 29: CAUCE PRINCIPAL DE LA SUBCUENCA SANTO DOMINGO.	61
FIGURA 30: CAUCE PRINCIPAL DE LA SUBCUENCA ACALA.....	62
FIGURA 31: PERMEABILIDAD A LO LARGO DE LA CUENCA CHICOASÉN. ARCVIEW.	66
FIGURA 32: USO DE SUELO EN CHICOASÉN. ARCVIEW.	67
FIGURA 33: EDAFOLOGÍA EN LA CUENCA CHICOASÉN. ARCVIEW.	68
FIGURA 34: DISTRIBUCIÓN DE LA VEGETACIÓN EN LA CUENCA CHICOASÉN. INEGI, SIMULADOR DE FLUJOS DE AGUA DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS (SIATL).....	68
FIGURA 35: DATOS CLIMÁTICOS EN LA CUENCA CHICOASÉN. INEGI, SIMULADOR DE FLUJOS DE AGUA DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS (SIATL).....	69
FIGURA 36: NÚMERO DE CURVA DE LA CUENCA CHICOASÉN. ARCVIEW.....	70
FIGURA 37: ESTACIONES DENTRO DE LA CUENCA BOQUERÓN. ARCVIEW.	72
FIGURA 38: CUENCA BOQUERÓN, PERIODO 20 DE SEPTIEMBRE AL 10 DE OCTUBRE 2010. MPE	74
FIGURA 39: CUENCA BOQUERÓN, PERIODO 14 DE SEPTIEMBRE AL 24 DE OCTUBRE 2011. MPE.....	74
FIGURA 40: CUENCA BOQUERÓN, PERIODO 1 DE SEPTIEMBRE AL 18 DE OCTUBRE 2012. MPE	75
FIGURA 41: CUENCA BOQUERÓN, PERIODO 14 DE SEPTIEMBRE AL 29 DE OCTUBRE 2014. MPE	75
FIGURA 42: ESTACIONES DENTRO DE LA CUENCA SANTO DOMINGO. ARCVIEW.....	76
FIGURA 43: CUENCA SANTO DOMINGO, PERIODO 20 DE SEPTIEMBRE AL 10 DE OCTUBRE 2010. MPE.....	79
FIGURA 44: CUENCA SANTO DOMINGO, PERIODO 14 DE SEPTIEMBRE AL 24 DE OCTUBRE 2011. MPE.....	80
FIGURA 45. ESTACIONES DENTRO DE LA CUENCA ACALA. ARCVIEW	81

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: CARACTERÍSTICAS DE LA CORTINA DE LA PRESA CHICOASÉN.	5
TABLA 2: CASA DE MÁQUINA DE LA PRESA CHICOASÉN.....	5
TABLA 3: CLASIFICACIÓN HIDROLÓGICA DE LOS TIPOS DE SUELOS SEGÚN SU PERMEABILIDAD.	23
TABLA 4: NÚMERO DE CURVA SEGÚN LA COBERTURA DE SUELO.....	25
TABLA 5: INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN POR EVENTO CLIMÁTICO.....	36
TABLA 6: ESTACIONES AUTOMÁTICAS DE CFE DENTRO DE LA CUENCA CHICOASÉN.	42
TABLA 7: FECHAS SELECCIONADAS PARA CALIBRAR LA CUENCA CHICOASÉN.	49
TABLA 8: CLASIFICACIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS POR SU TAMAÑO. (INEGI 2007).....	52
TABLA 9: ÁREA Y PERÍMETRO DE CADA SUBCUENCA EN CHICOASÉN.....	58
TABLA 10: LONGITUD DE LOS CAUCES PRINCIPALES. ARCVIEW	62
TABLA 11: PENDIENTE DE LOS CAUCES PRINCIPALES. ARCVIEW.	63
TABLA 12: PARÁMETROS HIDROLÓGICOS DE LA CUENCA CHICOASÉN.....	64
TABLA 13: TIEMPO DE CONCENTRACIÓN DE CADA CUENCA.....	64
TABLA 14: FECHAS SELECCIONADAS PARA LA CALIBRACIÓN DE LA CUENCA BOQUERÓN.....	73
TABLA 15: PARÁMETROS DE BOQUERÓN.....	73
TABLA 16: FECHAS SELECCIONADAS PARA CALIBRAR LA CUENCA SANTO DOMINGO.	77
TABLA 17: PARÁMETROS DE SANTO DOMINGO.	78
TABLA 18: PARÁMETROS DE ACALA. MPE	82
TABLA 19: PARÁMETROS ÚNICOS DE LA CUENCA BOQUERÓN. MPE.	83
TABLA 20: PARÁMETROS ÚNICOS DE LA CUENCA SANTO DOMINGO. MPE.....	84
TABLA 21: PARÁMETROS DE CHICOASÉN. MPE.....	85
TABLA 22: TIEMPO DE PRONÓSTICO DE TODAS LAS CUENCAS.	85

A la memoria de mi padre, Oscar Labrada, por ser el mejor en todos los aspectos, por consentirme y cuidarme el poco tiempo que estuvo conmigo, por esos recuerdos y enseñanzas que me han formado hasta hoy, por ser mi ejemplo de vida. Siempre serás una parte de mí.

A la mujer que más admiro y amo en la vida, mi madre, Patricia Montalvo, porque sin ella nada de esto sería posible. Gracias por todo el cariño, amor, consejos y por esa alegría que te caracteriza, por sacarme adelante y enseñarme lo importante de la vida.

A mis hermanos, mejores amigos e ingenieros favoritos, Oscar y Daniel Labrada. A ustedes por estar siempre conmigo en todos los momentos, por alentarme a seguir adelante y siempre cuidarme.

A mi sobrino Oscar, por traer alegría, felicidad y amor a mi vida.

A Mauricio, por acompañarme a lo largo de esta etapa y ayudarme a concluirla.

A mis tíos, Jorge, Griselda y primos Karen, Ale y Erick, por las risas y momentos en familia.

A mi familia; tías, tíos y primos por todos esos recuerdos que me han hecho lo que soy.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por permitirme cursar y concluir mis estudios en la mejor universidad para alcanzar una meta más en mi vida.

Al Instituto de Ingeniería, por todo el apoyo brindado a lo largo de este trabajo.

Al Dr. Ramón Domínguez Mora, por su tiempo, dedicación y atenciones brindadas para la elaboración de esta tesis.

A la M. en I. Gabriela Esquivel Garduño, por su tiempo y ayuda, por transmitirme su conocimiento y experiencia.

1 INTRODUCCIÓN

La relación entre lluvias y escurrimientos es utilizada para el diseño de obras hidráulicas, pronósticos de volúmenes de escurrimiento y la evaluación de proyectos, así como para prevenir y alertar a la población en caso de ser necesario.

Además de fáciles y menos costosos de recoger, los datos de lluvia son más abundantes que los de escurrimiento. Es por eso que cuando no se cuenta con datos de escurrimientos, podemos apoyarnos en las relaciones lluvia-escurrimiento donde a partir de registros de precipitación se puede inferir la información de escurrimiento.

Las relaciones lluvia-escurrimiento usualmente se establecen en dos etapas: la determinación del volumen de escurrimiento que resulta de un volumen de lluvia producido durante un período de tiempo dado, y la distribución del volumen de escurrimiento en función del tiempo. La primera etapa es necesaria debido a la división de la lluvia en evapotranspiración, infiltración y escurrimiento. La segunda se requiere para tomar en cuenta el tiempo de recorrido y la atenuación de la onda de escurrimiento que se genera por la lluvia (Campos 2007).

La cuenca que se analizó, Chicoasén, se encuentra dentro de la Cuenca Grijalva, específicamente en el medio Grijalva.

La Cuenca Grijalva tiene un área de alrededor de 58 025 km²; comprende parte de Guatemala y el resto continúa en México. Sus coordenadas geográficas extremas son 94° 14' y 91° 22' oeste, y 14° 56' 20" y 18° 39' norte. Abarca los estados de Chiapas y Tabasco, y una pequeña parte de Oaxaca y Veracruz. La cuenca se divide en Cuenca alta, media y baja; el Alto y Medio Grijalva se ubica en la Depresión Central de Chiapas, en el centro de este Estado, es una extensa zona semiplana bordeada por la Sierra Madre, los Altos y las Montañas del Norte de Chiapas. En el Bajo Grijalva se ubica la Sierra del Norte de Chiapas, son una serie de serranías separadas por alargados valles que bordean a los Altos y las Montañas del Oriente. La disposición de las montañas permite interceptar la humedad que cargan los vientos del Golfo de México, lo que propicia un clima húmedo con lluvias todo el año. El Bajo Grijalva también presenta una planicie que se ubica en la Llanura Costera del Golfo, esta llanura es ocupada en su mayoría por el estado de Tabasco. A su vez, está formada por grandes cantidades de aluvión acarreado por los ríos más caudalosos del país Papaloapan, Coatzacoalcos, Grijalva y Usumacinta, los cuales atraviesan la provincia para desembocar en la parte sur del Golfo de México.

En la figura 1 se muestra la división de la cuenca Grijalva.

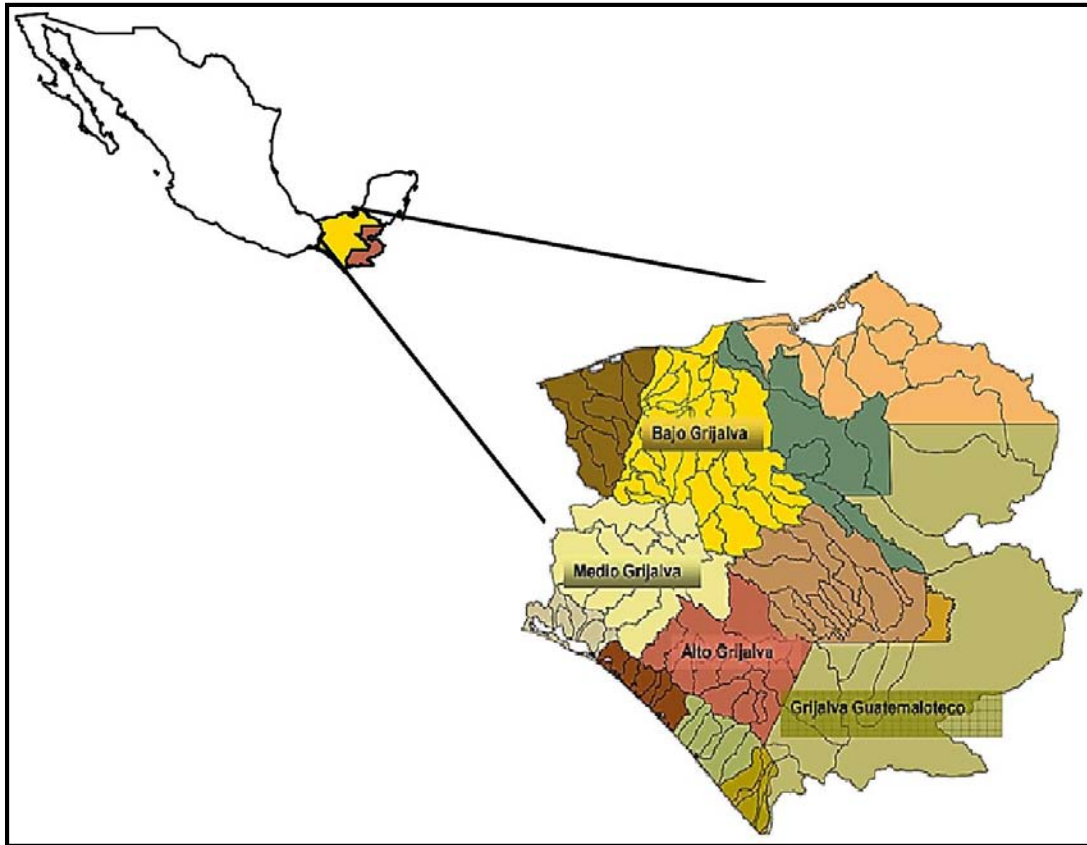


Figura 1: División de la cuenca Grijalva.

El cauce principal de las Subregiones Hidrológicas Alto, Medio y Bajo Grijalva, es el río Grijalva, el cual tiene una longitud total de aproximadamente 700 kilómetros

El río Grijalva nace en Guatemala en la Sierra de Cuchumatanes, entra a México, recorriendo la depresión central de Chiapas, donde sus aportaciones son primero reguladas a través de la presa La Angostura en el Alto Grijalva, aguas abajo el río Grijalva bordea la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Capital del estado de Chiapas, aguas abajo se ubica la presa Chicoasén, la más eficiente en generación eléctrica del país, posteriormente el Grijalva cuenta con las aportaciones por margen izquierda del río La Venta y por la margen derecha de los ríos Chicoasén y Yamonho, donde se ubica la presa Malpaso, después recibe las aportaciones de varias corrientes que dan origen al río Mezcalapa, como se le llama localmente al río Grijalva, después se bifurca en los ríos Samaria por su margen izquierda, el cual desemboca en el golfo de México en la Barra de Chiltepec después de varias bifurcaciones, y el río Carrizal por su margen derecha, este último cruza la ciudad de Villahermosa, capital del estado de Tabasco, donde recibe las aportaciones de los ríos que nacen en las montañas del Bajo Grijalva. Después de Villahermosa continúa el río Grijalva hasta confluir con el río Usumacinta para después desembocar al golfo de México.

El volumen medio anual que escurre hacia la desembocadura del Río Grijalva se encuentra alrededor de los 36,500 millones de m³ anuales, si a este volumen añadimos el volumen medio anual del río Usumacinta y la corriente principal de la cuenca Grijalva Usumacinta, la cantidad de agua dulce que desemboca al Golfo de México es de alrededor de 100,000 millones de m³ al año.

Sobre el río Grijalva se encuentra el Sistema Hidroeléctrico más importante del país, conformado por los embalses de las presas La Angostura, Chicoasén, Malpaso y Peñitas. Entre la presa “La Angostura” y la presa “Chicoasén”, se encuentra la cuenca Chicoasén con un área de 7553 km². En la cuenca propia de Chicoasén, el régimen pluviométrico establece dos periodos definidos, de julio a diciembre se presentan precipitaciones máximas, producto de las perturbaciones ciclónicas que se generan en el Golfo de México y el Mar Caribe, y ocasionalmente las del Océano Pacífico. El segundo periodo es el de estiaje, que comprende los meses de diciembre a junio.

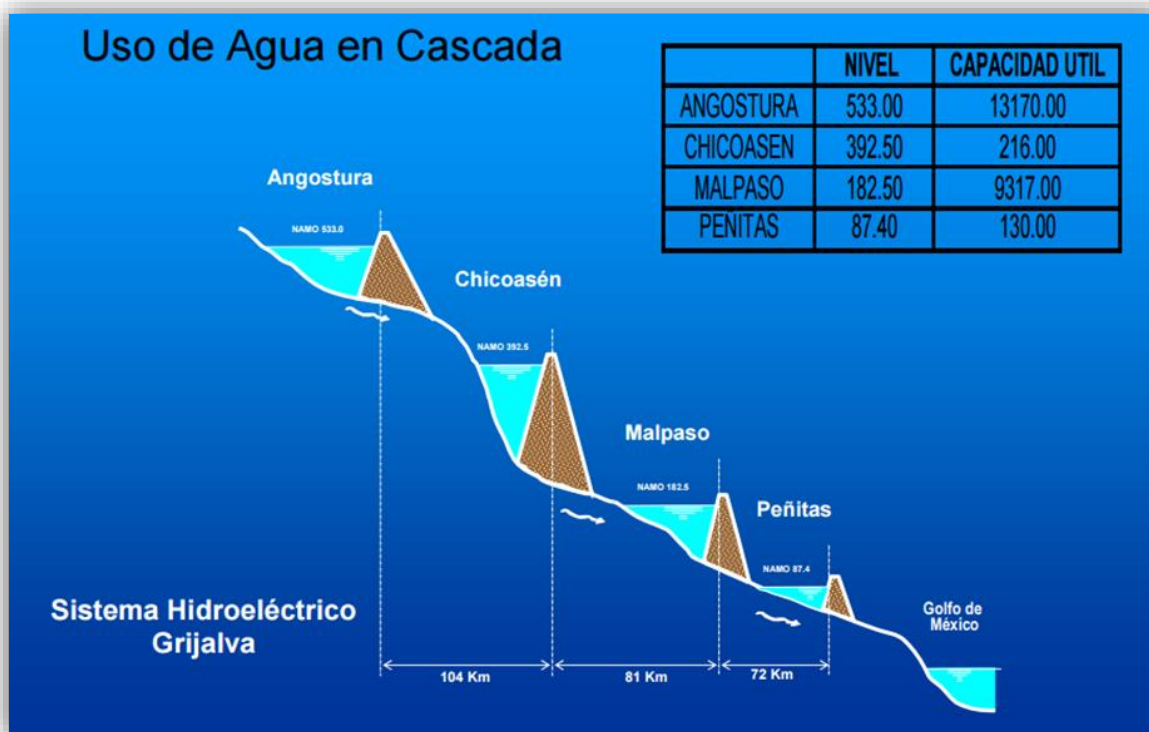


Figura 2: Sistema Hidroeléctrico en el río Grijalva. CFE.

La Presa Ing. Manuel Moreno Torres “Chicoasén” se construyó entre los años de 1974 a 1980 en el estado de Chiapas sobre el río Grijalva, en el municipio de Chicoasén. Se localiza 104 km aguas abajo de la Presa La Angostura, al final del Parque Nacional Cañón del Sumidero a 41km al noreste de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Sus coordenadas geográficas son 16°56'29" de latitud norte y 93°06'03" de longitud oeste. En la figura 2, puede verse la ubicación de la presa en la cuenca Grijalva.

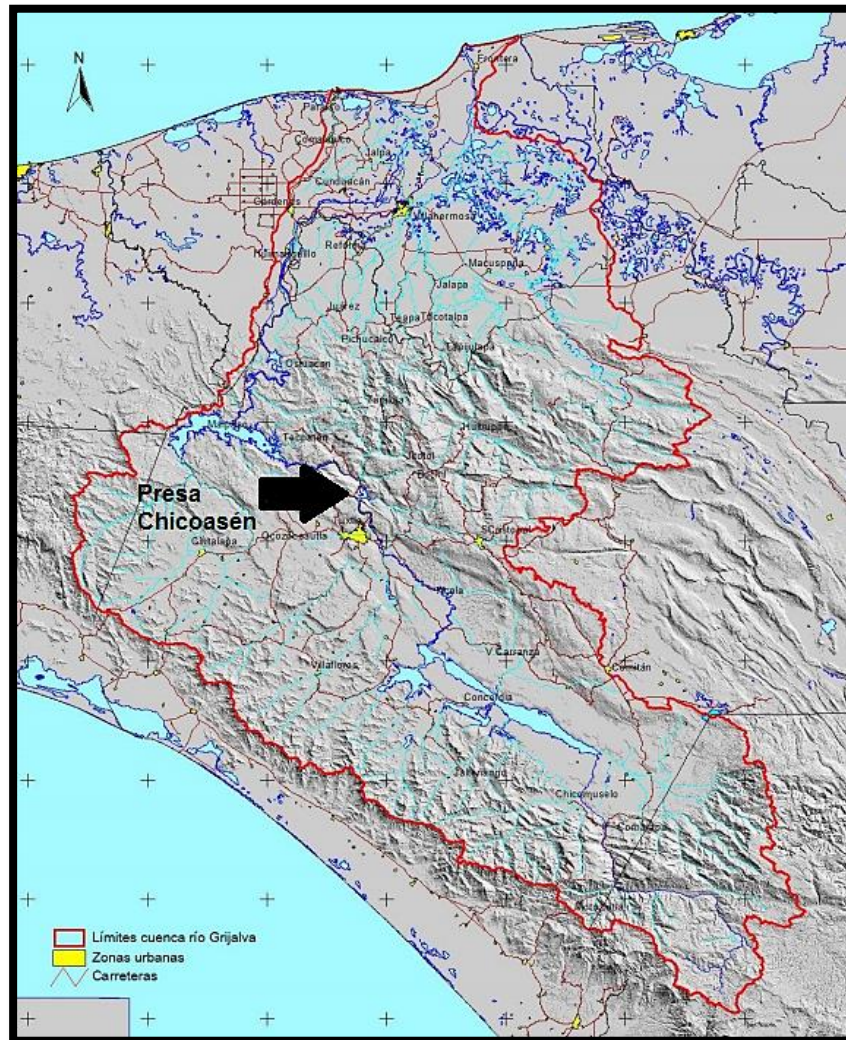


Figura 3: Ubicación de la Presa Chicoasén en la Cuenca Grijalva.

La Presa Chicoasén es la tercera en construirse del Plan Integral del río Grijalva. Las características hidrológicas, topográficas, geológicas y económicas del sitio hacen que esta central hidroeléctrica se convierta en la más poderosa para generar energía eléctrica anual en México.

La presa almacena 1376 hm³ de agua, con una generación media anual de 4787,42 GWh. Se forma de las corrientes que vienen de la cuenca del Alto del río Grijalva y afluentes Sabinal, Suchiapa, Santo Domingo y Hondo.

Las características generales de su cortina son las siguientes:

CORTINA	
Tipo	Enrocamiento
Altura Máxima	261 m
Elevación de la corona	405 msnm
Ancho de la corona	25 m
Longitud de la corona	584 m
EMBALSE	
NAME	395 msnm
NAMO	388 msnm
NAMINO	380 msnm

Tabla 1: Características de la cortina de la Presa Chicoasén.

La cortina de 261 m de altura, la convierte en una de las presas más altas del mundo y de México.

Como planta hidroeléctrica tiene las siguientes características:

CASA DE MÁQUINAS	
Tipo	Subterráneas
Turbinas	8 Francis
Capacidad	300 MW c/u
POTENCIA Y GENERACIÓN	
Capacidad instalada	2400 MW
Generación media anual	7653 GWh
Factor de planta	36.30 %

Tabla 2: Casa de máquina de la Presa Chicoasén.

Sus turbinas y generadores están alojados en una caverna excavada en la roca a 200 m de profundidad. Se considera como la cuarta planta de generación de energía hidroeléctrica más productiva del mundo. La energía eléctrica generada por esta planta abastece 35% del consumo nacional de electricidad.

La obra de desvío, consta de dos túneles excavados en la margen derecha, de sección portal sin revestir, de 13 m de ancho y 13 m de altura. Las ataguías de

materiales graduados forman parte de la cortina, la de aguas arriba con 61 m de altura y de 26 m la de aguas abajo.

La obra de excedencia está formada por tres vertedores en túnel alojados en la margen izquierda, controlados por compuertas radiales. El acceso del agua a los vertedores es mediante un canal excavado a cielo abierto, de ancho variable. En cada uno de los vertedores se tiene tres compuertas radiales de 8.40 m de ancho por 19 m de altura. La cresta del cimacio, tipo Creager, se fijó a una elevación de 373 m y permite evacuar un gasto de 15,000 m³/s.



Figura 4: Presa Chicoasén.

El presente trabajo consta de cinco capítulos; en el primer capítulo se da una introducción al programa MPE, explicando los modelos y métodos matemáticos utilizados para su funcionamiento.

El segundo capítulo muestra la información y las características de las estaciones climatológicas e hidrométricas dentro de la cuenca de estudio, así como el análisis y criterio que fue necesario utilizar para la selección de tormentas extraordinarias.

En el tercer capítulo se describe el procedimiento para obtener los parámetros hidrológicos de la cuenca mediante el programa ArcView 3.2 y sus resultados correspondientes.

En el cuarto capítulo se realiza la aplicación del modelo MPE a la cuenca Chicoasén y a sus subcuencas, obteniendo los parámetros de calibración para cada una de ellas.

Finalmente, el capítulo quinto presenta las conclusiones de este trabajo.

1.1 ANTECEDENTES

La energía hidroeléctrica no solo es renovable y barata, es también la más importante para el país.

La presa hidroeléctrica Chicoasén, aparte de ser la más grande de Latinoamérica por su cortina de 261 m de altura, es de las más sobresalientes en nuestro país por su capacidad de generación eléctrica, siendo la mayor de todas las presas hidroeléctricas con 2400 MW de capacidad.

Es por esto que contar con un buen modelo de pronóstico de escurrimientos en el sitio donde se encuentra la presa, permitirá tomar las medidas necesarias en caso de presentarse una avenida importante y así poder operarla de manera correcta.

La cuenca del río Grijalva, lugar donde se ubica la presa Chicoasén, se considera de las más importantes en México por su caudal, tamaño y porque en ella se localizan algunas de las zonas más lluviosas del país. Esta cuenca es una zona montañosa alta donde comienzan y se concentran los escurrimientos de agua en un cauce definido, que cruza las montañas del norte de Chiapas, recibiendo el aporte de agua de tributarios y saliendo hacia las partes más bajas que corresponden a la planicie tabasqueña, inundándola con frecuencia.

La Cuenca del Grijalva ha sufrido importantes modificaciones a su régimen natural. El crecimiento de la población, la disminución de la cobertura vegetal original y un conjunto de cambios en los usos del suelo, la intensificación de otras actividades productivas como la explotación petrolera y la minería, han ocasionado que existan actualmente una serie de problemas, que ahora se intensifican con el cambio climático en diferentes partes de la cuenca, tales como la persistencia de riesgos de inundaciones, deslaves, erosión de suelos y azolvamiento de presas.

El deterioro de la cubierta vegetal, el suelo y la calidad del agua es severo en la parte alta, media y baja. La ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos es una constante en la cuenca, tal como el ocurrido en octubre del 2007 causadas por un frente frío, donde los caudales recibidos por las presas Peñitas y Malpaso, aumentaron considerablemente provocando que la presa Peñitas desfagara.

Los impactos derivados de estos desastres naturales, muestran las condiciones de alto riesgo, vulnerabilidad y amenaza que enfrenta la población de estos municipios.

Los cambios morfológicos que han sufrido estas cuencas, debidos a los últimos fenómenos hidrometeorológicos, deforestación y cambio en el uso de suelo, obligan a tener una nueva calibración en los modelos de pronóstico existentes, y con ello, hacer una buena estimación en sus escurrimientos y por lo tanto un pronóstico oportuno, con el cual se operen las obras ya construidas o se emitan alarmas para movilizar a la población fuera de la zona de riesgo.

Con estos problemas, es muy importante realizar una actualización periódica del modelo de predicción de escurrimientos, pues todos estos cambios y deterioros en la geomorfología de la cuenca, intervienen de manera directa en las infiltraciones y escurrimientos que hay en la misma.

1.2 OBJETIVO

Obtener el modelo lluvia-escurrimiento de la cuenca Chicoasén, mediante un modelo de parámetros distribuidos, que permita pronosticar los volúmenes de las avenidas hacia la presa Chicoasén. Dicho modelo servirá para alimentar el programa Pronóstico de avenidas en tiempo real para la Presa Chicoasén, de la Comisión Federal de Electricidad.

2 MODELO PARA PRONÓSTICO DE ESCURRIMIENTO (MPE)

El Modelo para Pronóstico de Esgurrimiento, fue diseñado con el objetivo de pronosticar el escurrimiento de cualquier cuenca.

El programa computacional MPE, desarrollado en lenguaje de programación Visual Basic, fue elaborado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Domínguez et al. 2008) para obtener el hidrograma de escurrimiento de una cuenca con un modelo de parámetros distribuidos que considere de manera sencilla las pérdidas por evapotranspiración que se presentan durante el intervalo de tiempo de una tormenta a otra y que se ajuste a la información disponible en nuestro país para su análisis.

Para el funcionamiento del programa, el MPE necesita archivos de entrada desarrollados en un SIG, específicamente el ArcView 3.2, que se utiliza para obtener los parámetros hidrológicos de la cuenca en forma de malla en conjunto con la extensión de modelación hidrológica geoespacial (HEC-GeoHMS), desarrollada por el Hydrologic Engineering Center para el US Army Corps of Engineers.

2.1 Descripción del proceso lluvia-escurrimiento

El agua se evapora desde los océanos y desde la superficie terrestre gracias a la radiación solar para ser parte de la atmósfera; el vapor de agua se eleva en la atmósfera hasta condensarse y precipitar sobre la superficie terrestre o los océanos; el agua precipitada puede ser interceptada por la vegetación o construcciones y convertirse en flujo superficial sobre el suelo o infiltrarse. Casi toda el agua interceptada y de escurrimiento superficial regresa a la atmósfera mediante la evaporación.

A este proceso recirculatorio e indefinido se le conoce como ciclo hidrológico.

Cuando llega la lluvia al suelo, ocurren dos fenómenos:

- La lluvia se infiltra en el terreno.
- La superficie comienza a mojarse, llenando las depresiones.

Cuando la intensidad de la lluvia es mayor que la capacidad de infiltración en el terreno, se forma un tirante suficiente que rompe la tensión superficial. Así es como se inicia el escurrimiento superficial, que gracias a la gravedad terrestre, se desplaza a las partes bajas de la cuenca hasta llegar a los ríos.

Los modelos de transformación lluvia-escorrimento son de gran utilidad para la previsión de avenidas, el diseño de obras hidráulicas, la realización de políticas de operación, etc. Es por esto que es de gran importancia contar con un modelo apropiado que relacione la precipitación con el escurrimiento en la cuenca Chicoasén, y así poder predecir las afectaciones en el sector socioeconómico de la zona en estudio.

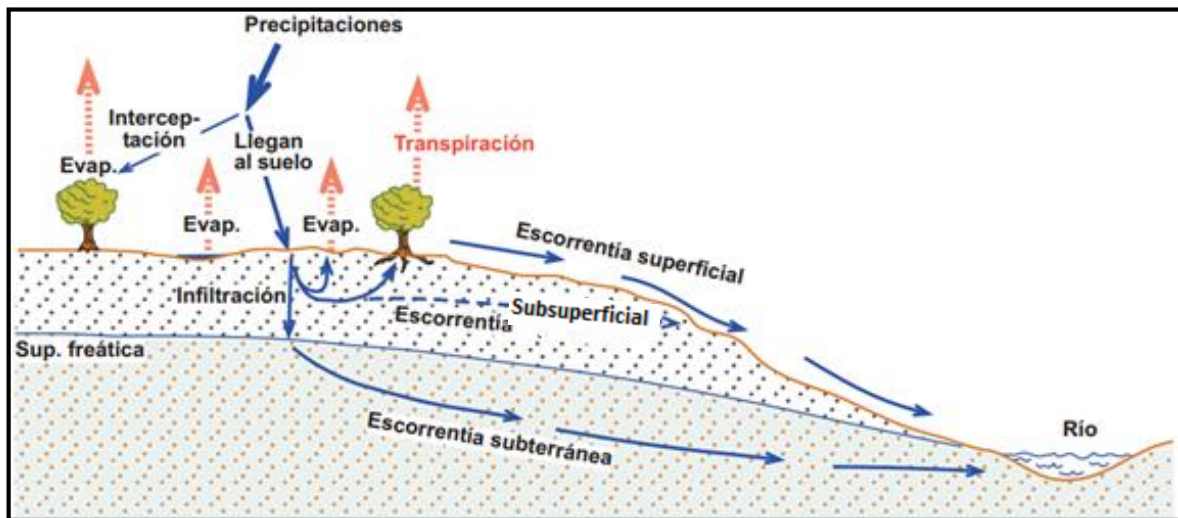


Figura 5: Ciclo hidrológico. Fuente: Sánchez San Román. Universidad de Salamanca (2011).

2.2 Características fisiográficas principales

El escurrimiento es función de la intensidad y duración de la precipitación, de la permeabilidad del suelo, del tipo de vegetación, del tamaño de la cuenca hidrográfica en cuestión, de la profundidad del nivel freático y de la pendiente de la superficie del suelo.

Los factores que intervienen en la producción del escurrimiento se pueden clasificar en:

- **Factores climáticos:** Incluyen los efectos de la precipitación, la evaporación y la transpiración, los cuales presentan variaciones estacionales. Medir y prestar atención al clima es de gran importancia y para la cuenca Chicoasén, así como todas las que conforman la región hidrológica 30, puede generar una prevención a siniestros climatológicos.

- **Factores fisiográficos:** A su vez se clasifican en dos, las características de la cuenca y las características del cauce. En los primeros se encuentran factores tales como tamaño, forma y pendiente de la cuenca, permeabilidad y uso del suelo, presencia de lagos, etc. Las características del cauce están relacionados con las propiedades hidráulicas de la misma cuenca en cuestión, las cuales gobiernan el movimiento de las corrientes y determinan su capacidad de almacenamiento.

2.3 Concepto de sistema

Existen muchas definiciones de sistemas, una de ellas es en la que Chow (1964) define un sistema como un conjunto de partes conectadas entre sí, que forman un todo.

Se puede concluir con todas las definiciones existentes, que un sistema es un conjunto de partes o elementos organizados y relacionados entre sí que interactúan para llegar a un objetivo. Los sistemas reciben (entrada) datos, proveen (salida) información.

Para este caso, puede considerarse la cuenca Chicoasén como un sistema cuyas entradas y salidas son los registros simultáneos de precipitación y escurrimiento, respectivamente, y se busca encontrar las leyes que rigen la transformación de las entradas (precipitación) en salidas (escurrimientos).

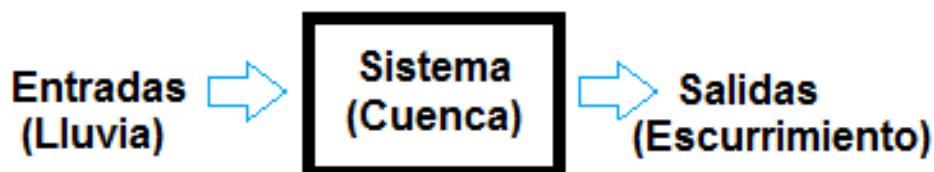


Figura 6: Concepto de sistema.

Un sistema hidrológico se define como conjunto de elementos y procesos físicos unidos mediante una interdependencia, que actúa sobre un grupo de variables de entrada para convertirlas en las de salida.

Debido a su complejidad, los sistemas hidrológicos son estudiados para reproducir o predecir su funcionamiento a través de modelos matemáticos.

2.4 Concepto de modelo

Un modelo es una representación abreviada o simplificada de un sistema complejo, o bien es una simulación de un prototipo. (Campos, Aranda 2007).

Representación simplificada de la realidad que, sin embargo, considera todas las componentes relevantes para la solución del problema específico que se estudia. (Domínguez, 1990).

La historia del modelaje en hidrología viene desde el año 1851, cuando el irlandés Thomas Jame Mulvaney publicó la ecuación del método racional:

$$Q_p = CIA$$

Donde:

Q_p : gasto pico del hidrograma.

C: coeficiente empírico.

I: Intensidad de la lluvia.

A: área de la cuenca.

Es un modelo sencillo, que brinda una idea de lo que se puede esperar ante un evento, y que modela solo gastos pico.

De acuerdo con Raudkivi (1979), los modelos utilizados en hidrología tienen muchas aplicaciones, tales como:

- Determinar avenidas de diseño.
- Extender mediciones.
- Predecir el comportamiento hidrológico de una cuenca.
- Pronosticar los efectos de cambios físicos en las cuencas.
- Predecir frecuencias de eventos.
- Generar secuencias sintéticas.
- Optimizar el diseño y los procedimientos de operación de proyectos de recursos hidráulicos.
- Hacer pronósticos a corto plazo.

La modelación hidrológica de cuencas hidrográficas nos permite obtener pronósticos de posibles afectaciones en alguna zona debido a la ocurrencia de lluvias extremas máximas.

2.4.1 Clasificación de los modelos

Los modelos se pueden clasificar en:

- **Modelos a escala.** También llamados modelos físicos. Los modelos físicos simulan estructuras o situaciones muy particulares en una escala reducida, y aunque sus resultados son muy confiables, sólo pueden ser utilizados para tales casos. Para hidrología en donde se desea saber las características y escurrimientos en la totalidad de una cuenca, en una zona de ella o en su vecindad inmediata, no son de gran utilidad.
- **Modelos Analógicos.** Son sistemas que reproducen en un medio físico diferente el comportamiento de un prototipo. Su desarrollo está fundado principalmente en la analogía eléctrica. Aunque estos modelos den un mejor panorama a la hidrología que los físicos, su uso es limitado porque dependen de los modelos matemáticos y por su calibración.
- **Modelos matemáticos.** Simulan el prototipo mediante ecuaciones que relacionan las variables de entrada y de salida. Estas variables pueden ser funciones del espacio y del tiempo, y también pueden ser variables probabilísticas o aleatorias que no tienen un valor fijo en un punto particular del espacio y del tiempo, pero que están descritas a través de distribuciones de probabilidad. Por ejemplo no se puede pronosticar con exactitud la lluvia que caerá, pero si se puede calcular la probabilidad de que llueva.

Tal como se había mencionado, de los modelos anteriormente descritos, los más utilizados en hidrología son los matemáticos.

2.4.2 Clasificación de los modelos matemáticos

Un modelo matemático está constituido por una componente física, que expresa el conocimiento previo con el que se cuenta del fenómeno que se representa, y por una componente estocástica, que con términos estadísticos nos expresa aquello que no puede explicarse por conocimiento previo.

Un modelo matemático se subdivide en determinísticos, estocásticos y paramétricos:

Modelos determinísticos; no consideran aleatoriedad, las variables que intervienen en el modelo tienen un valor fijo en un punto particular del espacio y del tiempo, la salida producida por el sistema depende de solo una entrada; es decir, para dos entradas diferentes el sistema producirá dos salidas distintas.

Modelos estocásticos o no determinísticos; las variables son solamente aleatorias, es decir, no se conocen con precisión, por lo cual se dice que son modelos basados en la probabilidad. Un modelo estocástico tiene salidas que son por lo menos parcialmente aleatorias; la salida depende de una o más entradas.

Se dice que los modelos determinísticos hacen pronósticos, mientras que los modelos estocásticos hacen predicciones.

Modelos paramétricos; consideran las variables aleatorias y no aleatorias del fenómeno, es decir, tienen una componente determinística o física y una componente estocástica, por lo que hacen una mejor representación de la realidad.

Ya que un fenómeno hidrológico tiene variables aleatorias y variables conocidas, el modelo más utilizado es el modelo paramétrico. Los modelos paramétricos se dividen en concentrados o agregados, y en distribuidos.

2.5 Modelos de parámetros concentrados y de parámetros distribuidos

Los modelos paramétricos ubicados más hacia el lado determinista, están clasificados en modelos de parámetros concentrados y modelos de parámetros distribuidos.

- **Modelos de parámetros concentrados o agregados:** En estos modelos se ve el fenómeno como una caja negra donde el estímulo o entrada es la lluvia, obteniéndose una respuesta o salida representada por el escurrimiento. Este modelo trata a la cuenca como una sola entidad, tomando una sola lluvia de entrada y a sus características como homogéneas en toda su área. No consideran datos de variabilidad espacial de la precipitación o de los parámetros del modelo, haciendo que el modelo pierda validez, pues el escurrimiento varía por distintos factores como la urbanización, reforestación, construcción de obras de control, erosión, cambios en el clima, etc., que no se distribuyen uniformemente en la cuenca.

Los hidrogramas unitarios usan este concepto; ven a la cuenca como un sistema lineal que no varía en el tiempo donde la lluvia efectiva es la causante del escurrimiento.



Figura 7: Modelo de caja negra.

Los modelos concentrados no toman en cuenta la variación espacial de la precipitación, la infiltración, pérdidas, etc. Éstas simplemente son promediadas o ignoradas, por lo que, en la actualidad, no son muy recomendables.

Hay casos en los que se prefiere utilizar el modelo por su simplicidad, pues los distribuidos representan un reto a la hora de obtener los parámetros de la cuenca. Para cuencas consideradas pequeñas, puede decirse que el modelo es útil.

- **Modelos de parámetros distribuidos**, en estos modelos interviene un mayor número de variables, consideran a la cuenca formada por un conjunto de elementos con características uniformes en cada uno de ellos simulando los procesos físicos que ocurren en cada elemento, tales como la infiltración, el escurrimiento sobre la superficie del terreno, el flujo de corrientes, etc. La falta de datos con suficiente densidad en la cuenca es una limitación para el uso de los modelos de parámetros distribuidos.

Estos modelos son los más acercados a la realidad, pues toman el escurrimiento como lo que es, una respuesta hidrológica continua en el espacio y tiempo que depende del proceso hidrológico que sucede en varios puntos y lugares del espacio. Se basa en el principio de conservación de la materia, manteniendo el balance de agua entre la lluvia, escurrimiento, evaporación e infiltración.

Una parte muy importante del modelo de parámetros distribuidos, es que divide al sistema en celdas o píxeles asignándole a cada una de ellas parámetros y factores uniformes (uso de suelo, tipo de suelo, vegetación, pendiente, etc.).

Con el desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y algunos de sus complementos o extensiones, se puede dividir la cuenca hidrológica en partes pequeñas (generalmente celdas cuadradas o píxeles) cada una con sus características específicas y con los Modelos de Elevación (MDE), extraídos de la página de INEGI, seguir las trayectorias del escurrimiento directo hasta que llega al sitio o a los sitios de estudio.

En cuanto a la distribución espacial y temporal de la lluvia, en nuestro país todavía existen limitaciones por la escasez de redes de medición. Aun así, se han logrado ciertos avances en las técnicas de interpolación y con el tiempo se ha integrado la tecnología de los Sistemas de información Geográfica (SIG) para estimar mejor la distribución espacial de la lluvia.

La utilización de éste modelo cuenta con varias ventajas:

- Nos permite un análisis de los diferentes elementos que influyen en la respuesta de una cuenca y su cambio por la intervención humana.
- Permite obtener la aproximación cuantitativa de la modificación de la respuesta hidrológica ante eventos de precipitación extraordinaria.
- Se puede obtener el caudal en cualquier punto de la cuenca.
- El modelo sirve para mejorar la evaluación del riesgo ante inundaciones, pues permite conocer el estado del sistema en cualquier punto de la red de drenaje. En los modelos distribuidos, la variación espacial de la precipitación, la infiltración, pérdidas y escurrimiento están totalmente considerados.
- La modelación hidrológica distribuida tiene amplias formas de aplicación, principalmente en la implementación de sistemas de alerta temprana.

Por estos avances, son más usados los modelos de parámetros distribuidos, en los que la producción del escurrimiento generado en cada una de las celdas o pixeles se puede transitar por la cuenca siguiendo trayectorias individualizadas hasta los sitios de interés.

De lo anterior se concluye que aunque los modelos de parámetros distribuidos necesitan más tiempo de cálculo por su complejidad y más calidad de datos, darán resultados más reales que los concentrados, pues la heterogeneidad espacial de un sistema hidrológico puede no estar bien reproducida con valores medios de los parámetros.

Gracias a la buena disponibilidad de datos de lluvia y gasto de las estaciones automáticas de la CFE, así como la facilidad de poder obtener datos mediante un SIG para la descripción detallada de la cuenca, para el estudio de la relación lluvia-escurrimiento de la cuenca Chicoasén se hará uso del modelo MPE de parámetros distribuidos.

2.6 Modelo Distribuido MPE

Mediante un modelo de parámetros distribuidos, el programa MPE es capaz de pronosticar los escurrimientos en una cuenca.

Su objetivo es modelar la relación entre precipitación y escurrimiento, con el fin de hacer una buena estimación de los escurrimientos.

El método utilizado para la producción del escurrimiento está basado en el *Soil Conservation Service* (SCS), con una consideración que permite contemplar el secado del suelo después de una lluvia. La transferencia del escurrimiento se hace con el método de Clark modificado. El programa trabaja con la información de una red de estaciones pluviográficas instaladas en la cuenca y con los parámetros hidrológicos de la cuenca en forma de malla, obtenidos con la ayuda de un SIG (Sistema de Información Geográfica). El modelo obtiene la precipitación media en la cuenca, el hietograma de precipitación, la lluvia en exceso, las pérdidas y el hidrograma a la salida de la cuenca.

Para cada cuenca es necesario calibrar los parámetros Ia (infiltración inicial), S (retención potencial máxima) y fx (factor de olvido), llamados parámetros de pérdidas y los parámetros Tc (tiempo de concentración), k (coeficiente de atenuación por almacenamiento) llamados parámetros de forma, y comparar los resultados obtenidos de la simulación con datos observados. Más adelante se hablará de cada uno de estos parámetros.

Para un correcto funcionamiento del MPE, se requiere la información de estaciones pluviográficas e hidrométricas instaladas en la cuenca así como los archivos con los parámetros hidrológicos en forma de malla que representa las celdas como subcuencas para la modelación distribuida, todos estos archivos en formato .txt. Los resultados obtenidos con este modelo pueden ser guardados en archivos con el mismo formato.

El MPE puede ser aplicado a cualquier cuenca, siempre y cuando se cuente con la información necesaria para obtener los archivos de entrada para un buen funcionamiento del modelo.

2.7 Método empleado para el cálculo de la precipitación

La precipitación distribuida en la cuenca se obtiene interpolando la lluvia registrada en la red de estaciones pluviográficas. La interpolación es hecha mediante el método de Shepard, que consiste en obtener una media pesada de los valores registrados en N sitios próximos al punto de interpolación, utilizando como peso el inverso de la distancia del punto por interpolar a los puntos dato que le rodean.

El método de Shepard es parecido al del inverso de la distancia, pero introduce procedimientos de mínimos cuadrados.

La función $hp: z = hp(x, y)$ para $(x, y) \in B$, donde B es una región arbitraria del plano x, y , es interpolada para los puntos (x_j, y_j) dados por la función:

$$\phi(x, y) = \sum_{j=0}^N w_j(x, y) hp_j \dots (1) \text{ método global o general de Shepard}$$

Donde el factor de peso de cada estación se determina como:

$$r_j(x, y) = \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2}, j = 0, \dots, N \dots (2)$$

$$w_j(x, y) = \frac{\frac{1}{r_j^\mu}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{r_i^\mu}}, 0 < \mu < \infty$$

Donde:

$\Phi(x, y)$, punto a interpolar.

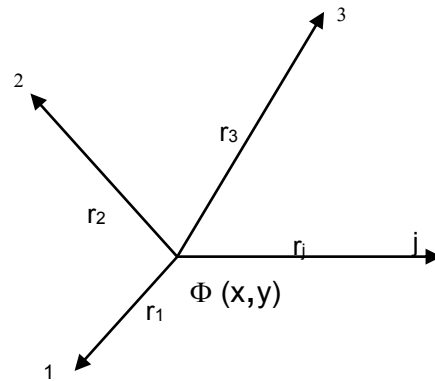
N , número de estaciones de lluvia.

w_j , factor de peso en la estación j .

hp_j , lluvia en la estación j .

$r_j(x, y)$, distancia desde el punto (x, y) a la estación j .

μ , coeficiente de calibración, se recomienda que: $2 \leq \mu \leq 6$



A la ecuación 1 se le llama método global o general de Shepard, porque considera todos los puntos N . En algunas ocasiones es necesario limitar el número de datos a interpolar. Shepard ha indicado una modificación para el cálculo de $w_j(x, y)$ la cuál utiliza solamente los puntos (x_j, y_j) de un círculo de radio R alrededor del punto (x, y) , a este se le llama método local de Shepard, donde w se determina con los parámetros de Franke-Little:

$$\xi_j(x,y) = \begin{cases} 1 - \frac{r_j(x,y)}{R} & \text{para } 0 < r_j(x,y) < R \\ 0 & \text{para } r_j(x,y) \geq R \end{cases}$$

Donde:

R , distancia máxima a considerar para hacer la interpolación.

$r_j(x,y)$, distancia desde el punto (x,y) a la estación j .

La ecuación para determinar el factor de peso (w) resulta:

$$w_j(x,y) = \frac{\xi_j^\mu(x,y)}{\sum_{i=0}^N \xi_i^\mu(x,y)}$$

2.8 Método empleado para la producción del escurrimiento

El método que se emplea para la producción del escurrimiento es el Método de las Abstracciones o del Número de Curva del SCS (Soil Conservation Service) del Servicio de Conservación de Recursos Naturales de EE.UU, es un método sencillo para calcular la lluvia efectiva en función de la lluvia acumulada, la cobertura del suelo, el uso del suelo y las condiciones de humedad.

Para considerar el secado del suelo después de presentarse una lluvia se hace una modificación al método SCS, en el cálculo de la precipitación acumulada se multiplica la precipitación por un factor denominado factor de olvido, el cual hace que la importancia de las lluvias antecedentes vaya disminuyendo conforme pasa el tiempo.

El método de Número de Curva del *Soil Conservation Service* (SCS-CN) es uno de los más populares para la estimación de los volúmenes de escurrimiento; su éxito se debe a que toma en cuenta las principales características de la cuenca que producen el escurrimiento, como lo son el uso y el tipo del suelo. Dicho método obtiene directamente el escurrimiento superficial acumulado a partir de la precipitación acumulada, la capacidad de almacenamiento del suelo y las pérdidas iniciales.

El Método de número de curva se basa en la ecuación de balance hídrico y en dos hipótesis fundamentales. La primera hipótesis establece que la razón entre el volumen de escurrimiento directo y el escurrimiento potencial máximo es igual a la razón entre la infiltración real y la infiltración potencial máxima. La segunda hipótesis establece que la infiltración inicial es una fracción de la retención potencial. La ecuación de balance hídrico y las hipótesis expresadas son, respectivamente:

$$\frac{Pe}{P - Ia} = \frac{Fa}{S} \quad (1)$$

$$P = Pe + Ia + Fa \quad (2)$$

$$Ia = \lambda S \quad (3)$$

Donde:

P , precipitación total, cm

Ia , retención, (infiltración) inicial, cm

Fa , infiltración acumulada, cm

Pe , precipitación efectiva, cm

S , retención, (infiltración) potencial máxima, cm

La versión actual del método supone $Ia = 0.2S$ para aplicaciones prácticas.

La forma extendida del método se determina de la combinación de las ecuaciones 1, 2 y 3:

$$Pe = \frac{(P - Ia)^2}{P - Ia + S}; Ia \leq P, 0 \quad (4)$$

Sustituyendo $Ia = 0.2S$ en la ecuación 4:

$$Pe = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (5)$$

El valor de S , en cm, está dado por

$$S = \frac{2540 - (25.4 \times CN)}{CN} \quad (6)$$

Sustituyendo la ecuación 6 en 5:

$$Pe = \frac{\left(P - \frac{508}{CN} + 5.08\right)^2}{P + \frac{2032}{CN} - 20.32} \quad (7)$$

Donde CN es el Número de Curva determinado a partir de uso y tipo de suelo.

($0 < CN \leq 100$). Números de curva altos significan escorrentías elevadas e infiltraciones bajas. Los números de curva bajos implican altas tasas de infiltración y baja escorrentía superficial.

Utilizando ArcView como herramienta y apoyándose en los mapas de cobertura vegetal y edafológica así como el grupo hidrológico al que pertenecen, es posible obtener un mapa de curva N. El mapa que se genera es un mallado con tamaño de celda de 1 km x 1 km.

Para ello se requiere tener clasificado el tipo de suelo por su permeabilidad de acuerdo con la siguiente tabla:

CLAVE DE CLASIFICACIÓN FAO	SUELOS	TIPO HIDROLÓGICO DE SUELO	PERMEABILIDAD	PROPIEDADES
T Q J O U	Andosoles Arenosoles Fluvisoles Histosoles Ranker	A	Muy Alta	Arenas con poco limo y arcilla (escurrimiento mínimo)
X, Y I, E Z D F R	Calcisoles (antes xerosol y yermosol) Leptosoles (antes litosoles y rendizinas) Solonchaks Podzoles Ferralsoles Regosoles	B	Buena	Arenas finas y limos
H K N C	Feozems Kastanozems Nitosoles Chernozems	C	Media	Arenas muy finas, limos y bastante arcilla
- A B G L V W S D - -	Alisoles Acrisoles Cambisoles Gleysoles Luvisoles Vertisoles Planosoles Solonetz Podzoluvisoles Plintosoles Lixisoles	D	Baja	Arcillas en grandes cantidades, suelos poco profundos con subhorizontes casi impermeables (escurrimiento máximo)

Tabla 3: Clasificación hidrológica de los tipos de suelos según su permeabilidad.

Los números de curva se determinan a partir del grupo hidrológico al que pertenece el suelo, de la cubierta vegetal y la pendiente del terreno.

La siguiente tabla fue obtenida de la consulta de varias publicaciones:

USO DE SUELO Y VEGETACIÓN (INEGI)		GRUPO HIDROLÓGICO			
		A	B	C	D
AGRICULTURA (de humedad, de riego, de temporal)	Condición hidrológica mala	72	81	88	91
	Condición hidrológica regular	67	76	83	86
	Condición hidrológica buena	62	71	78	81
ÁREA SIN VEGETACIÓN APARENTE		77	86	91	94
ASENTAMIENTO HUMANO	Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.	82	88	91	93
	Condición hidrológica regular.	49	69	79	84
	Condición hidrológica buena.	39	61	74	80
	Residencial 50 % ó más área Impermeable.	77	85	90	92
	Residencial 50 % ó menos área impermeable.	61	75	83	87
	Áreas comerciales de negocios (85 % impermeables).	89	92	94	95
	Distritos industriales (72 % impermeables).	81	88	91	93
	Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc.	98	98	98	98
	Calles y carreteras (pavimentados con cunetas y alcantarillas).	98	98	98	98
	Calles y carreteras de grava.	76	85	89	91
Calles y carreteras de tierra	72	82	87	89	
BOSQUE (cultivado, de encino, encino-pino, oyamel, pino, tascate, mesófilo de montaña)	Condición hidrológica mala	45	66	77	83
	Condición hidrológica regular	36	60	73	79
	Condición hidrológica buena	25	55	70	77
CARDONAL		54	71	80	89
CHAPARRAL (ARBUSTOS)		20	48	65	73
CUERPO DE AGUA		10	10	10	10

EROSIÓN		68	79	86	89
MANGLAR		10	10	10	10
MATORRAL (con izotes, con rosetófilos acaules, inerme, desértico micrófilo, desértico rosetófilo, espinoso, inerme, crasicaule, subinerme, subtropical)	Condición hidrológica mala	48	67	77	83
	Condición hidrológica regular	34	58	71	78
	Condición hidrológica buena	20	48	65	73
MEZQUITAL		68	79	86	92
NOPALERA		39	61	74	84
PALMAR		45	66	77	83
PASTIZAL (cultivado, halófilo, inducido, natural, naturalhuizachal)	Condición hidrológica mala	68	79	86	89
	Condición hidrológica regular	49	69	79	84
	Condición hidrológica buena	39	61	74	80
PLANTACIÓN FORESTAL	Condición hidrológica mala	55	73	82	86
	Condición hidrológica regular	44	65	76	82
	Condición hidrológica buena	32	58	72	79
PRADERA DE ALTA MONTAÑA		30	58	71	78
SABANA		45	66	77	83
SELVA (baja caducifolia, baja caducifolia y subcaducifolia, baja espinosa, mediana subcaducifolia)		45	66	77	83
TULAR		68	79	86	92
VEGETACIÓN HALÓFILA		68	79	100	100
VEGETACIÓN SECUNDARIA		68	79	86	89

Tabla 4: Número de curva según la cobertura de suelo.

Definición de condición hidrológica:

- Suelos agrícolas:

Mala: tiene menos del 25 % del terreno cubierto

Regular: tiene entre 25 y 50 % del terreno cubierto

Buena: tiene más del 50 % del terreno cubierto.

- Uso forestal:

Mala: tiene menos del 30% del terreno cubierto

Regular: tiene entre 30 y 70% del terreno cubierto.

Buena: tiene más del 70% del terreno cubierto.

El programa MPE trabajará con una tabla en formato .txt, la cual deberá contener los parámetros hidrológicos de cada celda creada en la cuenca, así como el número de curva asignado a cada una de ellas.

Shz_v	Cell_id	Mod_area	Wshshgid	Flowlength	Nc	Ln	Area_meter
1797	150	0.13935200000	0	165.7142656250	60	60	139352.310
1798	151	0.00481500000	1	165.2260625000	60	60	4815.108
1794	261	0.16720000000	2	166.0573437500	60	60	167200.041
1795	262	0.25418100000	3	165.8655781250	60	60	254182.097
1796	263	0.39449900000	4	164.6395468750	60	60	394500.725
1797	264	0.95505200000	5	165.0515937500	60	60	954916.172
1798	265	0.62860400000	6	165.2260625000	60	60	606362.770
1799	266	0.00724100000	7	164.6446250000	60	60	7240.911
1793	374	0.10981500000	8	165.7635781250	60	60	109815.303
1794	375	0.87766200000	9	165.5239062500	88	88	217788.912
1795	376	1.00000000000	10	165.1291562500	60	60	577.395
1796	377	1.00000000000	11	164.1623750000	88	88	13244.870
1797	378	1.00000000000	12	163.9153906250	60	60	753831.920
1798	379	1.00000000000	13	163.9163437500	60	60	59849.865
1799	380	0.80659100000	14	164.6446250000	60	60	583372.826
1800	381	0.43392700000	15	165.5546250000	60	60	33302.730
1801	382	0.01717900000	16	164.3739218750	60	60	37424.687
1801	382	0.03742500000	17	165.5044062500	60	60	37424.687
1802	383	0.25922700000	18	165.4602968750	60	60	259228.061
1791	486	0.03513700000	19	167.0700937500	60	60	35136.714
1792	487	0.60474900000	20	166.3171406250	60	60	604751.801
1793	488	0.98490800000	21	165.3415000000	88	88	146957.377
1794	489	1.00000000000	22	164.3824218750	88	88	917208.073
1795	490	1.00000000000	23	163.9074062500	88	88	879388.237
1796	491	1.00000000000	24	162.7588750000	60	60	1000006.213
1797	492	1.00000000000	25	162.5188906250	88	88	387005.297
1798	493	1.00000000000	26	163.2586406250	88	88	333683.305
1799	494	1.00000000000	27	164.4546562500	60	60	533908.696
1800	495	1.00000000000	28	165.3297500000	60	60	1000006.304
1801	496	0.95969200000	29	164.3739218750	60	60	959697.490
1802	497	0.94438900000	30	164.8420468750	60	60	944394.522

Figura 8: Tabla con parámetros hidrológicos para el MPE. ArcView.

Factor de Olvido: Para considerar el secado del suelo después de presentarse una lluvia, se agregó en el cálculo de la precipitación un parámetro denominado factor de olvido, el cual hace que las aportaciones de las lluvias antecedentes vayan disminuyendo conforme pasa el tiempo. Con este parámetro se consideran las pérdidas por evapotranspiración que se presentan durante el intervalo de tiempo de una tormenta a otra; de lo contrario, cuando se presente un segundo evento de lluvia, el suelo se encontraría saturado y escurriría todo lo que llueve, lo cual no es real.

$$Pa_n = P_1 * fx^n + P_2 * fx^{n-1} + \dots + P_n * fx^{n-n} \dots (8)$$

Donde:

Pa_n , precipitación neta acumulada en el intervalo de tiempo n , (cm)

P_n , precipitación en el intervalo de tiempo n , (cm)

fx , factor de olvido, menor que 1.

La precipitación acumulada neta sustituye a la acumulada total P en la ec. 7 del número de curva, para estimar la precipitación efectiva.

Cuando se quiere calibrar eventos de varios días, se recomienda que para menor evapotranspiración, mayor escurrimiento, por lo tanto aumentar el valor de f_x . Para mayor evapotranspiración, menor escurrimiento, es decir, disminuir el valor de f_x .

Para cualquier caso, $0 \leq f_x \leq 1$

2.9 Método para el tránsito del escurrimiento

La transferencia del escurrimiento desde cualquier punto de la cuenca hasta su salida puede realizarse por medio de una agregación simple, usando un hidrograma unitario distribuido. El más popular es el hidrograma unitario distribuido de Clark Modificado o ModClark, que consiste en trasladar el escurrimiento producido en cada celda hasta la salida de la cuenca después de transcurrido un intervalo de tiempo igual al tiempo de viaje desde la celda hasta la salida considerando la regulación en un embalse en el que el gasto de descarga es una función lineal del volumen almacenado.

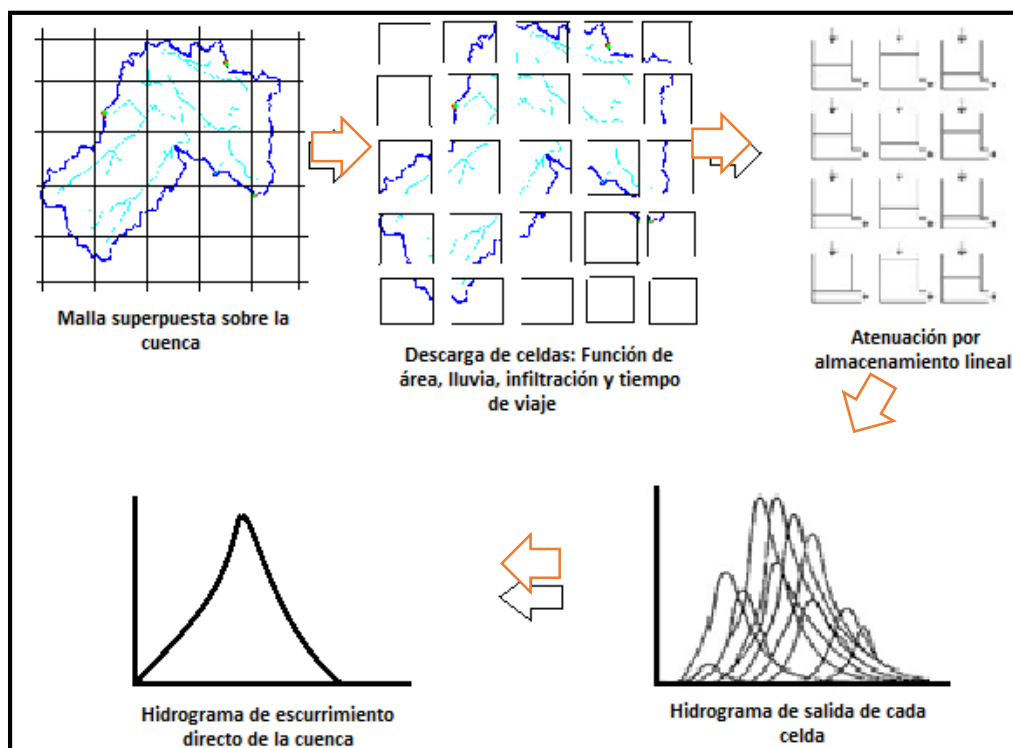


Figura 9: Modelo de escurrimiento directo conceptual de ModClark para parámetros distribuidos.

Este método requiere la estimación de dos parámetros para determinar el hidrograma de la cuenca; el tiempo de concentración T_c y el coeficiente de atenuación por almacenamiento k .

a) Parámetros de pérdidas. Intervienen en la producción del escurrimiento.

- Factor de Escala de pérdida Inicial (λ). En el método de Número de Curva, relaciona la infiltración Inicial con la Infiltración potencial máxima. El valor de λ debe estar entre 0 y 1, para aplicaciones prácticas se recomienda iniciar la calibración con un valor $\lambda=0.2$.

$$0 < \lambda < 1$$

$$I_a = \lambda S$$

I_a , infiltración inicial, cm

S , retención potencial máxima, cm

- Factor de Escala de retención Potencial (f_s). Varía o modifica la retención potencial del suelo y, por lo tanto, el valor del número de curva.

$$S = S(f_s)$$

- menos permeable (mayor escurrimiento), al disminuir el valor de f_s
- más permeable (menor escurrimiento), al aumentar el valor de f_s

- Factor de Olvido (f_x). Con este parámetro se consideran las pérdidas por evapotranspiración que se presentan durante el intervalo de tiempo de una tormenta a otra. Se recomienda cuando se quieren modelar varios días que:

$$0 < f_x \leq 1$$

Donde:

- menos evapotranspiración (mayor escurrimiento), al aumentar el valor de f_x .
- más evapotranspiración (menos escurrimiento), al disminuir el valor de f_x .

b) Parámetros de Forma. Intervienen en el traslado del escurrimiento. Le dan la forma al hidrograma:

- Tiempo de Concentración (T_c). Tiempo que tarda la precipitación excedente en alcanzar la salida de la cuenca desde su punto más alejado.

$$T_c > \Delta t$$

- Coeficiente de Almacenamiento (C_a). Tiempo de retraso provocado por el efecto del almacenamiento natural. Para una primera aproximación:

$$C_a = 0.6 T_c$$

$$C_a > \Delta t / 2$$

Donde:

C_a , coeficiente de almacenamiento.

T_c , tiempo de concentración.

Δt , intervalo de tiempo para el cálculo del pronóstico.

El tiempo de concentración T_c se define como el tiempo que le toma a la precipitación excedente alcanzar la salida de la cuenca desde su punto hidráulicamente más remoto. Es una medida de retraso puro, sin tomar en cuenta el efecto de almacenamiento. En la bibliografía existen varias ecuaciones para calcular el tiempo de concentración, T_c . La ecuación empleada por el modelo MPE es la ecuación de Kirpich:

$$T_c = 0.000325 \times \left(\frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \right) \dots (1)$$

Donde:

T_c , tiempo de concentración (h)

L , longitud del cauce principal (m)

S , pendiente del cauce principal.

El coeficiente de atenuación por almacenamiento k es una medida de retraso provocado por el efecto del almacenamiento natural.

Para usos prácticos:

$$k = 0.6 T_c \dots (2)$$

Donde:

k , es el coeficiente de almacenamiento (h)

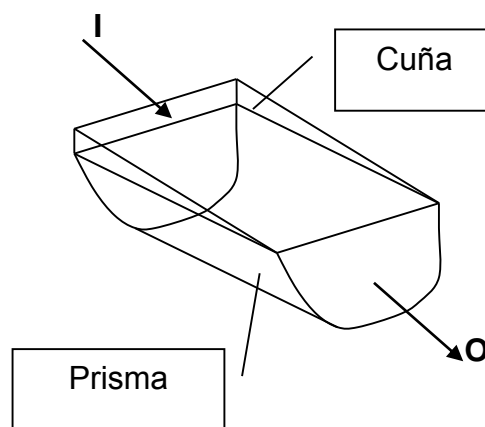
T_c , tiempo de concentración (h)

Al traslado del escurrimiento se le aplica el Método de Muskingum para considerando el retraso por almacenamiento.

$$S_{prisma} = K.O \dots (3)$$

$$S_{cuña} = k.x.(I - O) \dots (4)$$

$$S = k[xI + (1 - x)O] \dots (5)$$



Donde;

S , almacenamiento en el tramo considerado

I , caudal de entrada en ese tramo

O , caudal de salida de ese tramo

k, x , constantes, para ese tramo del cauce

Aplicando a dos intervalos de tiempo:

$$S_1 = k[xI_1 + (1-x)O_1] \dots(6)$$

$$S_2 = k[xI_2 + (1-x)O_2] \dots(7)$$

$$O_2 = C_0I_2 + C_1I_1 + C_2O_1 \dots(8)$$

$$C_0 = \left(\frac{-kx + 0.5\Delta t}{k - kx + 0.5\Delta t} \right) \dots(9)$$

$$C_1 = \left(\frac{kx + 0.5\Delta t}{k - kx + 0.5\Delta t} \right) \dots(10)$$

$$C_2 = \left(\frac{k - kx - 0.5\Delta t}{k - kx + 0.5\Delta t} \right) \dots(11)$$

$$C_0 + C_1 + C_2 = 1 \dots(12)$$

Despreciando el almacenamiento en cuña $x = 0$, se tiene

$$C_0 = C_1 = \left(\frac{0.5\Delta t}{k + 0.5\Delta t} \right) \dots(13)$$

$$C_2 = \left(\frac{k - 0.5\Delta t}{k + 0.5\Delta t} \right) \dots(14)$$

$$O_2 = C_0I_2 + C_1I_1 + C_2O_1 \dots(15)$$

El tiempo de viaje desde cada celda hasta la salida de la cuenca se obtiene mediante la determinación de la distancia de viaje desde cada celda hasta la salida de la cuenca. Lo anterior se complementa ya sea estimando el escurrimiento en las laderas y el tiempo de viaje de la corriente principal o simplemente suponiendo una velocidad de viaje constante, dado por la relación entre la distancia del punto más alejado de la salida de la cuenca entre el tiempo de concentración.

En el SIG se obtienen las longitudes de viaje de cada celda, que posteriormente son convertidas por el programa MPE en los tiempos de viaje que requiere el método de ModClark para la transferencia del escurrimiento.

$$Tt = Tc \times \left(\frac{Lv_N}{Lv_n} \right) \dots (16)$$

Donde:

Tc , tiempo de concentración (h)

Tt , tiempo de tránsito o tiempo de viaje (h)

Lv_N , longitud de viaje de la celda más lejana

Lv_n , longitud de viaje de la celda que analiza

3 INFORMACIÓN DE LAS ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS E HIDROMÉTRICAS

En la actualidad se requieren modelos hidrológicos más exactos, lo cual implica más y mejor calidad de datos físicos, que a su vez son recolectados en campo con el equipo necesario, tales como estaciones climatológicas e hidrométricas.

El enfoque cuantitativo del ciclo hidrológico es la base de los estudios sobre evaluación y manejo de los recursos hidráulicos. Este enfoque presenta dos problemas a los hidrólogos, el primero es el cuantificar las cantidades de agua en las diferentes fases de este ciclo y el segundo, en evaluar sus velocidades de transferencia entre fases. Lo anterior sólo es posible de alcanzar con cierta exactitud y ello depende fundamentalmente de la disponibilidad de mediciones que se hayan realizado de los componentes fundamentales del ciclo hidrológico, por ejemplo, precipitación, escurrimiento, evaporación, humedad del suelo, etc.

El monitoreo automatizado de cuencas hidrológicas nos permite alimentar la información adquirida, a modelos de pronóstico de avenidas, mediante los cuales se podrá estimar los volúmenes de los escurrimientos de una cuenca y sus efectos en los embalses. Estos modelos dan como resultado información que permite la ejecución anticipada de operaciones en una central hidroeléctrica, para el manejo de los sistemas de dosificación de aguas, con fines de generación eléctrica, o para la prevención de desastres.

Para este estudio se utilizaron las estaciones automáticas a cargo de la CFE situadas dentro de la cuenca Chicoasén.

El Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) realiza el monitoreo de estaciones hidrométricas y climatológicas en diferentes cuencas hidrológicas de México vía satélite (fig. 10). En la página de internet del IIE se puede encontrar información hidrométrica y climatológica de las estaciones localizadas en las cuencas de CFE para generación hidroeléctrica.



Figura 10: Cuencas hidrológicas con estaciones hidrométricas y climatológicas automáticas del IIE

Cuenta con un monitoreo automático de las estaciones a cada hora, siendo ésta de alta confiabilidad y disponibilidad en tiempo real. La información se presenta en internet de manera diaria, semanal y mensual, tanto en forma gráfica como tabular.

El IIE maneja 13 estaciones dentro de la cuenca Chicoasén. La información de cada una de ellas fue obtenida desde su página de internet.



Figura 11: Localización de las estaciones dentro de la cuenca Chicoasén. Fuente: IIE

Existen tres estaciones hidrométricas dentro de la cuenca Chicoasén, por lo que se dividirá en tres subcuencas; Acala, Boquerón y Santo domingo, con el objetivo de comparar los gastos medidos con los calculados y así calibrar los parámetros en el modelo lluvia-escorrimento.

En conclusión, para llevar a cabo tanto este modelo lluvia-escorrimento, así como cualquier otro estudio en la hidrología, es de suma importancia contar con la información que las estaciones climatológicas e hidrométricas nos proporcionan. En este caso, la precipitación se utilizará como información de entrada en el modelo lluvia-escorrimento.

3.1 Características generales

Al 2012 México contaba con 3,817 estaciones climatológicas oficiales en operación (CONAGUA), las cuales miden las variables climatológicas e hidrométricas que se registran en el país.

- **Estación climatológica (Automatizada y Tradicional):** Conjunto de instrumentos colocados a la intemperie que permiten medir las variaciones del clima, colocados en sitios estratégicos representativos de ambientes diversos. Las estaciones climatológicas miden temperatura, precipitación pluvial, evaporación, velocidad y dirección del viento.

EVENTO CLIMÁTICO	INSTRUMENTO DE MEDICIÓN
Precipitación	Pluviómetro o Pluviógrafo
Temperatura	Termómetro
Evaporación	Tanque evaporómetro
Viento	Anemómetro y Veleta
Presión atmosférica	Barómetro
Humedad	Higrómetro

Tabla 5: Instrumentos de medición por evento climático.



Figura 12. Estación climatológica.

Se entiende por elemento climatológico "Toda propiedad o condición de la atmósfera cuyo conjunto define el estado físico del tiempo o del clima de un lugar determinado, para un momento o un período de tiempo dados".

Dentro de los más esenciales se citan:

- Temperatura: máxima, mínima y ambiente.
- Humedad: relativa, absoluta, relación de mezcla, específica, presión del vapor.
- Viento: dirección y velocidad, ráfaga máxima.
- Nubosidad: tipo, altura, cantidad.
- Presión: máxima absoluta, máxima media, media, mínima media, mínima absoluta.
- Precipitación: cantidad, frecuencia, intensidad.
- Radiación.

Hasta el 2010, México contaba con 368 estaciones hidrométricas en operación.

- **Estación Hidrométrica:** Registra en forma continua los niveles de agua de un curso o río, en determinada sección, con el fin de calcular una relación entre nivel y caudal y obtener una medición continua del caudal. Sirven para conocer la cantidad, disponibilidad del recurso y su distribución entre usuarios, también registran algunos parámetros climatológicos.

En la figura 13, se pueden observar las estaciones hidrométricas dentro de la cuenca Chicoasén.

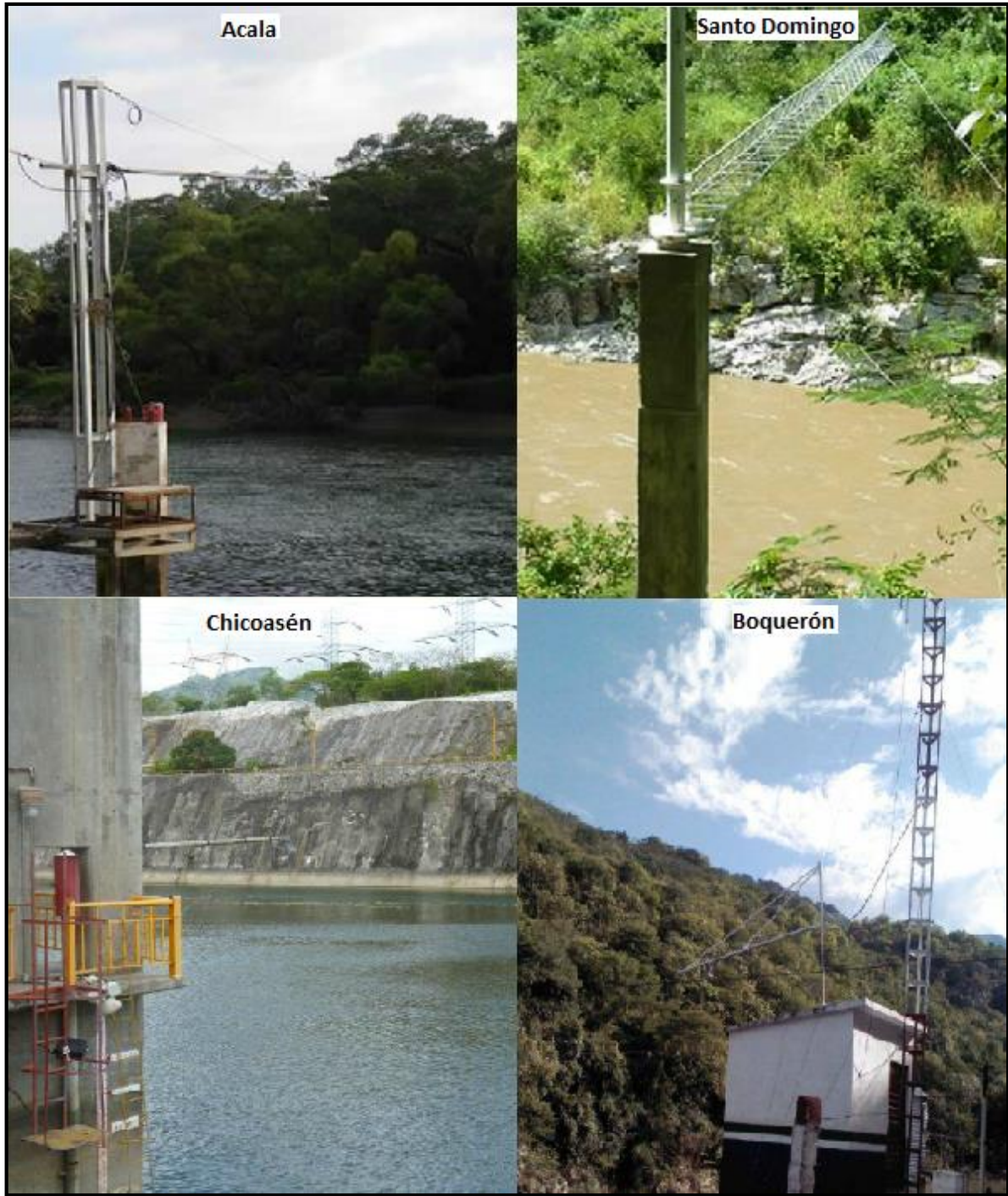


Figura 13: Estaciones hidrométricas de la cuenca Chicoasén.

Las estaciones hidrométricas, además del equipo de niveles, están constituidas por un tramo del cauce llamado tramo de aforo, donde se practican todas las operaciones de aforo y en el cual están localizadas las siguientes partes:

Reglas graduadas o miras, las cuales están debidamente relacionadas con un punto de referencia altimétrica o BM, que se utilizan para medir el nivel de agua en cualquier momento. También debe ubicarse el medidor de picos, el cual registrará las crecientes.

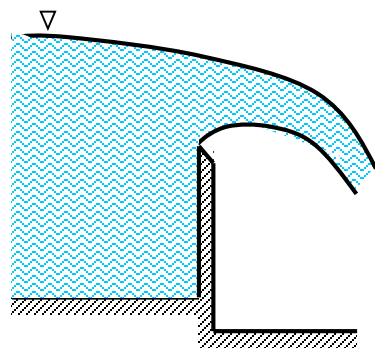
Una estructura de aforo, que puede ser puentes, pasarelas o canastilla, se utiliza para hacer la medición de velocidades en distintas verticales de la sección llamada estructura de aforos.

El determinar el volumen de agua que pasa por una sección en una unidad de tiempo, se le llama aforar. Para ello, hay varios métodos como:

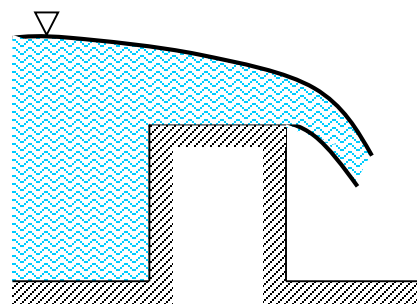
- Sección de control, es donde existe una relación única entre el tirante y el gasto. Las más habituales son los vertedores y las que producen un tirante crítico, como el estrechamiento del fondo del cauce, su elevación o una combinación de las dos.

Se le llama vertedor a un muro o estructura hidráulica en donde se descarga agua por encima de él. Existen vertedores de diferentes secciones como rectangular, triangular, trapecial, circular, etc., y todos ellos pueden ser de pared delgada o de pared gruesa.

Se dice que un vertedor es de pared delgada cuando la descarga se efectúa en una placa de arista aguda, por el contrario cuando la descarga hace contacto con toda una superficie, el vertedor es de pared gruesa.



Vertedor de pared delgada



Vertedor de pared gruesa

- Relación sección-velocidad, es medir la velocidad en varios puntos de la sección transversal y calcular el gasto por medio de la ecuación de continuidad:

$$Q = AV$$

Donde

Q, gasto en la sección, en m^3/s

V, velocidad media de la corriente, en m/s

A, área de la sección transversal hasta el nivel del agua, en m^2

Como la velocidad es diferente en cada punto de la sección transversal, la ecuación resulta:

$$Q = \sum_{i=1}^n a_i V_{mi}$$

Donde:

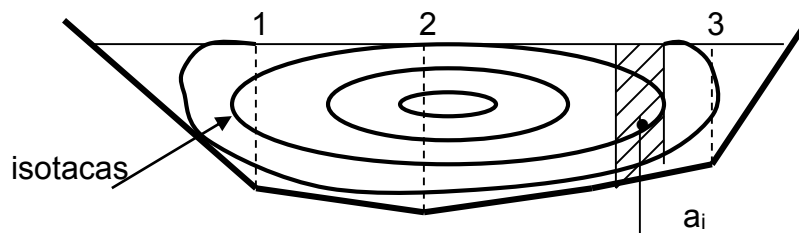
a_i , área de la subdivisión i del área total

V_{mi} , velocidad media en dicha área, calculada de la siguiente manera:

$$V_{mi} = \frac{V_{0.2} + V_{0.8}}{2}$$

Donde:

$V_{0.2}$ y $V_{0.8}$ son las velocidades medidas a profundidades de 0.2 y 0.8 del tirante.



Distribución de velocidades en una sección

Las velocidades se miden por lo general con molinetes, los cuales tienen una hélice que gira impulsada por la corriente y mediante un mecanismo eléctrico mide las revoluciones por minuto o por segundo con que gira la hélice. Ésta velocidad angular se transforma en m/s usando la fórmula de calibración del aparato proporcionada por el fabricante.

- Relación sección-pendiente. Cuando no se cuenta con otro aforo y se necesita conocer el gasto máximo, se recurre al método de sección-pendiente. Para llevarlo a cabo se necesita conocer la topografía de un tramo del cauce y las marcas del nivel máximo de agua durante el paso de la avenida. La determinación del gasto se hace empleando la fórmula de Manning:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

Donde

- V, velocidad media de la corriente, en m/s
- n, coeficiente de rugosidad Manning
- R, radio hidráulico medio, en m
- S, pendiente hidráulica

Los instrumentos para medir los niveles son:

- a) Limnómetro. Es una regla graduada que se introduce a un costado de la corriente, en la cual se leen los niveles del agua. En general, en época de lluvias se toman lecturas cada dos horas durante el día y en época de estiaje una diaria. Como la avenida máxima puede no coincidir con alguna de las lecturas, es recomendable marcar el limnómetro con pintura soluble al agua y de esta manera saber el nivel máximo alcanzado.
- b) Limnógrafo. Es un aparato automático que registra de forma continua los niveles; consta de un flotador unido a una plumilla que marca los niveles del agua en un papel fijado a un tambor que gira mediante un mecanismo de relojería. También se coloca en las márgenes del cauce, unido por un tubo o zanja o bien dentro del cauce siempre y cuando se tenga en donde fijarlo para protegerlo de las avenidas máximas.

Para el estudio de la cuenca Chicoasén, se cuenta con una red de estaciones automáticas de medición a cargo de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Son en total 13 las estaciones dentro de ésta, que a su vez pueden ser de tipo hidrométrica, pluviométrica o climatológica. Sus nombres, tipo de estación y ubicación geográfica se muestran en la siguiente tabla:

ESTACIÓN	TIPO DE ESTACIÓN	COORDENADAS GEOGRÁFICAS	
		Latitud	Longitud
Acala	Hidrométrica y Pluviométrica	16°39'19"	92°57'19"
Boquerón	Hidrométrica y Pluviométrica	16°36'54"	93°10'11"
Cristóbal Obregón	Climatológica	16°26'29"	93°28'01"
Monterrey	Pluviométrica	16°04'03"	93°23'04"
Chicoasén	Climatológica e Hidrométrica	16°56'29"	93°06'03"
Angostura	Climatológica e Hidrométrica	16°24'03"	92°46'40"
San Cristóbal	Climatológica	16°43'38"	92°36'11"
Sto. Domingo	Climatológica e Hidrométrica	16°27'09"	93°03'23"
Santuario	Pluviométrica	16°22'25"	93°13'52"
Sierra Morena	Climatológica	16°09'08"	93°35'28"
Tres Picos	Pluviométrica	16°13'38"	93°34'40"
Tuxtla Gutiérrez	Climatológica	16°45'42"	93°05'10"
Cañón del Sumidero	Climatológica e Hidrométrica	16°44'33.8"	93°02'2.8"

Tabla 6: Estaciones automáticas de CFE dentro de la cuenca Chicoasén.

3.1.1 La precipitación y su importancia

La precipitación es cualquier tipo de hidrometeoro que cae a la superficie terrestre. Ocurre de varias formas, sólida o líquida:

- Lluvia: Se consideran gotas con diámetro mayor a 0.5 mm.
- Llovizna: Pequeñas gotas cuyo diámetro va de 0.1 mm a 0.5 mm.
- Escarcha: Capa de hielo transparente y suave, contiene bolsas de aire, se forma en zonas expuestas a congelamiento.
- Nieve: Precipitación sólida. Cristales de hielos blancos o translúcidos con cristales simples.
- Granizo: Precipitación con forma irregular, ocurre como precipitación sólida para después fundirse y convertirse en aguacero.
- Rocío: Precipitación oculta asociada a un diámetro de 0.1 mm a 0.5 mm

El factor principal en la hidrología de un área o cuenca determinada es la precipitación, pues es la principal aportación de agua a la superficie del terreno. Por esta razón, el conocimiento de sus patrones de comportamiento en espacio y tiempo es elemental para el conocimiento de la humedad del suelo, la recarga de aguas subterráneas, y por supuesto, del escurrimiento.

La medición de la precipitación se realiza mediante dos instrumentos:

- Pluviómetro: Un pluviómetro es un instrumento que mide la cantidad de agua precipitada de un determinado lugar, recogiendo el agua atmosférica en sus diversos estados, el total se denomina precipitación. La unidad de medida es en milímetros (mm). La información de la precipitación es de forma acumulada en 24 horas.

El agua recogida en el depósito se introduce en una probeta graduada, y se determina entonces la cantidad de lluvia caída, es decir, la altura en mm de la capa de agua que se habría podido formar sobre la superficie horizontal e impermeable, de no evaporarse nada.



Figura 14: Pluviómetro profesional.

- Pluviógrafo: Aparato que toma la información de la precipitación de manera acumulada también, pero proporcionándonos el comportamiento de la lluvia con respecto al tiempo (variación inclusive cada 10 minutos). Es utilizado para saber la cantidad e intensidad de la lluvia en forma de gráfica continua.



Figura 15: Pluviógrafo de balancín.

3.2 Selección de las tormentas de análisis para la cuenca Chicoasén

Como se mencionó en el capítulo anterior, el Instituto de Investigaciones Eléctricas brinda a través de su portal en internet la información necesaria de las estaciones hidrométricas y climatológicas dentro de la cuenca Chicoasén para nuestro modelo. La lluvia se reporta cada 60 minutos por radio.

La selección de las fechas de estudio comprende únicamente los años del 2010 al 2014, ya que en el Instituto de Ingeniería existe un estudio con el modelo ya calibrado del 2006 al 2009.

Al determinar las fechas de análisis, se hizo uso de tres criterios:

- 1.- Observación directa: De los registros de lluvia disponibles, se seleccionan las tormentas de mayor intensidad.
- 2.- Observación indirecta: Basarse en las fechas de tormentas intensas anteriores que causaron daños en la zona de estudio.
- 3.- Seleccionar aquellos registros que representan un incremento en el escurrimiento.

Más detalladamente, el procedimiento que se siguió para seleccionar las tormentas que se analizarían fue, por supuesto, elegir aquellas que representaban para cada año el caudal máximo o evento extraordinario como inundaciones, identificando uno por año. Se analizaron tanto gastos como precipitaciones dependiendo el tipo de estación.

Cada año a analizar se dividió en:

- Temporada de estiaje: enero a junio.
- Temporada de lluvias: julio a diciembre.

Para obtener la información de la página del IIE, se fue seleccionando estación por estación. La página da la facilidad de elegir periodos de tiempo y exportarlos en formato .xlsx (Excel). Una vez descargados, se encontraron los máximos de cada estación y año. Es importante señalar que muchas veces las estaciones no funcionaban y simplemente no tenían datos o tenían errores, por lo que se trató de interpolar y promediar datos con la finalidad de obtener una buena calidad de información.

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	
2	Fechas	ACALA			ANGOSTURA		BOQUERON			CAÑÓN DEL SUMIDERO		CHICOASÉN		CRISTOBAL OBREG	MONTERREY	SAN CRISTOBAL	
		Nivel (m)	Gasto (m³/s)	Precipitación Pluvial (mm)	Nivel (m)	Precipitación Pluvial (mm)	Nivel (m)	Precipitación Pluvial (mm)	Gasto (m³/s)	Nivel (m)	Precipitación Pluvial (mm)	Nivel (m)	Precipitación Pluvial (mm)	Precipitación Pluvial (mm)	Precipitación Pluvial (mm)	Precipitación Pluvial (mm)	
6	01/09/2011 03:00			0	526.37	1.7	3.72	0	210		0	390.76	0.2	0	0	1.4	
7	01/09/2011 04:00			0	526.39	0.3	3.71	0	209		0	390.76	0.2	0	0	0.4	
8	01/09/2011 05:00			0	526.41	0.1	3.67	0	204		0	390.81	0.3	0	0	0.1	
9	01/09/2011 06:00			0	526.42	0	3.65	0	201		0	390.86	0.2	0	0	0.3	
10	01/09/2011 07:00			0	526.43	0	3.61	0.1	196		0	390.84	0	0	0	0.2	
11	01/09/2011 08:00			0	526.44	0	3.57	0.1	191		0	390.85	0.1	0	0	0	
12	01/09/2011 09:00			0	526.45	0	3.54	0	187		0	390.86	0	0	0	0	
13	01/09/2011 10:00			0	526.47	0	3.54	0	187		0	390.82	0	0	0	0	
14	01/09/2011 11:00			0	526.49	0	3.5	0	182		0	390.82	0	0	0	0	
15	01/09/2011 12:00			0	526.5	0	3.46	0	177		0	390.81	0	0	0	0	
16	01/09/2011 13:00			0	526.51	0	3.44	0	175		0	390.76	0	0	0	0	
17	01/09/2011 14:00			0	526.52	0	3.42	0	172		0	390.71	0	0	0	0	
18	01/09/2011 15:00			0	526.53	0	3.39	0	169		0	390.66	0	0	0	0	
19	01/09/2011 16:00			0	526.53	0	3.38	0	168		0	390.59	0	0	0	0	
20	01/09/2011 17:00			0	526.55	0	3.35	0	164		0	390.54	0	0	0	0	
21	01/09/2011 18:00			0	526.57	0	3.34	0	163		0	390.45	0	0	0	0	
22	01/09/2011 19:00			0	526.58	0	3.31	0	159		0	390.42	0	0	0	0	
23	01/09/2011 20:00			0	526.59	0	3.29	0	157		0	390.42	0	0	0	0	
24	01/09/2011 21:00			0	526.6	0	3.25	0	152		0	390.31	0	0	0	0	
25	01/09/2011 22:00			0	526.6	0	3.25	0	152		0	390.21	0	0	0	0	
26	01/09/2011 23:00			0	526.62	0	3.22	0	149		0	390.16	0	0	0	0	
27	02/09/2011 00:00			0	526.63	0	3.21	0	148		0	390.09	0	0	0	0	

Figura 16: Datos de las estaciones hidrométricas y climatológicas del año 2011 descargados de la página del IIE.

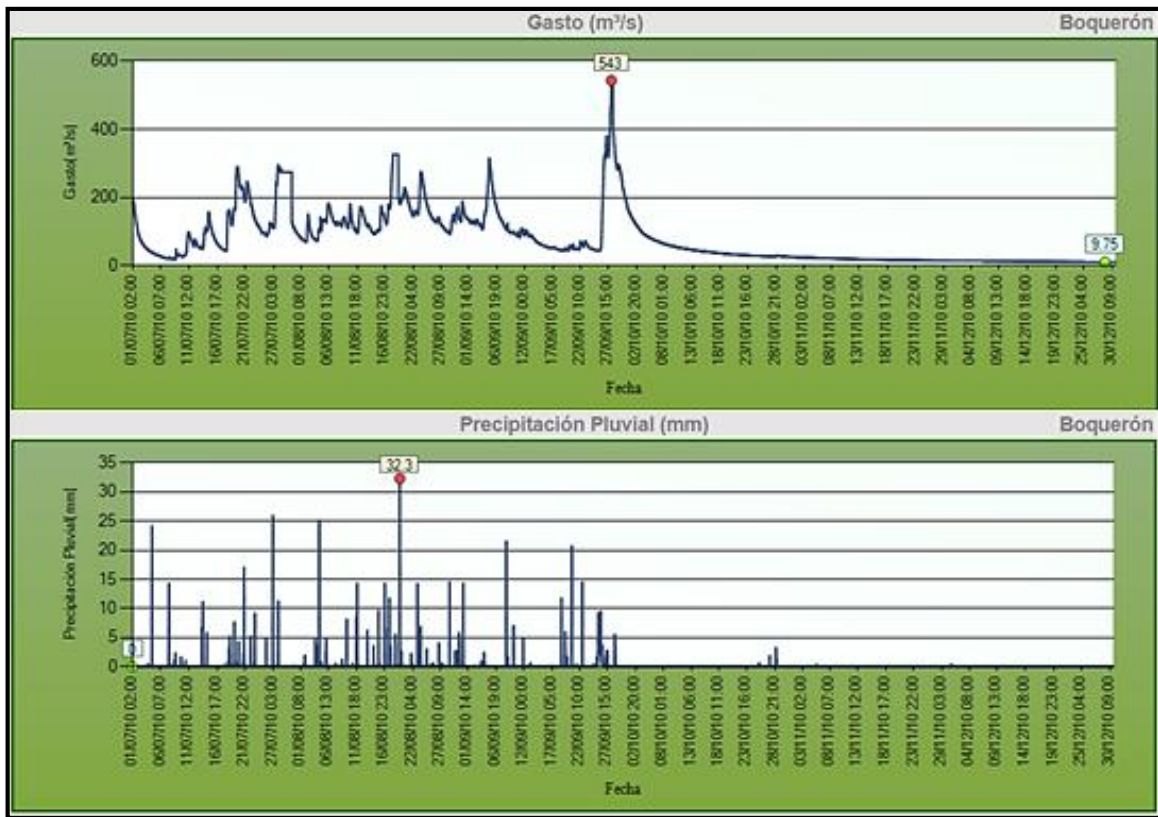


Figura 17: Gasto y precipitación medido en la cuenca hidrométrica de Boquerón en el 2010, época de lluvias. Página del IIE.

Para elegir el periodo de análisis, con la información disponible se graficaron los hidrograma y hietogramas para tener una mejor representación de los datos por consiguiente, una buena selección de fechas.

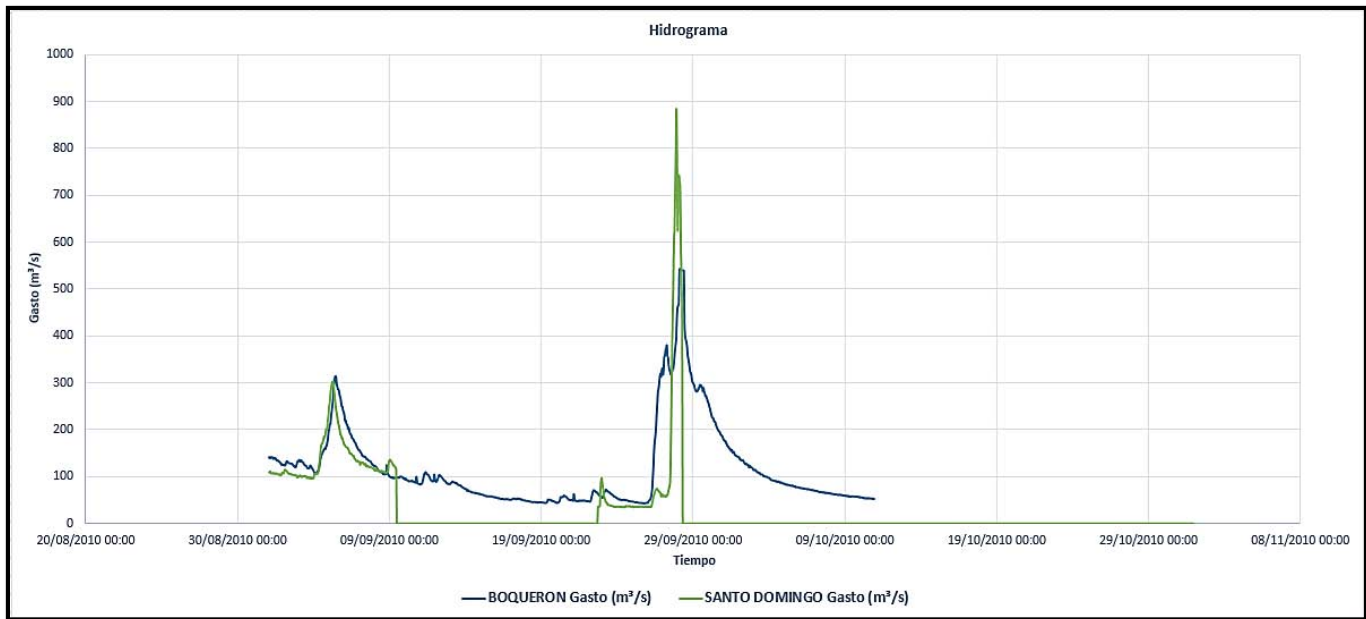


Figura 19: Hidrograma de la cuenca Chicoasén del año 2010.

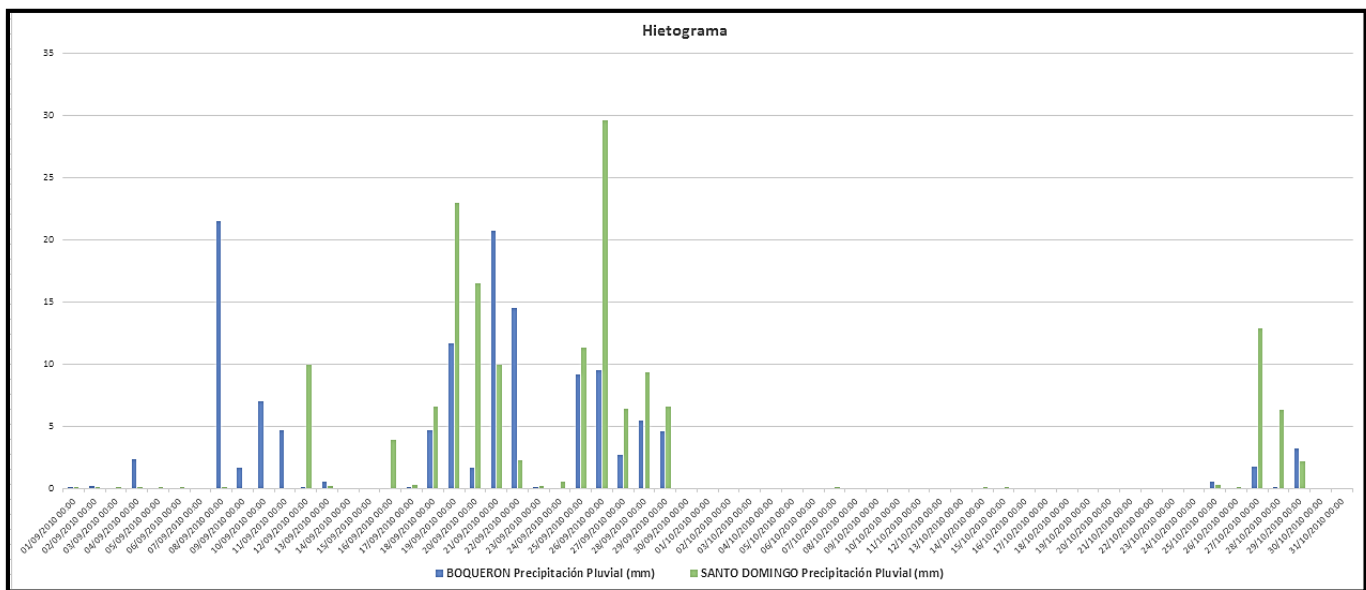


Figura 18: Hietograma de la cuenca Chicoasén.

Aunque los máximos encontrados fueron para un solo día, sabemos que los eventos no son independientes, pues estarán influenciados por la tormenta anterior. Es por esto que del día seleccionado se tomaron diez días antes y otros diez días después para obtener el periodo de análisis.

A partir del estudio de la información descargada, seguido de la observación de los hidrogramas y hietogramas, los cinco periodos seleccionados fueron los siguientes:

AÑO	FECHAS SELECCIONADAS
2010	20 de septiembre al 10 octubre
2011	14 septiembre al 24 octubre
2012	1 septiembre al 18 octubre
2013	1 octubre al 20 octubre
2014	14 septiembre al 29 octubre

Tabla 7: Fechas seleccionadas para calibrar la cuenca Chicoasén.

4 OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS HIDROLÓGICOS MEDIANTE UN SIG PARA LAS CUENCAS BOQUERÓN, SANTO DOMINGO Y CHICOASÉN

Las características físicas de una cuenca hidrológica son importantes desde el punto de vista hidrológico, ya que constituyen uno de los tantos factores que afectan el escurrimiento.

Éstos parámetros hidrológicos son estimaciones que implican varias propiedades físicas de ésta y que tienen una aplicación directa en los cálculos hidrológicos, tal como el tiempo de concentración y el número N que caracteriza numéricamente los complejos hidrológicos suelo-cobertura en la estimación del escurrimiento directo. (Campos Aranda 2010).

Durante la precipitación existen diversos factores que atenúan el proceso de lluvia escurrimiento, parte del agua de lluvia al caer es interceptada por casas, edificios y vegetación. Este proceso ocasiona que solo un porcentaje de la lluvia escurra y otro se infiltre en el terreno. En general la respuesta de la cuenca, ante los diferentes fenómenos depende de las características propias de la misma como son su tipo y uso de suelo, vegetación existente, arreglo de corrientes naturales, longitud de sus cauces y topografía, la interacción de los factores antes mencionados ocasiona la disminución o el aumento del escurrimiento superficial. (Domínguez et. Al, 2009).

Tradicionalmente, la medición u obtención de los parámetros hidrológicos eran mediante cálculos manuales y herramientas físicas, como planímetros, curvímetros, el uso de papel milimétrico, etc.

Sin embargo, estos procesos conllevan a un notable consumo de tiempo y, en ocasiones, imprecisiones o errores por la técnica utilizada. En la actualidad, gracias a los avances tecnológicos en geoinformática, estos parámetros pueden ser obtenidos de forma automatizada por medio de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). (Hunsaker et al., 1993).

Los sistemas de información Geográfica (SIG) se pueden definir como una combinación organizada de hardware, software y datos geográficos para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada. El objetivo de un SIG es el crear, compartir y aplicar útiles productos de información basada en mapas que respaldan el trabajo de las organizaciones, así como crear y administrar la información geográfica pertinente.

El modelo de parámetros distribuidos está totalmente ligado a estos sistemas computacionales, por lo cual fue requerido el sistema de información geográfica Arcview 3.2.

El SIG funciona, por tanto, como una interfase entre los datos espaciales crudos y el programa de modelación.

Para obtener los parámetros hidrológicos se deben tener en cuenta ciertos requerimientos de programas e información básica representada digitalmente. El programa, sus entradas y extensiones requeridas en este trabajo son las siguientes:

- Arcview 3.2
- Hec-GeoHMS
- Spatial Analyst
- Xtools 6
- Geoprocessing
- Modelo Digital de Elevaciones (MDE)

INEGI define un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) como una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo.

Estos valores están contenidos en un archivo de tipo raster con estructura regular, el cual se genera utilizando equipo de cómputo y software especializados. Existen dos importantes cualidades y ventajas en los MDE, la exactitud y resolución horizontal o grado de detalle digital de representación en formato digital.

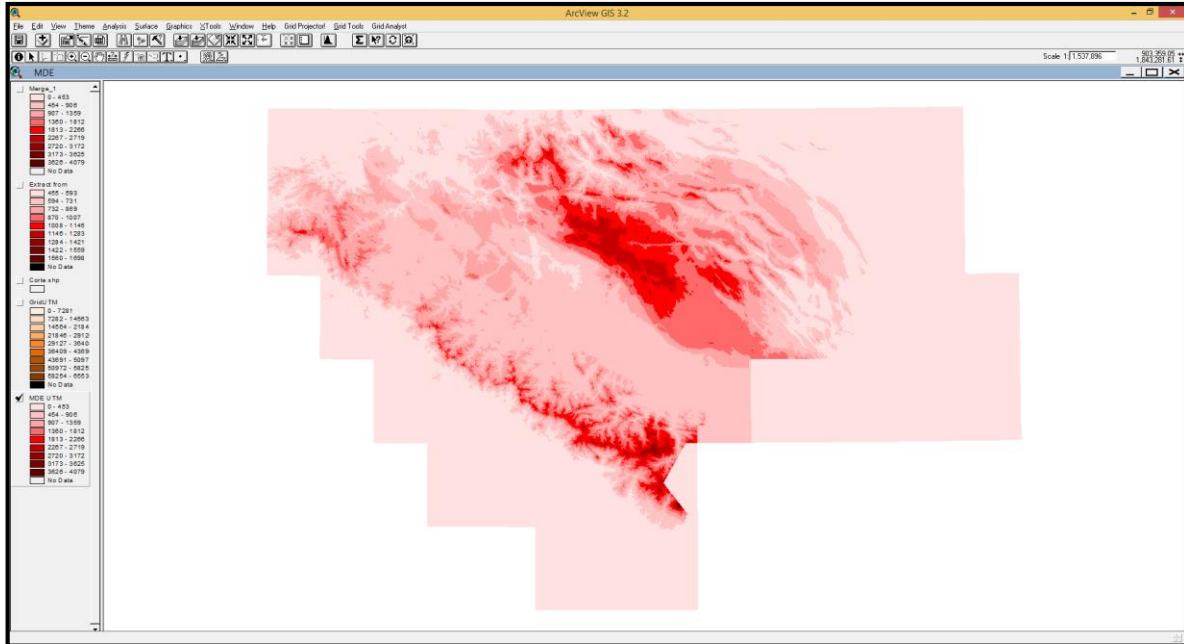


Figura 20: Modelo Digital de Elevaciones MDE de Chicoasén. ArcView.

El límite del área de estudio, el parteaguas, fue extraído y digitalizado de cartas 1:50,000 para contar con una mejor definición, así como para contrastar los resultados conseguidos por el uso del MDE.

El MDE de la cuenca Chicoasén fue procesado por medio de las funciones de análisis de obtención de cuencas con las funciones watershed, waterflow, flow accumulation del software Arcview 3.2.

Se elaboraron los mapas distribuidos de las cuencas utilizando el Sistema de Información Geográfica ArcView, el modelo digital de elevación, escala 1:50,000 y los mapas digitalizados de uso y tipo de suelo a escala 1:250,000 del INEGI.

Para ello primero se realizó el análisis de terreno en el SIG y se obtuvo el mallado de las cuencas, con un tamaño de celdas de 1km por 1 km, y los parámetros hidrológicos para cada celda celdas tales como área, longitud de viaje, pendiente, etc.

En este capítulo se tratará el procedimiento a seguir para obtener parámetros hidrológicos de la cuenca en forma de malla, con celdas.

4.1 Área de la Cuenca

El tamaño o magnitud de una cuenca es el área en proyección horizontal, encerrada por un parteaguas.

El parteaguas es la línea imaginaria del contorno de una cuenca de drenaje, que la separa de las adyacentes y distribuye el escurrimiento originado por la precipitación en el sistema de cauces que fluye o drena hacia la salida de la cuenca.

El área de la cuenca es el parámetro más importante para la determinación de sus parámetros hidrológicos, pues existe una relación directa entre la magnitud del área y la magnitud de los volúmenes generados por la precipitación en ella.

En general el tamaño de una cuenca determina el tamaño de sus crecientes, gastos mínimos o de estiaje y escurrimientos promedio.

De acuerdo al tamaño de las cuencas, éstas se clasifican en:

TAMAÑO DE LA CUENCA (km ²)	DESCRIPCIÓN
<25	Muy pequeña
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Intermedia-pequeña
500 a 2500	Intermedia-grande
2500 a 5000	Grande
>5000	Muy grande

Tabla 8: Clasificación de cuencas hidrográficas por su tamaño. (INEGI 2007)

Una cuenca pequeña se define como aquella cuyo escurrimiento es sensible a lluvias de alta intensidad y corta duración y donde predominan las características físicas del suelo con respecto a las del cauce. (Campos, 2005)

Generalmente el área es determinada con planímetro, figuras geométricas, sistemas CAD (Dibujo Asistido por Computadora) o con Sistemas de Información Geográfica (SIG).

En este caso se utilizó el SIG Arcview 3.2, en donde a través de algoritmos matemáticos que evalúan la topografía del terreno es posible delimitar cuencas.

El límite del área de estudio fue obtenido a través del análisis de la información del Modelo Digital de Elevaciones (MDE), el cual mediante un SIG (Arcview 3.2) y la extensión HECGeoHMS, se generó la red de corrientes y los parteaguas tanto de la cuenca como de las subcuencas.

Como la cuenca Chicoasén cuenta con tres estaciones de medición de gasto (Acala, Boquerón y Santo Domingo) la cuenca se subdividió en tres subcuencas para un mejor estudio y así poder comparar los gastos medidos con los calculados y con ellos calibrar los parámetros que intervienen en el modelo lluvia-escurrimiento. Cabe destacar, que se le llamó cuenca Acala a toda la cuenca Chicoasén menos las subcuencas Boquerón y Santo Domingo.

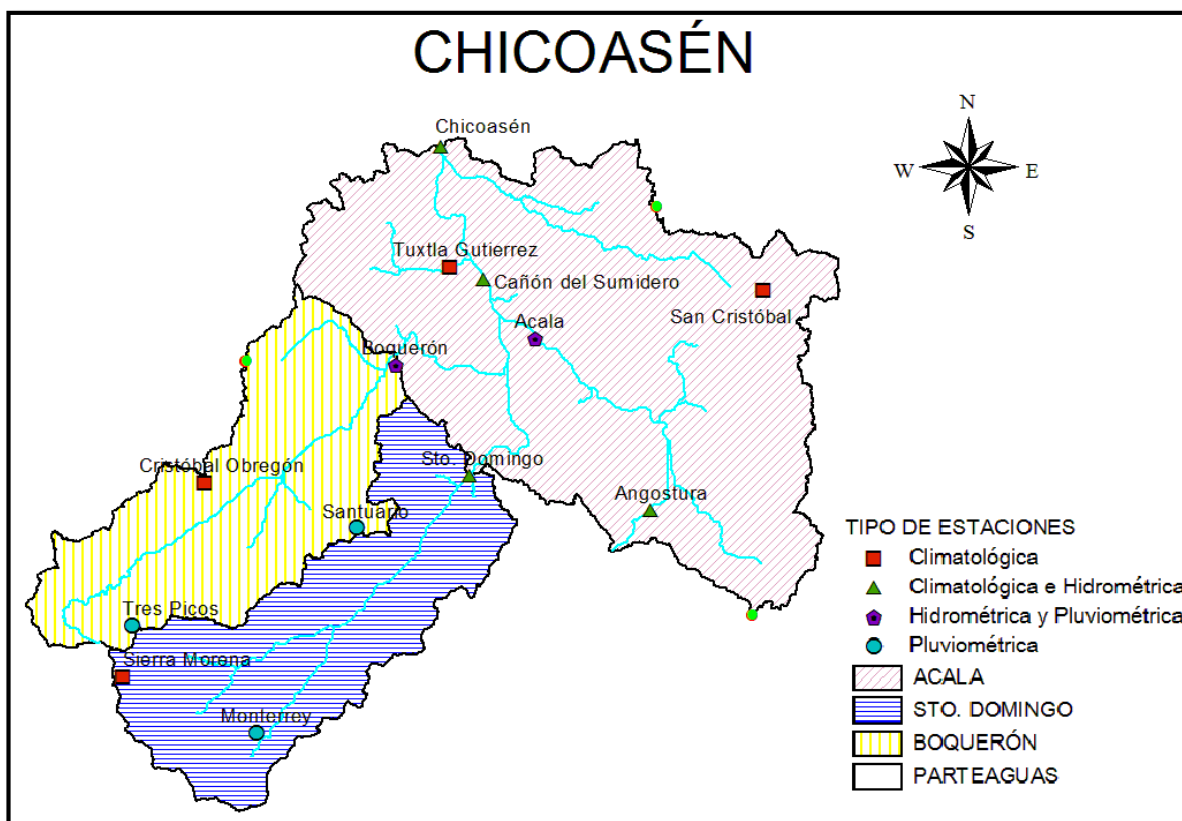


Figura 21: Tipo de estaciones en la cuenca Chicoasén. ArcView.

4.1.1 Área de la cuenca Chicoasén

La cuenca propia de Chicoasén, localizada en la zona central del estado de Chiapas, tiene un área de 7553 km², área comprendida aguas abajo de la Presa “La Angostura” hasta la Presa “Chicoasén”.

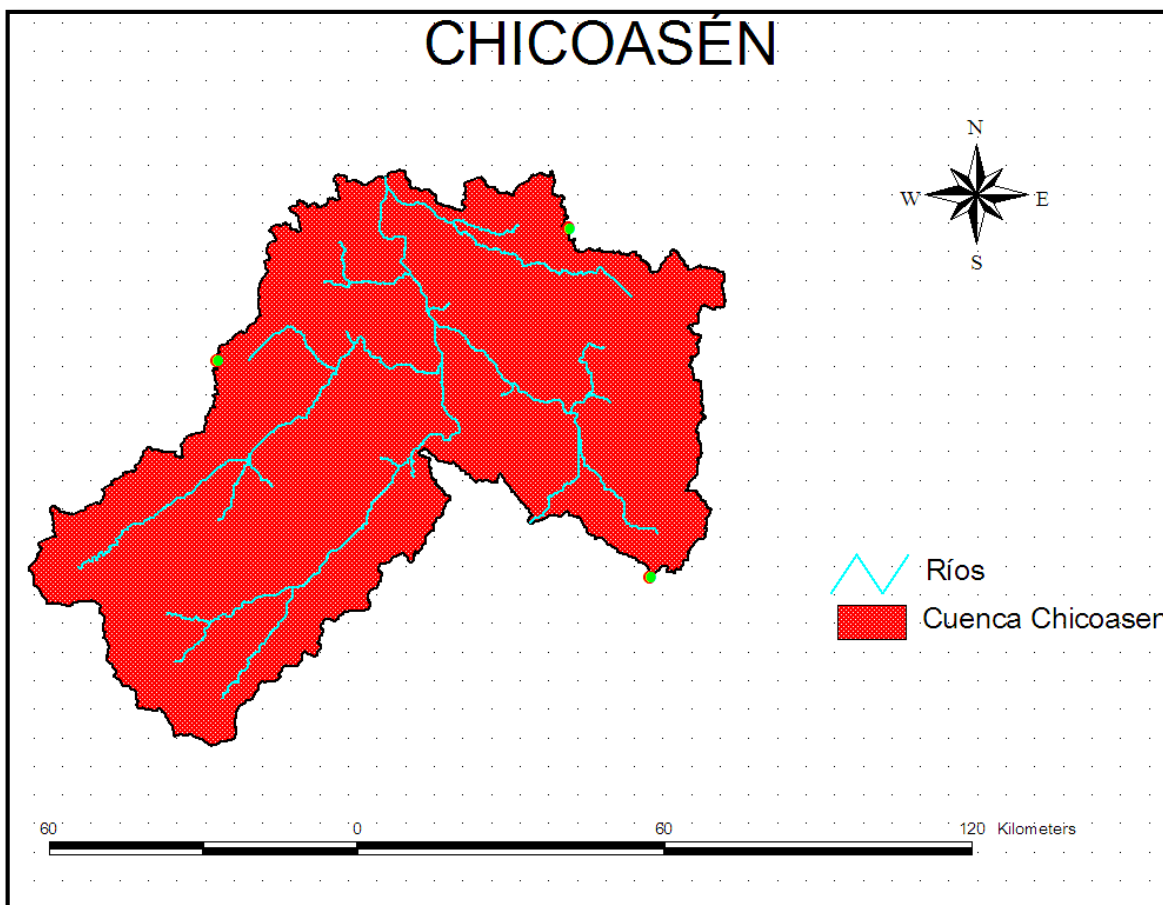


Figura 22: Cuenca Chicoasén. ArcView.

De acuerdo con la clasificación de cuencas hidrográficas por su tamaño, estaríamos tratando con una cuenca “muy grande”.

La cuenca Chicoasén ha sido dividida en tres subcuencas para una mejor medición, ya que su cauce principal está formado por las aportaciones de la presa La Angostura y de los ríos Santo Domingo, Boquerón y Acala, tal como se mencionó anteriormente.

4.1.2 Área de la subcuenca Boquerón

La cuenca Boquerón, cuenta con una extensión territorial de 1716 km². Por lo tanto, es una cuenca considerada como “intermedia- grande”.

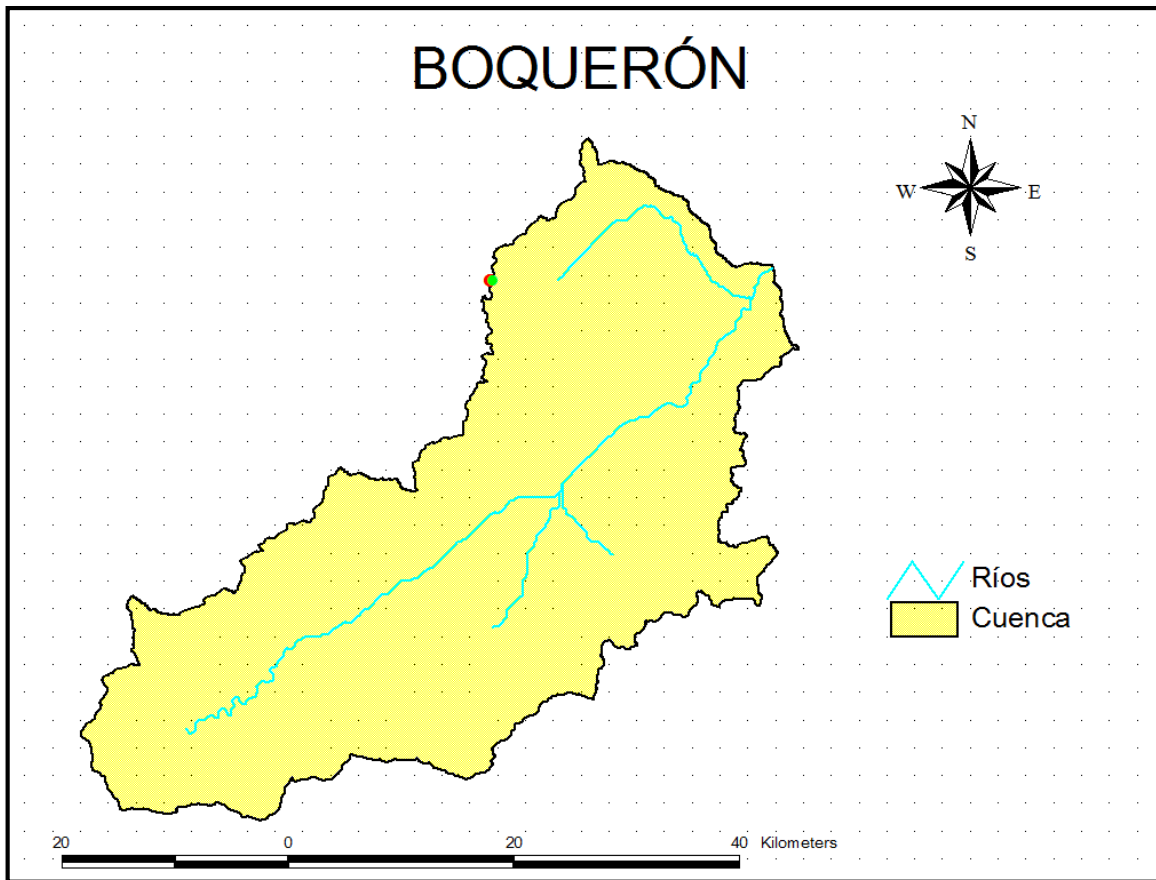


Figura 23: Subcuenca Boquerón. ArcView.

4.1.3 Área de la subcuenca Santo Domingo

La cuenca Santo Domingo tiene un área igual a 1743 km², que al igual que la cuenca Boquerón, es una cuenca clasificada como “intermedia-grande”.

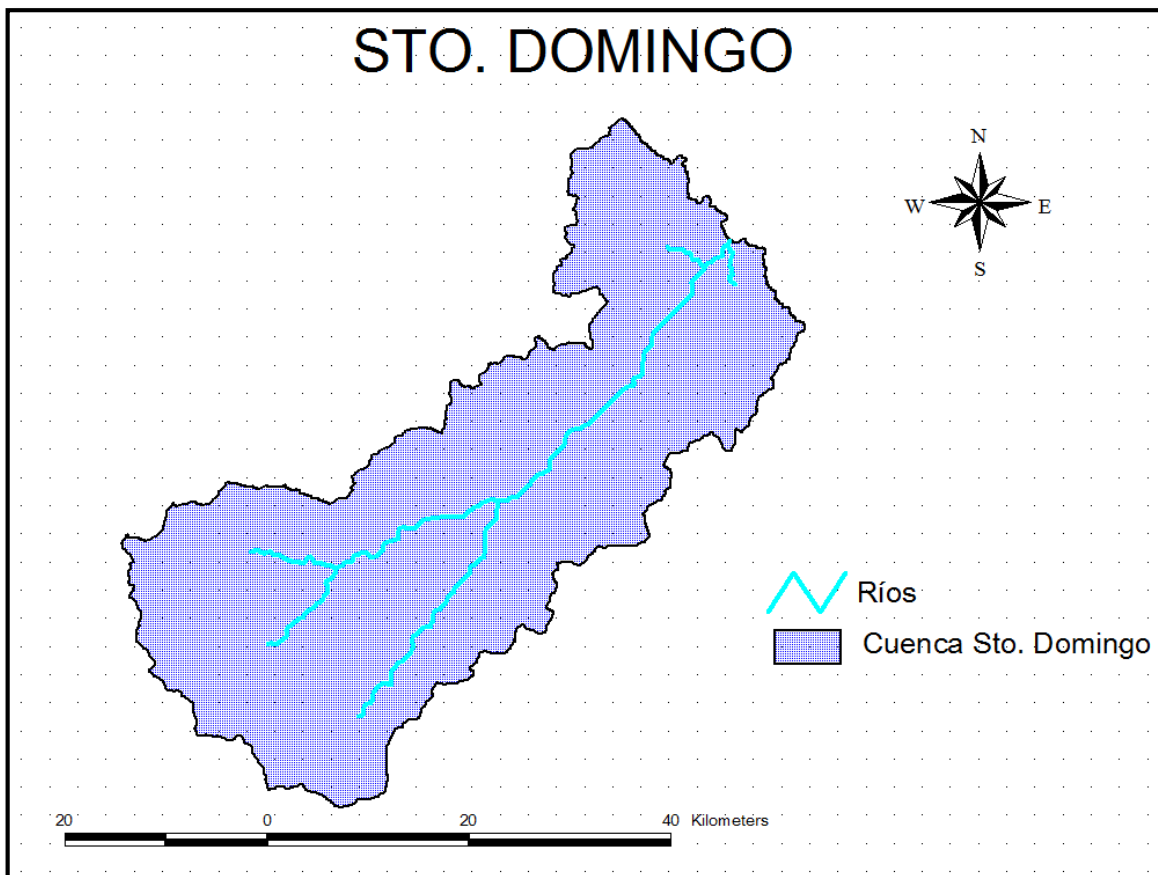


Figura 24: Subcuenca Santo Domingo. ArcView.

4.1.4 Área de la subcuenca Acala

Por último, la cuenca Acala cuenta con una superficie de 4096 km². Una cuenca catalogada como “grande”. Como se mencionó anteriormente, Acala es toda la cuenca Chicoasén, menos las subcuencas Boquerón y Santo Domingo.

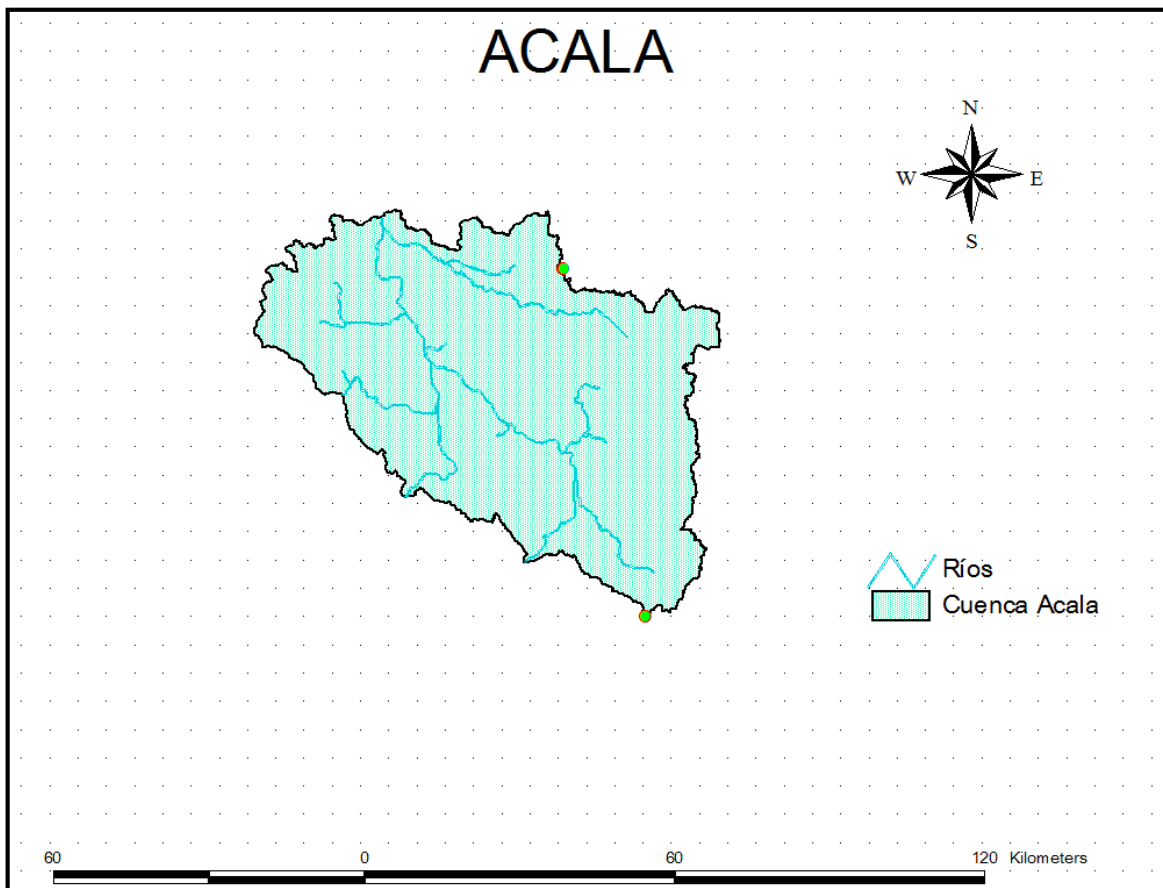


Figura 25: Subcuenca Acala. Arcview.

Finalmente, se muestra a continuación la tabla resumen de todos los parámetros hidrológicos correspondientes a cada cuenca:

CUENCA	PERÍMETRO (km)	A(km ²)	PORCENTAJE (%) DE ÁREA	CLASIFICACIÓN
Boquerón	327.4	1716.6	22.7%	intermedia-grande
Sto. Domingo	349.6	1742.7	23%	intermedia-grande
Acala	948.4	4096	54.2%	grande
Chicoasén	766.8	7553	100%	muy grande

Tabla 9: Área y perímetro de cada subcuenca en Chicoasén.

4.2 Longitud del cauce principal

El cauce principal de una cuenca es la corriente que pasa por el punto de salida de la misma, y que a su vez, recibe el aporte de otros cauces llamados tributarios. Ésta definición sólo es aceptada para las cuencas exorreicas. Todas las cuencas tienen sólo un cauce principal.

La longitud del cauce principal es una medida característica útil y de efecto importante en la respuesta hidrológica de la cuenca, ya que en un río corto los efectos de la precipitación se reflejan más rápidamente que en un río largo (Klohn, 1970). La longitud del río principal es la distancia entre la desembocadura y el nacimiento del mismo.

El cauce principal se determina con auxilio del orden de corrientes, partiendo de la salida de la cuenca hacia aguas arriba, siguiendo la corriente de más alto orden. Una corriente de orden 1 es un tributario sin ramificaciones, una de orden 2 tiene tributarios de primer orden. Dos corrientes de orden 1 forman una de orden 2, dos corrientes de orden 3 forman una de orden 4, etc. Cuando se suman tributarios de distinto orden, se conserva el tributario de mayor orden.

De esta manera, el cauce principal será el de mayor orden dentro de la cuenca. De igual forma, el orden de la cuenca está dado por el orden del cauce principal.

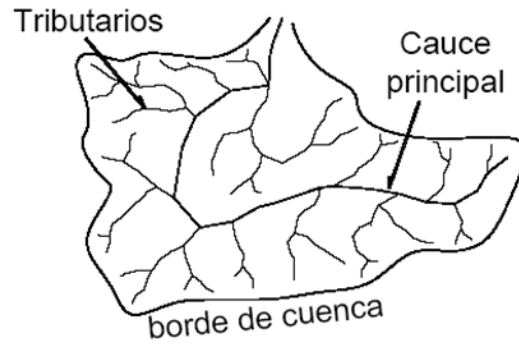


Figura 26: Cauce principal y tributarios de una cuenca.

4.2.1 Cauce principal de la cuenca Chicoasén

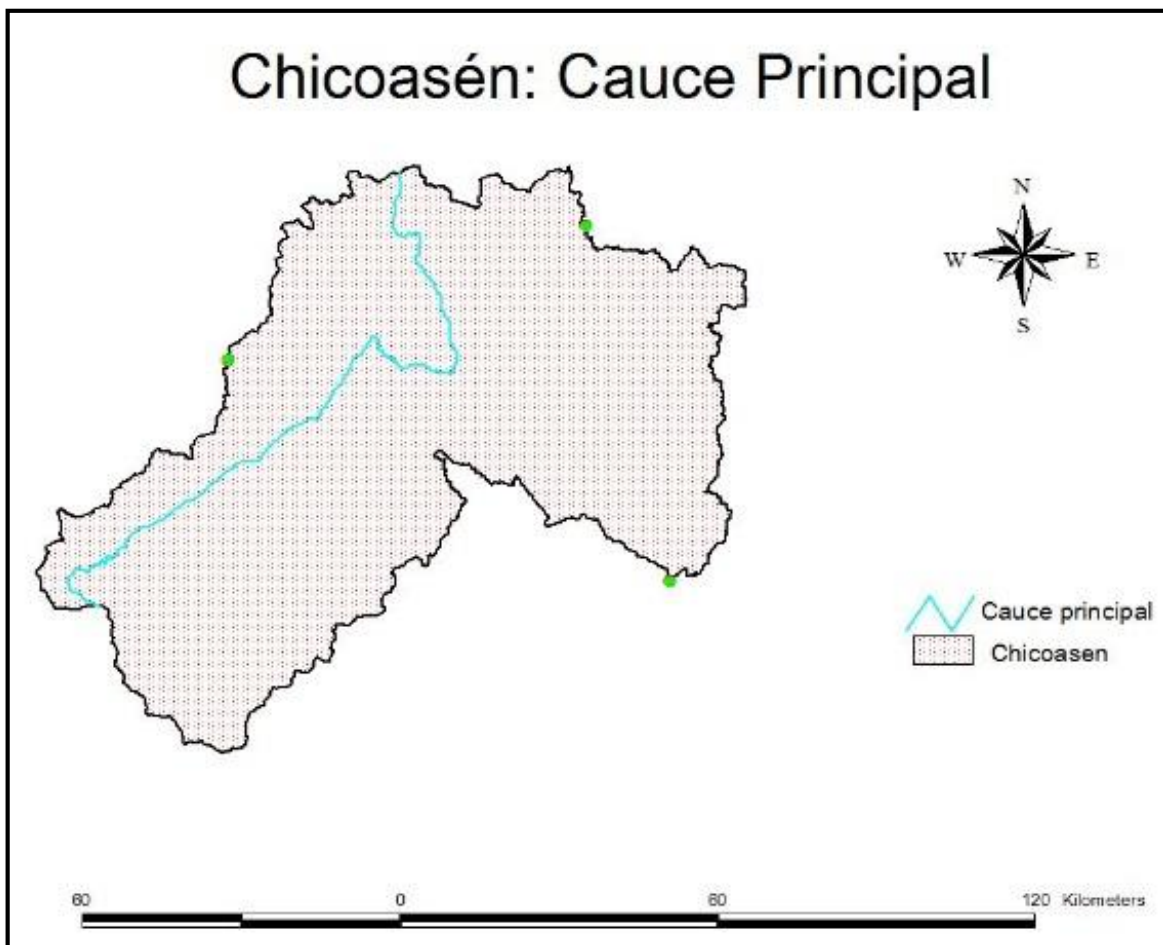


Figura 27: Cauce principal de la cuenca Chicoasén.

4.2.2 Cauce principal de la subcuenca Boquerón

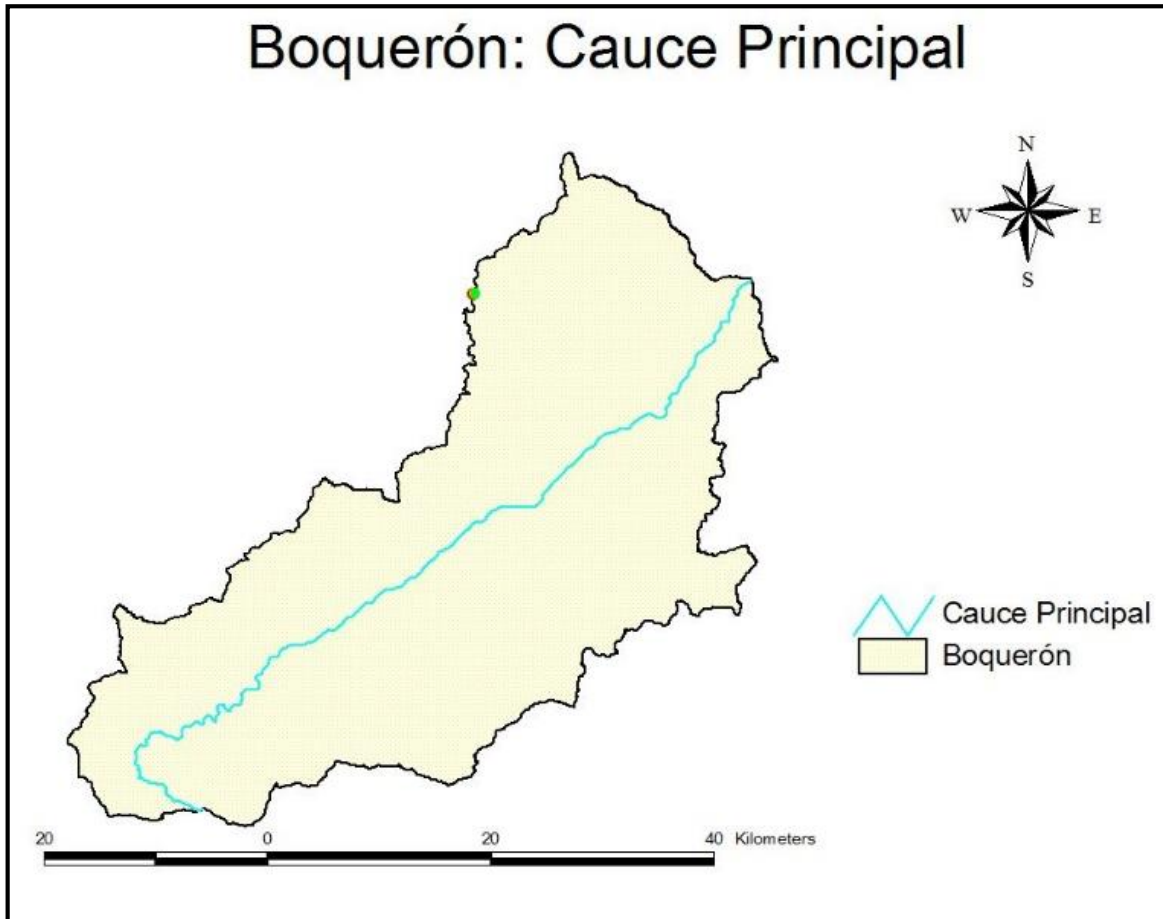


Figura 28: Cauce principal de la subcuenca Boquerón.

4.2.3 Cauce principal de la subcuenca Santo Domingo

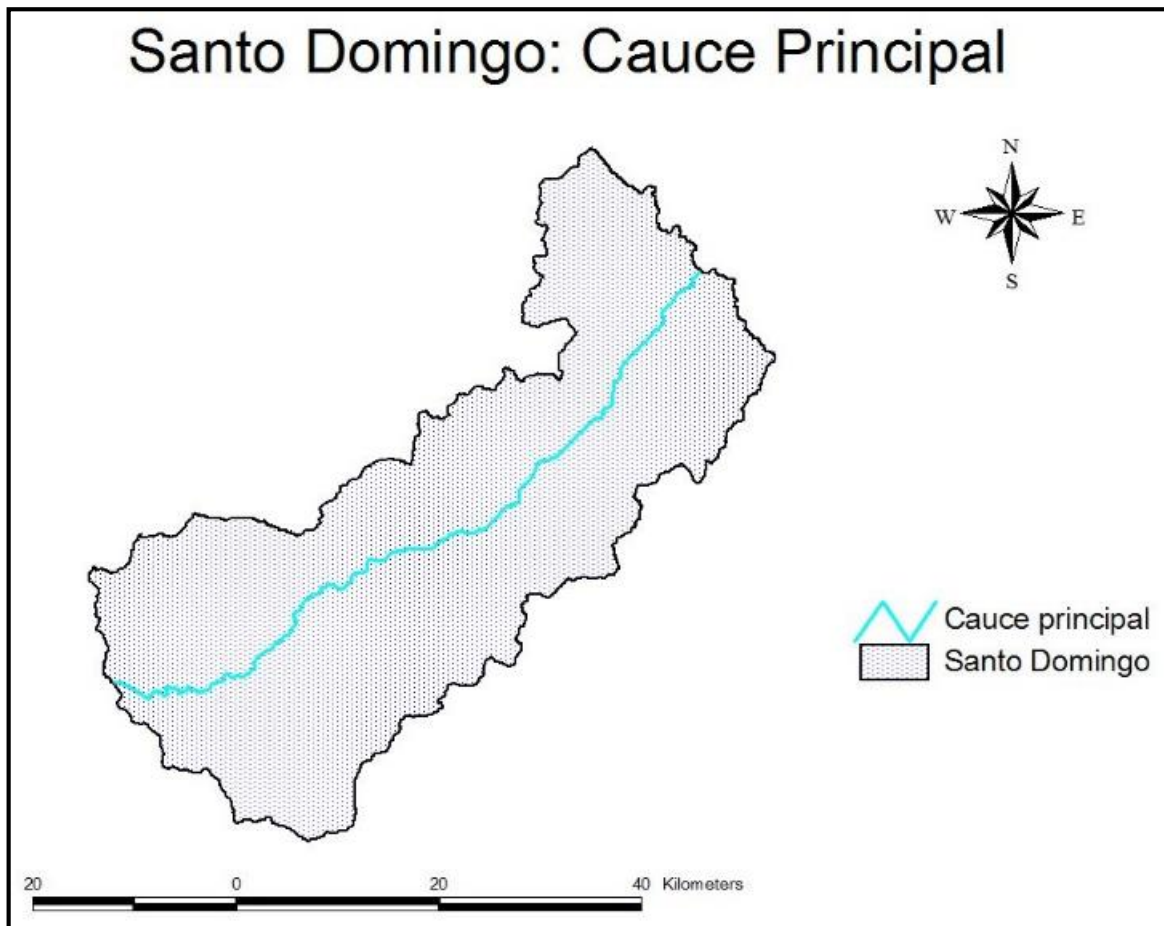


Figura 29: Cauce principal de la subcuenca Santo Domingo.

4.2.4 Cauce principal de la subcuenca Acala

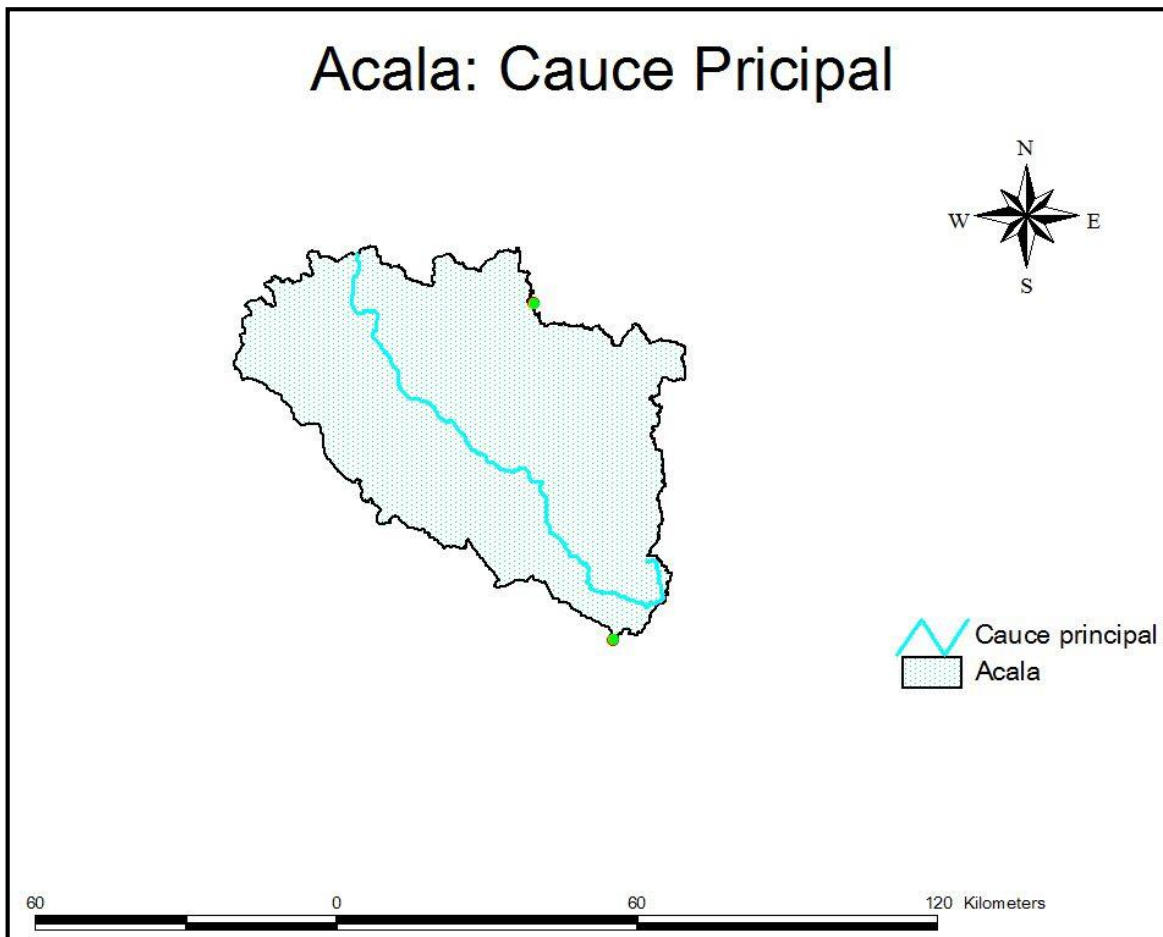


Figura 30: cauce principal de la subcuenca Acala.

Las longitudes de cada cauce principal se presentan a continuación:

CUENCA	LONGITUD DEL CAUCE PRINCIPAL (m)	LONGITUD DEL CAUCE PRINCIPAL (km)
Boquerón	94,651.39	94.65
Acala	132,605.30	132.605
Santo Domingo	88,118.80	88.119
Chicoasén	168,312.61	168.313

Tabla 10: Longitud de los cauces principales. ArcView

4.3 Pendiente del cauce principal

La pendiente de un tramo de río es la relación que existe entre los extremos inicial y final y la distancia horizontal de dicho tramo.

Es uno de los principales indicadores que existen para saber el grado de respuesta de una cuenca a una tormenta. Está relacionada con las características hidráulicas del escurrimiento, con la velocidad de propagación de las avenidas y con la capacidad de transporte de sedimentos.

La pendiente del cauce principal representa un valor medio, pues cada tramo de río tiene una pendiente propia. Por lo tanto, mientras mayor sea el número de tramos seleccionados, la pendiente media del cauce principal se aproximará más al real.

La pendiente del cauce varía, por lo que se necesita obtener una media de ésta. Existen varios métodos para obtenerla, pero el que más toma en cuenta lo antes mencionado, es el criterio y fórmula de Taylor y Schwarz:

$$S_T = \left(\frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \frac{l_n}{\sqrt{S_n}} + \dots} \right)^2$$

Donde:

L: longitud total del cauce principal.

l_i : longitud del tramo i en m.

S_{ii} : pendiente del tramo i .

En éste caso, la pendiente fue obtenida mediante el MDE y el programa ArcView:

CUENCA	PENDIENTE (S)
Boquerón	0.017
Acala	0.006
Santo Domingo	0.019
Chicoasén	0.011

Tabla 11: Pendiente de los cauces principales. ArcView.

Finalmente, se muestra un resumen de todos los parámetros hidrológicos obtenidos mediante el programa ArcView:

PARÁMETRO CUENCA	PERÍMETRO (km)	ÁREA (km ²)	LONGITUD DEL CAUCE PRINCIPAL (km)	PENDIENTE
ACALA	948.4	4096	132.605	0.006
BOQUERÓN	327.4	1716.6	94.65	0.017
STO. DOMINGO	349.6	1742.7	88.119	0.019
CHICOASÉN	766.8	7553	168.313	0.011

Tabla 12: Parámetros hidrológicos de la cuenca Chicoasén.

4.4 Tiempo de Concentración

El tiempo de concentración es el tiempo que tarda el escurrimiento de la tormenta en viajar desde el punto más lejos hasta la salida de la cuenca o el punto de interés.

En este caso, se utilizó la fórmula de Kirpich para calcularlo:

$$T_c = 0.000325 \times \left(\frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \right)$$

Donde:

T_c , tiempo de concentración (h)

L , longitud del cauce principal (m)

S , pendiente del cauce principal.

CUENCA	LONGITUD DE CAUCE PRINCIPAL (m)	PENDIENTE(S)	Tc (Kirpich) (horas)
Chicoasén	168312.61	0.011	19.5
Acala	132605.30	0.006	20.5
Sto. Domingo	88118.80	0.019	9.6
Boquerón	94651.39	0.017	10.6

Tabla 13: Tiempo de concentración de cada cuenca.

4.5 Geología, Edafología y Cobertura vegetal

En el Bajo Grijalva se ubica la Sierra del Norte de Chiapas, son serie de serranías separadas por alargados valles que bordean a los Altos y las Montañas del Oriente.

La disposición de las montañas permite interceptar la humedad que cargan los vientos del Golfo de México, lo que propicia un clima húmedo con lluvias todo el año. La pérdida de suelos por erosión hídrica extrema y muy extrema afecta al 89% del territorio de Tabasco y al 83% de Chiapas y alcanza valores de pérdidas de suelos mayores a las 500 ton/ha/año. La erosión hídrica es especialmente crítica en la Sierra Madre de Chiapas, los Altos de Chiapas y en las montañas marginales del norte, donde los valores van de severos a extremos (mayores a 100 ton/ha/año); severa y alta (de 25 a 100 ton/ha/año) en la Selva Lacandona, Valles centrales y Malpaso, provocados y acelerados por los intensos procesos de deforestación que ocasiona la erosión de laderas, frecuentes derrumbes y caídas de árboles que obstruyen el flujo del agua y provocan taponamientos e inundaciones. Instituto nacional de Ecología (2005).

Es conveniente obtener estimaciones de la capacidad de infiltración y de la velocidad de transmisión del suelo de la cuenca.

El suelo en una cuenca, influye demasiado en el régimen hidrológico del cauce principal y su transporte de sedimentos, pues el clima y sus características físicas determinan la naturaleza y el desarrollo de la vegetación, lo cual tiene efecto en la evapotranspiración y en la erosión.

En cuanto al estudio de la geología en una cuenca, ésta deberá estar dirigido a obtener una estimación de su permeabilidad.

Por lo tanto, es necesario e importante obtener qué porcentaje de área cubierta de la cuenca hay de cada tipo de suelo y vegetación, lo cual nos ayudará también en la determinación del número de curva NC.

En hidrología se clasifica al suelo de acuerdo a su permeabilidad como Muy Alta, Buena, Media y Baja, la cual se relaciona con el grupo hidrológico A, B, C y D, respectivamente.

- a) Suelo tipo A: El escurrimiento es mínimo, tienen altas velocidades de infiltración cuando están mojados, consisten de arenas y gravas profundas.
- b) Suelo tipo B: Suelos con moderadas velocidades de infiltración cuando están mojados, consisten de suelos de texturas finas a gruesas.
- c) Suelo tipo C: Tienen bajas velocidades de infiltración cuando están mojados, suelos con texturas finas.

- d) Suelo tipo D: Se presenta escurrimiento máximo, con bajas velocidades de infiltración cuando están mojados, suelos arcillosos en grandes cantidades, suelo poco profundo con subhorizontes casi impermeables. Domínguez et al. (2008).

La cuenca Chicoasén tiene una permeabilidad buena por tener un suelo mayormente conformado de arenas finas y limos.

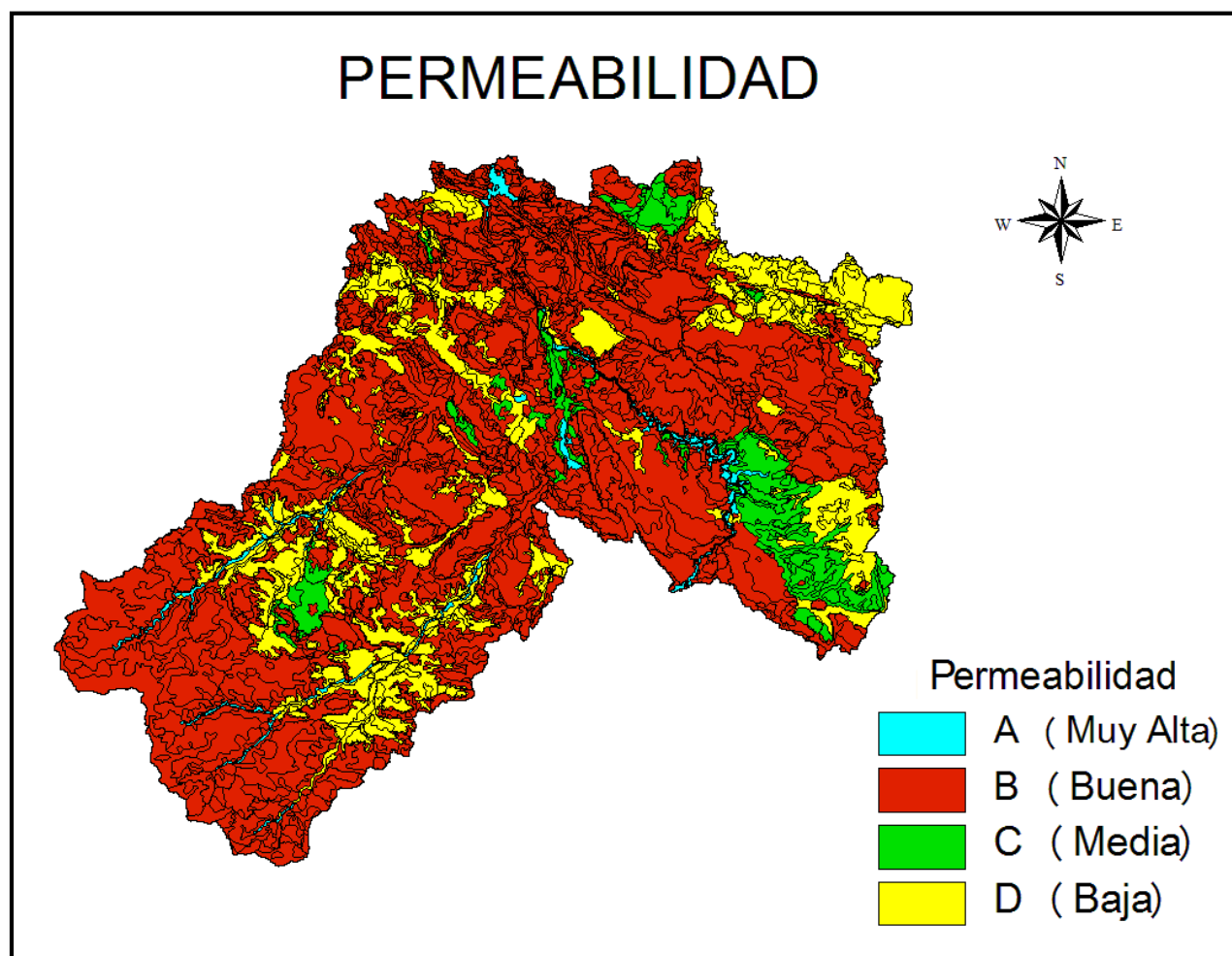


Figura 31: Permeabilidad a lo largo de la cuenca Chicoasén. ArcView.

En la cuenca Chicoasén, el 37% pertenece a la agricultura, el 32% es zona de bosque, el 22% zona de selva, el 7% es de zona de pastizal, mientras que el 2% restante pertenece a asentamientos urbanos y cuerpos de agua.

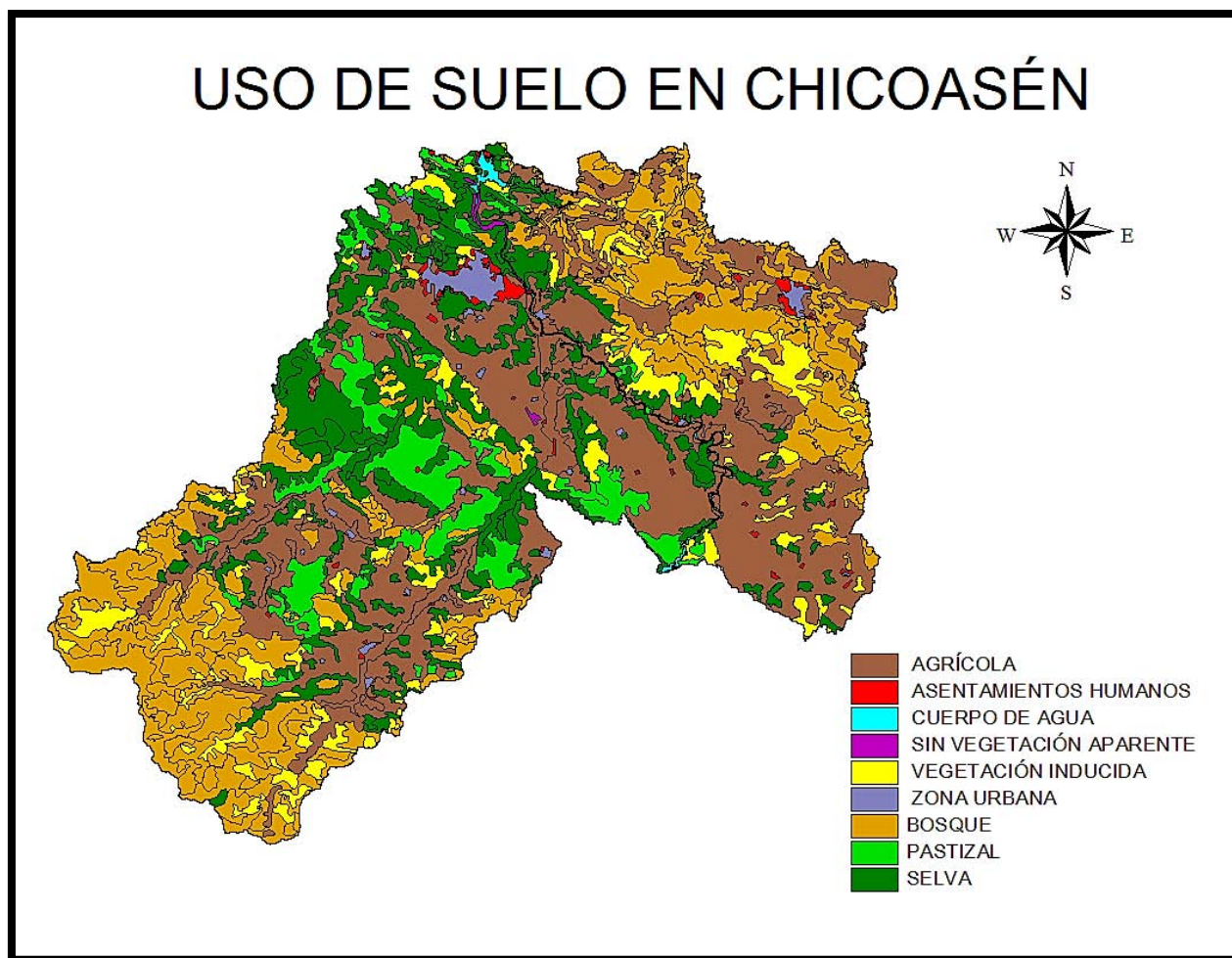


Figura 32: Uso de Suelo en Chicoasén. ArcView.

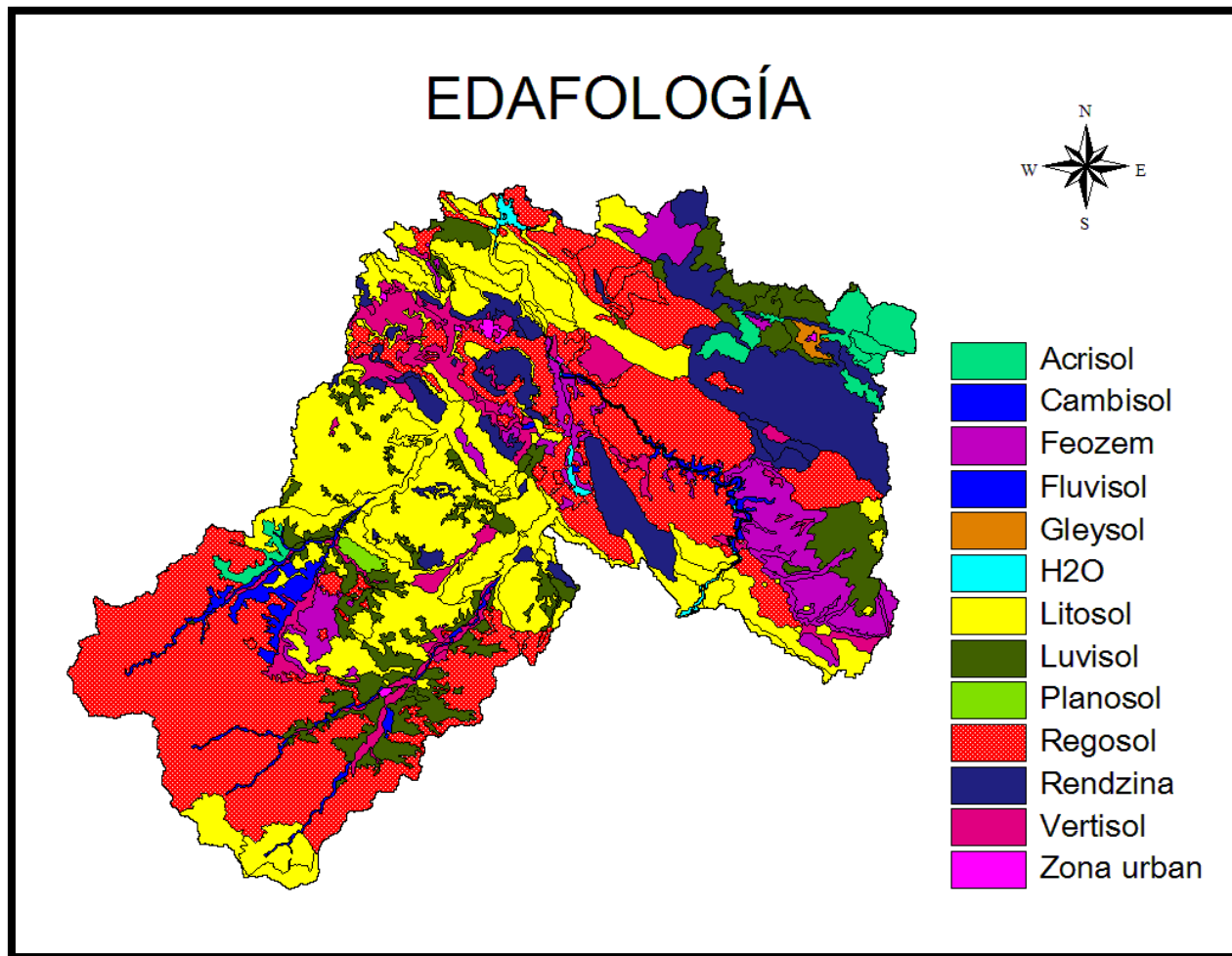


Figura 33: Edafología en la cuenca Chicoasén. ArcView.

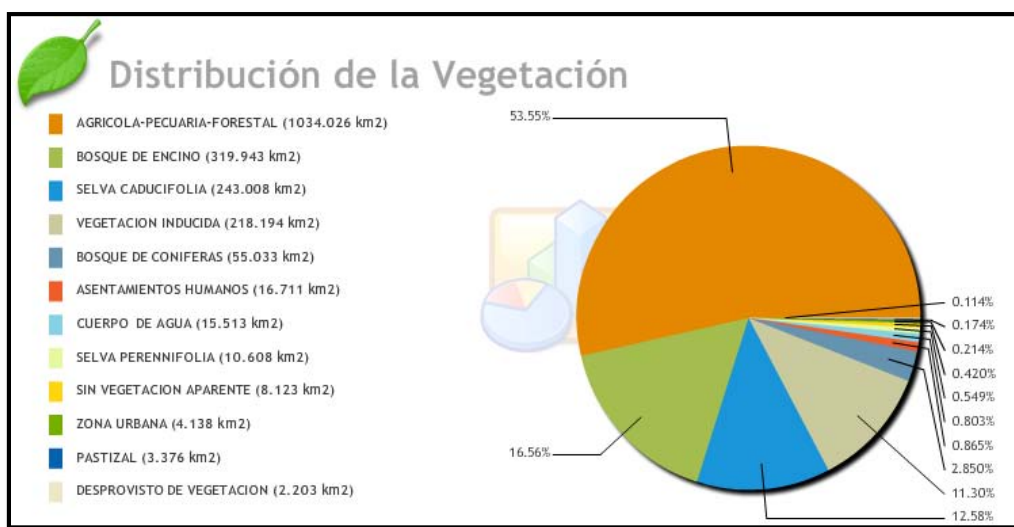


Figura 34: Distribución de la vegetación en la cuenca Chicoasén. INEGI, Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas (SIATL).

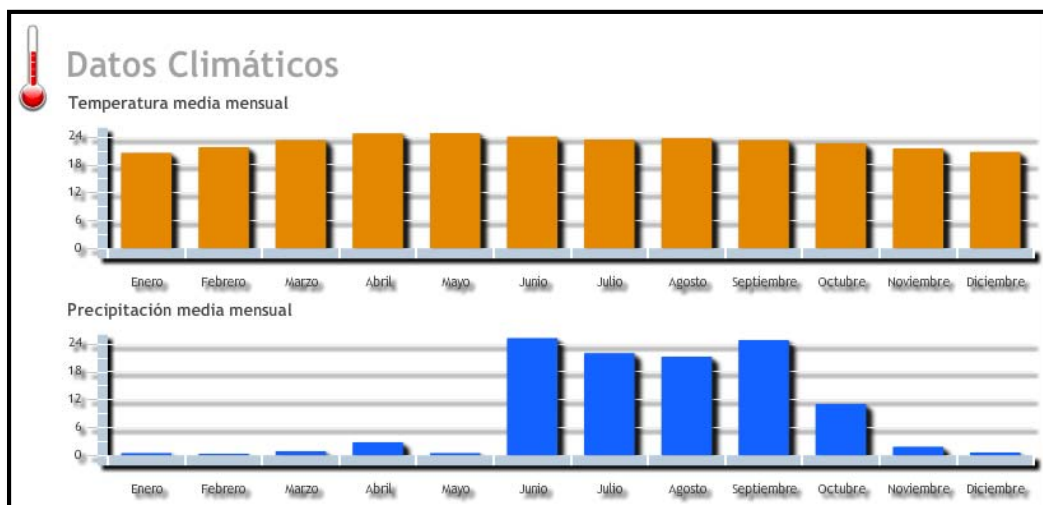


Figura 35: Datos climáticos en la cuenca Chicoasén. INEGI, Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas (SIATL).

4.6 Determinación del número de curva

El modelo distribuido usado en este estudio (MPE), utiliza el método del SCS (Soil Conservation Service) o Número de Curva (CN), para calcular la producción del escurrimiento. Para aplicar este método al modelo distribuido, la cuenca debe ser dividida en celdas y a cada celda definirle un valor de Número de Curva para determinar el almacenamiento máximo en el suelo.

El método del Número de Curva, es de los más utilizados para la estimación del escurrimiento, debido a que toma en cuenta, con solo un parámetro, las principales características de la cuenca que producen el escurrimiento, como la pendiente y el uso y tipo de suelo.

La variación espacial del número de curva se obtuvo mediante el SIG ArcView 3.2 (fig. 36). Para conseguir el mallado de la cuenca con el número de curva asignado a cada celda, se relacionaron los mapas de uso y tipo de suelo de la zona en estudio, clasificando su grado de permeabilidad en Muy Alta (Tipo A), Buena (Tipo B), Media (Tipo C) y Baja (Tipo D), con base en la clasificación de los tipos hidrológicos del suelo acorde con la tabla 3.

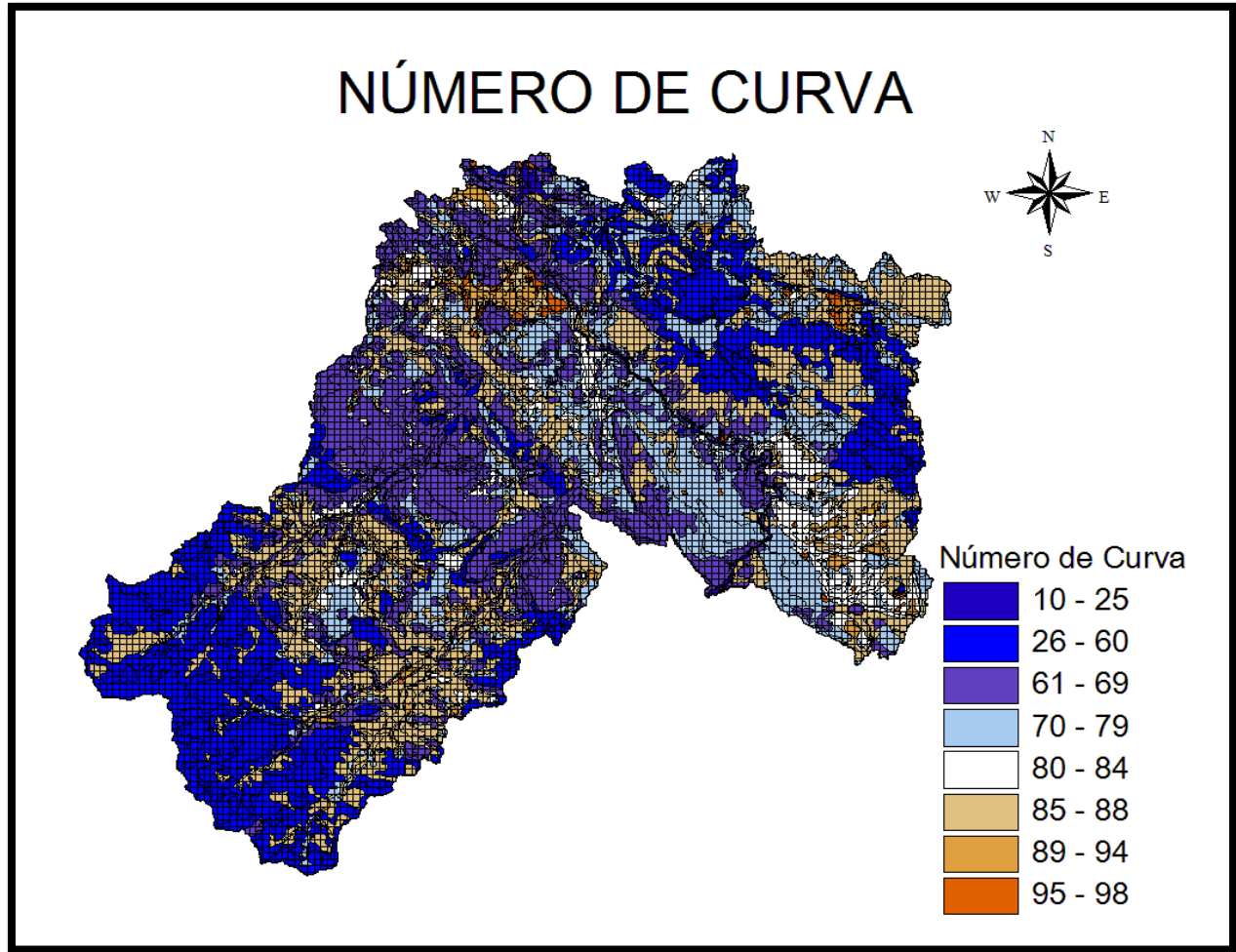


Figura 36: Número de curva de la cuenca Chicoasén. ArcView.

5 MODELO DE LLUVIA-ESCURRIMIENTO PARA LA CUENCA CHICOASÉN

En la cuenca Chicoasén se tienen tres estaciones de medición de gasto, las cuales se utilizaron para comparar los gastos medidos con los calculados y con ello calibrar los parámetros que intervienen en el modelo lluvia –escurrimiento, por lo tanto para el pronóstico del hidrograma de entrada a la presa Chicoasén se obtuvo el hidrograma de las subcuencas Boquerón, Santo Domingo y Acala, esta última compuesta en su mayoría por las salidas de la Presa Angostura.

Los modelos hidrológicos deben ser calibrados y verificados antes de utilizarse en análisis y diseños de ingeniería.

Es necesario calibrar los parámetros de forma (T_c , k) y los parámetros de pérdidas (I_a , S y fx), para comparar los resultados obtenidos de la simulación con los datos observados.

La Estación hidrométrica Acala mide los escurrimientos provenientes de la presa Angostura, por lo que resulta imposible comparar los gastos medidos con los calculados para obtener una calibración. Los parámetros de calibración para la cuenca Acala (que incluye el vaso de la presa Chicoasén) serán los mismos de la cuenca Boquerón y se les sumaran los escurrimientos de la presa Angostura.

5.1 Análisis de la Cuenca Boquerón

Aunque en la subcuenca Boquerón se encuentran sólo 4 estaciones (Boquerón, Cristóbal Obregón, Santuario y Tres Picos) como se muestra en la siguiente figura, se utilizaron todas las estaciones automáticas de CFE localizadas dentro de la cuenca Chicoasén.

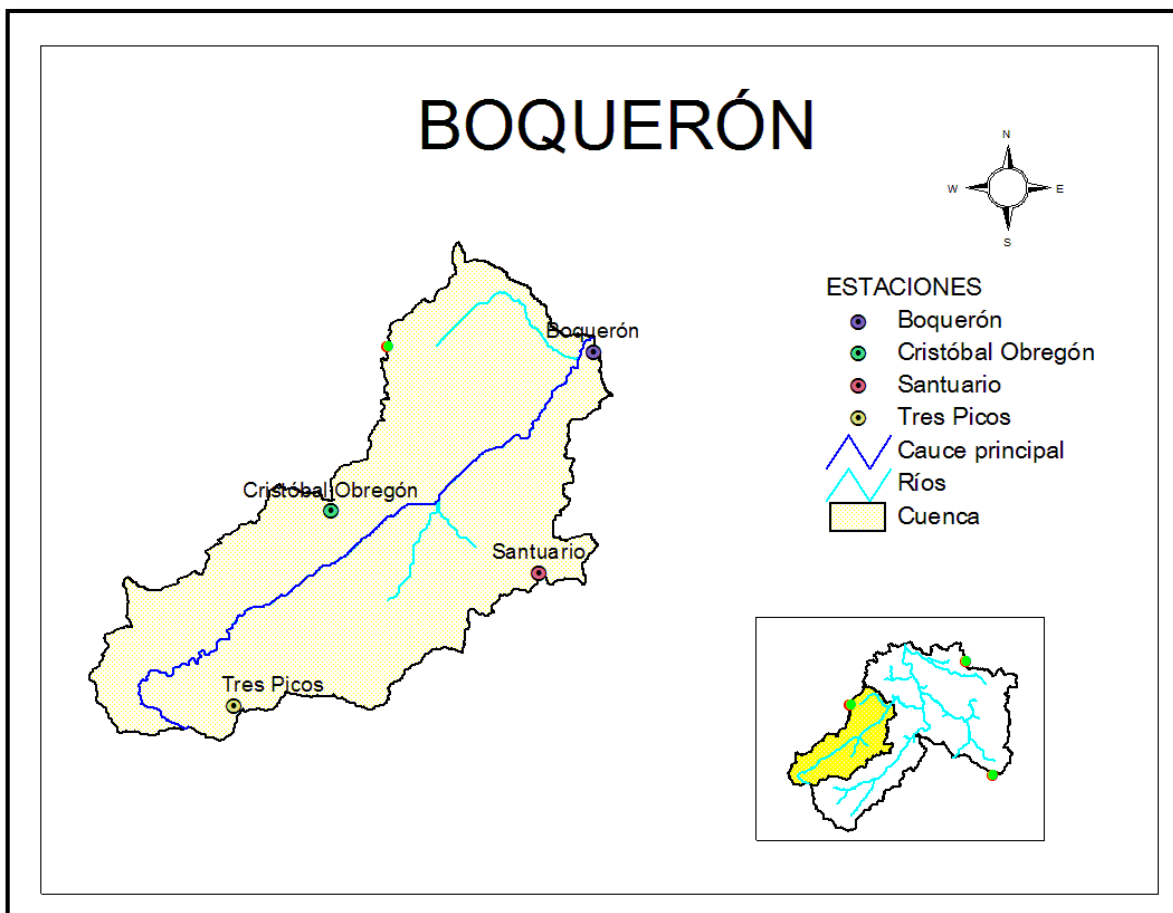


Figura 37: Estaciones dentro de la cuenca Boquerón. ArcView.

Las fechas seleccionadas para calibrar y obtener los parámetros a utilizar en la subcuenca Boquerón son las siguientes:

FECHAS SELECCIONADAS	ESTACIONES UTILIZADAS
20 SEP-10OCT 2010	Acala, Boquerón, Cristóbal Obregón, Monterrey, Chicoasén, Angostura, San Cristóbal, Santuario, Sierra morena y Tuxtla Gutiérrez NO FUNCIONÓ STO. DOMINGO
14 SEP -24 OCT 2011	
1 SEP-18 OCT 2012	
1-20 OCT 2013	Acala, Boquerón, Cristóbal Obregón, Monterrey, Chicoasén, Angostura, San Cristóbal, Santuario, Sierra Morena y Tuxtla Gutiérrez NO FUNCIONÓ STO. DOMINGO
14 SEP-29 OCT 2014	Acala, Boquerón, Cristóbal Obregón, Monterrey, Chicoasén, Angostura, San Cristóbal, Santuario, Sierra Morena y Tuxtla Gutiérrez

Tabla 14: Fechas seleccionadas para la calibración de la cuenca Boquerón.

Con los archivos de las características fisiográficas de la cuenca Boquerón obtenidos por el SIG ArcView, con la información de lluvias y gastos en las fechas seleccionadas, y con toda esa información correctamente convertida a varios archivos tipo .txt, se pudo aplicar de manera exitosa el programa MPE obteniendo los siguientes parámetros de calibración para cada año:

PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN	2010 20 SEP-10 OCT	2011 14SEP-24OCT	2012 1SEP-18OCT	2014 14SEP-29OCT
PARÁMETROS DE PÉRDIDAS				
Factor de escala de pérdida inicial (λ)	0.2	0.2	0.2	0.2
Factor de escala de retención potencial	1.2	1	1.2	1.2
Factor de olvido (fx)	0.99	0.98	0.98	0.98
PARÁMETROS DE FORMA				
Tc, en hrs.	17	17	17	17
K, en hrs.	15	15	15	15

Tabla 15: Parámetros de Boquerón

El año 2013 fue quitado de la calibración, pues los datos en ese año no fueron buenos.

A continuación se presentan los hidrogramas obtenidos en el programa MPE con los parámetros anteriores:

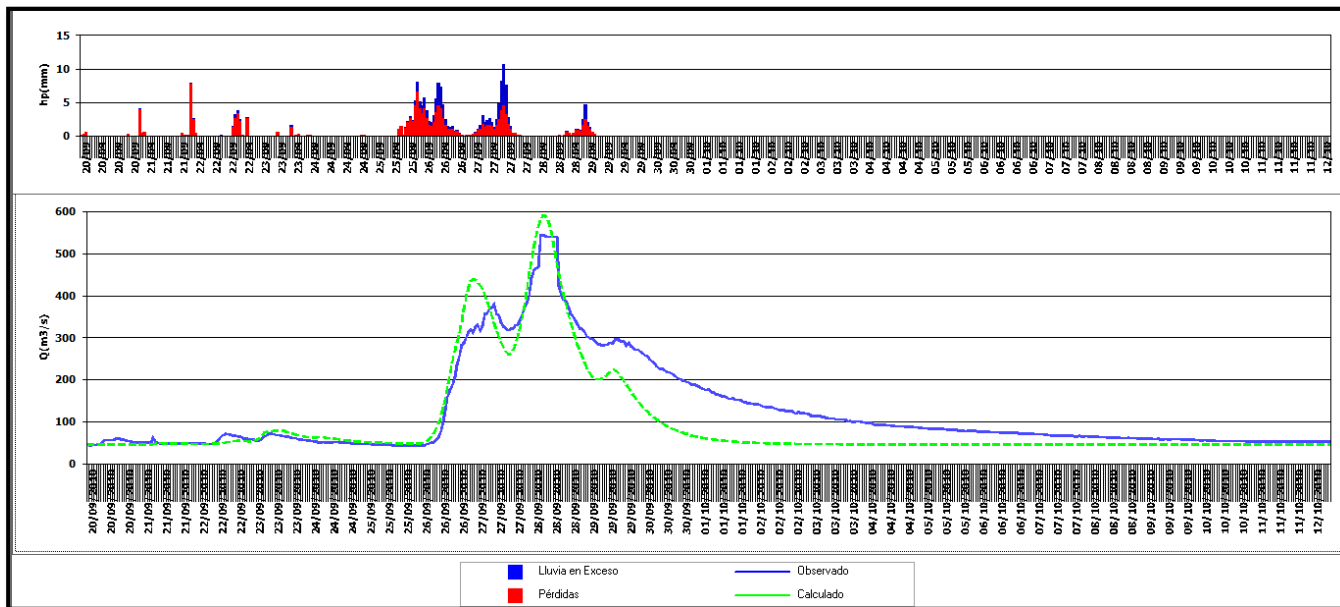


Figura 38: Cuenca Boquerón, periodo 20 de septiembre al 10 de octubre 2010. MPE

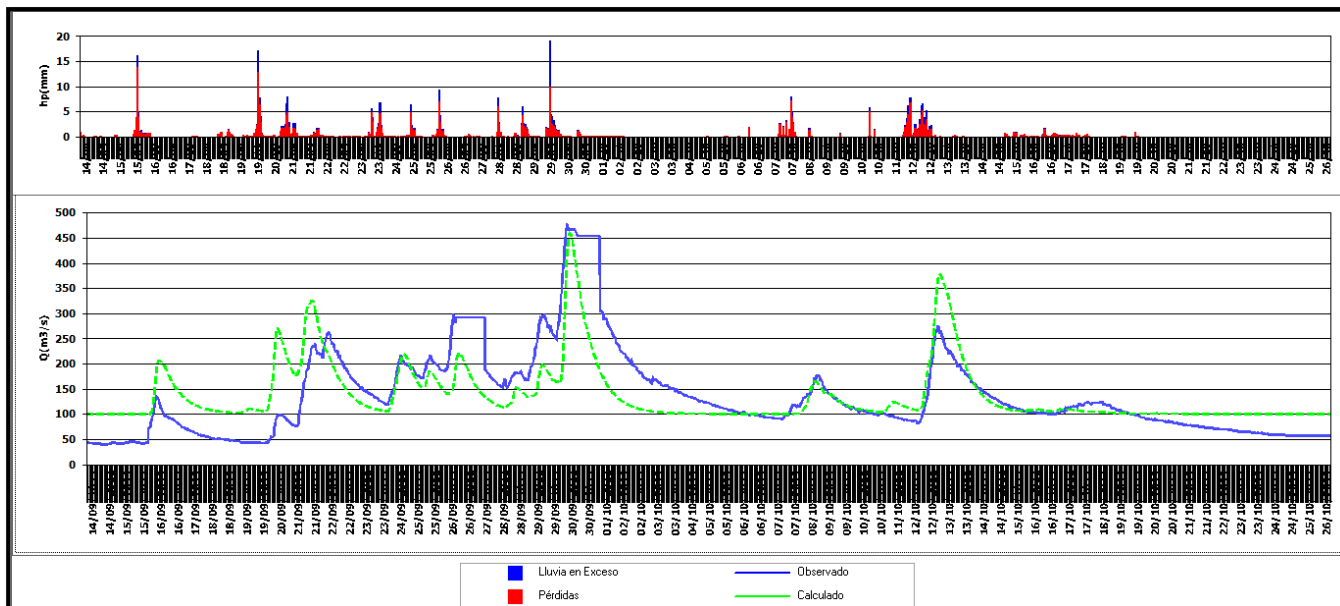


Figura 39: Cuenca Boquerón, periodo 14 de septiembre al 24 de octubre 2011. MPE.

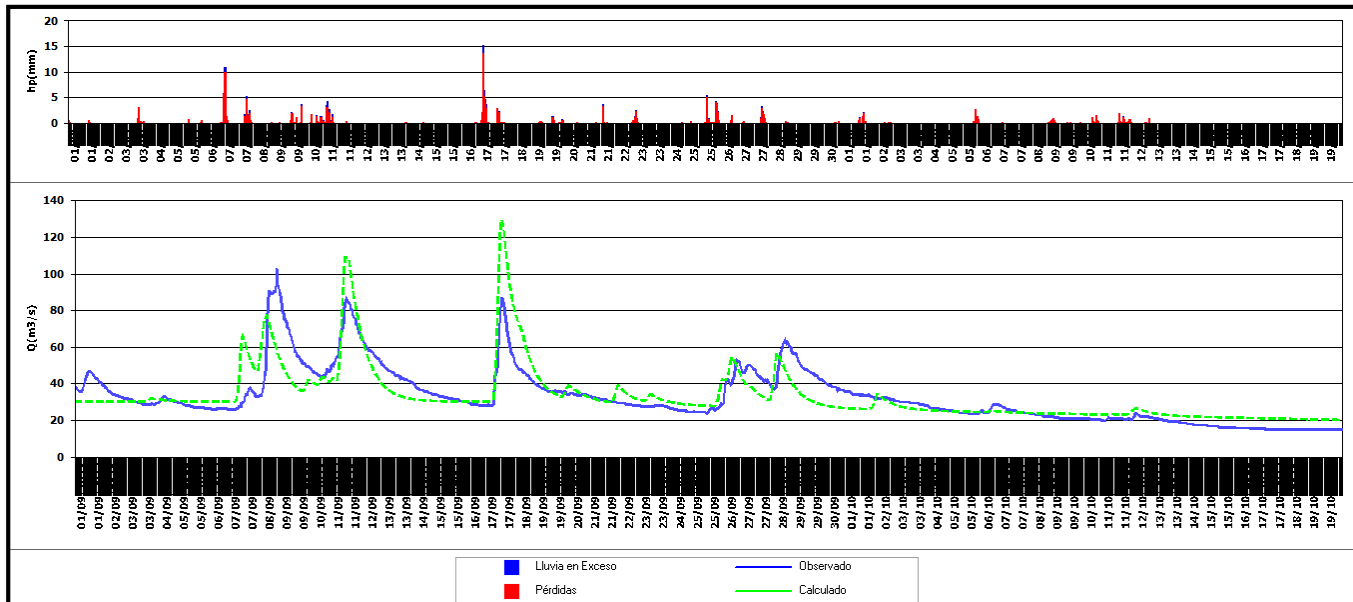


Figura 40: Cuenca Boquerón, periodo 1 de septiembre al 18 de octubre 2012. MPE

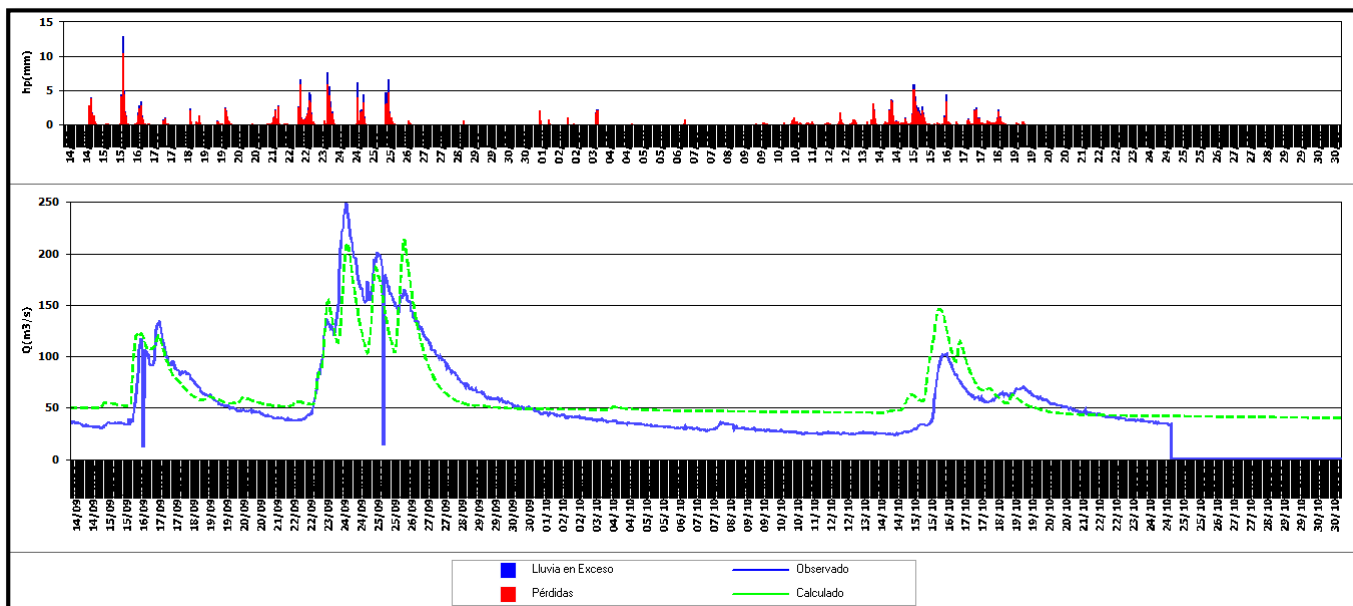


Figura 41: Cuenca Boquerón, periodo 14 de septiembre al 29 de octubre 2014. MPE

5.2 Análisis de la Cuenca Santo Domingo

De igual manera, aunque en la cuenca Santo Domingo influyen algunas estaciones (Sto. Domingo, Santuario, Sierra Morena, Monterrey), se tomaron en cuenta todas las estaciones automáticas de CFE que están dentro de la cuenca Chicoasén.

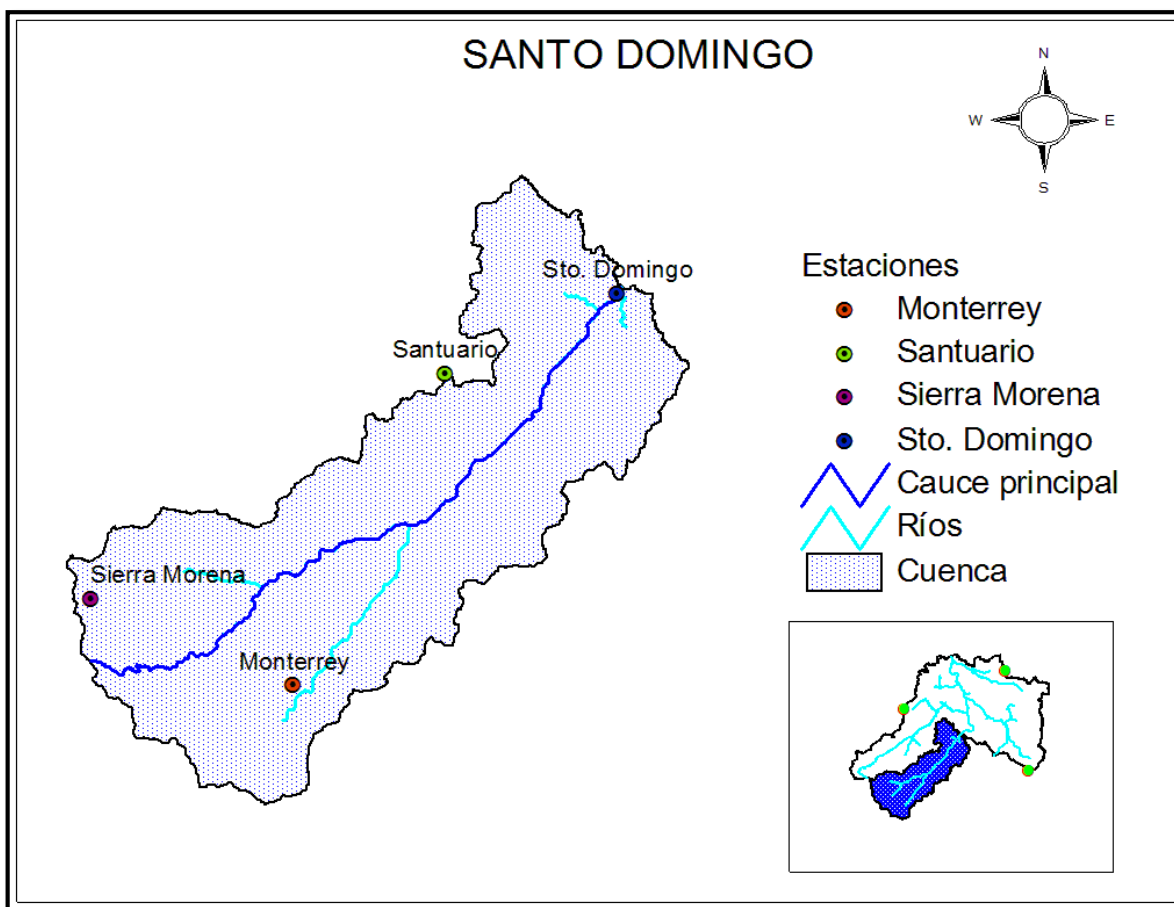


Figura 42: Estaciones dentro de la cuenca Santo Domingo. ArcView.

Las fechas seleccionadas para calibrar la cuenca Santo Domingo fueron las siguientes:

FECHAS SELECCIONADAS	ESTACIONES UTILIZADAS
20 SEP-10 OCT 2010	Acala, Boquerón, Cristóbal Obregón, Monterrey, Chicoasén, Angostura, San Cristóbal, Santuario, Sierra morena y Tuxtla Gutiérrez
14 SEP-24 OCT 2011	Acala, Boquerón, Cristóbal Obregón, Monterrey, Chicoasén, Angostura, San Cristóbal, Santuario, Sierra Morena y Tuxtla Gutiérrez, Santo Domingo
01 SEP-18 OCT 2012	Acala, Boquerón, Cristóbal Obregón, Monterrey, Chicoasén, Angostura, San Cristóbal, Santuario, Sierra Morena y Tuxtla Gutiérrez NO FUNCIONÓ STO. DOMINGO
01-20 OCT 2013	Acala, Boquerón, Cristóbal Obregón, Monterrey, Chicoasén, Angostura, San Cristóbal, Santuario, Sierra Morena y Tuxtla Gutiérrez NO FUNCIONÓ STO. DOMINGO
14 SEP-29 OCT 2014	Acala, Boquerón, Cristóbal Obregón, Monterrey, Chicoasén, Angostura, San Cristóbal, Santuario, Sierra Morena y Tuxtla Gutiérrez NO FUNCIONÓ STO. DOMINGO

Tabla 16: Fechas seleccionadas para calibrar la cuenca Santo Domingo.

En los años 2012, 2013 y 2014 la estación hidrométrica Santo Domingo no funcionó correctamente, por lo que fue imposible conseguir datos. Por dicha razón, sólo se calibró con los años en los que se obtuvieron datos.

Los parámetros de calibración obtenidos fueron:

PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN	2010 20 SEP-10 OCT	2011 14SEP-24OCT
PARÁMETROS DE PÉRDIDAS		
Factor de escala de pérdida inicial (λ)	0.2	0.2
Factor de escala de retención potencial	1.2	1.2
Factor de olvido (fx)	0.97	0.98
PARÁMETROS DE FORMA		
Tc, en hrs.	10	10
K, en hrs.	7	7

Tabla 17: Parámetros de Santo Domingo.

Los hidrogramas obtenidos con los parámetros anteriores en el MPE, se muestran a continuación:

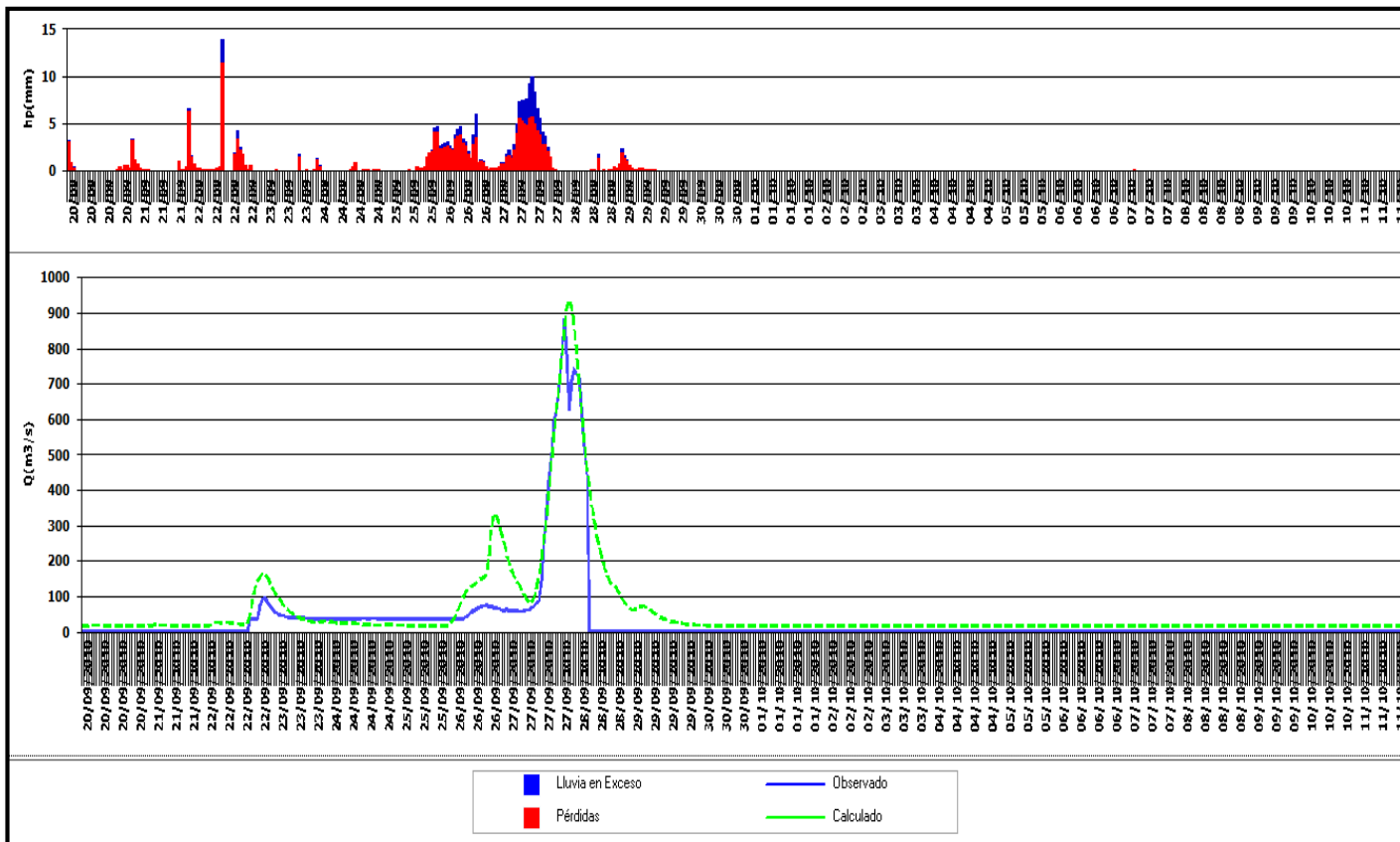


Figura 43: Cuenca Santo Domingo, periodo 20 de septiembre al 10 de octubre 2010. MPE

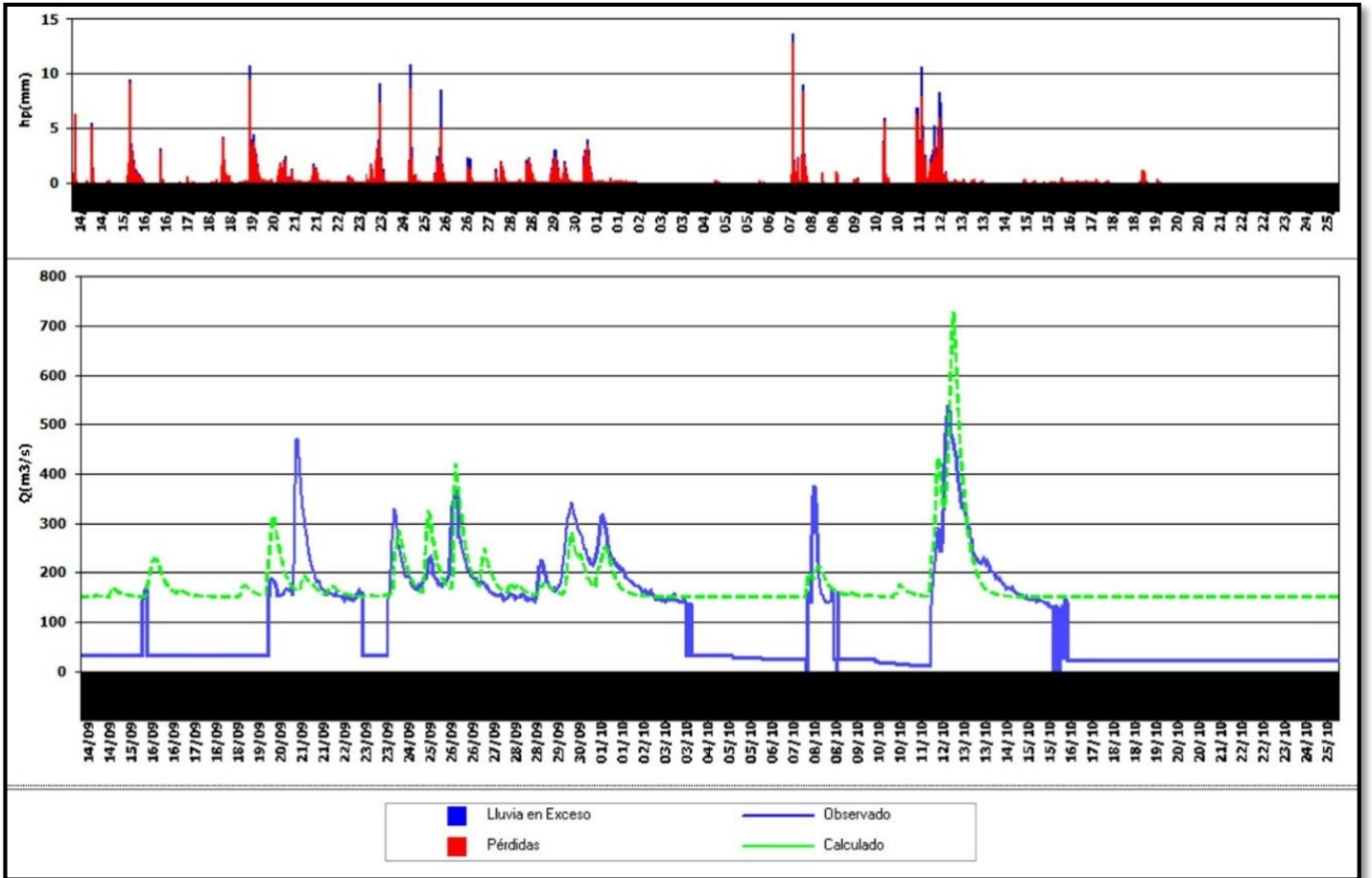


Figura 44: Cuenca Santo Domingo, periodo 14 de septiembre al 24 de octubre 2011. MPE.

5.3 Análisis de la Cuenca Chicoasén

Para analizar y calibrar Chicoasén por cuenca propia, primero se debe realizar la calibración de la cuenca Acala, pues ésta cuenca representa toda la cuenca Chicoasén menos la de Boquerón y Santo Domingo.

La Estación hidrométrica Acala mide los escurrimientos provenientes de la Presa Angostura, por lo que resulta imposible comparar los gastos medidos con los calculados para obtener una calibración. Los parámetros de calibración para la cuenca Acala, serán los mismos de la cuenca Boquerón y se les sumaran los escurrimientos de la presa Angostura.

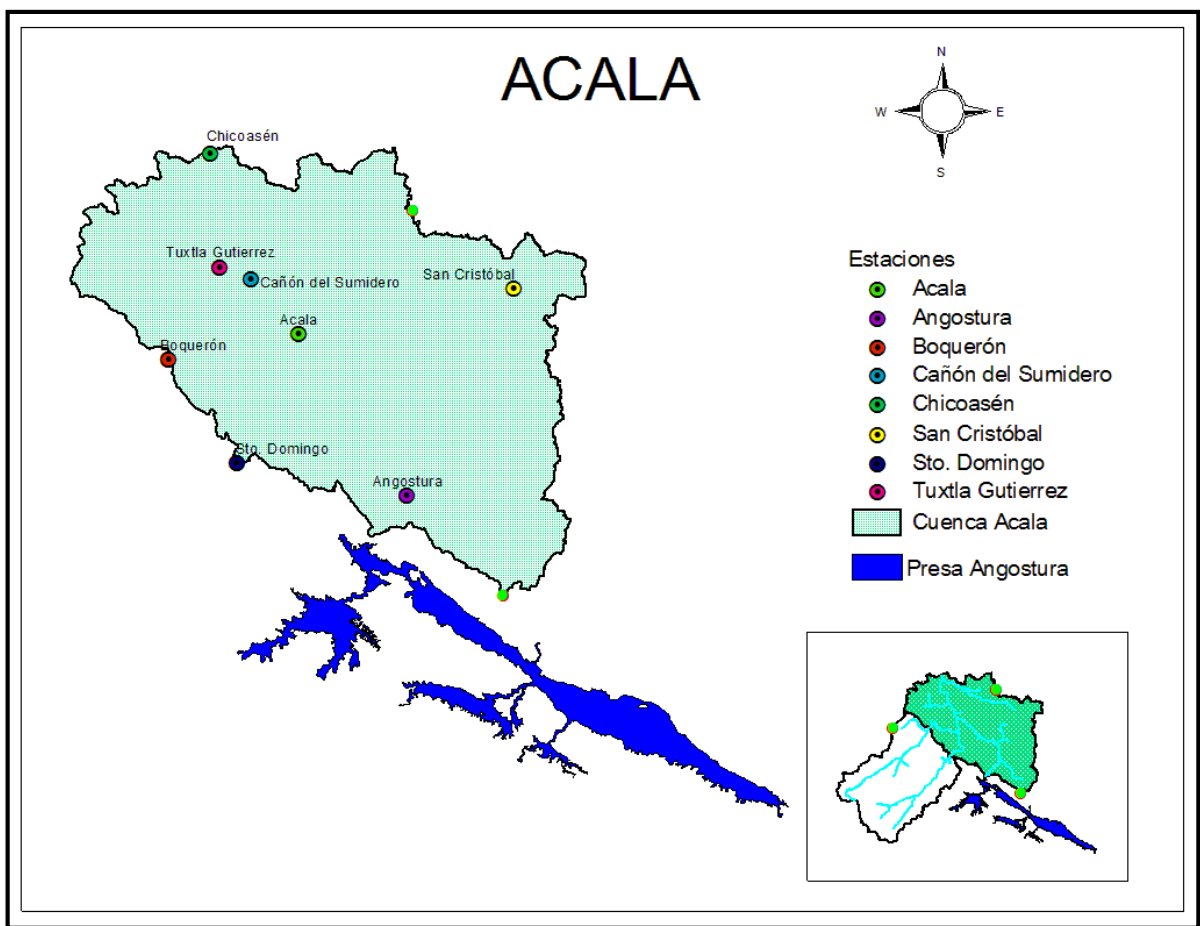


Figura 45. Estaciones dentro de la cuenca Acala. ArcView

Los parámetros obtenidos en la cuenca Acala serían los siguientes:

ACALA	ÉPOCA DE POCAS LLUVIAS	ÉPOCA DE LLUVIAS
PARÁMETROS DE PÉRDIDAS		
Factor de escala de pérdida inicial (λ)	0.2	0.2
Factor de escala de retención potencial	1.8	1.2
Factor de olvido (fx)	0.97	0.98
PARÁMETROS DE FORMA		
Tc, en hrs.	24	24
K, en hrs.	19	19

Tabla 18: Parámetros de Acala. MPE

A los gastos obtenidos hay que sumarles los excedentes de la presa La Angostura con un tiempo de traslado de unas 20 horas.

5.3.1 Obtención de los gastos de Chicoasén por cuenca propia

Para conseguir los parámetros de la cuenca propia Chicoasén, se obtuvieron primero los parámetros finales de las subcuencas Boquerón y Santo Domingo.

Los parámetros finales obtenidos para la subcuenca Boquerón, se muestran a continuación:

BOQUERÓN	ÉPOCA DE POCAS LLUVIAS	ÉPOCA DE LLUVIAS
PARÁMETROS DE PÉRDIDAS		
Factor de escala de pérdida inicial (λ)	0.2	0.2
Factor de escala de retención potencial	1.8	1.2
Factor de olvido (f_x)	0.97	0.98
PARÁMETROS DE FORMA		
Tc, en hrs.	17	17
K, en hrs.	15	15

Tabla 19: Parámetros únicos de la cuenca Boquerón. MPE.

- El Factor de pérdida inicial es el recomendado en la literatura.
- El factor de escala de retención potencial en épocas de pocas lluvias (enero-junio) debe ser mayor que en época de lluvias (julio-diciembre) debido a que el suelo se encuentra seco la retención es mayor.
- El factor de olvido en época de sequías es menor debido a que hay mayores pérdidas por infiltración y evaporación en las lluvias antecedentes.

Los parámetros finales obtenidos para la subcuenca Santo Domingo se muestran en la siguiente tabla:

SANTO DOMINGO	ÉPOCA DE POCAS LLUVIAS	ÉPOCA DE LLUVIAS
PARÁMETROS DE PÉRDIDAS		
Factor de escala de pérdida inicial (λ)	0.2	0.2
Factor de escala de retención potencial	1.8	1.2
Factor de olvido (fx)	0.96	0.97
PARÁMETROS DE FORMA		
Tc, en hrs.	16	16
K, en hrs.	13	13

Tabla 20: Parámetros únicos de la cuenca Santo Domingo. MPE.

- El Factor de pérdida inicial es el recomendado en la literatura.
- El factor de escala de retención Potencial en épocas de pocas lluvias (enero-junio) debe ser mayor que en época de lluvias (julio-diciembre) debido a que el suelo se encuentra seco la retención es mayor.
- El factor de Olvido en época de sequías es menor debido a que hay mayores pérdidas por infiltración y evaporación en las lluvias antecedentes.

Haciendo una revisión de los parámetros de calibración de las cuencas Santo Domingo y Boquerón, los parámetros para la cuenca de Chicoasén resultarían:

CHICOASÉN	ÉPOCA DE POCAS LLUVIAS	ÉPOCA DE LLUVIAS
PARÁMETROS DE PÉRDIDAS		
Factor de escala de pérdida inicial (λ)	0.2	0.2
Factor de escala de retención potencial	1.8	1.2
Factor de olvido (f_x)	0.97	0.98
PARÁMETROS DE FORMA		
Tc, en hrs.	28	28
K, en hrs.	22	22

Tabla 21: Parámetros de Chicoasén. MPE

De igual forma, a los gastos obtenidos hay que sumarles los excedentes de la presa La Angostura con un tiempo de traslado de unas 20 horas.

5.3.2 Tiempo de pronóstico

El tiempo de pronóstico es igual al tiempo de concentración de la cuenca más el tiempo de retención por almacenamiento, por lo que los tiempos de pronóstico para las cuencas son las siguientes:

CUENCAS		Tc (h)	k (h)	Tp (h)
1	Chicoasén	28	22	50
2	Boquerón	17	15	32
3	Santo Domingo	16	13	29
4	Acala (incluye la cuenca del vaso)	24	19	43

Tabla 22: Tiempo de pronóstico de todas las cuencas.

6 CONCLUSIONES

Se obtuvo el modelo distribuido lluvia-escorrentamiento de la cuenca Chicoasén satisfactoriamente para contribuir a la correcta estimación de los escurrimientos ante un evento hidrometeorológico como el ocurrido en octubre del 2007 y los cambios en la cuenca que eso conlleva.

Los parámetros del modelo para la cuenca Chicoasén son los que se obtuvieron al calibrar las subcuencas Boquerón y Santo Domingo, pues Acala no puede ser calibrada porque recibe las extracciones de la presa Angostura.

En la parte alta de la cuenca, se cuenta con pocas estaciones, por lo que hubo dificultad en las calibraciones. En el año 2013, para la cuenca Boquerón, los datos fueron erróneos, lo mismo para Santo Domingo en los años 2012, 2013 y 2014. Aun así, los mejores resultados fueron para las fechas en los años 2010 y 2011, lo cual fue suficiente para calibrar el modelo con éxito.

Se observa que se obtienen mejores resultados cuando las avenidas son mayores y cuando la medición de las lluvias se realiza con un mayor número de estaciones repartidas en las cuencas.

Al escurrimiento pronosticado en la cuenca Chicoasén hay que sumarle los excedentes de la presa La Angostura con un tiempo de traslado de 20 horas.

La principal dificultad que se encontró durante el estudio de la cuenca, fue la escasa y algunas veces mala información de los registros de lluvia y del escurrimiento, en este caso las estaciones que presentaron fallas frecuentes fueron Tres Picos, Santo Domingo y Cristóbal Obregón. Con una mayor densidad en la red de estaciones y con mayor confiabilidad en su funcionamiento, la calibración de las cuencas mejoraría y el pronóstico del escurrimiento sería aún mejor.

Se puede concluir que con el modelo obtenido, se comprobó que el comportamiento y las características del suelo son factores importantes para calcular la precipitación efectiva y que con el uso de parámetros distribuidos para la distribución espacial de la precipitación, obtendremos resultados más reales. Se puede decir que el MPE es realmente útil y confiable para predecir la respuesta hidrológica de una cuenca.

Aun así, es necesario contar con la información suficiente de los instrumentos de medición en las cuencas, para que el programa realice correctamente su funcionamiento.

Finalmente, se considera que los resultados obtenidos muestran que se cuenta con un modelo confiable para pronosticar escurrimientos en la cuenca Chicoasén, y que los esfuerzos futuros deben dirigirse a contar con más y mejor información continua.

7 REFERENCIAS

- Aparicio, M.F.J., 2009. Fundamentos de Hidrología. Ed. Limusa, México.
- Baldemar M.A., (1998). Comparación entre modelos Lluvia-escorrimento lineales y no lineales. Tesis Maestría, IIUNAM.
- Campos, A., D.F. (2007). Estimación y aprovechamiento del escurrimento. México.
- Campos, A., Universidad Autónoma de San Luis Potosí, (1998). Procesos del Ciclo Hidrológico.
- Chow, V, T. (1994) Hidrología Aplicada. Mcgraw-Hill Interamericana, S. A.
- Domínguez MR, Esquivel G.G., Méndez A.B., Mendoza R.A., Arganis J.M.L., Carrizosa E.E. 2008. Manual del Modelo para pronóstico de escurrimento, IIUNAM.
- Domínguez MR, Quaas R, Legaria G, (1978) Sistema de telemedición hidrológica para predecir avenidas, presa Chicoasén, Chiapas. IIUNAM.
- Esquivel G.G., (2000). Modelo lluvia-escorrimento para la Cuenca del Río Mixcoac. Tesis Maestría, IIUNAM.
- Juárez J. I., (2014). Estimación del hidrograma de salida de una cuenca usando un modelo hidrológico de parámetros distribuidos y un modelo hidráulico bidimensional en volúmenes finitos con un modelo hidrológico.
- Nabil M. K. (2001). Modelo distribuido de lluvia-escorrimento basado en el manejo de variables geo-referenciados y el escalamiento fisiográfico de cuencas.
- Martínez C. J., (2013). Manejo y calibración de un modelo hidrológico de parámetros distribuidos y su aplicación para la estimación de eventos de diseño, en la cuenca del río Armeria.
- Martínez R. S., (2010). Aplicación de un modelo distribuido lluvia-escorrimento a las cuencas de los ríos de la sierra, Tabasco. Tesis Maestría, IIUNAM.
- Ruíz U. Ma.R., (2014). Apuntes de clase. Facultad de Ingeniería.
- http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL
- http://repositorio.imta.mx:8080/cencarepositorio/bitstream/123456789/1247/1/RIH_051.pdf
- <http://h06814.iie.org.mx/cuencas/MapaCuenca.aspx?cuenca=Chicoasen>
- <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=263131532006>
- http://repositorio.imta.mx:8080/cencarepositorio/bitstream/123456789/1247/1/RIH_051.pdf