

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

ÁREA INTEGRADA

The seal of the University of San Carlos of Guatemala is a circular emblem. It features a central figure of a man on a horse, holding a staff, set against a landscape with mountains and a volcano. Above the figure is a coat of arms with a crown and a lion. The Latin motto "CETERAS URBIS CONSPICUA CAROLINA ACADIA COACTEMALENSIS INTER" is inscribed around the perimeter of the seal.

TRABAJO DE GRADUACIÓN
APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL (SWAT), PARA LA SIMULACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO ATULAPA, ESQUIPULAS, CHIQUIMULA, GUATEMALA, C.A

EDSON TONIÑO HERNANDEZ MAZARIEGOS

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

ÁREA INTEGRADA

TRABAJO DE GRADUACIÓN

**APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL
(SWAT), PARA LA SIMULACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO DE LA MICROCUENCA
DEL RÍO ATULAPA, ESQUIPULAS, CHIQUIMULA, GUATEMALA, C.A**

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

POR

EDSON TONIÑO HERNANDEZ MAZARIEGOS.

EN EL ACTO DE INVESTIDURA COMO

INGENIERO AGRONOMO

EN

RECURSOS NATURALES RENOVABLES

EN EL GRADO ACADÉMICO DE

LICENCIADO

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

RECTOR

Dr. CARLOS GUILLERMO ALVARADO CEREZO

JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA

DECANO	Dr. Lauriano Figueroa Quiñonez
VOCAL PRIMERO	Dr. Ariel Abderramán Ortíz López
VOCAL SEGUNDO	Ing. Agr. MSc. Marino Barrientos García
VOCAL TERCERO	Ing. Agr. Erberto Raúl Alfaro Ortíz
VOCAL CUARTO	P. For. Sindi Benita Simón Mendoza
VOCAL QUINTO	Br. Sergio Alexsander Soto Estrada
SECRETARIO	Dr. Mynor Raúl Otzoy Rosales

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2014

Guatemala, noviembre de 2014

Honorable Junta Directiva.

Honorable Tribunal Examinador

Facultad de Agronomía

Universidad de San Carlos de Guatemala

Honorables miembros:

De conformidad con las normas establecidas por la Ley Orgánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala, tengo el honor de someter a vuestra consideración, el trabajo de graduación: **“Aplicación del modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT), para la simulación del balance hídrico de la Microcuenca del Río Atulapa, Esquipulas, Chiquimula, Guatemala, C.A”**; como requisito previo a optar al título de Ingeniero Agrónomo en Recursos Naturales Renovables, en el grado académico de Licenciado.

Esperando que el mismo llene los requisitos necesarios para su aprobación, me es grato suscribirme,

Atentamente,

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Edson Toniño Hernández Mazariegos

ACTO QUE DEDICO

- A DIOS: Mi fortaleza, el que me ha dado la oportunidad de vida, el dueño de mis triunfos y mis bendiciones
- A MI MADRE: Angélica Mazariegos, mi primer gran amor, la persona en la que ciegamente confié, la que siempre ha estado en mis triunfos y también en mis derrotas, a usted que es todo en mi vida, le dedico con todo respeto este trabajo, espero llenarla de orgullo.
- A MI PADRE: Vicente Hernández, gracias por enseñarme luchar por la vida, gracias porque sé que todo lo que ha hecho en su vida, lo hace para darnos lo mejor, por hacer de mi familia un ejemplo a seguir.
- A MI HIJO: José Raúl Hernández Mazariegos, por llenar de alegría mi vida, por ocupar mi tiempo, por hacerme esforzar a ser el mejor padre del mundo.
- A MIS HERMANAS: Nataly, Wendy y Beatriz, gracias por todo el apoyo incondicional que me han dado por demostrarme que soy parte importante de la familia y ser mi primeras amigas.
- A MI FAMILIA: A toda mi familia porque este triunfo es de todos, por ser mi inspiración.
- A MIS AMIGOS: Ricardo Rivas, Alvaro Rodriguez, Mauro Tezen, Raul Alvarez, Gabriela Guzman, gracias a cada uno de ustedes por ser las grandes personas que Dios puso en mi camino para lograr mis objetivos

AGRADECIMIENTOS

Especialmente a la Facultad de Agronomía, por dejarme pertenecer a su prestigioso grupo de estudiantes.

Al Ing. Agr. Guillermo Santos por apoyarme en el proceso de EPS, por darme la oportunidad de aplicar mis conocimientos en tan importante instituto. IGN.

Al Instituto Geográfico Nacional por ser mi primera oportunidad laboral, por enseñarme los procesos técnicos y científicos de la cartografía nacional, por crear en mí el espíritu de investigación y colaborar con mi país.

A mis supervisores y asesores José Horacio Ramírez Pérez, Guillermo Santos Mansilla, Tomas Padilla por apoyarme en toda mi investigación y ser personas que siempre estuvieron dispuestas a colaborar con mi persona.

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	PÁGINA
RESUMEN.....	x
CAPÍTULO I DIAGNÓSTICO REALIZADO EN LA DIVISIÓN DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DEL INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL DE GUATEMALA.....	1
1.1. PRESENTACIÓN.....	2
1.1. MARCO REFERENCIAL.....	4
1.1.1. Antecedentes.....	4
1.1.2. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA).....	4
1.1.3. Instituto Geográfico Nacional "Ingeniero Alfredo Obiols Gómez".....	6
1.1.3.1. Marco Legal.....	9
1.1.3.2. Ubicación Geográfica, Límites y Vías de Acceso.....	10
1.2.3.4. Misión.....	11
1.2.3.5. Visión.....	11
1.2.3.6. Objetivos.....	11
1.2.3.7. Atribuciones.....	11
1.2.3.8. Áreas Técnicas y Ejecutivas.....	12
1.2.3.9. Cinco áreas administrativas.....	12
1.2.4 División De Información Geográfica.....	16
1.2.4.1 Función.....	16
1.2.4.2 Misión.....	16
1.2.4.3. Organigrama de la División.....	17
1.2.4.3 Productos.....	17
1.3 OBJETIVOS.....	24

CONTENIDO	PÁGINA
1.3.1 General.....	24
1.3.2 Específicos	24
1.4 METODOLOGÍA, MATERIALES Y RECURSOS	25
1.4.1 Metodología.....	25
1.4.1.1 Fase inicial de Gabinete	25
1.4.1.2 Fase de Campo	25
1.4.1.3 Fase Final de Gabinete	26
1.4.2 Recursos	26
1.4.2.1 Recursos humanos.....	26
1.4.2.2 Recursos Físicos	26
1.4.2.3 Recursos Financieros.....	27
1.5 RESULTADOS.....	28
1.5.1 Fortalezas.....	28
1.5.2 Debilidades.....	28
1.5.3 Oportunidades	29
1.5.4 Amenazas.....	29
1.6 CONCLUSIONES.....	31
1.7 RECOMENDACIONES	32
1.8 BIBLIOGRAFÍA	33
CAPÍTULO II APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL (SWAT), PARA LA SIMULACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO ATULAPA, ESQUIPULAS, CHIQUIMULA, GUATEMALA.....	
	34
2.1. INTRODUCCIÓN	35

CONTENIDO	PÁGINA
2.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	38
2.3. JUSTIFICACIÓN	39
2.4. MARCO TEÓRICO.....	41
2.4.1. MARCO CONCEPTUAL.....	41
2.4.1.1. Cuenca.....	41
2.4.1.2. La cuenca hidrográfica como sistema.....	41
2.4.1.3. Partes de una cuenca	42
2.4.1.4. Cuenca hidrográfica y cuenca hidrológica	43
2.4.1.5. Delimitación de una cuenca	43
2.4.1.6. El ciclo hidrológico y balance hídrico	44
B Balance hídrico	45
2.4.1.7. Componentes del ciclo hidrológico y balance hídrico.....	46
2.4.1.8. Modelos hidrológicos	48
C Clasificación de modelos de cuenca	49
D Clasificación de los modelos matemáticos o formales	50
2.4.1.9. Información climatológica requerida por el modelo SWAT.....	52
2.4.1.10. Modelo Hidrológico SWAT	53
2.4.2. Componentes del modelo SWAT	53
E. Clima	55
F. Sedimentación.....	57
H. Nutrientes	57
I. Componentes de transporte	58
2.4.2. MARCO REFERENCIAL	59

CONTENIDO	PÁGINA
2.4.2.1. Ubicación Geográfica de la Cuenca.....	59
2.4.2.2. Límites de la Microcuenca del rio Atulapa.....	61
2.4.2.3. Ubicación política administrativa.....	61
2.4.2.4. Características socioeconómicas.....	63
A. Población.....	63
B. Tenencia de la Tierra.....	63
C. Actividades productivas.....	63
D. Servicios Públicos.....	63
2.5. OBJETIVOS.....	65
2.5.1. Objetivo General.....	65
2.5.2. Objetivos Específicos.....	65
2.6. METODOLOGÍA.....	66
2.6.1. Fase de gabinete I.....	67
2.6.1.1. Recopilación de información alfanumérica.....	67
2.6.1.2. Recopilación de información espacial.....	68
2.6.1.3. Procesamiento de datos climáticos.....	68
2.6.2. Fase de Gabinete II.....	70
2.6.2.1. Ingreso de datos espaciales.....	70
2.6.3. Fase de Gabinete III.....	71
2.6.3.1. Simulación con el modelo hidrológico.....	71
2.6.4. Fase Final.....	81
2.6.4.1. Datos de Salida.....	81
2.6.4.2. Ordenamiento de Datos de salida.....	83
2.6.4.3. Comparación de resultados.....	83
2.7. RESULTADOS Y DISCUSION.....	84

CONTENIDO	PÁGINA
2.7.1. Simulación Diaria	84
2.7.2. Simulación y correlación diaria periodo enero-diciembre 2012.....	86
2.7.3. Simulación Mensual	88
2.7.4. Simulación y correlación mensual periodo enero-diciembre 2012	89
2.7.5. Correlación Lluvia Vs. Caudal simulado.....	91
2.7.6. Índices Estadísticos	92
2.8. CONCLUSIONES.....	96
2.9. RECOMENDACIONES	97
2.10. BIBLIOGRAFÍA	98
CAPITULO III SERVICIOS REALIZADOS.....	101
3.1 INTRODUCCIÓN	102
3.2 PREPARACIÓN DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ESTABLECIMIENTO DEL GEOPORTAL DEL INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL ING. ALFREDO ÁLVAREZ OBIOL –IGN-.....	103
3.2.1 MARCO CONCEPTUAL.....	103
3.2.1.1 Información Geográfica	103
3.2.1.2 Sistema de Información Geográfica (SIG).....	104
3.2.1.3 Que Es Un Geoportal?	105
3.2.1.4 Componentes de un Geoportal.....	105
3.2.1.5 Datos	106
3.2.1.6 Metadatos.....	107
3.2.1.7 Estándares	108
3.2.1.8 GeoServicios	109
3.2.2 OBJETIVOS.....	111

CONTENIDO	PÁGINA
3.3. DETERMINACIÓN DE CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DE LA CUENCA DEL RIO OCOSITO, CON SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICOS.....	121
3.3.3.1. INTRODUCCIÓN.....	121
3.3.3.2. MARCO CONCEPTUAL.....	122
3.3.4. OBJETIVOS.....	126
3.3.5. METODOLOGÍA.....	126
3.3.6. RESULTADOS.....	129
3.3.7. EVALUACION.....	133
3.3.8. RECOMENDACIONES.....	133

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
Figura 1: Organigrama del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA).....	5
Figura 2: Ubicación del Instituto Geográfico Nacional	10
Figura 3: Organigrama Instituto Geográfico Nacional “Ingeniero Alfredo Obiols Gómez”	13
Figura 4: Organigrama de la División de Información Geográfica.....	17
Figura 5: Nombres Geográficos sobre fotografía aérea IGN 2006.....	18
Figura 6: Diccionario Geográfico de Guatemala.	19
Figura 7: Portada de las monografías de los municipios de San Luis Jilotepeque y Tecpán.....	20
Figura 8: Mapa de Cuencas Hidrográficas de Guatemala.	21
Figura 9: Edición de polígonos de uso y cobertura de la tierra.	22
Figura 10: Edición de polígonos de sistemas de información geográficos urbanos.....	23
Figura 11: Diagrama del Ciclo del Agua, ilustración de John M. Evans, USGS.....	45
Figura 12: Ubicación de la cuencas sobre las hojas Cartográficas IGN 2010.	60
Figura 13: Mapa de Ubicación de la Microcuenca.	62
Figura 14: Archivo de entrada al modelo precipitación diaria en formato .txt.....	70
Figura 15: Archivo de entrada al modelo temperaturas máximas y mínimas en formato .txt.....	70
Figura 16: Modulo Project Setup, de la interfaz ArcSwat.....	72
Figura 17: Modulo Watershed Delineation de la interfaz ArcSwat.	73
Figura 18: Sección Dem setup del Módulo Watershed Delineation de la interfaz ArcSwat.....	73
Figura 19: Sección Stream Definition del Módulo Watershed Delineation, de la interfaz ArcSwat.....	74
Figura 20: Sección Stream network del Módulo Watershed Delineation, de la interfaz ArcSwat.....	74

FIGURA	PÁGINA
Figura 21: Sección Delineate watershed del Módulo Watershed Delineation, de la interfaz ArcSwat.	75
Figura 22: Sección Calculation of Subbasin Parameters, del Módulo Watershed Delineation de la interfaz ArcSwat.	75
Figura 23: Delimitación de la cuencas con el módulo watershed Delineation, en la interfaz ArcSwat.	76
Figura 24: Modulo HRU Analysis de la interfaz ArcSwat.	77
Figura 25: Clasificación de Unidades de Respuesta Hidrológica con el módulo HRU Analysis, en la interfaz ArcSwat.	78
Figura 26: Reclasificación Uso de la Tierra con códigos de la interfaz ArcSwat.	79
Figura 27: Reclasificación de suelos en la interfaz ArcSwat.	79
Figura 28: Módulo Weather Data Definition para ingresar la información climática (Pp, T°max y min) de la interfaz ArcSwat.	80
Figura 29: Módulo SWAT simulation de la interfaz ArcSwat.	81
Figura 30: Output datos de salida del modelo después de la simulación.	82
Figura 31: Diagrama de simulación del balance hídrico en la cuenca.	82
Figura 32: Dinámica y magnitud de los escurrimientos superficiales simulados diarios (1983-2012).	84
Figura 33: Modulo de simulación de la intefaz ArcSwat.	85
Figura 34: Dinámica y magnitud de los escurrimientos superficiales simulados diarios (ENERO-DICIEMBRE 2012).	87
Figura 35: Análisis de regresión de caudales simulados y observados.	87
Figura 36: Dinámica y magnitud de los escurrimientos superficiales simulados mensuales (1983-2012).	88
Figura 37: Dinámica y magnitud de los escurrimientos superficiales simulados mensuales (ENERO-DICIEMBRE 2012).	90
Figura 38: Grafica de barras de la Dinámica y magnitud de los escurrimientos superficiales simulados mensuales (ENERO-DICIEMBRE 2012).	90

FIGURA	PÁGINA
Figura 39: Análisis de regresión de caudales simulados y observados.	91
Figura 40: Análisis de regresión de los escurrimientos superficiales medidos y lluvia.....	92
Figura 41: Mapa de Carreteras de Guatemala.....	106
Figura 42: Mapa de zonas de Vida de Guatemala.....	107
Figura 43: Dinámica de un Geoportal.	110
Figura 44: Mapa de Zonas de Vida de Holdrifge.....	114
Figura 45: Mapa de Cobertura y Uso de la Tierra.....	115
Figura 46: Mapa de Clasificación Taxonómica de Suelos.	116
Figura 47: Mapa Geológico.....	117
Figura 48: Mapa de Ecorregiones.....	118

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO	PÁGINA
Cuadro 1: Antecedentes históricos de IGN.....	8
Cuadro 2: Muestra de archivos de entrada al modelo SWAT.....	70
Cuadro 3: Rangos para evaluar modelos hidrológicos propuesto por Nash-Sutcliffe.	93
Cuadro 4: Indicadores estadísticos para evaluar la eficiencia de la simulación.....	94
Cuadro 5: Comparación de índices estadísticos en diferentes cuencas.....	95
Cuadro 6: Hojas topográficas.....	123
Cuadro 7: Características morfométricas Subcuenca 1.....	129
Cuadro 8: Características morfométricas Subcuenca 2.....	130
Cuadro 9: Características morfométricas Subcuenca 3.....	131

RESUMEN

El presente informe corresponde al trabajo realizado en el Instituto Geográfico Nacional IGN, mismo que se requiere como parte del Ejercicio Profesional Supervisado –EPS-, de la Facultad de Agronomía, de la Universidad de San Carlos de Guatemala, en el periodo de febrero a noviembre de 2012. Dicho informe consta de tres capítulos en el siguiente orden, Capítulo I Diagnóstico, Capítulo II Investigación y Capítulo III Servicios.

El diagnóstico realizado se concentró en el análisis FODA de la División de información Geográfica. Los resultados obtenidos a través de las boletas reflejaron una serie de problemas que los entrevistados resaltan, a la vez estas boletas permitieron identificar las fortalezas de la división y las cualidades positivas de su equipo de trabajo.

Dicha información se obtuvo a través de una boleta, la cual se le entregó a cada técnico que labora en la división y a través de una dinámica, se fueron enlistando fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas, lo que permitió realizar el diagnóstico de la división.

La investigación como requerimiento del IGN, fue la aplicación de un modelo hidrológico para determinar las características o factores que actúan en el ciclo hidrológico. El modelo seleccionado para aplicar en este proyecto fue el modelo SWAT, el cual tiene amplia aplicabilidad alrededor del mundo, por lo que acceder a trabajos similares no fue difícil, al contrario permitió fortalecerse a través de experiencias con características similares.

En la presente investigación se aplicó este modelo a la microcuenca del Río Atulapa. Parte de los resultados fueron comparados con caudales observados para el período enero-diciembre 2012, arrojando información satisfactoria a escala mensual (R^2 : 0,86; R^2 ENS: 0,6), pero poco deseable en las escalas diarias (R^2 : 0,12; R^2 ENS: 0,41), en una situación donde no hubo calibración ni se mejoró ningún parámetro (sólo valores por defecto de la interfaz ARCSWAT).

En consideraciones generales, la aplicación del modelo SWAT en esta microcuenca ha sido de indiscutible eficacia; en consecuencia de ello, sería conducente la inclusión del mismo, en las posteriores labores investigativas que al respecto se desarrollen.

El tercer capítulo del presente documento, corresponde a una serie de servicios que proporcionaron apoyo técnico y científico, en la ejecución de algunos de los proyectos de IGN. Según las necesidades durante el periodo de EPS, las actividades de servicio realizadas fueron:

- Preparación de información geográfica, para el establecimiento del geoportal del Instituto Geográfico Nacional, Ing. Alfredo Álvarez Obiol –IGN-
- Determinación de características morfométricas de la Cuenca Del Rio Ocosito, con sistemas de información geográficos.

La propuesta de dichos servicios, responde a los problemas identificados en el diagnóstico, específicamente la falta de nuevos servicios, que el instituto pueda ofrecer al público.

CAPÍTULO I

DIAGNÓSTICO REALIZADO EN LA DIVISIÓN DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DEL INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL DE GUATEMALA

1.1. PRESENTACIÓN

El Instituto Geográfico Nacional fue creado el 8 de diciembre de 1964, después de haber realizado trabajos iniciales desde el año de 1932, anteriormente llamado Departamento de Mapas y Cartografía.

El Instituto Geográfico Nacional (IGN) tiene como objetivo, proveer de información geográfica y cartográfica adecuada para la investigación y evaluación de los recursos naturales del país. Para cumplir con lo anterior, se apoya de cinco divisiones técnicas, las cuales cumplen funciones específicas.

La División de Información Geográfica es una división del Instituto Geográfico Nacional, formando parte del Consejo Técnico. Esta división tiene asignada en sus funciones planificar, diseñar y coordinar estudios y proyectos, que atiendan al aprovechamiento y conservación de los recursos naturales y medio ambiente del país.

Para darle cumplimiento a sus atribuciones asignadas, el IGN se compone de seis divisiones las cuales son:

- División de Geodesia;
- División de Fotogrametría;
- División de Cartografía;
- División de Información Geográfica;
- División de Catastro.
- División de informática

Como parte de las actividades que se desarrollaron dentro del Ejercicio Profesional Supervisado –EPS- se realizó un diagnóstico de la División de Información Geográfica.

El presente documento contiene el Diagnóstico realizado en la División de Información Geográfica, del Instituto Geográfico Nacional de Guatemala. La metodología utilizada para en el diagnóstico, fue por medio de un análisis FODA.

1.1. MARCO REFERENCIAL

1.1.1. Antecedentes

El Instituto geográfico nacional de Guatemala (IGN) actualmente es una dependencia del Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación (MAGA), según Acuerdo Gubernativo No. 474-2006. Posteriormente, por Acuerdo Gubernativo No. 338-2010, del 19 de Noviembre del 2010, Reglamento Orgánico Interno del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, pasa a ser un órgano de consulta del mismo. (MAGA, 2011).

1.1.2. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA)

A través del Decreto Gubernativo número 14, del 24 de agosto de 1871, el gobierno de Guatemala, suprimió el Consulado de Comercio y estableció el Ministerio de Fomento, para la protección y mejora del comercio, agricultura, ganadería, artes industriales, obras públicas, líneas telegráficas, caminos, puentes, puertos y otros medios de comunicación; fue el 1 de Agosto de 1899, cuando se creó la Dirección de Agricultura adscrita al Ministerio de Fomento. El Ministerio de Agricultura fue creado a través del Decreto Legislativo No. 1042, de fecha 21 de Mayo de 1920, sin embargo se le llamaba Secretaria del Despacho de Agricultura, de la Secretaria de Agricultura hasta 1933. (MAGA, 2011).

Por Decretos Gubernativos en el año 1944, se le denominó Secretaria de Estado, en el Despacho de Economía y luego Secretaria de Agricultura y Minería; y en 1945, por Decreto Legislativo No. 93, del 25 de abril se le llamo Ministerio de Agricultura. Fue en diciembre 1981, cuando el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación recibió el nombre que hasta la fecha conserva, por medio del Decreto Legislativo No. 51-81. El Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación de Guatemala, es el encargado de atender los asuntos concernientes al régimen jurídico que rige la producción agrícola, pecuaria e hidrobiología, esta última en lo que le atañe, así como aquellas que tienen por objeto mejorar las condiciones alimenticias de la población, la sanidad agropecuaria y el desarrollo productivo nacional (MAGA, 2012) .

1.1.3. Instituto Geográfico Nacional "Ingeniero Alfredo Obiols Gómez"

La historia del Instituto Geográfico Nacional "Ingeniero Alfredo Obiols Gómez", se remonta desde el siglo XX, específicamente en el año de 1919, cuando la Sociedad Geográfica Americana de Estados Unidos, lidera un estudio económico denominado *Economical Survey*, con el objeto de proveer información útil para resolver el diferendo territorial entre Guatemala y Honduras. Producto de este trabajo, Claudio Urrutia publica el Mapa de Guatemala, a escala 1:400,000 (ONU, 1933).

Posteriormente durante el periodo de 1932 a 1938, se realizan los primeros trabajos geodésicos, como parte del sistema de control terrestre. Partiendo de estos trabajos, se conforma una comisión técnica integrada por cinco ingenieros, designados por el Tribunal Arbitral con el consejo de la Oficina de Estudios Geodésicos de los Estados Unidos (*United States Coast & Geodetic Survey*); el Gobierno de Guatemala y el Gobierno de Honduras, formando la "Comisión Técnica de Demarcación de la Frontera entre Guatemala y Honduras". Esta comisión fue la primera en su tipo en Centroamérica, en la que se realizaron por primera vez, mapas modernos basados en triangulaciones de primer orden y con detalles aerofotográficos (Morales, 2011)

Continuando con los primeros intentos de conformación, de una institución encargada de los trabajos geográficos y cartográficos en el país, en el año de 1935, los Gobiernos de Guatemala y El Salvador conforman una comisión, encargada de la demarcación de la frontera entre los dos países, siendo nombrada como "Comisión Mixta de Límites". (Morales, 2011).

En 1940, se crea la Sección de Ingeniería adscrita al Ministerio de Relaciones Exteriores, oficina encargada de los trabajos cartográficos en el país, funcionando en el periodo de

1940 a 1945. Lo más importante de este periodo fue el Plano del Puerto de San José, a escala 1:5,000. Esta Sección fue remplazada a mediados de 1945, por el Departamento de Mapas y Cartografía, como parte del Ministerio de Comunicaciones y Obras Públicas (Morales, 2011)

En el año de 1954, específicamente el 8 de septiembre, se crea se crea la Dirección General de Cartografía (DGC), como dependencia del Ministerio de Comunicaciones y Obras Públicas, liderada por el Ing. Alfredo Obiols Gómez, en reemplazo del Departamento de Mapas y Cartografía. La DGC se caracterizó por su intensa actividad cartográfica, fuertemente apoyada por el gobierno central (GEOINSTITUTOS, 2005)

Finalmente en el 28 de diciembre de 1964, con el apoyo del Ing. Alfredo Obiols Gomez se crea el Instituto Geográfico Nacional (IGN), reemplazando a la Dirección General de Cartografía, en respuesta a la necesidad que se tenía desde años atrás, de modernizar ese sector, fungiendo como primer director, el Ing. Alfredo Obiols Gómez

En septiembre de 1981, el IGN adquiere el nombre de Instituto Geográfico Nacional "Ing. Alfredo Obiols Gómez", en honor a quien fue su primer director y quien se desempeñó además, como director de la Dirección General de Cartografía.

El 29 de diciembre de 1982, por acuerdo gubernativo 526-82, se fusiona el Servicio de Cartografía del Ejército con el Instituto Geográfico Nacional, denominándosele "Instituto Geográfico Militar", por lo que el IGN se convierte en una dependencia del Ministerio de la Defensa Nacional (Ministerio de la Defensa Nacional, 2009).

Del año 1990 a 1995, a través del Decreto No. 72-90, "Ley Constitutiva del Ejército de Guatemala", se nombra al Departamento Geográfico Militar como una dependencia militar, auxiliar del ejército de Guatemala, trasladándose en 1995 al antiguo hospital militar, situación que dejó sin efecto la fusión anterior (Ministerio de la Defensa Nacional, 2009).

A partir del 1 de enero de 1998, el IGM se convierte nuevamente en Instituto Geográfico Nacional "Ing. Alfredo Obiols Gómez", como dependencia del Ministerio de Comunicaciones y Obras Públicas, en cumplimiento de la desmilitarización de las instituciones estatales prevista en los Acuerdos de Paz de 1996, y mediante el Acuerdo Gubernativo No. 861-97

El 12 de septiembre del 2006 pasa a formar parte del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, como dependencia centralizada, según Acuerdo Gubernativo No. 474-2006. Posteriormente, por Acuerdo Gubernativo No. 338-2010, del 19 de Noviembre del 2,010, Reglamento Orgánico Interno del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, pasa a ser un órgano de consulta del mismo.

Cuadro 1: Antecedentes históricos de IGN.

Nombre Institucional	Periodo de Actividades	
	De:	A:
Comisión Técnica de Demarcación de la Frontera entre Guatemala y Honduras	25 de julio de 1932	7 de septiembre de 1936
Comisión Mixta de Límites Guatemala – El Salvador	1 de agosto de 1935	30 de septiembre de 1940
Sección de Ingeniería adscrita al Ministerio de Relaciones Exteriores	28 de noviembre de 1940	24 de enero de 1945
Departamento de Mapas y Cartografía adscrito al Ministerio de Comunicaciones y Obras Públicas	25 de enero de 1945	7 de septiembre de 1954
Dirección General de Cartografía,	8 de septiembre de	7 de diciembre de

Dependencia del Ministerio de Comunicaciones y Obras Públicas	1954	1964
Instituto Geográfico Nacional, Dependencia del Ministerio de Comunicaciones y Obras Públicas	8 de diciembre de 1964	6 de septiembre de 1981
Instituto Geográfico Nacional “Ing. Alfredo Obiols Gómez”, Dependencia del Ministerio de Comunicaciones y Obras Públicas	7 de septiembre de 1981	27 de diciembre de 1982
Instituto Geográfico Militar, Dependencia del Ministerio de la Defensa	28 de diciembre de 1982	31 de diciembre de 1997
Instituto Geográfico Nacional “Ing. Alfredo Obiols Gómez”, Dependencia del Ministerio de Comunicaciones y Obras Públicas	1 de enero de 1998	27 de septiembre de 2006
Instituto Geográfico Nacional “Ing. Alfredo Obiols Gómez”, Dependencia del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación	28 de septiembre de 2006	Al presente -2013

Fuente: Morales 2011.

1.1.3.1. Marco Legal

La normatividad que rige al Instituto Geográfico Nacional, se puede sintetizar en los siguientes acuerdos:

- Reglamento de Organización administrativa del IGN, Acuerdo Gubernativo No.114-99 del 24 de febrero de 1999.
- Acuerdo Gubernativo No. 474-2006, del 12 Septiembre del 2006, traslado del IGN del MICIVI al MAGA.
- Acuerdo Gubernativo No. 338-2010, del 19 de Noviembre del 2,010, reglamento orgánico interno, del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación–MAGA- (ver artículo 35 Numeral).
- Acuerdo Ministerial No. 247-2011, del 26 de Octubre del 2011, Tarifas de Productos y Servicios que presta el IGN.

1.1.3.2. Ubicación Geográfica, Límites y Vías de Acceso

El Instituto Geográfico Nacional de Guatemala, está ubicado en el departamento de Guatemala, específicamente en Avenida Las Américas, 5-76 zona 13.



Figura 2: Ubicación del Instituto Geográfico Nacional.

1.2.3.4. Misión

Ser un ente público científico de reconocimiento internacional, rector y facilitador de la geomática nacional, de alta tecnología, proveedor de servicios y productos precisos y oportunos (IGN, 2013)

1.2.3.5. Visión

Somos el ente científico rector y facilitador de productos y servicios, que por medio de la formulación de políticas, la aplicación de alta tecnología y el liderazgo sectorial, garantiza la información geográfica básica nacional y oficial, a usuarios que inciden en el desarrollo del país (IGN, 2013)

1.2.3.6. Objetivos

- Promover, coordinar y apoyar la investigación científica que se realice en Guatemala, relacionada con las actividades propias del IGN.
- Conformar, administrar y actualizar el Sistema de Información Nacional.
- Proveer información geográfica y cartográfica confiable, para la investigación, planificación, monitoreo, para el desarrollo del país a nivel público y privado.

1.2.3.7. Atribuciones

- Conformar y administrar el Sistema Nacional de Información Geográfica –SNIG.
- Establecer, densificar y modernizar la Red Geodésica Nacional.
- Generar, publicar y distribuir la información geográfica oficial del país.
- Apoyar al Catastro Nacional.
- Investigación científica en campo de Geomática.
- Cooperación con instituciones dentro de competencias del IGN
- Opinión técnica sobre delimitaciones interdepartamentales e intermunicipales.
- Normalizar los nombres geográficos de la República.

- Formar parte de la Comisión específica de Protección del Mapa en Relieve.
- Velar por la certeza y exactitud de contenido del material cartográfico del país.

1.2.3.8. Áreas Técnicas y Ejecutivas

El IGN está organizado en seis divisiones técnicas:

- División de Geodesia;
- División de Fotogrametría;
- División de Cartografía;
- División de Información Geográfica;
- División de Apoyo al Catastro;
- División de Informática.

1.2.3.9. Cinco áreas administrativas

- Recursos humanos;
- Financiero;
- Bienes y servicios;
- Mercadeo y ventas; y
- Oficina de enlace IGN-RIC.



Figura 3: Organigrama Instituto Geográfico Nacional "Ingeniero Alfredo Obiols Gómez"

A. División de Geodesia

Esta división es la encargada de establecer el control geodésico horizontal y vertical, básico y suplementario. Provee las coordenadas precisas y su metodología a la geomática (Cartografía, Fotogrametría, Sistemas de Información Geográfica, entre otras), y las Geociencias (climatología, hidrología, paleontología, vulcanología, sismología, entre otras) (MAGA, 2011).

B. División de Fotogrametría

Obtener la fotografía aérea en distintas escalas y territorios del país o a nivel nacional, mediante el diseño, la toma, la evaluación y clasificación de los planes de vuelo de

fotografía aérea análoga o digital, así mismo, restituir o digitalizar mapas fotogramétrico, de escalas pequeñas a medianas para la cartografía. (MAGA, 2011).

C. División de Cartografía

Elabora información cartográfica, obteniendo insumos de las divisiones de Geodesia, Fotogrametría, Información Geográfica, Apoyo al Catastro e Informática, con el fin de representar el territorio nacional de Guatemala en forma general o parcial, a diferentes escalas de representación, aplicando normas, estándares y especificaciones nacionales e internacionales, dando como resultado el conjunto de productos cartográficos actualizados con que cuenta el IGN, para consulta y utilización por los tomadores de decisiones, entidades de Gobierno, Municipalidades, estudiantes y público en general, para la planificación, dirección y control de proyectos de ordenamiento territorial, gestión del riesgo, control de la pobreza, medio ambiente, control de la violencia entre otros, con fines sociales y de desarrollo, de acuerdo a las políticas de gobierno en turno (MAGA, 2011).

D. División de Información Geográfica

Realiza todas las aplicaciones de la Cartografía. Su objetivo es realizar mapas temáticos, estudios de cuencas hidrográficas, aplicaciones de sensores remotos usando imágenes de satélite, control de los nombres geográficos y sus bases de datos, sistemas de Información geográficos, así como todos los estudios de la información geoespacial en Guatemala (MAGA, 2011)..

E. División de Apoyo a Catastro

Dentro de sus procesos utiliza la base cartográfica generada por la división de cartografía, para la definición los límites municipales y departamentales a nivel nacional; los límites pretendidos por comunidades en proceso de elevación a categoría de municipios, así

mismo, la solución técnica en los conflictos de límites municipales y departamentales sometidos a su conocimiento (MAGA, 2011).

F. División de Informática

Desarrolla soluciones basadas en sistemas de información y tecnología, existente en apoyo al logro de los objetivos del IGN. Da soporte a la división de Geodesia, en la administración del software y las telecomunicaciones de la red geodésica activa CORS. Desarrolla y administra el Geoportal y la infraestructura de datos espaciales IDE (MAGA, 2011).

G. Área de Recursos Humanos

Sirve de Apoyo a la infraestructura de información utilizada por las áreas administrativas y técnicas.

H. Área Financiera

Administrar y optimizar los recursos Financieros, dotando a cada división y departamento del IGN, de los materiales y suministros necesario para la ejecución del Plan Operativo anual.

I. Área de Bienes y Servicios

Su función principal es mantener el mobiliario, vehículos y edificio en las mejores condiciones y conservar aptas las instalaciones para uso del personal, como también mantener los vehículos en buen funcionamiento, para las comisiones oficiales.

J. Área de Mercadeo y Ventas

Es la unidad de apoyo para el proceso de divulgación y promoción de las diferentes actividades que se realizan. Da a conocer los productos que se tienen para la venta, así como hace un estudio de los productos que sería recomendable crear, de acuerdo a las necesidades del cliente. Su objetivo es ser un área de servicio, en la cual se dé la atención debida a los usuarios de la información cartográfica.

1.2.4 División De Información Geográfica

1.2.4.1 Función

La División de Información Geográfica es la encargada de caracterizar el uso y cobertura de la tierra, así como de efectuar estudios a nivel de cuencas hidrográficas, que orienten al aprovechamiento y mejoramiento de los recursos naturales. Administra y genera los sistemas de información geográficos, que sirven de apoyo a la planificación estratégica en el uso, conservación y mejoramiento de los elementos ambientales, sociales, y culturales del país (MAGA, 2011).

1.2.4.2 Misión

Generar estudios geográficos generales y/o específicos que tiendan al aprovechamiento, conservación y mejoramiento de los recursos naturales, así como de los elementos sociales y culturales del país (MAGA, 2011)..

1.2.4.3. Organigrama de la División

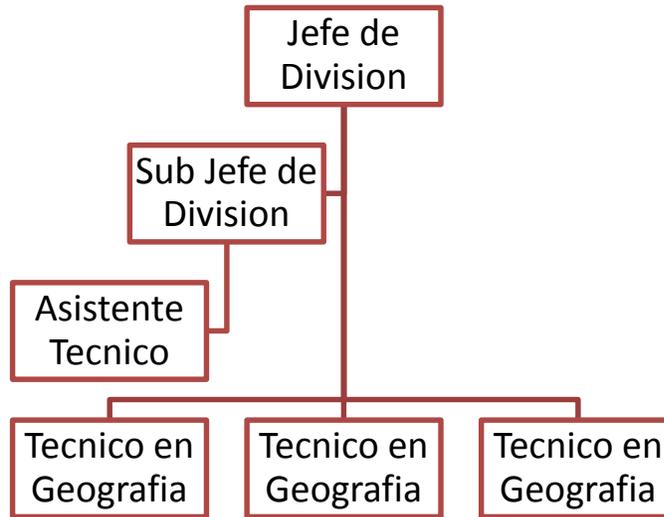


Figura 4: Organigrama de la División de Información Geográfica.

1.2.4.3 Productos

- Toponimia
- Diccionario geográfico
- Monografías municipales
- Estudio de cuencas hidrográficas
- Uso y cobertura del suelo
- Sistemas de información geográficos urbanos

A. Toponimia

Constituye una rama de la geografía, que se encarga del estudio de los Nombres de Accidentes Geográficos, los cuales son plasmados en documentos, Diccionario Geográfico, planos, mapas, atlas, etc. Los Nombres Geográficos proporcionan información que no se puede representar solamente con símbolos; también proporcionan datos espaciales sobre lugares, zonas y sus relaciones geográficas y culturales.

B. Diccionario geográfico

El Diccionario Geográfico de Guatemala, tiene su origen en la obra documental del Dr. Francis Gall Atlas, basada en la geografía descriptiva de los accidentes geográficos, publicada en los años 70, por el IGN. En ella se compilaron todos los nombres geográficos de la República de Guatemala. El diccionario geográfico es una herramienta muy útil e importante, que permite conocer el registro oficial de los Nombres Geográficos, así como otros datos referentes a Historia, Ubicación, Hidrografía, Orografía, entre otros.

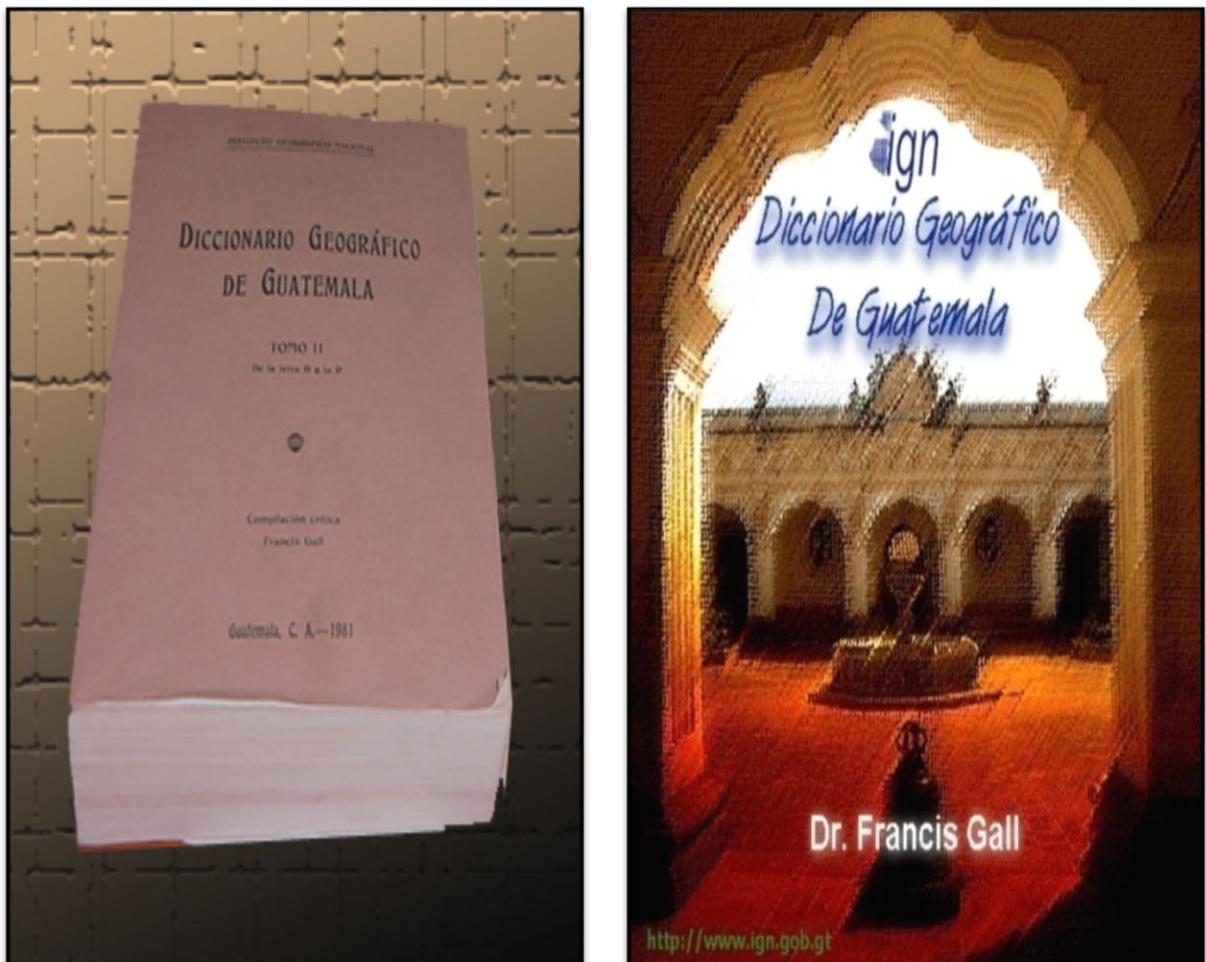


Figura 6: Diccionario Geográfico de Guatemala.

C. Monografías municipales

Una Monografía Municipal es la compilación de información geográfica básica, histórica, económica, turística, cultural, servicios básicos, infraestructura entre otros, que generan un documento de presentación de un municipio. Este documento cumple una doble función, ya que permite generar información básica y a la vez, permite a los usuarios, conocer sobre las riquezas culturales y potencialidades más destacadas, del municipio que es objeto de estudio.

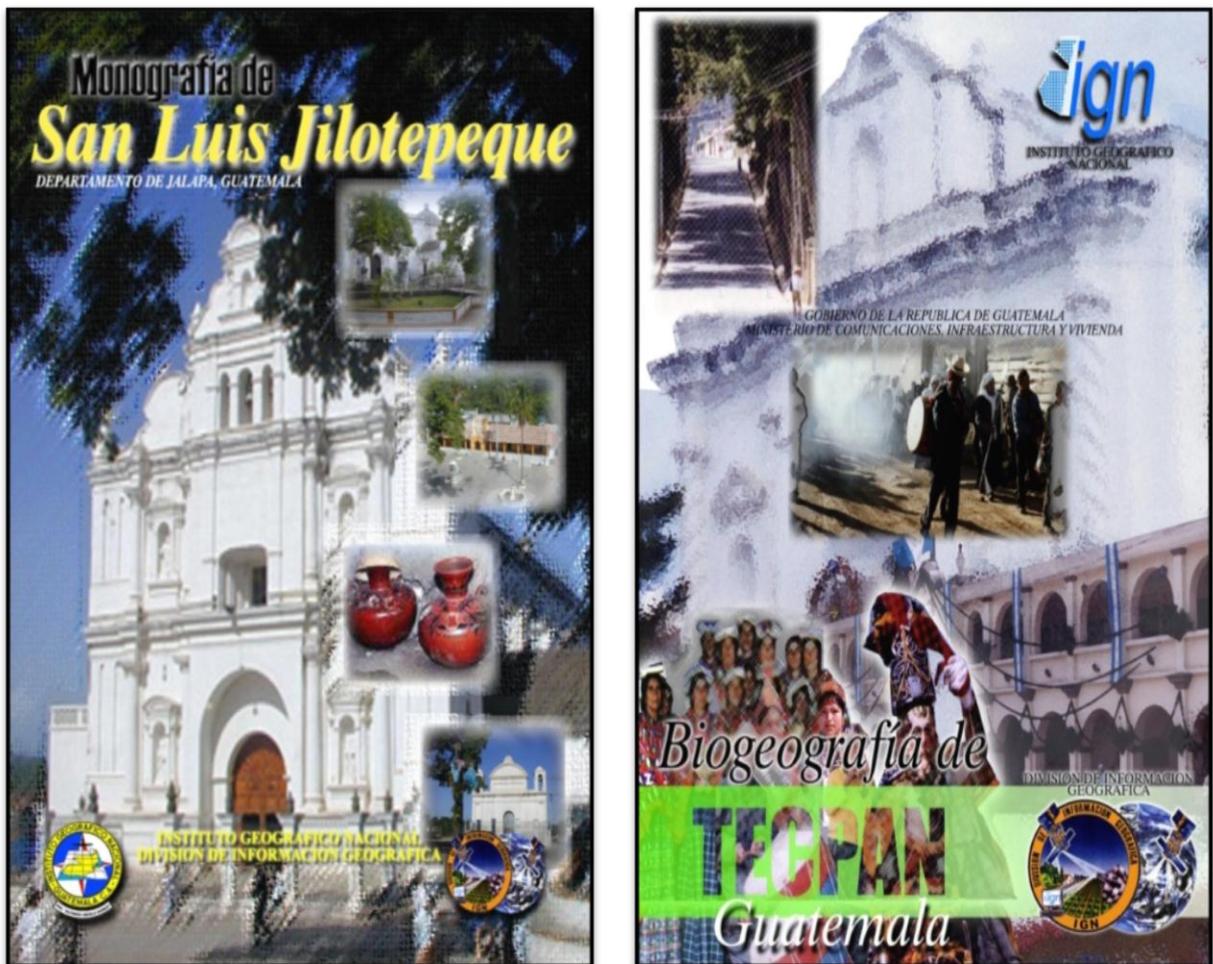


Figura 7: Portada de las monografías de los municipios de San Luis Jilotepeque y Tecpán.

D. Estudio de cuencas hidrográficas

Programa que está orientado a generar información básica sobre los recursos naturales, que sirven para la implementación de proyectos de desarrollo sostenible y preservación del recurso agua. A partir de estos estudios, se generan mapas temáticos: Uso del Suelo, pendientes, geológicos, hipsométricos, hidrográficos, infraestructura, climatológicos, etc.

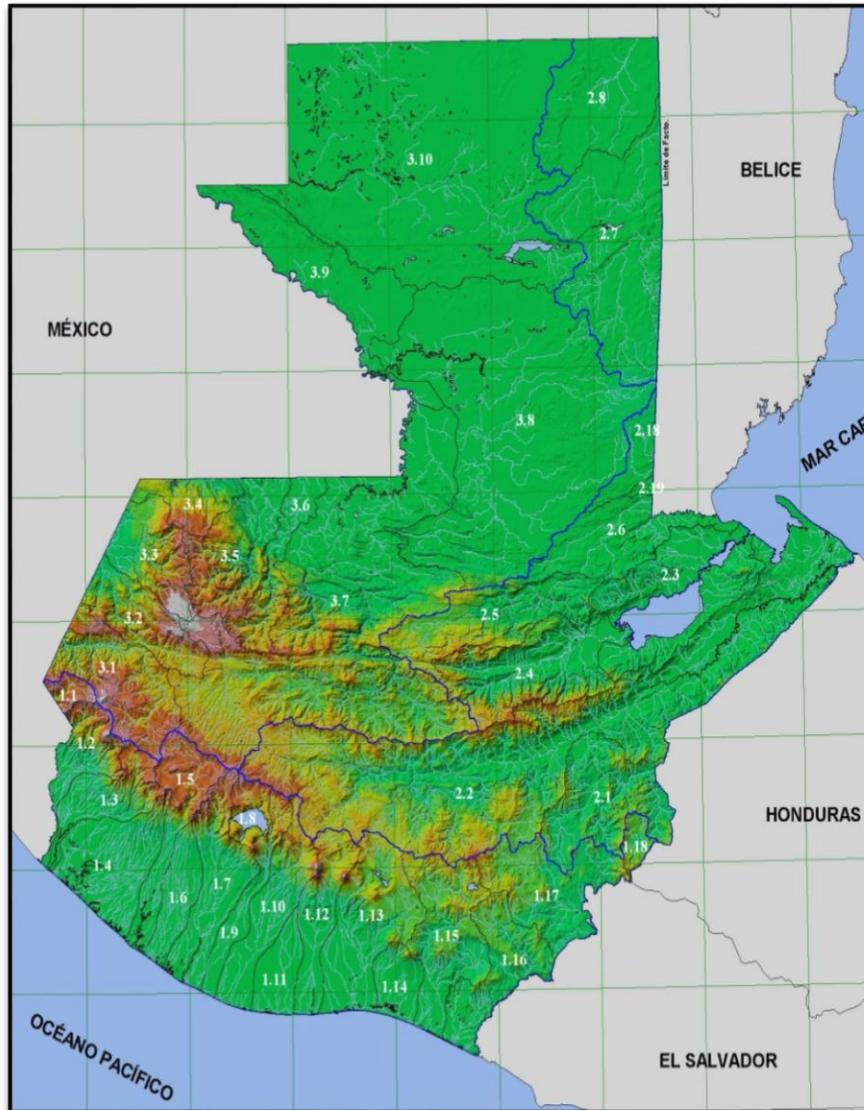


Figura 8: Mapa de Cuencas Hidrográficas de Guatemala.

E. Uso y cobertura del suelo

Clasificación del Uso y Cobertura del Suelo, por cuencas e Identificación de áreas vulnerables a inundación o deslave, para la reducción a desastres. (Proyecto Conjunto Banco Mundial-IGN).

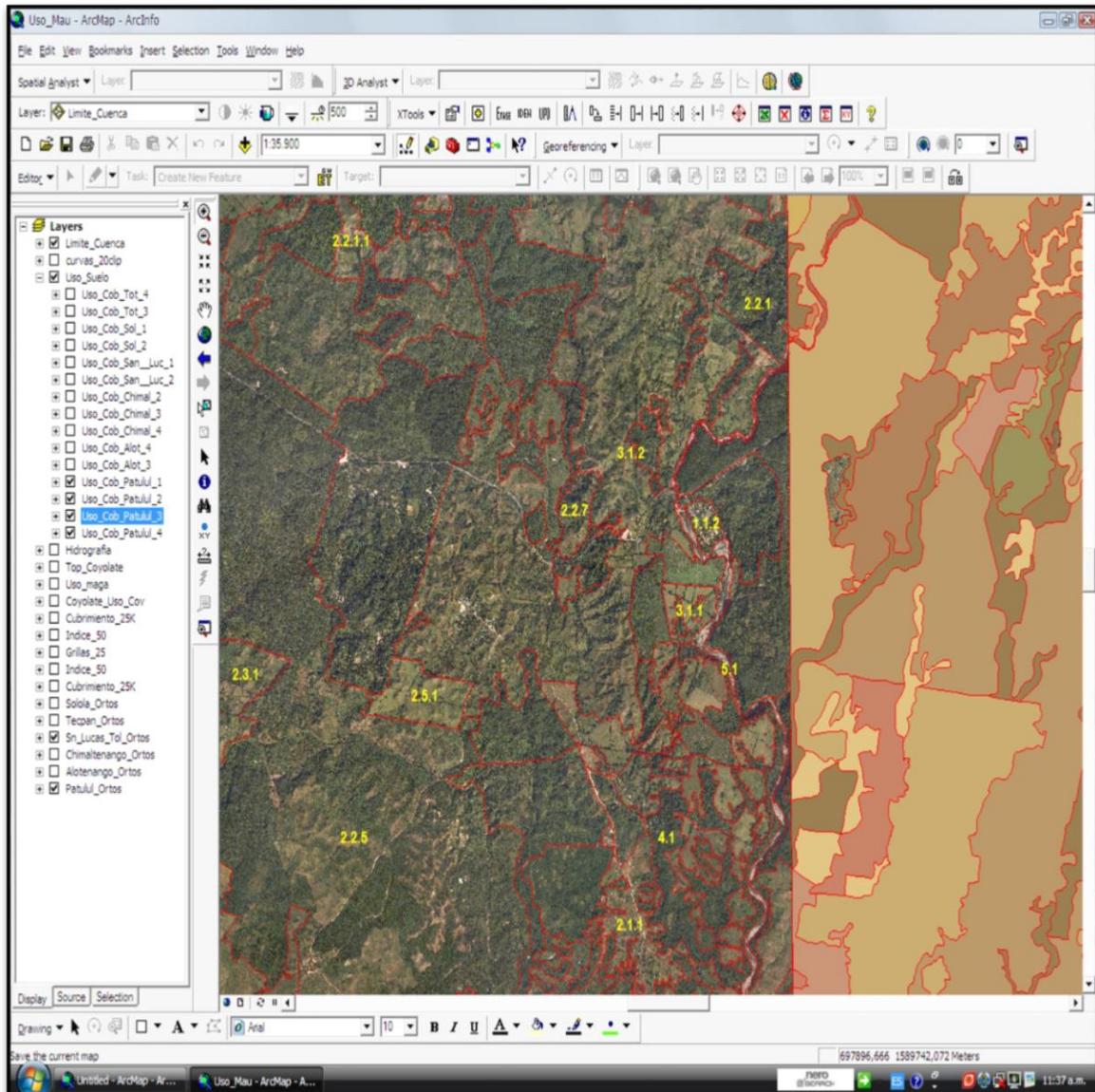


Figura 9: Edición de polígonos de uso y cobertura de la tierra.

F. Caracterización urbana

El proyecto de caracterización urbana, está orientado a generar una plataforma básica de datos espaciales, como apoyo al fortalecimiento de los gobiernos municipales en la toma de decisiones.

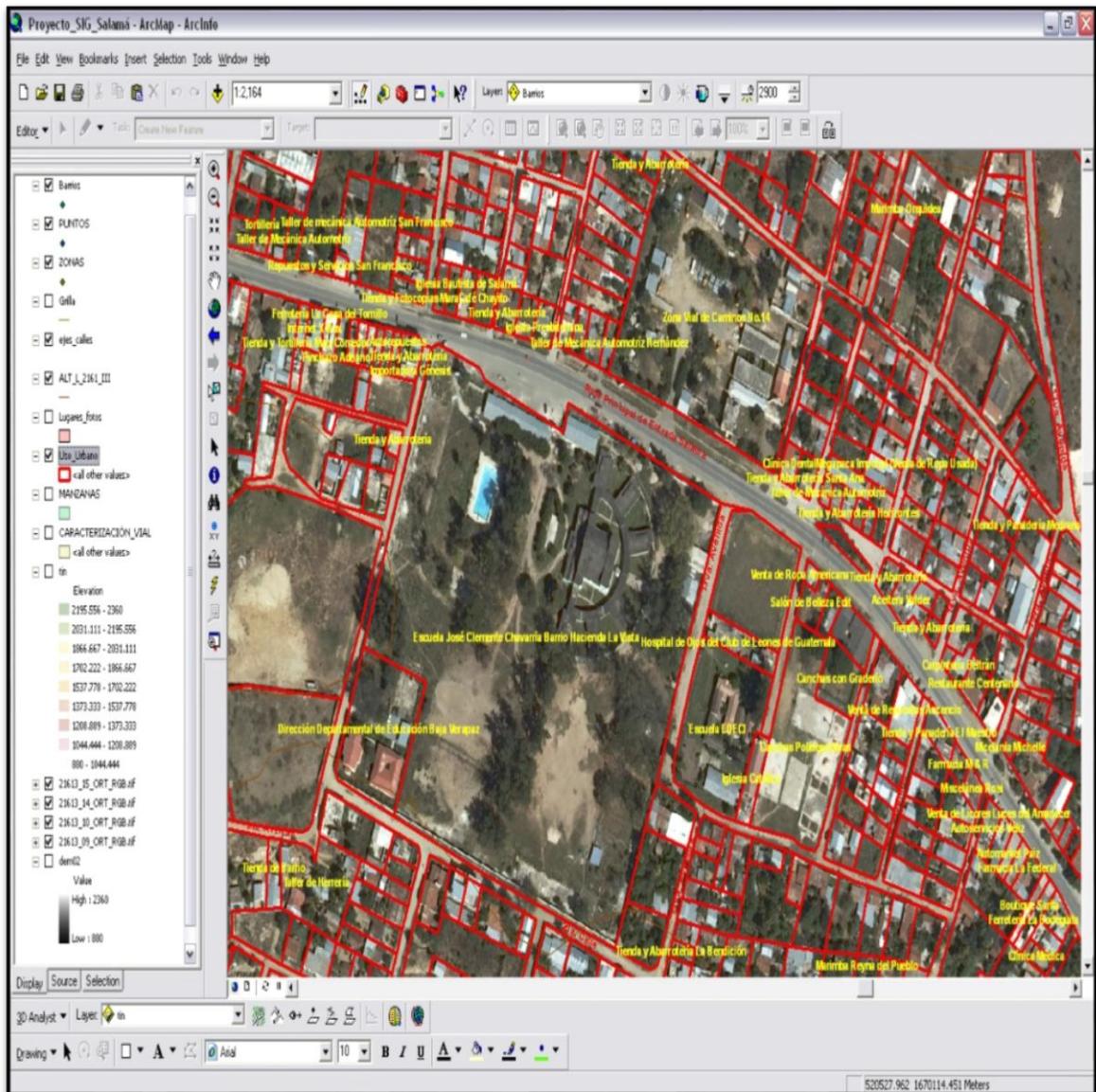


Figura 10: Edición de polígonos de sistemas de información geográficos urbanos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 General

- Realizar el diagnóstico de la División de Información Geográfica, del Instituto Geográfico Nacional “Ing. Alfredo Obiols Gómez”, por medio de un análisis FODA.

1.3.2 Específicos

- Conocer la opinión del personal acerca de los procesos que se realizan en la División de Información Geográfica, del Instituto Geográfico Nacional “Ing. Alfredo Obiols Gómez”.
- Identificar las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas de la División de Información Geográfica, del Instituto Geográfico Nacional “Ing. Alfredo Obiols Gómez”.
- Conocer la oferta de productos generados en la División de Información Geográfica, la demanda de la población de estos productos y la identificación de nuevos productos que pueden ser ofrecidos.

1.4 METODOLOGIA, MATERIALES Y RECURSOS

1.4.1 Metodología

1.4.1.1 Fase inicial de Gabinete

- Reconocimiento de las instalaciones de la División de Información Geográfica, del Instituto Geográfico Nacional “Ing. Alfredo Obiols Gómez”: En esta actividad se pudo conocer de manera general, las instalaciones de la división y familiarizarse con ella, así mismo se conocieron las actividades que realiza su personal.
- Recopilación de información de fuentes secundarias: se realizó la búsqueda de información, planes operativos anuales, informes y cualquier otro tipo de documento, los mismos fueron obtenidos de la biblioteca del instituto. El objetivo fue conocer más acerca de la institución, además de recolectar de información específica de la División de Información Geográfica.
- Recolección de información de fuentes primarias: Esta actividad tuvo como objetivo, la recolección de información a través de conversación y entrevistas con el personal de la División de Información Geográfica.
- Depuración de información recolectada de fuentes secundarias: Posterior a la recolección de la información primaria, se realizó un análisis y selección de la información útil para la elaboración del marco teórico.
- Formulación del FODA: Esta actividad tuvo como objetivo orientar e identificar la información necesaria para la realización del análisis FODA.

1.4.1.2 Fase de Campo

- Ejecución del FODA:
 - Análisis Externo:

A través de una boleta, la cual contenía un cuestionario, el cual fue contestado por el personal del Departamento de Mercadeo del Instituto Geográfico Nacional, permitió la identificación de la oferta de productos, la demanda de la población de estos productos y la identificación de nuevos productos que pueden ser ofrecidos.

- Análisis Interno:

A través de una dinámica de grupo, el personal identificó las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas, que consideran presentes en la división.

1.4.1.3 Fase Final de Gabinete

- Análisis de Información:
 - Análisis externo:

A partir de la información recolectada en la fase campo, se procedió a identificar las oportunidades y amenazas.

- Análisis Interno:

A partir de la información recolectada en la fase campo, se procedió a identificar las fortalezas y debilidades.

- Análisis y priorización de problemas:

Con toda la información obtenida de las anteriores fases, se identificaron y priorizaron los problemas.

Del análisis de esta información, se pudo conocer las sinergias que la división tiene con otras divisiones, así como la demanda de productos y nuevos productos.

1.4.2 Recursos

1.4.2.1 Recursos humanos

- Personal de la División de Información Geográfica
- Personal del Departamento de Mercadeo y Ventas.

1.4.2.2 Recursos Físicos

- Boleta de encuesta para diagnóstico interno.
- Boleta de encuesta para diagnóstico externo.
- Computadora

- Cámara digital
- Libreta de apuntes
- Bolígrafos
- Hoja de papel
- Libros
- Internet
- Documentos e informes
- Grabadoras de voz

1.4.2.3 Recursos Financieros

- Para la elaboración del diagnóstico no se proveen muchos gastos financieros y algunos insumos como hojas y copias, los cuales fueron proporcionados por el Instituto Geográfico Nacional.

1.5 RESULTADOS

Como se explica en la metodología, el análisis FODA de la división de información Geográfica se realizó por medio de un cuestionario, asistido a los colaboradores de dicha oficina. Esta actividad permitió obtener la lista de los cuatro aspectos a evaluar.

A continuación se presentan los resultados obtenidos del análisis FODA:

1.5.1 Fortalezas

- Personal capacitado en los trabajos que se realizan
- Apoyo de instituciones Internacionales
- Información generada con estándares internacionales
- Se cuenta con la información básica para generar investigación técnico científica
- Infraestructura e instalaciones básicas
- Generación de proyectos y convenios
- Personal con experiencia
- Institución con conocimiento de sistemas de información geográfica
- Personal con interés y compromiso por generación de nueva información y productos.

1.5.2 Debilidades

- La DIG no cuenta con investigaciones de ninguna índole, debido a la falta de fondos.
- Poco interés de las autoridades por capacitación del personal con el fin de mantenerse actualizados.
- Poca estabilidad laboral
- Recelo por la información generada entre divisiones
- Licencia para software GIS
- Malas condiciones del equipo de cómputo y oficina
- Poco personal asignado a la DIG

- Falta de equipo para actividades de campo
- Falta de comunicación con otras divisiones
- Actividades administrativas retrasan los procesos técnicos
- Viáticos insuficientes

1.5.3 Oportunidades

- Demanda de información geográfica por diversos usuarios
- Proyectos conjuntos internacionales
- Generación de información para prevención de riesgos
- Convenios internacionales para capacitaciones y becas
- Reconocimiento a nivel internacional
- Generación de información útil para otras instituciones
- Interés de los usuarios por nuevos productos
- Información básica para generar productos que demandan los usuarios

1.5.4 Amenazas

- Otras instituciones están realizando las actividades que le competen a IGN
- Duplicidad de Información
- Fuga de información
- Empresas privadas compitiendo en la generación de información cartográfica
- Fuga de talentos
- Falta de actualización en el uso de herramientas de sistemas de información geográfica
- Cambio y rotación de personal constante debido al cambio de gobierno.
- Poca generación de nuevos productos

Como parte de los resultados, se identificaron aspectos importantes a resaltar, por lo que se decidió realizar un listado separado de los resultados.

- Se determinó que uno de los principales problemas de la DIG, es el bajo presupuesto asignado, para generar nuevos productos e investigaciones de interés por los usuarios, por lo que se debe cubrir estas áreas con las herramientas que se cuentan, para realizar estimaciones que generen la información faltante.
- Se concluye que el uno de los malestares del personal, es la forma actual de contratación, por lo que genera inestabilidad laboral.
- Se determinó que actualmente el equipo de cómputo y oficina, no se le da mantenimiento, por lo que es una de las limitantes para el personal.
- Se concluye que uno de los requerimientos por el personal, es generar programas de capacitación y actualización en el uso de Software y herramientas GIS, para continuar con la vanguardia institucional de estas herramientas.
- Se concluye que uno de las fortalezas fuertes con las que cuenta la división, son los convenios y cooperación internacional e interinstitucional.
- Se concluye que se cuenta con personal calificado, para generación de los actuales productos y para realizar investigación.
- El bajo presupuesto asignado no permite generar nuevos y mejores productos, que los usuarios demandan, así mismo no se puede generar investigación, ya que el presupuesto asignado únicamente cubre viáticos para el personal.
- La DIG cuenta con personal calificado para el cumplimiento de sus actividades y la generación de nuevos productos.

1.6 CONCLUSIONES

- Por medio de análisis FODA se pudo conocer la opinión del personal sobre los procesos que se realizan en la División de Información Geografía. Estos resultados concluyeron que los procesos administrativos retrasan la ejecución de los proyectos e investigaciones.
- El análisis FODA permitió la Identificación de las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas de la División de Información Geográfica del Instituto, dentro de las cuales resaltan la capacidad de los técnicos para realizar distintos proyectos de investigación como una de las fortalezas, y una de las debilidades es el bajo presupuesto asignado para la ejecución de proyectos e investigaciones.
- Se determinó por medio del análisis FODA realizado al personal de Mercadeo y Ventas, la oferta de productos generan en la División de Información Geográfica así mismo se identificaron los productos que más demanda la población.

1.7 RECOMENDACIONES

Se debe solicitar por parte del Jefe de la DIG, ampliación del presupuesto para que se cumpla con:

- Contratación de personal
- Presupuesto para investigación
- Presupuesto para mejorar los actuales productos
- Presupuesto para capacitación y actualización de personal

Se debe solicitar por parte de las autoridades a nivel de Jefes de divisiones con la aprobación del Director y Subdirector que se cumpla lo siguiente:

- Mejorar la comunicación e integración Inter-Divisiones
- Evitar el recelo de información inter-divisiones
- Evitar que los trámites administrativos retrasen los procesos técnicos.
- Generar programas de capacitación y actualización permanente para el personal
- Delegar a personal encargado de trámites de convenios internacionales.
- Se debe revisar el reglamento de viáticos
- Incentivar al personal con la promoción de ascensos del personal de acuerdo a sus capacidades, experiencia y grado académico.
- Solicitar programas de promoción de los productos y servicios actuales y evaluar que nuevos productos demandan los usuarios.

Aprovechamiento de herramientas GIS gratuitas, para fortalecer los productos que se generan en la DIG.

Solicitar un mantenimiento periódico del equipo de cómputo dentro de la DIG.

Aprovechar la infraestructura básica y el conocimiento de personal para realizar convenios en los cuales se puedan obtener financiamientos y recursos para generar investigaciones.

1.8 BIBLIOGRAFÍA

1. GEOINSTITUTOS, ES. 2005. Quien fue Claudio Urrutia? (en línea). Madrid, ES. Consultado 10 abr 2013. Disponible en http://www.geoinstitutos.com/quien_fue/cl_urrutia.asp
2. IGN (Instituto Geográfico Nacional de Guatemala, GT). 2013. Instituto Geográfico Nacional “Alfredo Álvarez Obiols” homepage (en línea). Guatemala. Consultado 2 abr 2013. Disponible en www.ign.gob.gt/institucionacuten.html
3. MAGA (Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación, GT). 2011. Manual de organización y funciones, nueva estructura Instituto Geográfico Nacional “Ingeniero Alfredo Obiols Gómez” -IGN-. Guatemala. 70 p.
4. _____. 2012. Organigrama MAGA (en línea). Guatemala. Consultado 1 mar 2013. Disponible en <http://web.maga.gob.gt/rrhh/files/2014/07/Organigrama-recursos-1.png>
5. MINDEF (Ministerio de la Defensa Nacional, GT). 2009. Reseña histórica del servicio geográfico militar (en línea). Guatemala. Consultado 2 abr 2013. Disponible en <http://www.mindef.mil.gt/emdn/sgm/historia.html>
6. _____. 2011. Servicio geográfico militar: reseña histórica (en línea). Guatemala. Consultado 11 abr 2013. Disponible en <http://www.mindef.mil.gt/ftierra/emdn/sgm/historia.html>
7. MINFIN (Ministerio de Finanzas Públicas, GT). 1998. Reglamento de gastos de viáticos para el Organismo Ejecutivo y las entidades descentralizadas, acuerdo gubernativo no. 397-98. Guatemala. p. 3ONU, US. 1933. Reports of international arbitral awards: Honduras borders (en línea). Estados Unidos. Consultado 7 abr 2012. Disponible en http://untreaty.un.org/cod/riaa/cases/vol_II/1307-1366.pdf
8. Morales Maldonado, JE. 2011. Análisis histórico de las transformaciones experimentadas por las representaciones cartográficas en Guatemala: período 1529-2009. Tesis Ing. Agr. Quetzaltenango, Guatemala, USAC, CUNOC. 140 p
9. Wikipedia.org. 2013. Instituto Geográfico Nacional de Guatemala (en línea). España. Consultado 2 abr 2013. Disponible en http://es.wikipedia.org/wiki/Instituto_Geografico_Nacional_de_Guatemala

CAPÍTULO II

APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL (SWAT), PARA LA SIMULACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO ATULAPA, ESQUIPULAS, CHIQUIMULA, GUATEMALA.

APPLICATION OF THE HYDROLOGIC MODEL SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL (SWAT) IN MICRO-BASIN OF THE ATULAPA RIVER´S, ESQUIPULAS, CHIQUIMULA, GUATEMALA, C.A.

2.1. INTRODUCCIÓN

La importancia de las cuencas hidrográficas radica en que los recursos de aguas continentales, son un componente esencial y una parte imprescindible de todos los ecosistemas terrestres. De esta manera, la generación de información acerca de la cantidad de agua disponible, resulta fundamental para la elaboración de un plan de abastecimiento del recurso hídrico, entre otros fines.

Pero para una óptima planificación, gestión y desarrollo de los recursos hídricos de una cuenca, es indispensable conocer la oferta o disponibilidad de los mismos, tanto en calidad como en cantidad.

Sin embargo y al igual que muchos países de Latinoamérica, Guatemala no cuenta con infraestructura hidrométrica para la medición de caudales en todas las cuencas, contándose con este tipo de infraestructura, en cuencas de mayor impacto.

Cuando se desean desarrollar planes de abastecimiento, es necesario contar con mediciones de caudales que reflejan la cantidad de agua disponible; cuando no se cuenta con ese tipo de mediciones, la opción mayormente utilizada en las últimas décadas, ha sido la simulación hidrológica.

Es dentro de este contexto, que se planteó llevar a cabo una investigación cuyo objetivo fue la aplicación del modelo *Soil and Water Assessment Tool (SWAT)*, para la simulación del balance hídrico en la Microcuenca Atulapa, y a modo de alternativa para evaluar la

cantidad de agua disponible, en aquellas cuencas hidrográficas que no cuentan con suficiente infraestructura de medición de caudales, entre otras variables.

El uso de sistemas de información geográficos asociados con los modelos hidrológicos, contribuye al desarrollo de la tarea del investigador, en tanto que facilita la capacidad de reproducir los componentes que actúan en el ciclo hidrológico con la ayuda de un ordenador. Dentro de ellos, el SWAT es uno de los modelos paramétricos más utilizados: la mayor parte de usuarios de modelos hidrológicos tiende a utilizarlo, debido a la continua revisión y expansión del mismo, en referencia tanto a su uso generalizado como en la cantidad y precisión de procesos hidrológicos simulados.

El SWAT es la continuación de cerca de treinta años de esfuerzos de simulación llevada a cabo por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, en conjunto con la Universidad de Texas. La aplicación de los modelos hidrológicos, incluyendo el SWAT para la simulación del escurrimiento superficial, ha encontrado barreras en países menos desarrollados, tales como la escasez en la provisión de datos y la falta de confianza respecto a la implementación de los mismos.

En consecuencia, y como se mencionó anteriormente, en la presente investigación se aplicó este modelo a la microcuenca del Río Atulapa. Parte de los resultados fueron comparados con caudales observados para el período enero-diciembre 2012, arrojando información satisfactoria a escala mensual (R^2 : 0,86; R^2 ENS: 0,6) pero poco deseable en las escalas diarias (R^2 : 0,12; R^2 ENS: 0,41), en una situación donde no hubo calibración ni se mejoró ningún parámetro (sólo valores por defecto de la interfaz ARCSWAT).

Los caudales simulados conservan la tendencia de los datos observados, evidenciándose un desplazamiento aproximadamente constante en el eje vertical más evidente en la época de invierno, que se debe al poco número de estaciones meteorológicas cercanas a la microcuenca en estudio.

En consideraciones generales, la aplicación del modelo SWAT en esta microcuenca ha sido de indiscutible eficacia; en consecuencia de ello, sería conducente la inclusión del mismo en las posteriores labores investigativas, que al respecto se desarrollen.

2.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Instituto Geográfico Nacional (IGN) de Guatemala es quien tiene a su cargo la realización de los estudios de cuencas hidrográficas, orientados a proveer información sobre los recursos naturales y a elaborar mapas de riesgo a desastres naturales, específicamente relativos a inundaciones, a fin de contribuir a la implementación de proyectos de desarrollo sostenible y de preservación del recurso agua.

A partir de estos estudios se generan mapas temáticos: usos del suelo, pendientes, geológicos, hipsométricos, hidrográficos, infraestructura, climatológicos, etc. Sin embargo, para la ejecución de los mismos, los profesionales de la división de información geográfica, del Instituto Geográfico Nacional, encuentran frecuentes limitaciones, a saber: escaso presupuesto asignado, e insuficiente infraestructura hidrométrica para la medición de caudales y otras variables. Esta situación obstaculiza las correcciones en campo y la recolección de información, por lo que ininidad de veces los investigadores ven reducida la posibilidad de cumplir con las metas propuestas.

Los estudios de cuencas hidrográficas realizados por el Instituto Geográfico Nacional, tienen por fin generar información que permita a las instituciones públicas, establecer estrategias apropiadas y eficaces para el manejo sustentable del recurso hídrico, para lo cual se requiere de información biofísica, climática e hidrológica. En consecuencia se determinó que los estudios de cuencas hidrográficas, realizados en el Instituto Geográfico Nacional, presentan una escasa información del recurso hídrico.

2.3. JUSTIFICACIÓN

Los proyectos de desarrollo sostenible y preservación del recurso agua, así como los mapas de riesgo a desastres naturales, encuentran su soporte fáctico en los estudios de cuencas hidrográficas, mediante los cuales se genera información respecto a multiplicidad de variables y a diferentes escalas.

La importancia de estos estudios realizados por el Instituto Geográfico Nacional, radica en la constitución de una base de datos que fundamente la toma de decisiones en las diversas instituciones y/o entidades, y cuyo acceso sea regulado ante la solicitud de usuarios que demanden esta información. Es que “la formulación de políticas públicas requiere de una sólida estructura de información confiable y oportuna que permita orientar adecuadamente las acciones estratégicas del país” (IARNA, 2008).

A través de estos estudios, se ha generado información temática sobre uso del suelo, topografía, geología, hidrográfica, infraestructura y clima. Pero los mismos encuentran limitaciones debido al escaso presupuesto asignado al Instituto Geográfico Nacional para su desarrollo, partida que imposibilita la obtención de otras variables tales como estudios taxonómicos de suelos y estudios hidrométricos, que puedan otorgarle un valor agregado a los productos que oferta esta institución.

Es dentro de este contexto, entonces, donde se plantea desarrollar una investigación respecto a la posibilidad de aplicación del modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), como alternativa para la generación de datos que permitan la simulación del balance hídrico en la Microcuenca Atulapa, y que contribuyan a evaluar la disponibilidad

del agua en cuencas hidrográficas, cuya infraestructura de medición de caudales –entre otras variables- sea insuficiente.

Soil and Water Assessment Tool (SWAT), es un programa de modelamiento hidrológico, diseñado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, en conjunto con la Universidad de Texas, que permite simular la producción de agua y sedimentos en cuencas hidrográficas.

En cuanto a las razones de su aplicación, este modelo ha sido seleccionado por los expertos, debido a la facilidad de operación, a su ínfimo costo de funcionamiento y a la confiabilidad de los resultados que arroja (Torres Benites, Fernández Reynoso, Oropeza Mota, Mejía Saenz, 2004).

Se espera entonces que con esta investigación, puedan fortalecerse los estudios sobre cuencas hidrográficas realizadas por el Instituto Geográfico Nacional, y por ende contribuir a establecer estrategias apropiadas y eficaces, para el manejo sustentable del recurso hídrico.

2.4. MARCO TEÓRICO

2.4.1. MARCO CONCEPTUAL

2.4.1.1. Cuenca

Cuando se habla de cuenca, se está haciendo referencia a la unidad del territorio, diferenciada de otras unidades, normalmente delimitada por un parte aguas o líneas divisorias de las aguas, que aporta sus aguas de escorrentías a un mismo punto de desagüe o punto de cierre.

Según Aparicio en 1992, una cuenca es una zona de superficie terrestre en donde las gotas de lluvia que caen sobre ellas, tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida.

Según el Manual de manejo de cuencas (2004) “es el espacio de territorio delimitado por la línea divisoria de las aguas, conformado por un sistema hídrico que conduce sus aguas a un río principal, a un río más grande, a un lago o a un mar”.

2.4.1.2. La cuenca hidrográfica como sistema

Para comprender por qué la cuenca hidrográfica es un sistema, es necesario explicar que:

- a) En la cuenca hidrográfica existen entradas y salidas.
- b) En la cuenca hidrográfica se producen interacciones entre sus elementos.
- c) En la cuenca hidrográfica existen interrelaciones. (WorldVision, 2004)

El sistema de la cuenca hidrográfica está integrado, a su vez, por los siguientes subsistemas:

- a) Biológico, que integran esencialmente la flora y la fauna, y los elementos cultivados por el hombre.
- b) Físico, integrado por el suelo, subsuelo, geología, recursos hídricos y clima (temperatura, radiación y evaporación, entre otros).
- c) Económico, integrado por todas las actividades productivas que realiza el hombre, en agricultura, recursos naturales, ganadería, industria, servicios (camino, carreteras, energía, asentamientos y ciudades).
- d) Social, integrado por los elementos demográficos, institucionales, tenencia de la tierra, salud, educación, vivienda, culturales, organizacionales, políticos, y legal. (WorldVision, 2004).

2.4.1.3. Partes de una cuenca

Se puede decir que una cuenca hidrográfica está compuesta por determinadas partes, según el criterio que se utilice, a saber:

- a) Criterio 1 Altitud: Si el criterio utilizado es la altura, se podrían distinguir la parte alta, media y baja, sucesivamente, en función de los rangos de altura que tenga la cuenca. Si la diferencia de altura es significativa y varía de 0 a 2,500 msnm., es factible diferenciar las tres partes; si esta diferencia es menor, por ejemplo de 0 a 1000 msnm., posiblemente sólo se distingan dos partes; y si la cuenca es casi plana, será menos probable establecer partes. Generalmente, este criterio de la altura se relaciona con el clima, y puede ser una forma de establecer las partes de una cuenca.
- b) Criterio 2 Topografía: Otro criterio muy similar al anterior, es la relación con el relieve y la forma del terreno. Las partes accidentadas forman las montañas y

laderas; las partes onduladas y planas, forman los valles. Y, finalmente, otra parte es la zona por donde discurre el río principal y sus afluentes; a ésta se le denomina cauce (WorldVision, 2004).

2.4.1.4. Cuenca hidrográfica y cuenca hidrológica

Según el concepto de ciclo hidrológico, toda gota de lluvia que cae al suelo continúa en forma de escurrimiento e infiltración, luego va a lugares de concentración; allí, parte se evapora y vuelve al espacio para formar el ciclo. Luego que la gota de lluvia se infiltra, satura el suelo, pasa a percolación profunda y recarga los acuíferos. En este desplazamiento vertical, el agua se puede encontrar con estratos impermeables (rocas duras), que movilizarán las partículas dependiendo de la forma y tipo de rasgos geológico (WorldVision, 2004).

Cuando el relieve y fisiografía tienen una forma y simetría diferente a la configuración geológica de la cuenca, se puede decir que existe una cuenca subterránea, que cambia la dirección del flujo subsuperficial para alimentar a otra cuenca hidrográfica. A ésta configuración se la denomina cuenca hidrológica, la cual adquirirá importancia cuando se tenga que realizar el balance hidrológico. (WorldVision, 2004).

2.4.1.5. Delimitación de una cuenca

La cuenca hidrográfica puede dividirse en espacios definidos, por la relación entre el drenaje superficial y la importancia que tiene con el curso principal. El trazo de la red hídrica es fundamental, para delimitar los espacios en que se puede dividir la cuenca. A un curso principal llega un afluente secundario, el cual comprende una subcuenca. Luego, al curso principal de una subcuenca, llega un afluente terciario, que comprende una microcuenca; además, se encuentran las quebradas, que son cauces menores (Visión Mundial, 2004).

El primer paso que se considera para realizar los estudios de unidades hidrográficas, comprende la ubicación y delimitación de la cuenca objeto de análisis. Así, esta etapa consiste en realizar el trazado de la línea imaginaria que la delimita, comúnmente conocida como parteaguas. Esta línea imaginaria está formada por los puntos de mayor nivel topográfico, y separa la cuenca de interés de las cuencas vecinas.

2.4.1.6. El ciclo hidrológico y balance hídrico

A. El ciclo hidrológico

En resumen, el ciclo hidrológico está conformado por la siguiente cadena de eventos: la evaporación de los cuerpos de agua, tanto en la superficie como en los océanos; ésta es transportada en forma de vapor hacia la atmósfera, y precipita en forma de lluvia o nieve; es interceptada por la cobertura vegetal, escurre superficialmente, se infiltra a través del suelo; continúa su recorrido hacia los acuíferos o tributa a corrientes y ríos; finalmente desemboca en los océanos, lagos u otros ríos más grandes, desde donde nuevamente se evapora y se reinicia el ciclo. Este inmenso motor -que da movimiento al agua y utiliza como combustible la energía solar- es favorecido por la fuerza de gravedad, y continúa interminablemente sin importar la presencia o ausencia de la actividad humana (Te Chow, MaidmenT & Larry, 1994).



Figura 11: Diagrama del Ciclo del Agua, ilustración de John M. Evans, USGS.

B. Balance hídrico

El estudio del balance hídrico se basa en la aplicación del principio de conservación de masas, también conocido como ecuación de la continuidad. La misma establece que, para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier período de tiempo, la diferencia entre las entradas y salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada (Sokolov & Chapman, 1981).

En el balance hídrico de cuencas hidrográficas, las entradas son generalmente por precipitación, y las salidas por evapotranspiración, infiltración a fuentes subterráneas, demandas de usuarios y exportaciones de agua. Esta diferencia de entradas y salidas, proporciona información básica para la planificación del recurso agua; y generalmente se

realiza para conocer sobre la oferta de agua superficial en cuencas, a fin de incrementar el aprovechamiento de este recurso, sin utilizar más agua de la que pueda renovarse (Arrueta, 2009).

C. Ecuación del balance hídrico

La ecuación del balance hídrico, para cualquier zona o cuenca natural, indica los valores relativos de entrada y salida de flujo y la variación del volumen de agua almacenada en la zona o masa de agua. Las entradas de agua a la cuenca hidrográfica comprenden las precipitaciones (P), en forma de lluvia o nieve recibida en la superficie del suelo, y las aguas superficiales (QSI) y subterráneas (QUI) recibidas dentro de la cuenca o masa de agua desde fuera. Las salidas en la ecuación incluyen la evaporación desde la superficie de la masa de agua (E) y la salida de corrientes de agua superficial (QSO) y subterránea (QUO), desde la cuenca o masa de agua considerada. Cuando las entradas superan a las salidas, el volumen de agua almacenada (ΔS) aumenta y cuando ocurre lo contrario, disminuye. Todos los componentes del balance hídrico están sujetos a errores de medida o estimación, y la ecuación del balance deberá incluir, por tanto, un término residual o de diferencia (V). (Sokolov & Chapman, 1981). Por tanto, el balance hídrico para cualquier masa de agua y cualquier intervalo de tiempo, en su forma más general estará representado por la siguiente ecuación:

$$P + Q_{SI} + Q_{UI} - E - Q_{SO} - Q_{UO} - \Delta S - V = 0$$

2.4.1.7. Componentes del ciclo hidrológico y balance hídrico

A. Precipitación

En una acepción genérica, el término precipitación se refiere a todas las formas de humedad emanada de la atmósfera y depositada en la superficie terrestre, tales como lluvia, granizo, rocío, neblina, nieve o helada. Adicionalmente, la precipitación se considera la fase del ciclo hidrológico que da origen a todas las corrientes superficiales y

subterráneas, por lo cual su evaluación y el conocimiento de su distribución -tanto en el tiempo como en el espacio- son problemas básicos en hidrología. (Arrueta, 2009).

B. Evapotranspiración

La evapotranspiración es el término que engloba en una variable única, la evaporación y la transpiración de los seres vivos. La evaporación es el fenómeno físico en el que el agua transita de estado líquido a vapor, incluyendo también de sólido a vapor. La transpiración es el fenómeno biológico, por el cual los seres vivos pierden agua a la atmósfera. Este fenómeno es relevante en hidrología, por su importancia en el entendimiento de pérdidas de agua, en las corrientes, canales y embalses (Arrueta, 2009).

C. Infiltración

La infiltración es el proceso por el cual el agua penetra en el suelo a través de la superficie de la tierra, y queda retenida por ella o alcanza un nivel acuífero incrementando el volumen acumulado anteriormente. Superada por la capacidad de campo del suelo, el agua desciende por la acción conjunta de las fuerzas capilares y de la gravedad (Arrueta, 2009).

D. Escorrentía

La escorrentía es aquel término de la hidrología que hace referencia a la lámina de agua que circula sobre la superficie en una cuenca de drenaje, es decir, la altura en milímetros del agua de lluvia escurrida y extendida. Normalmente, se considera como la precipitación menos la evapotranspiración real y la infiltración del sistema suelo (Arrueta, 2009).

E. Circulación subterránea

La circulación subterránea se produce a favor de la gravedad, al igual que la escorrentía superficial, de la que se puede considerar una versión.

2.4.1.8. Modelos hidrológicos

A. Qué son los modelos hidrológicos

Los modelos hidrológicos son representaciones simplificadas de los sistemas hidrológicos reales, a partir de los cuales se estudia la relación causa-efecto de una cuenca, a través de datos de entrada y salida, que permiten la simulación del ciclo hidrológico de una cuenca (Sanchez, 2010).

López (2009) define a los modelos hidrológicos como una representación simplificada de un sistema real complejo, bajo forma física o matemática. De tal manera, un modelo matemático contribuye a la toma de decisiones en materia de hidrología, por lo que es necesario tener conocimiento de entradas y salidas del sistema.

En otras palabras, un modelo hidrológico es una simplificación de la realidad, a partir del cual puede estudiarse la relación causa-efecto de una cuenca a través de los datos de entrada y salida, con los cuales se logra un mejor entendimiento de los procesos físicos hidrológicos que tienen lugar dentro de la cuenca (Te Chow, MaidmenT & Larry, 1994).

B. Objetivos de un modelo hidrológico

Sánchez (2010), destaca que en términos generales, el objetivo principal de los modelos hidrológicos, consiste en determinar con eficiencia y precisión los componentes del ciclo hidrológico en una cuenca, a fin de estimar el comportamiento y la magnitud del agua.

C. Clasificación de modelos de cuenca

Los modelos de cuenca pueden ser agrupados en dos categorías generales:

- Material;
- Formal.

i. Modelo material

Un modelo material es una representación física del prototipo, más simple en estructura, pero con propiedades que reúne las del prototipo. Los ejemplos de modelos de cuencas materiales, son los simuladores de lluvia y las cuencas experimentales (Ponce, 2005).

ii. Modelos matemáticos o formales

Los modelos matemáticos o formales son representaciones simplificadas de los sistemas hidrológicos reales, a partir de los cuales se estudia la relación causa-efecto de una cuenca, a través de datos de entrada y salida, que permiten la simulación del ciclo hidrológico de una cuenca (Ponce, 2005).

Los modelos matemáticos que se utilizan con la ayuda de un ordenador se denominan modelos computacionales. Muchos modelos computacionales de cuenca han sido desarrollados a lo largo de las últimas tres décadas.

En cuanto a la utilización práctica de ambos modelos, los materiales se caracterizan por su excesivo costo y su limitada aplicabilidad. Por el contrario, los modelos formales son de fácil acceso, altamente flexibles y en comparación con los primeros, de económica operatividad. (Ponce, 2005)

D. Clasificación de los modelos matemáticos o formales

Un modelo matemático puede ser de tres tipos:

- A. teórico;
- B. conceptual;
- C. empírico.

En suma, un modelo matemático puede ser: determinístico o probabilístico, lineal o no lineal, invariable o variable en el tiempo, global o distribuido, continuo o discreto, analítico o numérico, evento guiado o proceso continuo.

En la práctica del modelado de cuenca, comúnmente se reconocen cinco tipos generales de modelos matemáticos:

- A. determinísticos;
- B. probabilísticos;
- C. conceptuales;
- D. paramétricos;
- E. sistemáticos.

i. Modelos determinísticos

Sánchez (2010) describe los modelos determinísticos, como aquéllos que tienden a establecer relaciones cuantitativas de causa-efecto entre las entradas y salidas, utilizando una relación directa para obtener una respuesta debida a un requerimiento, sea por medio de una ecuación empírica, o mediante el uso de los métodos de regresión simple.

Un modelo determinístico no considera aleatoriedad; una entrada produce siempre una misma salida. Por ejemplo, pueden desarrollarse modelos determinísticos razonablemente eficientes, para la evaporación diaria en un lugar dado, utilizando información sobre energía disponible y transporte de vapor (Te Chow, Maidment & Larry, 1994).

Este tipo de modelo se utiliza cuando la disponibilidad de información es escasa; caso frecuente es el de las obras de ingeniería rural e hidráulica, en los cuales se tiende a reconstruir indirectamente la evolución de los escurrimientos y flujos superficiales a partir del conocimiento de los eventos de lluvia diaria, de los cuales se dispone a menudo de grandes series de datos (Sánchez, 2010)

ii. Modelos probabilísticos

Un modelo probabilístico se formula siguiendo las leyes del azar o la probabilidad. Los modelos probabilísticos son de dos tipos:

- a) Estadísticos;
- b) Estocásticos.

iii. Modelos conceptuales

Los modelos conceptuales son representaciones simplificadas de los procesos físicos. Usualmente recaen sobre descripciones matemáticas, ya sean en forma algebraica o por ecuaciones diferenciales ordinarias, que simulan procesos complejos basándose en unas pocas claves de parámetros conceptuales (Ponce. 2005).

iv. Modelos paramétricos

Los modelos paramétricos (esto es: empírico, o caja negra) son los más simples de todas las propuestas de modelado. Tal como su nombre lo indica, el énfasis de estos modelos, se encuentra en los parámetros empíricos en los que está basada la solución. Usualmente, un modelo paramétrico consiste en una ecuación (o ecuaciones) algebraica, que contiene uno o más parámetros a ser determinados, por el análisis de datos u otro medio empírico (Ponce, 2005)

v. Modelos de sistemas

Los modelos de sistemas consisten en seleccionar un número de alternativas posibles, a partir de un conjunto particular de acciones y posibilidades, para alcanzar ciertos objetivos, bajo condiciones y restricciones legales, éticas, económicas, políticas, sociales y hasta ambientales. Los tres componentes de estos modelos son: la teoría de la decisión, el análisis de sistemas y la investigación operacional (Ponce, 2005).

2.4.1.9. Información climatológica requerida por el modelo SWAT

Conforman el conjunto de las observaciones de temperatura, precipitación, evaporación, etc., obtenidas durante años en una estación meteorológica, formando una serie de datos, por lo que es indispensable resumir y coordinar esta similitud de cifras, con algunos elementos lo más pequeño posibles, pero sin embargo, suficiente para caracterizar la estación.

A. Temperatura media diaria

Se refiere a la temperatura media presentada durante el transcurso de un día en específico.

B. Precipitación media diaria

Se refiere a la cantidad total de lluvia precipitada en un periodo de 24 horas.

2.4.1.10. Modelo Hidrológico SWAT

Los conceptos de ArcSwat que a continuación se describen son descritos en el manual de ArcSwat (Uribe, 2010)

2.4.2. Componentes del modelo SWAT

Los componentes del modelo se agrupan en ocho divisiones: hidrología, clima, sedimentación, temperatura del suelo, crecimiento de cultivos, nutrientes, pesticidas y manejo de cultivos.

A. Hidrología

Escurrimiento superficial

El modelo simula escurrimientos superficiales y los gastos máximos, que se producen por la lluvia diaria. El volumen de escurrimiento se estima con la técnica modificada de las curvas numéricas, propuesta por el Servicio de Conservación del Suelo. El uso de datos de precipitación diaria es particularmente importante, para la técnica de la curva numérica debido a que en muchas localidades, los datos de precipitación con incrementos de tiempo de menos de un día no existen (Uribe, 2010).

Percolación

El componente de percolación del SWAT, usa una técnica de almacenamiento que predice el flujo a través de cada capa de suelo en la zona de raíces. El flujo hacia abajo

ocurre cuando se excede la capacidad de campo (CC), de una capa de suelo y si la capa inferior no está saturada. La tasa de flujo hacia abajo está gobernada por la conductividad a saturación en la capa del suelo. El flujo hacia arriba puede ocurrir cuando una capa inferior excede la CC. El movimiento de agua de una capa inferior hacia una capa inferior adyacente, se regula por el coeficiente de agua del suelo a CC de las dos capas (Uribe, 2010).

Flujo lateral subsuperficial

El flujo lateral subsuperficial en el perfil del suelo (0-2m), se calcula simultáneamente con la percolación. Se usa un modelo cinemática de almacenamiento, para predecir el flujo lateral en cada capa de suelo. El modelo considera la variación en la conductividad, la pendiente y el contenido de agua en el suelo (Uribe, 2010).

Flujo de agua subterráneo

La contribución del flujo subterráneo al flujo total, se simula creando un acuífero de almacenamiento poco profundo, la percolación a partir de la parte baja de la zona de raíces, es una recarga para ese acuífero delgado. Una constante de recesión derivada a partir de datos diarios de flujo, se usa para retardar el flujo del acuífero a la corriente de agua. Otros componentes incluyen evaporación, bombeo, filtraciones hacia la profundidad del acuífero (Uribe, 2010).

B. Evapotranspiración

El modelo ofrece tres opciones para su estimación Hargreaves (Hargreaves and Samani, 1985), Priestley Taylor (Priestley and Taylor, 1972), and Penman-Monteinth (Monteinth, 1965). La evapotranspiración potencial del agua en el suelo se estima como función de la evapotranspiración y el índice de área foliar (el área de las hojas de una planta en relación

al área del suelo $\frac{m^2}{m^2}$). La evapotranspiración del suelo real se estima usando ecuaciones exponenciales de la profundidad del suelo. La evapotranspiración del agua en la planta, se simula como una función lineal de la evapotranspiración potencial y el índice de área foliar (Uribe, 2010).

C. Pérdidas por transmisión

Las pérdidas por transmisión reducen los volúmenes de escurrimiento a medida que el agua viaja corriente abajo. El modelo SWAT utiliza el modelo de Lane, para estimar las pérdidas por transmisión. Las pérdidas en los canales son función del ancho del canal, de la longitud y duración del flujo, tanto del volumen de escurrimiento y la tasa pico se ajusta, cuando ocurren pérdidas por transmisión (Uribe, 2010).

D. Cuerpos de agua

Los cuerpos de agua son pequeñas estructuras que se presentan dentro de una subcuenca. El almacenamiento en los cuerpos de agua, se simula en función de la capacidad del cuerpo de agua, entradas y salidas diarias de agua, transmisión y evaporación (Uribe, 2010).

E. Clima

Las variables climáticas necesarias para correr el modelo SWAT son: precipitación, temperatura del aire, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Si la precipitación diaria y las temperaturas máximas y mínimas no están disponibles, el generador climático puede simular las temperaturas y la lluvia diarias. La radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa son siempre simuladas. Un conjunto de variables

climáticas pueden ser simuladas para toda la cuenca o diferente clima puede ser también simulado para cada subcuenca (Uribe, 2010).

Precipitación

El modelo de precipitación del SWAT desarrollado por Nicks (1974), es un modelo de cadena de Markov de primer orden, por lo tanto las entradas al modelo deben incluir las probabilidades mensuales de recibir precipitación si el día anterior fue seco o húmedo. Dada la relación húmedo-seco, el modelo determina estocásticamente si ocurre o no precipitación (Uribe, 2010).

Temperatura del aire y radiación solar

La temperatura de aire máxima y mínima, así como la radiación solar se genera a partir de una distribución normal corregida por las probabilidades húmedo-seco. El factor de corrección se usa para dar mayor desviación a la temperatura y radiación cuando el clima cambia y para días lluviosos. De esta manera las desviaciones son menores en días secos. Los factores de corrección se calculan, para asegurar que las desviaciones estándar a largo plazo de variables diarias se mantengan (Uribe, 2010).

Velocidad del viento y humedad relativa

La velocidad del viento diaria se simula usando una ecuación especial, ya que la velocidad mensual media del viento es un factor de entrada. El modelo de humedad relativa simula promedios diarios a partir de promedios mensuales, esto lo hace utilizando una distribución triangular igual que con la temperatura y la radiación, la humedad relativa media diaria se ajusta para tomar en cuenta los efectos de días húmedos y secos (Uribe, 2010).

F. Sedimentación

Producción de sedimentos La producción de sedimentos se estima para cada subcuenca con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada. El modelo hidrológico provee la estimación del volumen de escurrimiento y la tasa de escurrimiento pico. El factor de manejo de los cultivos se evalúa como la biomasa aérea, el residuo de cosecha en la superficie y el valor mínimo del factor C para el cultivo (Uribe, 2010).

G. Modelo de crecimiento del cultivo

Un solo cultivo se usa para simular todos los cultivos. La intercepción de la energía se estima en función de la radiación y el índice de área foliar del cultivo. El incremento potencial en la biomasa para un día dado se estima como el producto de la energía interceptada y un parámetro de cultivo para convertir energía a biomasa. El índice de área foliar se simula con ecuaciones que dependen de las unidades calor; el rendimiento de cultivos se estima usando el concepto de índice de cosecha. El índice de cosecha se incrementa como una función no lineal de las unidades calor a partir de cero a la fecha de siembra hasta un valor óptimo de madurez. El índice de cosecha puede ser reducido por el estrés por agua, durante períodos críticos del cultivo (generalmente 30 y 90% de la madurez) (Uribe, 2010).

H. Nutrientes

Nitrógeno

Cantidades de $\text{NO}^3\text{-N}$ contenidos en el escurrimiento lateral y la percolación se estiman, como productos del volumen de agua y la concentración promedio de los nutrimentos. La lixiviación y el flujo lateral subsuperficial en las capas bajas, son tratadas con la misma estrategia que se usa en las capas superiores, excepto que el escurrimiento superficial no se considera una función de concentración para aplicarla a eventos individuales de

escurrimiento, se usa para estimar pérdidas de nitrógeno orgánico. La función de concentración estima la pérdida de N orgánico diaria en el escurrimiento, basada en la concentración de nitrógeno orgánico en la capa más superficial del suelo. La producción de sedimentos y el coeficiente de crecimiento, también el uso de nitrógeno por el cultivo, se estiman usando un modelo de suministro y demanda (Uribe, 2010).

Fósforo

La estrategia del SWAT para estimar la pérdida del fósforo soluble en el escurrimiento superficial, se basa en el concepto de repartir los pesticidas en las fases de solución y sedimentación; debido a que el fósforo está más asociado con la fase de sedimentos. El fósforo soluble en el escurrimiento, se predice usando las concentraciones de fósforo lábil en la capa superior del suelo, el volumen de escurrimiento y un factor de repartición. El transporte de fósforo en sedimentos se simula como una función de concentración. El uso del fósforo por el cultivo se estima también con la estrategia de suministro y demanda (Uribe, 2010).

I. Componentes de transporte

Transporte de agua en los cauces

El transporte en cauces usa el método de coeficiente variable de almacenamiento, los parámetros del cauce incluyen: largo, pendiente, ancho y profundidad del banco, inclinación de taludes, pendiente del piso y rugosidad del cauce. El gasto y la velocidad media se calculan usando la ecuación de Manning y el tiempo de transporte se calcula dividiendo la longitud del canal por la velocidad. El flujo de salida del cauce se ajusta de acuerdo a las pérdidas de transmisión, evaporación, desviaciones y el flujo de retorno (Uribe, 2010).

Transporte de sedimentos en cauces

El modelo de transporte de sedimentos consiste de dos componentes que operan simultáneamente: depositación y degradación. El componente de depositación se basa en la velocidad de caída y el de degradación en el concepto del poder de la corriente. La depositación en el piso del cauce de la subcuenca, hacia la salida se basa en la velocidad de caída de las partículas de sedimentos (Uribe, 2010).

2.4.2. MARCO REFERENCIAL

2.4.2.1. Ubicación Geográfica de la Cuenca

La Microcuenca del río Atulapa posee un área de 42.33 km², está situada en la área suroriental del departamento de Chiquimula quedando incluida en su totalidad en el Municipio de Esquipulas, del departamento de Chiquimula. El mismo se encuentra en el área del Trifinio, de las líneas divisorias entre las Repúblicas de El Salvador, Honduras y Guatemala, a una altitud que oscila entre los 904 metros SNM y 2,241 metros en las montañas más altas

La Microcuenca del río Atulapa forma parte de la subcuenca del río Olopa, que a su vez corresponde a la cuenca del río Lempa, esta se localiza en las hojas cartográficas correspondientes a Esquipulas (2359 IV) y Cerro Montecristo (2359 III); se ubica entre las coordenadas geográficas:

- Latitud Norte 14°34'12" y 14°28'48"
- Longitud Oeste 89°17'24" y 89°23'24"

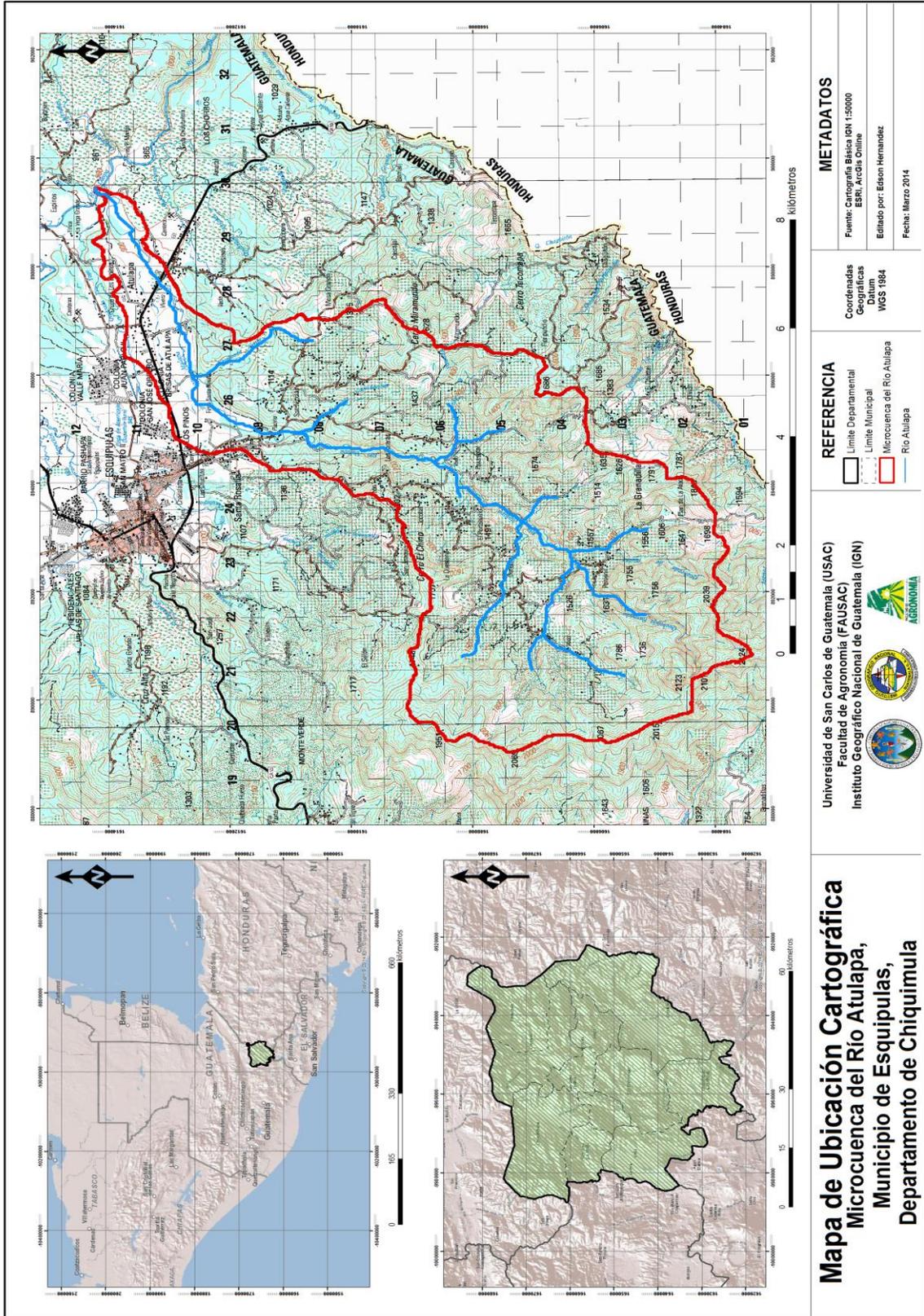


Figura 12: Ubicación de la cuencas sobre las hojas Cartográficas IGN 2010.

2.4.2.2. Límites de la Microcuenca del río Atulapa

La Microcuenca del río Atulapa colinda al Norte con la microcuenca del río Olopa, al Este con la Microcuenca del río Tecomapa, al Sur con terrenos del municipio de Concepción Las Minas y al Oeste con la Microcuenca del Río Zepoctum.

Como se mencionó anteriormente la Microcuenca del río Atulapa tiene una superficie aproximada de 42.33 Km² y un perímetro aproximado de 38.65 Km. Los principales cursos de agua superficial que conforman el río Atulapa son:

- Quebrada Raspada con una superficie de 3.2 Km² y un perímetro de 8.35 Km., aproximadamente.
- Quebrada de Piedra con una superficie de 3.7 Km² y un perímetro de 8.60 Km. aproximadamente.
- Quebrada Paxashtal con una superficie de 4.05 Km² y un perímetro de 9.27 Km, aproximadamente.
- Quebrada Liquidámbar con una superficie de 1.93 km² y un perímetro de 6.77 Km, aproximadamente.
- Quebrada Jimilil con una superficie de 2.7 Km² y un perímetro de 10.22 km, aproximadamente.

2.4.2.3. Ubicación política administrativa

El municipio de Esquipulas colinda al norte con los Municipios de Olopa, Jocotán y Camotán, del departamento de Chiquimula. Al Sur con municipio de Metapán, El Salvador, Al oriente con los departamentos de Copan y Ocotepeque, Honduras y al poniente con el municipio de Concepción las Minas y parte de Quezaltepeque, del departamento de Chiquimula, Guatemala.

De acuerdo a la división administrativa del país, la Microcuenca del río Atulapa se encuentra ubicada en la región III del país (Fong, 2010).

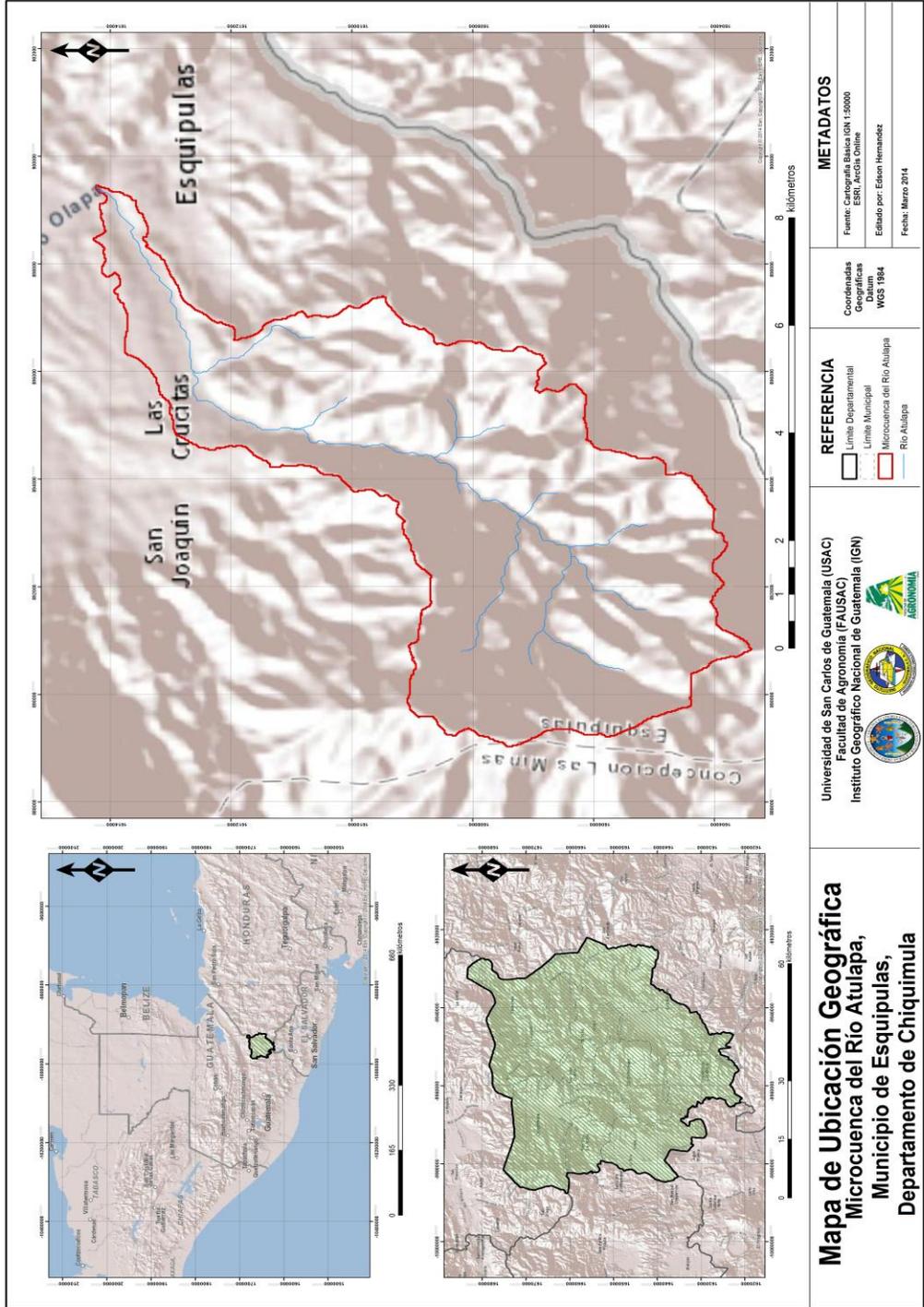


Figura 13: Mapa de Ubicación de la Microcuenca.

2.4.2.4. Características socioeconómicas

A. Población

Según datos del censo 2002, realizado por el Instituto Nacional de Estadística (INE), dentro de la cuenca se localizan 28 centros poblados (5 aldeas y 23 caseríos). (INE, 2002)

La población que se encuentra dentro de la Microcuenca del río Atulapa, es de 6,941 habitantes en una extensión de 42.33 Km². Con base en lo anterior, se cuenta con una densidad poblacional de 164 habitantes por kilómetro cuadrado, siendo este un dato elevado. (Fong, 2010)

B. Tenencia de la Tierra

En el caso del área urbana, la tenencia de tierra se encuentra representada de la siguiente forma: propia, prestada y arrendada.

C. Actividades productivas

Dentro de las actividades productivas que se realizan dentro de la microcuenca se pueden mencionar: agricultura, sector pecuario, sector forestal, industria, artesanía, turismo, ecoturismo entre otras.

D. Servicios Públicos

i. Salud

Para el servicio de salud hasta el momento solo se cuenta con un Centro de Salud en la ciudad de Esquipulas. En caso de enfermedad grave, el hospital más próximo se encuentra en la cabecera departamental, a unos 56 km de distancia. (Fong, 2010)

ii. Servicio de Agua Potable

El servicio de agua potable llega de forma aceptable hasta un 71% de las aldeas y un 32% de los caseríos. La ciudad de Esquipulas cuenta con 5 captaciones de agua, siendo la captación situada en la Microcuenca del Atulapa la que mayor cantidad de agua aporta con un 67%. (Fong, 2010)

iii. Vías de comunicación y transporte

La red vial del municipio cuenta con una carretera asfaltada, que por ser la que comunica con la ciudad capital del país es la principal, con una extensión de 222 km. En la actualidad cuentan con una amplia red de transporte, que conecta a los habitantes con la ciudad capital del país, así como también a la cabecera departamental Chiquimula (Fong, 2010).

2.5. OBJETIVOS

2.5.1. Objetivo General

- Aplicar el modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT), para la simulación de caudales de la microcuenca del río Atulapa, Esquipulas, Chiquimula, Guatemala.

2.5.2. Objetivos Específicos

- Determinar el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), que permita evaluar los resultados arrojados por el modelo SWAT en la Microcuenca del río Atulapa, para una frecuencia de simulación diaria.
- Determinar el coeficiente de determinación (R^2), que permita evaluar la relación entre los resultados arrojados por el modelo SWAT y los datos observados en la Microcuenca del río Atulapa, para una frecuencia de simulación diaria.
- Determinar el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), que permita evaluar los resultados arrojados por el modelo SWAT, en la Microcuenca del río Atulapa, para una frecuencia de simulación mensual.
- Determinar el coeficiente de determinación (R^2), que permita evaluar la relación entre los resultados arrojados por el modelo SWAT y los datos observados, en la Microcuenca del río Atulapa para una frecuencia de simulación mensual.

2.6. METODOLOGÍA.

El modelo hidrológico SWAT toma en cuenta las siguientes variables de entrada:

- Bases de datos alfanuméricas para SWAT:
- Precipitación en mm
- Temperatura máxima y mínima en grados centígrados
- Radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa (Opcional)
- La base de datos de suelos y agua (opcional), se pueden incluir variables físicas y químicas.

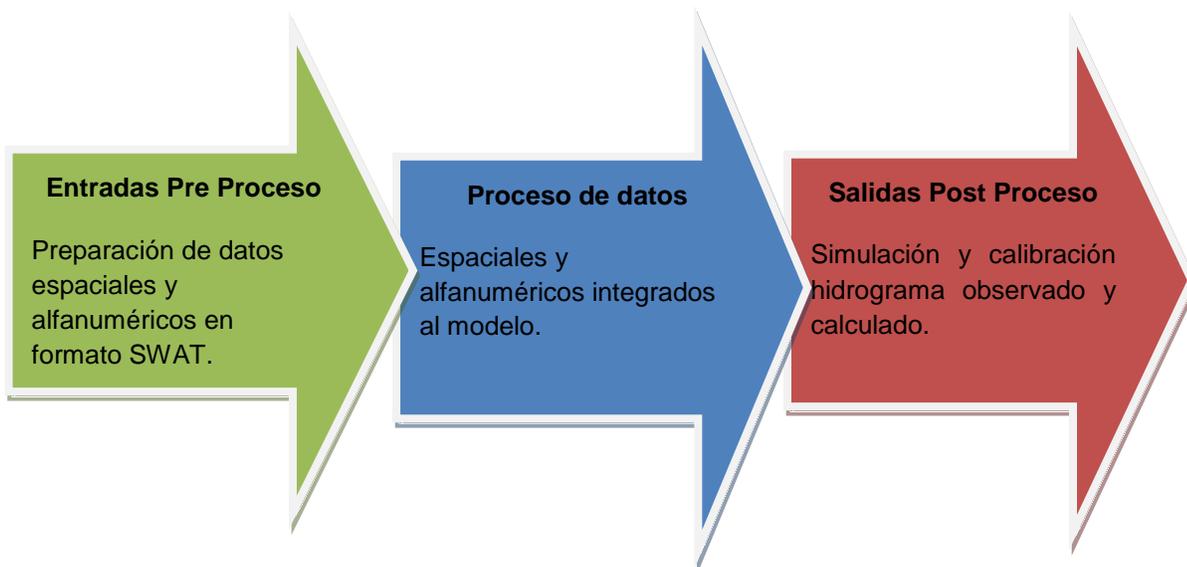
Los datos climáticos pueden ser agregados en formato (.dbf) organizados en mes, día y año o bien en formato ASCII organizados en año, mes y día. Las variables físicas y químicas del suelo y agua deben de ser agregadas a la base de datos de ARCSWAT.

- Base de datos espacial para SWAT
- Uso y cobertura de la tierra (grid) Clasificación USGS y NLCD
- Tipo de suelos (grid)
- Modelo de elevación digital (grid)
- Corrientes (opcional)
- Cuenca (opcional)
- Mascara para cortar el DEM (vector o raster opcional)
- Localización de las estaciones meteorológicas (vector)
- Punto de descarga o estación hidrométrica (vector) con información en la base de datos sobre caudal. Pero en caso existan datos de características físicas y químicas del agua, es importante añadirlas.

Las bases de datos espaciales poseen características específicas en formato (.dbf) asociadas a un mapa, como el nombre del campo y el formato. Estos campos específicos organizan los datos, estandarizando la lectura de cada uno de ellos.

La obtención del hidrograma observado e hidrograma calculado, es de gran utilidad para la calibración del modelo y luego la simulación, implementando cambios en variables para obtener resultados.

En el diagrama siguiente se logra observar de forma general las diferentes etapas del Swat.



2.6.1. Fase de gabinete I

2.6.1.1. Recopilación de información alfanumérica

La primera fase o etapa de la simulación fue la búsqueda y recopilación en fuentes primarias, como fuentes secundarias, en instituciones privadas, públicas y no gubernamentales, que tuvieran información relacionada con las características

morfológicas de la cuenca, así como datos alfanuméricos, entre los que se puede mencionar:

- Registros históricos de caudales diarios
- Registros históricos de Precipitación diaria (mm)
- Registros históricos de Temperatura máximas y mínimas (°C)
- Humedad relativa
- Velocidad del viento
- Radiación solar

2.6.1.2. Recopilación de información espacial

Se identificaron fuentes primarias, como fuentes secundarias en instituciones privadas, públicas y no gubernamentales, que tuvieran información relacionada con los temas que a continuación se mencionan:

- Uso y cobertura de la tierra Clasificación USGS y NLCD
- Tipo de suelos
- Modelo de elevación digital
- Corrientes
- Cuenca

2.6.1.3. Procesamiento de datos climáticos.

Las variables climáticas necesarias para hacer operar el modelo SWAT son: precipitación, temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento.

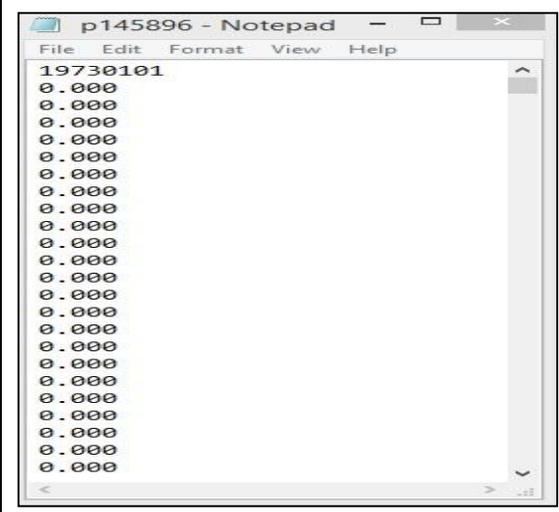
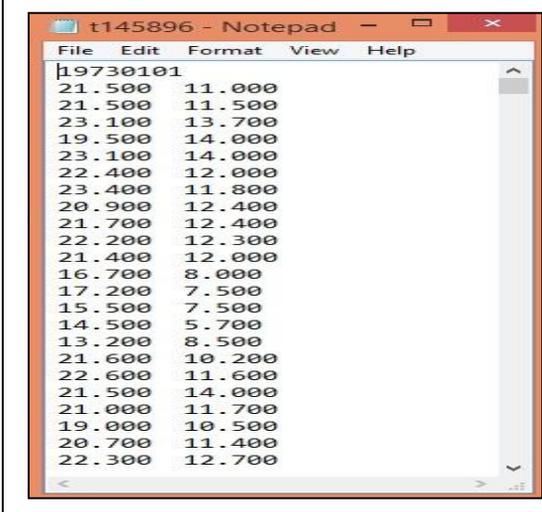
Si los datos de la precipitación diaria están disponibles, pueden ser introducidos directamente al programa SWAT, sino el generador de clima del programa SWAT puede simular precipitación diaria y temperatura, en base a datos mensuales. Los datos de radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa, son siempre simulados por el programa SWAT, a través de una distribución normal, corregida por una condición de probabilidad Seco-Mojado.

En base a estos resultados, se obtienen datos de entrada para el programa SWAT. Para un determinado intervalo de precipitación y temperatura (en este caso se pudo contar con un periodo de registro de datos de 39 años), para 2 estaciones meteorológicas que van desde el año 1973 al 2012.

Cabe aclarar que los datos de precipitación diaria que se tienen de las estaciones, son los que se utilizan como datos de entrada, para el programa SWAT y dado que solo se cuenta también con el registro de temperaturas diarias máximas y mínimas, el programa SWAT realizó la simulación de las variables climáticas restantes.

Para este programa de simulación hidrológica se requirió el ordenamiento de los datos. de tal manera que SWAT pueda leerlos e introducir esos registros. El formato de introducción de datos de precipitación y temperatura fue en (.txt), el cual se muestra a continuación:

Cuadro 2: Muestra de archivos de entrada al modelo SWAT.

 <pre> 19730101 0.000 </pre>	 <pre> 19730101 21.500 11.000 21.500 11.500 23.100 13.700 19.500 14.000 23.100 14.000 22.400 12.000 23.400 11.800 20.900 12.400 21.700 12.400 22.200 12.300 21.400 12.000 16.700 8.000 17.200 7.500 15.500 7.500 14.500 5.700 13.200 8.500 21.600 10.200 22.600 11.600 21.500 14.000 21.000 11.700 19.000 10.500 20.700 11.400 22.300 12.700 </pre>
<p>Figura 14: Archivo de entrada al modelo precipitación diaria en formato .txt</p>	<p>Figura 15: Archivo de entrada al modelo temperaturas máximas y mínimas en formato .txt</p>

2.6.2. Fase de Gabinete II

2.6.2.1. Ingreso de datos espaciales

Se generó una carpeta, en la cual contiene los datos espaciales de entrada que requiere el modelo:

- Uso y cobertura de la tierra escala 1/50,000. Fuente: INAB, CONAP y MAGA, año 2010; uso de la tierra y 2013 cobertura forestal, el cual fue necesario revisarlo y actualizar. Debido a los convenios institucionales, se pudo obtener el mapa de usos y cobertura 2012, generado por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, el cual sirvió para fortalecer la temática de cobertura y uso de la tierra. Además se contó con el mapa de ocupación del suelo, elaborado por IGN 2010, escala 1:25,000.
- Tipo de suelos escala 1/250,000 de FAO. Se mejoró con unidades fisiográficas a nivel de paisaje 1/50,000 y utilizando el programa SPAW. Asimismo, para fortalecer el tema de suelos, se ingresó la base de datos obtenida del Estudio de suelos:

Áreas semiáridas de la región del Trifinio, realizado por el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), en el año de 1992, a una escala de semidetalle.

- Modelo de elevación digital (grid), con resolución de 30 metros, fuente cartografía básica 1/50,000 IGN.
- Mascara para cortar el DEM
- Localización de las estaciones meteorológicas, fuente INSIVUMEH.
- Punto de descarga o estación de lectura de caudales (vector), con información en la base de datos sobre caudal. Esta información se obtuvo de la base de datos de la ONG Plan Trifinio, el cual tiene caudales diarios para esta microcuenca. Estos datos fueron utilizados para la evaluar la eficiencia del modelo SWAT, en la microcuenca del río Atulapa.

2.6.3. Fase de Gabinete III

2.6.3.1. Simulación con el modelo hidrológico.

Posterior al ingresar los datos alfanuméricos y espaciales que solicita el modelo, se procedió a realizar la simulación.

2.6.3.2. Generación de un proyecto de trabajo

El primer paso de la simulación, consistió en la generación de un proyecto de trabajo. La figura 16, muestra la imagen del módulo Project, el cual permitió la generación del proyecto. Este proyecto contiene, tanto la información o el Data dentro de una carpeta, nombrada como DATA y todos los archivos capas vectoriales y raster generados por el modelo, nombrada MODEL. Es dentro de esta carpeta donde se almacena uno de los

archivos fundamentales del modelo, llamado SWAT2012, el cual contiene toda la información alfanumérica y espacial que fue ingresada.

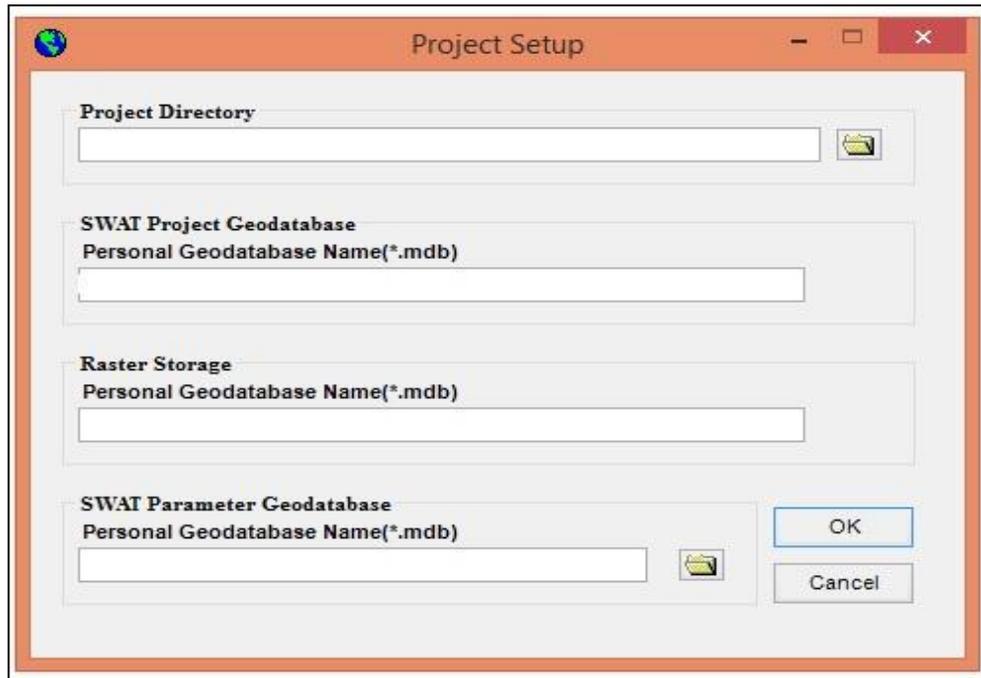


Figura 16: Modulo Project Setup, de la interfaz ArcSwat.

2.6.3.3. Generación de las subcuencas

La cuenca puede ser fraccionada en varias subcuencas, a través de un valor de área umbral, que dependerá del objetivo y exactitud del estudio. Dichas subcuencas poseen una posición geográfica determinada y están relacionadas con las vecinas. Esta se definió, para que el modelo generara una subcuenca. La cual facilito el manejo de los datos salida. La figura 17 muestra el modulo para la delimitación de cuencas. Este módulo contiene 6 secciones.

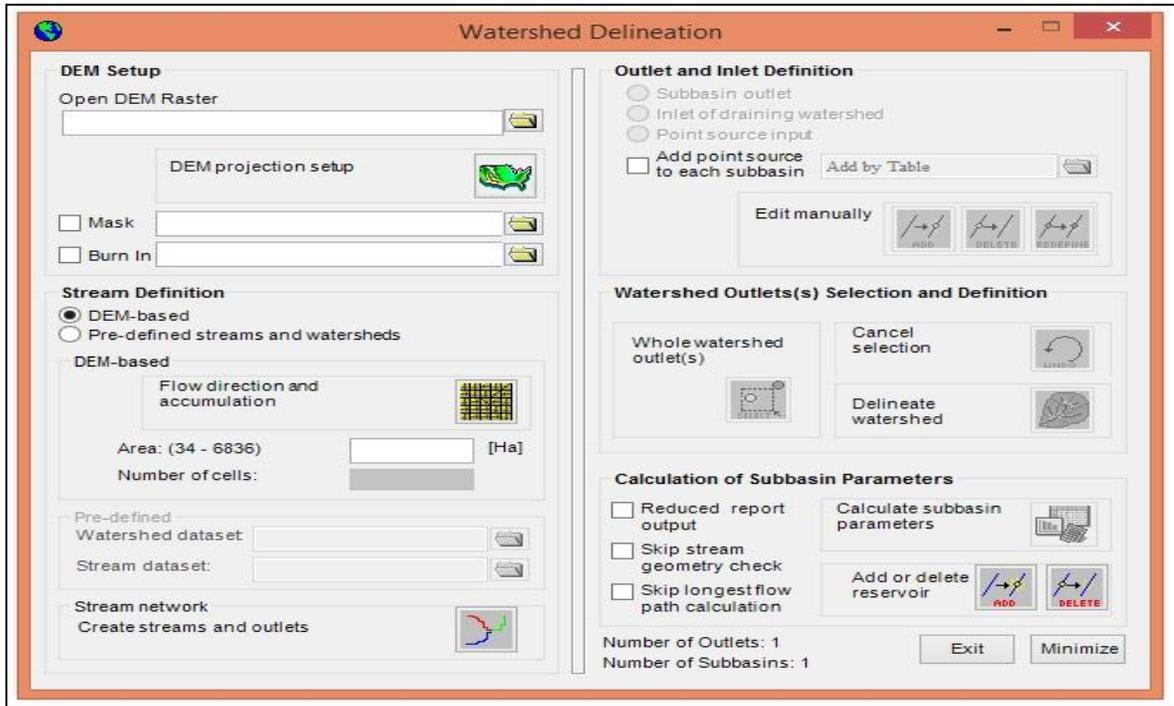


Figura 17: Modulo Watershed Delineation de la interfaz ArcSwat.

La sección 1, permite el ingreso el modelo de elevación digital. En la figura 18, se puede observar la sección 1 (DEM setup), con el ingreso del modelo de elevación digital.

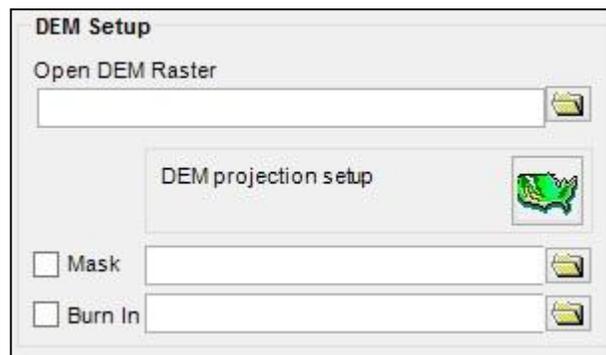


Figura 18: Sección Dem setup del Módulo Watershed Delineation de la interfaz ArcSwat.

La sección 2 permitió el cálculo de la dirección de flujo y el flujo acumulado, partes esenciales para la generación de las corrientes y el límite de la cuenca. En la figura 19, se observa la sección 2 (Stream Definition). Esta sección además de calcular la dirección de flujo y el flujo acumulado, permitió el ingreso del área mínima que debería delimitar el modelo. Esta parte fue fundamental, ya que se solicitó al modelo que generara una sola subcuenca.

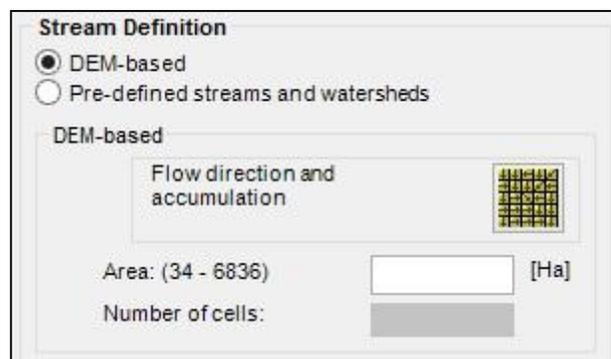


Figura 19: Sección Stream Definition del Módulo Watershed Delineation, de la interfaz ArcSwat.

La sección 3, permitió la generación de la red de drenaje. La figura 20 muestra la sección 3, que genera el vector de la temática hidrológica.



Figura 20: Sección Stream network del Módulo Watershed Delineation, de la interfaz ArcSwat.

Para esta área de estudio no se requirió el uso de la sección 4, ya que la misma es para uso exclusivo de cuencas con reservorios naturales. La sección 5, permitió la selección de un punto de donde partió el límite de la cuenca (punto de aforo). La figura 21, muestra la sección 5, la cual permite la generación del límite de la cuenca.



Figura 21: Sección Delineate watershed del Módulo Watershed Delineation, de la interfaz ArcSwat.

La sección 6, permitió el cálculo de algunas características morfométricas, específicamente las de relieve. La figura 22, muestra la sección 6 (Calculation of Subbasin Parameters).

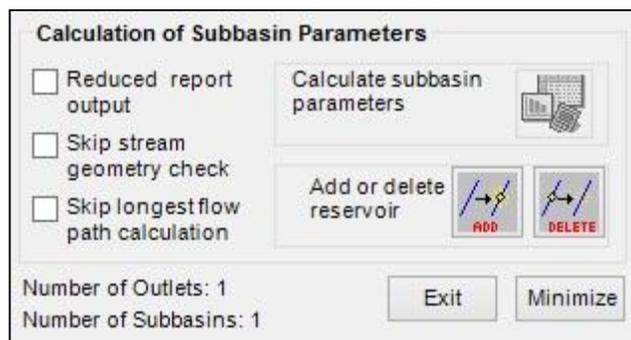


Figura 22: Sección Calculation of Subbasin Parameters, del Módulo Watershed Delineation de la interfaz ArcSwat.

El producto final del módulo Watershed Delineation, fue la obtención del límite de la cuenca y el cauce principal.

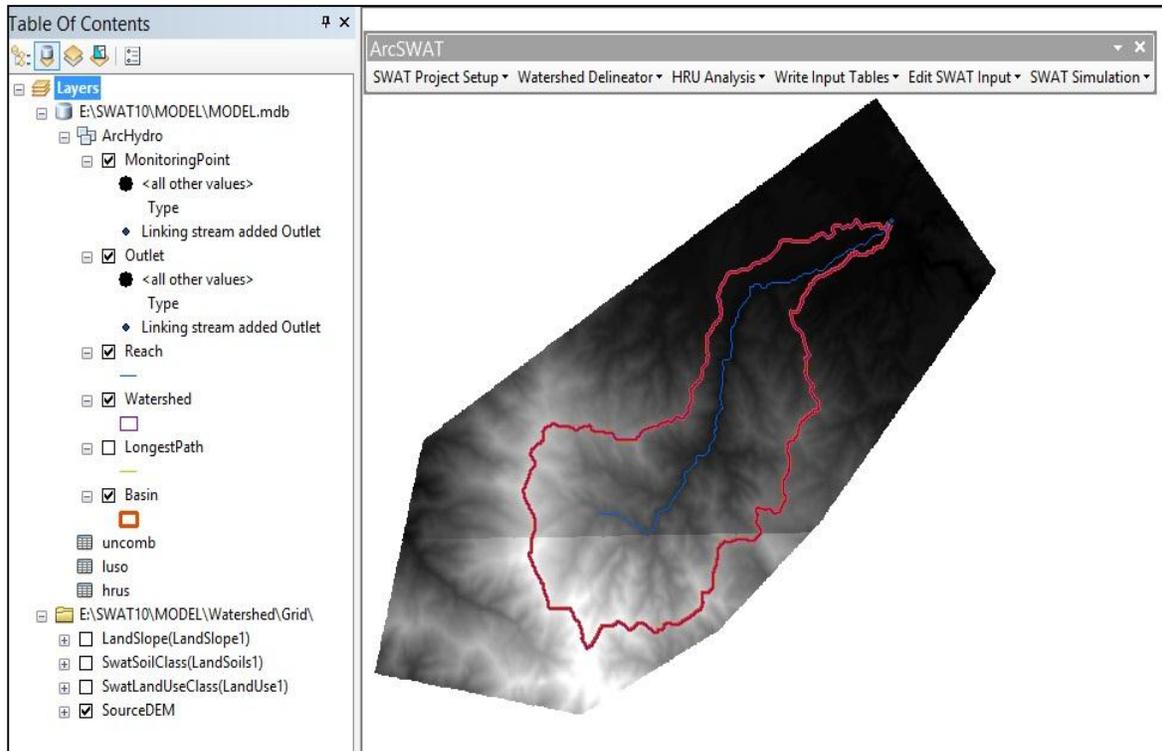


Figura 23: Delimitación de la cuencas con el módulo watershed Delineation, en la interfaz ArcSwat.

2.6.3.4. Generación de las Unidades de Respuesta Hidrológica

El módulo HRU Analysis de la interfaz arcswat, permite a los usuarios ingresar los vectores de los temas uso y características físicas y químicas del suelo al proyecto actual. Dicho modulo permite además, la elaboración de un raster que contiene las características de pendientes y determinar las combinaciones y las distribuciones existentes entre el uso/suelo/pendiente, para la determinación de las unidades de respuesta hidrológica (HRU en inglés).

La subcuenca generada por el modelo, se subdividió en Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU), que conforman una combinación única de tipos de suelo, usos del terreno y cobertura, pendiente, de forma que cada sub-cuenca posee al menos una HRU. La subdivisión de la cuenca permite al modelo reflejar diferencias en la evapotranspiración, para varios tipos de suelos y coberturas. La escorrentía se predice separadamente para cada HRU y es canalizada en función del modelo digital de elevación para obtener el total en la cuenca. Esto aporta una mayor precisión en la descripción física del balance de agua. La figura 24, muestra el módulo HRU Analysis, el cual permitió el ingreso de los datos espaciales (Raster), Uso y cobertura del suelo, características físicas y químicas del suelo y la generación de pendientes, de acuerdo a los rangos establecidos por el usuario. Estos rangos de pendientes no influyen fuertemente en el modelo, ya que las características de altura las posee el modelo de elevación digital.

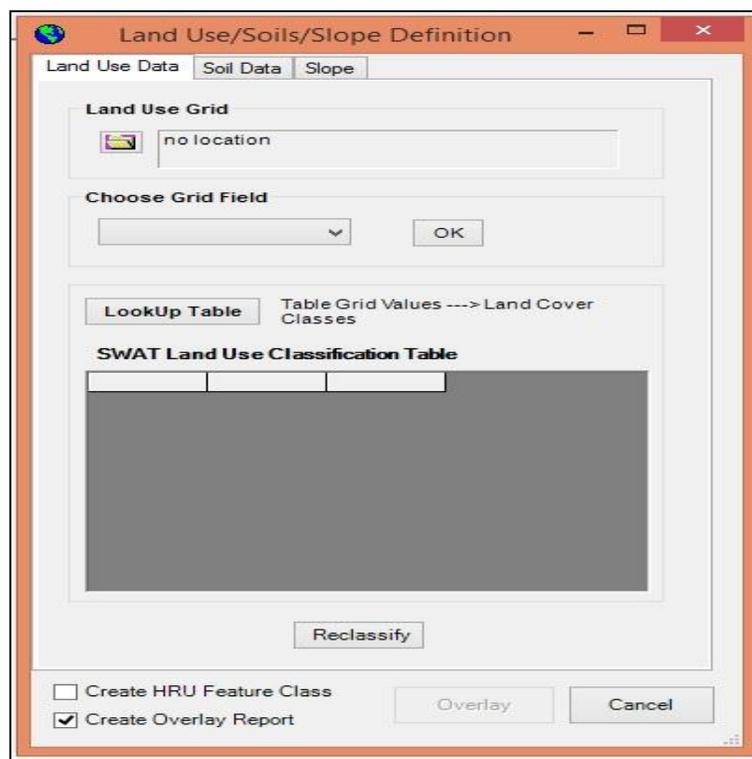


Figura 24: Modulo HRU Analysis de la interfaz ArcSwat.

El módulo HRU Analysis está dividido en 3 secciones: LandUse Data, Soil Data y Slope. Cada una de estas secciones permitió la reclasificación de las categorías, tanto de Uso y cobertura de suelo, así como en sus características físicas y químicas. Este proceso es un poco dificultoso, ya los datos espaciales de Cobertura y uso de suelo, tuvieron que coincidir con el código de 5 letras que maneja SWAT.

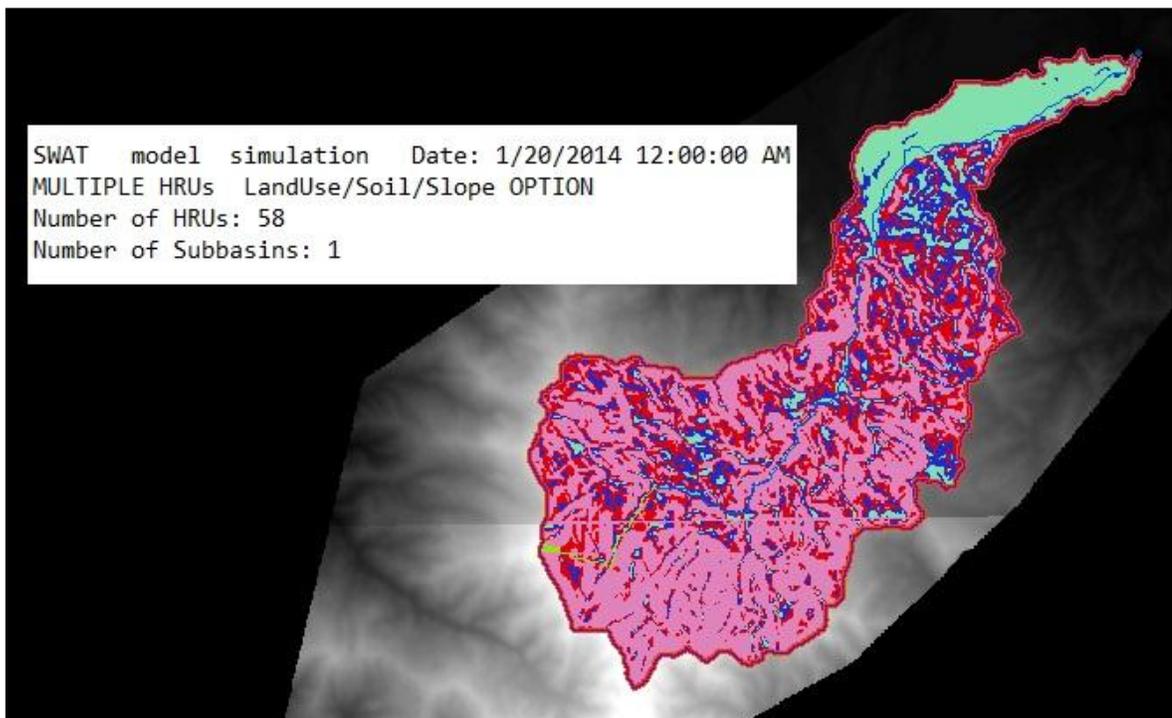


Figura 25: Clasificación de Unidades de Respuesta Hidrológica con el módulo HRU Analysis, en la interfaz ArcSwat.

La figura 25, muestra la sección LandUse Data y la asignación del código SWAT, para el dato espacial Uso y Cobertura de la Tierra para la Microcuenca del Rio Atulapa.

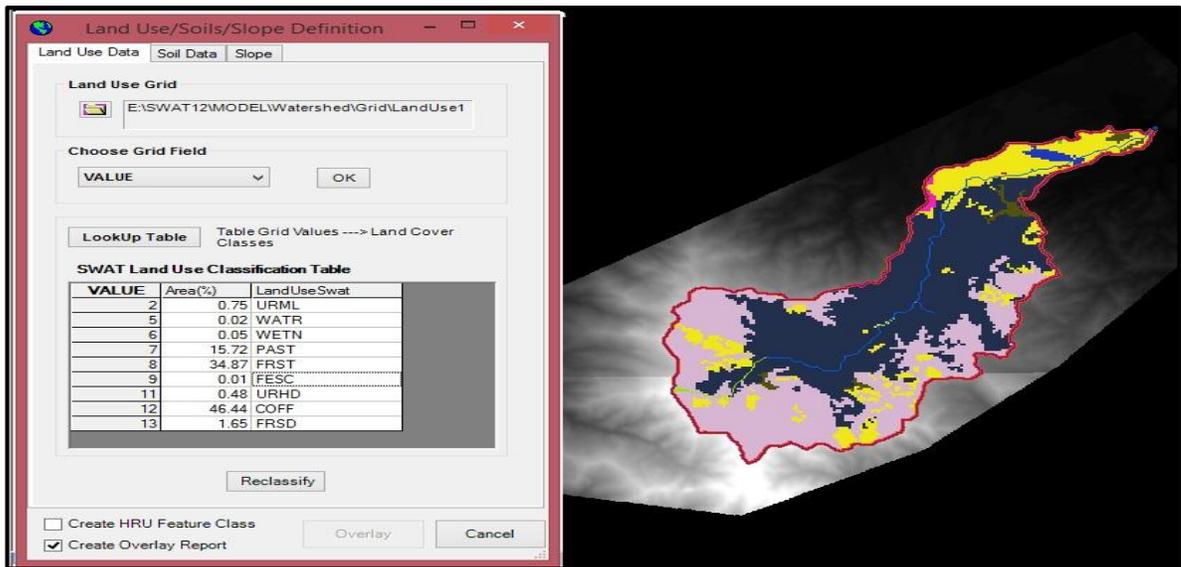


Figura 26: Reclasificación Uso de la Tierra con códigos de la interfaz ArcSwat.

La figura 26, muestra la sección Soil Data y el ingreso de las unidades homogéneas, en características físicas y químicas.

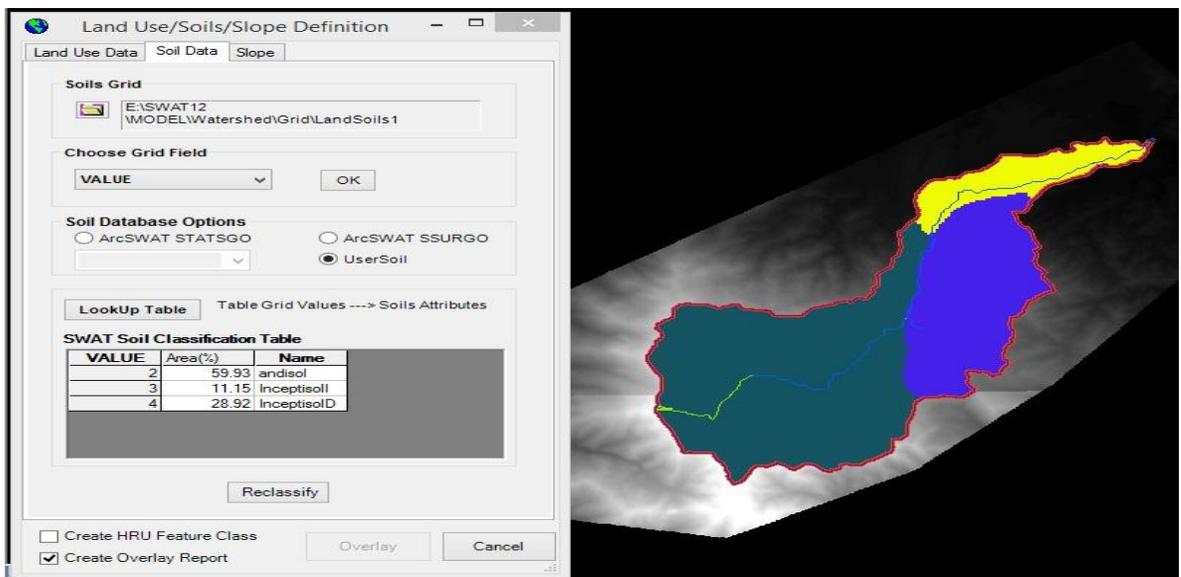


Figura 27: Reclasificación de suelos en la interfaz ArcSwat.

2.6.3.5. Información Climática

En la etapa de procesamiento climático, se generó una carpeta llamada Clima, en la que se guardaron 6 archivos de los cuales, 3 corresponden a la precipitación y los otros 3 restantes a la temperatura. Dentro de estos archivos, se definió principalmente la localización y cota altitudinal de cada estación, los valores registrados de precipitación diaria y temperaturas extremas diarias'

La figura 28 muestra el módulo Weather Data Definition, el cual permite el ingreso de los datos meteorológicos definidos por el usuario.

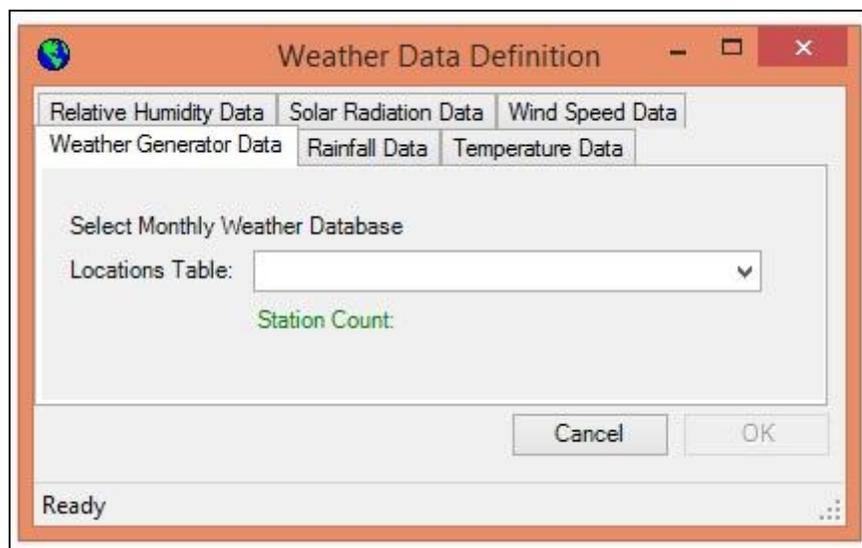


Figura 28: Módulo Weather Data Definition para ingresar la información climática (Pp, T°max y min) de la interfaz ArcSwat.

2.6.3.6. Simulación

El Modulo SWAT simulation permite realizar la simulación, así como la obtención de los datos de salida del balance hídrico. En él se elige la temporalidad sobre el cual se hará el análisis.

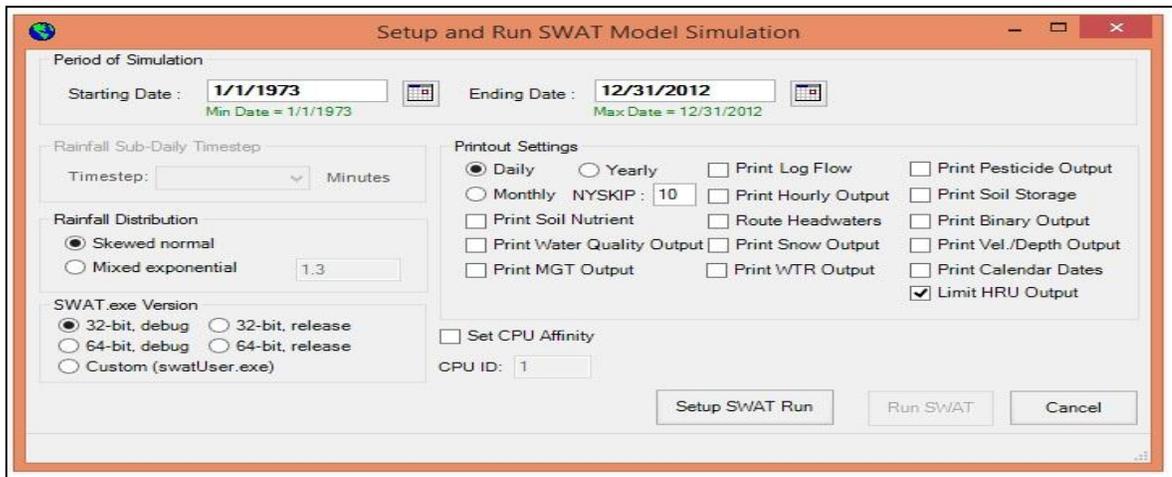


Figura 29: Módulo SWAT simulation de la interfaz ArcSwat.

Para los intereses de esta simulación, se procedió a generar archivos de salida con frecuencia diaria y mensual, para el periodo 1983-1973, con un periodo de calentamiento o equilibrio de 10 años.

2.6.4. Fase Final

2.6.4.1. Datos de Salida

Posterior a la simulación el SWAT genera archivos en formato .txt y .mdb, de donde se puede extraer datos simulados del caudal, escorrentía, infiltración, evapotranspiración potencial, etc. Para este estudio se extrajeron los datos de caudales simulados, para compararlos con datos de caudales observados.

Todos los objetos de Acc... <<		SUB	YEAR	MON	AREAk2	FLOW_INcm	FLOW_OUTc	EVAPcms
Tablas			1983	1	44.07	0.2398	0.2344	0.005413
hru		1	1983	2	44.07	0.214	0.2118	0.002172
rch		1	1983	3	44.07	0.2015	0.2014	0.0001788
sub		1	1983	4	44.07	0.2081	0.2078	0.0002557
tblDepDef		1	1983	5	44.07	0.1853	0.1852	0.00016
tblHruDef		1	1983	6	44.07	0.1708	0.1618	0.008995
tblHruDef		1	1983	7	44.07	0.1545	0.1539	0.0006376
tblMgtDef		1	1983	8	44.07	0.1457	0.1355	0.01016
tblPotDef		1	1983	9	44.07	0.1382	0.1291	0.009106
tblRchDef		1	1983	10	44.07	0.1306	0.1177	0.01288
tblRsvDef		1	1983	11	44.07	0.1258	0.1255	0.0002475
tblRsvDef		1	1983	12	44.07	0.1242	0.1223	0.001912
tblSedDef		1	1983	13	44.07	0.1183	0.1106	0.007771
tblSnuDef		1	1983	14	44.07	0.1133	0.1076	0.005635
tblSnuDef		1	1983	15	44.07	0.1086	0.1023	0.006289
tblSubDef		1	1983	16	44.07	0.1042	0.1016	0.002626
tblSubDef		1	1983	17	44.07	0.1002	0.09183	0.008368
tblSwrDef		1	1983	18	44.07	0.0964	0.09216	0.004245
tblVelDef		1	1983	19	44.07	0.09284	0.08384	0.008999
tblWqlDef		1	1983	20	44.07	0.08948	0.08378	0.005696
tblWtrDef		1	1983	21	44.07	0.08629	0.07691	0.009382
tblWtrDef		1	1983	22	44.07	0.08327	0.07214	0.01113
tblWtrDef		1	1983	23	44.07	0.08039	0.07482	0.005572
tblWtrDef		1	1983	24	44.07	0.07765	0.07261	0.005035

Figura 30: Output datos de salida del modelo después de la simulación.

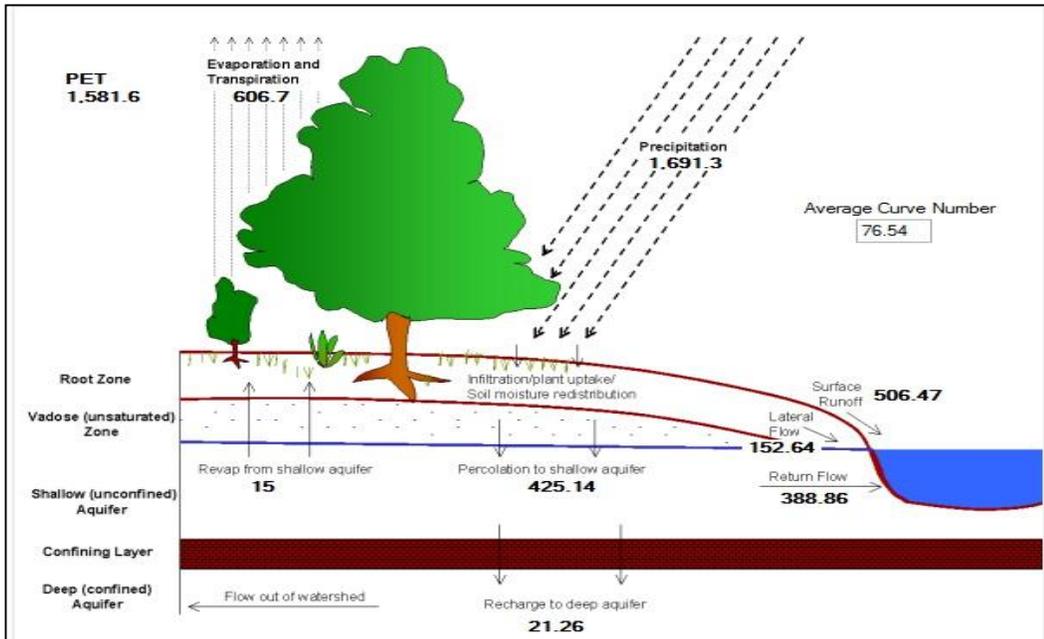


Figura 31: Diagrama de simulación del balance hídrico en la cuenca.

2.6.4.2. Ordenamiento de Datos de salida

Después de la obtención de los archivos de salida, se procedió al ordenamiento de datos. Del archivo en formato .mdb o .txt, se extraen los datos de interés (para este caso el libro RCH). Dentro del archivo .mdb, se encuentra la columna que contiene los datos de escurrimiento superficial simulados. Este dato permitirá la comparación con datos observados, generación de gráficas y cálculos de índices estadísticos.

2.6.4.3. Comparación de resultados

Posterior a la simulación y a obtener los datos de salida, se procedió a utilizar la herramienta SwatPlot, herramienta que utiliza específicamente las bases de datos guardados en la carpeta “Scenarios” de cada simulación realizada; dicha carpeta contiene los datos de salida de los caudales en formato “.mdb”, los cuales son comparados con los registros de caudales históricos, ya sea a nivel diario o mensual en formato “.txt”; automáticamente con esta herramienta, se obtiene los índices de correlación R^2 y NSE, así como una gráfica de columnas, haciendo referencia a la similitud o diferencias existentes, entre los caudales observados versus simulados.

2.7. RESULTADOS Y DISCUSION

El modelo hidrológico SWAT permite la simulación de los componentes del balance hídrico diario, mensual o anual. En el presente estudio, su aplicación se basó en datos diarios. La obtención de los resultados se reportan diarios y mensuales, para evaluar la eficiencia de la simulación en ambas frecuencias.

2.7.1. Simulación Diaria

La simulación diaria total fue realizada desde el 1 de enero de 1973 hasta el 31 de diciembre de 2012, para un periodo total de simulación de treinta y nueve años de información (1973-2012), con una frecuencia de impresión de salida diaria

La Figura 32, muestra la dinámica y la magnitud de los datos simulados por el modelo del periodo de 1983-2012. La frecuencia de salida de los datos es diaria. El caudal mínimo fue de $0.23 \text{ m}^3/\text{seg}$ y el caudal máximo de $52.15 \text{ m}^3/\text{seg}$.

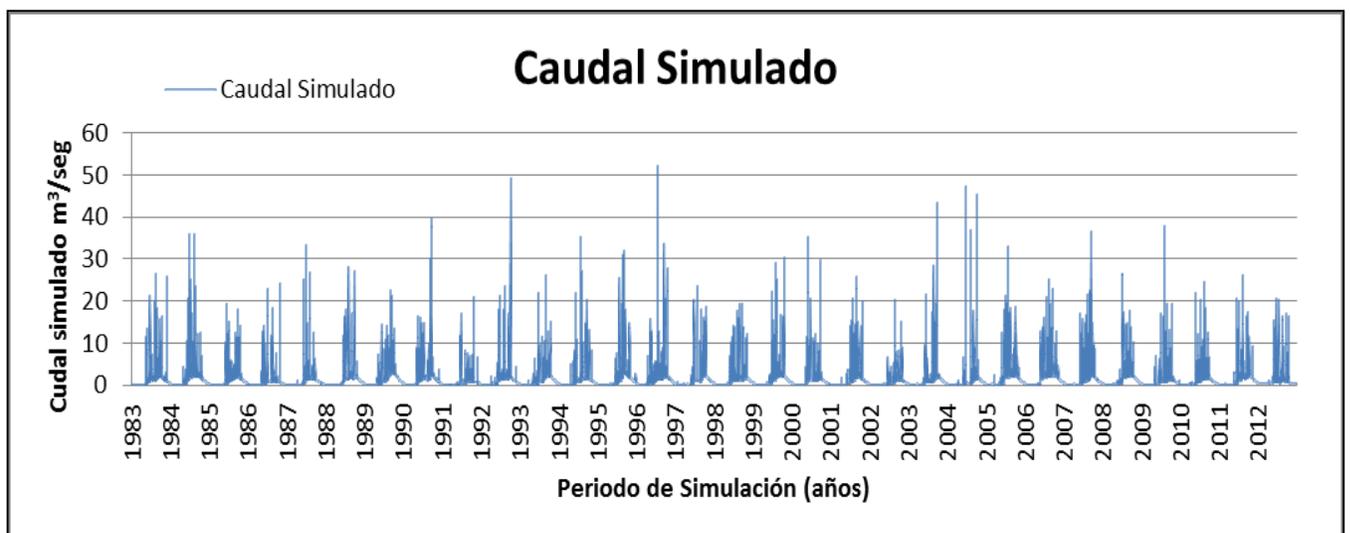


Figura 32: Dinámica y magnitud de los escurrimientos superficiales simulados diarios (1983-2012).

Como puede apreciarse en la figura 33, los datos representados corresponden al periodo 1983-2012, aun cuando la simulación diaria total fue realizada con datos de entrada, en el periodo comprendido 1973-2012. Este periodo de 10 años ausente, resultado del descuento realizado por el modelo, ya que se le dio un periodo de 10 años como etapa de calentamiento o equilibrio. Este periodo resulto de las recomendaciones obtenidas del manual de usuario de ARCSWAT, el cual recomienda dejar periodo de calentamiento (NYSKIP) de no mayor de 10 años. Después de 10 años no presenta mayor variación en los resultados.

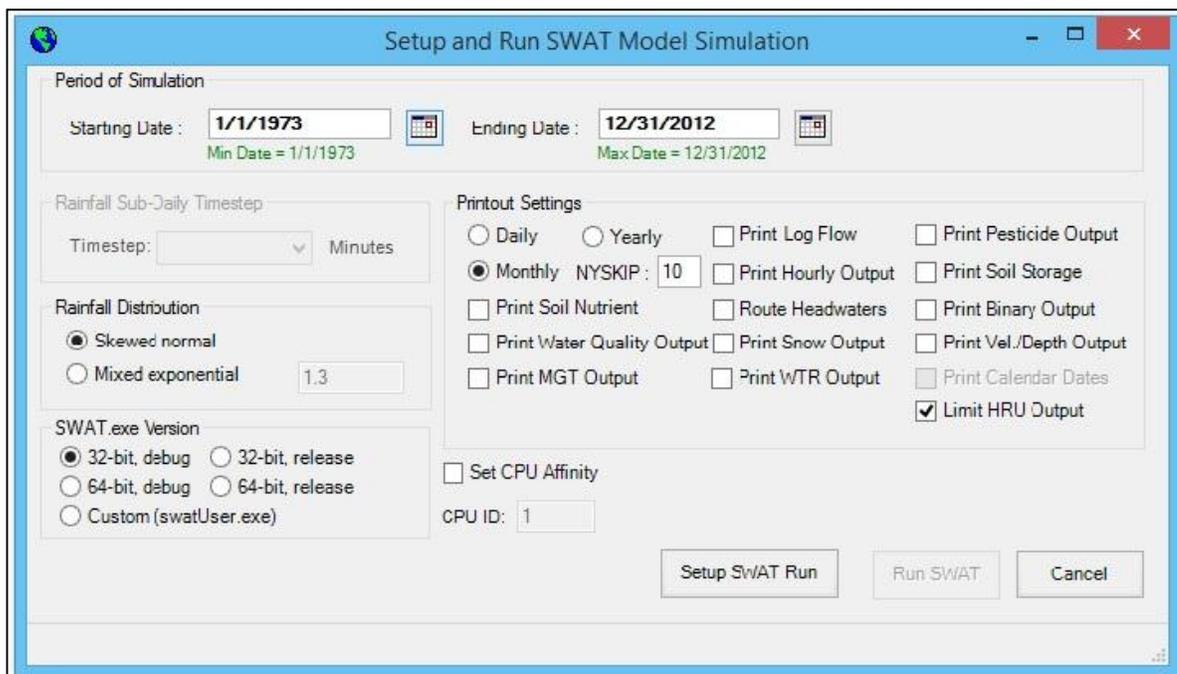


Figura 33: Modulo de simulación de la intefaz ArcSwat.

El Periodo de calentamiento o equilibrio (NYSKIP), permite que el usuario pueda excluir los datos generados durante el periodo de equilibrio de los archivos de salida. Además de no grabar los datos en el archivo de salida, el promedio anual no se calcula para los años

omitidos. Las simulaciones hidrológicas necesitan un período de calentamiento o de equilibrio. Este periodo es igual de importante al período de simulación.

Según el manual, para periodos de simulación mayores de 30 años, un período de equilibrio es opcional, pero comparando los resultados obtenidos de un periodo de simulación sin calentamiento, el caudal base en los primeros años es muy bajo, por lo que se decidió dejar la etapa de calentamiento en 10 años.

2.7.2. Simulación y correlación diaria periodo enero-diciembre 2012

La simulación para la correlación fue realizada desde el 1 de enero hasta el 31 de diciembre de 2012, para un periodo total de simulación de un año de información (2012), con una frecuencia de impresión de salida diaria.

La figura 34, representa la dinámica y la magnitud de la comparación entre los caudales observados y simulados. Como se puede observar, el modelo realiza sobrestimaciones en los meses de mayor precipitación. Es importante señalar que para este estudio, no se realizaron modificaciones de parámetros, por lo que los resultados presentados son los datos puros que simula el modelo.

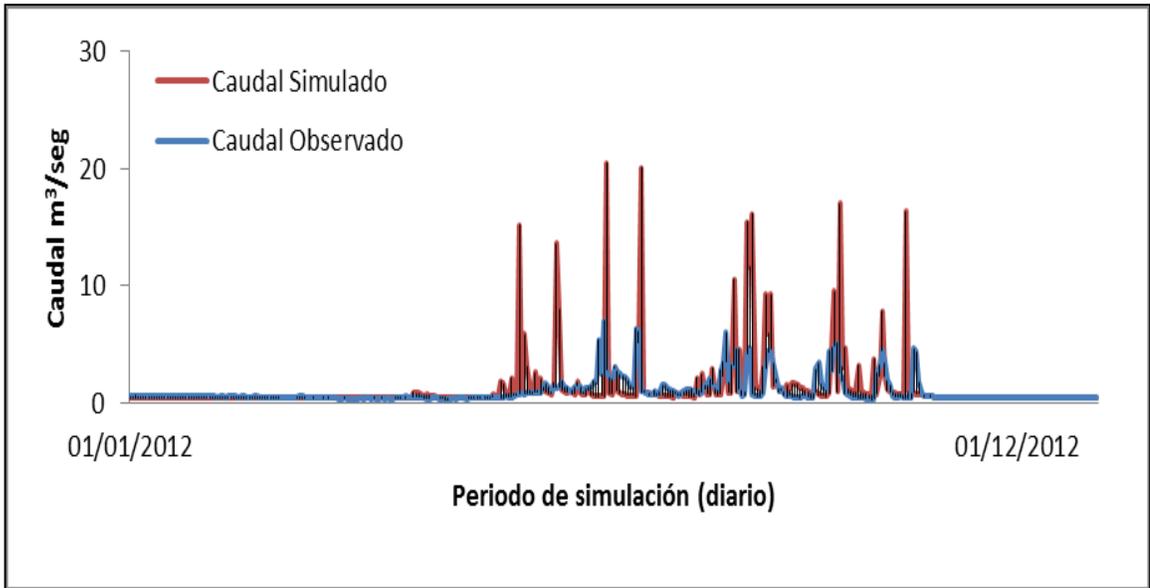


Figura 34: Dinámica y magnitud de los escurrimientos superficiales simulados diarios (ENERO-DICIEMBRE 2012).

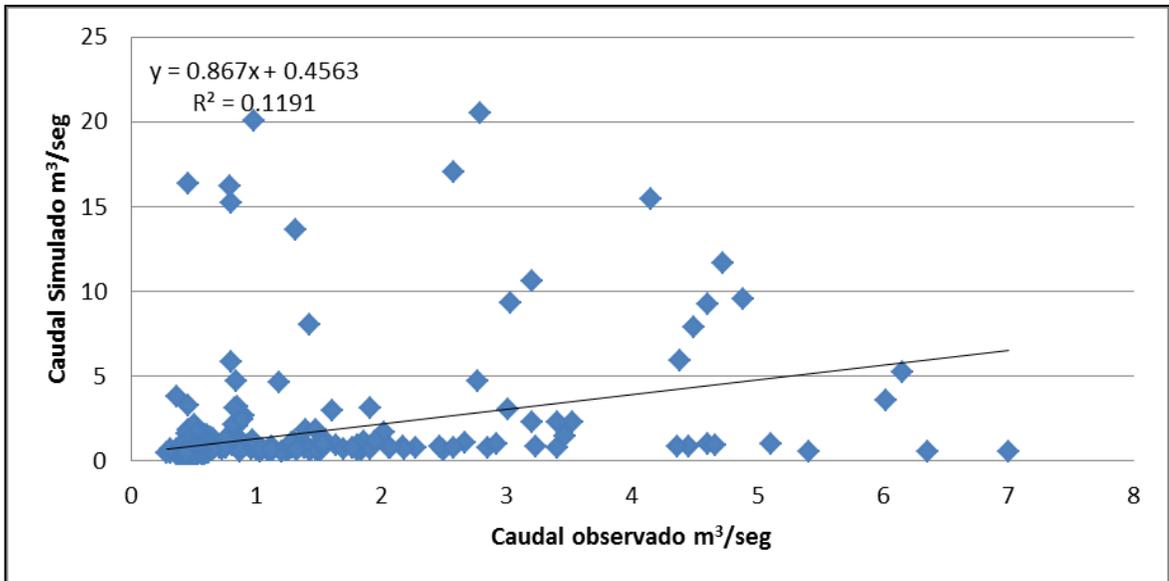


Figura 35: Análisis de regresión de caudales simulados y observados.

La figura 35, presenta el comportamiento grafico de los datos observados y simulados, para la frecuencia de datos de salida diaria, para el periodo enero-diciembre 2012. La pendiente de la recta y el coeficiente de determinación ($R^2=0.12$), indican que existe una baja correspondencia entre los valores de escurrimientos observados y simulados.

2.7.3. Simulación Mensual

La simulación mensual total fue realizada desde el 1 de enero de 1973 hasta el 31 de diciembre de 2012, para un periodo total de simulación de treinta y nueve años de información (1973-2012), con una frecuencia de impresión de salida mensual.

La figura 36, muestra la dinámica y la magnitud de los datos simulados por el modelo del periodo de 1983-2012. La frecuencia de salida de los datos es mensual. El caudal promedio mínimo fue de $0.27 \text{ m}^3/\text{seg}$ y el caudal promedio máximo de $6.6 \text{ m}^3/\text{seg}$.

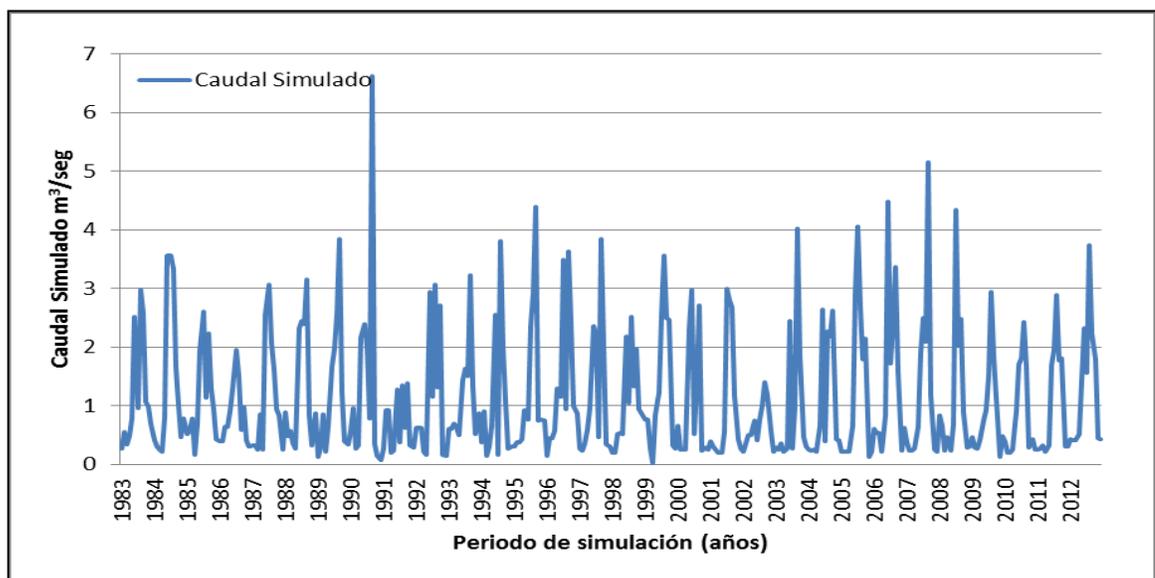


Figura 36: Dinámica y magnitud de los escurrimientos superficiales simulados mensuales (1983-2012).

Como puede apreciarse en la figura 36, los datos representados corresponden al periodo 1983-2012, aun cuando la simulación mensual total fue realizada con datos de entrada en el periodo comprendido 1973-2012. Este periodo de 10 años ausente, resulto del descuento realizado por el modelo, ya que se le dio un periodo de 10 años como etapa de calentamiento o equilibrio. Este periodo resulto de las recomendaciones obtenidas del manual de usuario de ARCSWAT, el cual recomienda dejar periodo de calentamiento (NYSKIP), de no mayor de 10 años. Después de 10 años no presenta mayor variación en los resultados.

2.7.4. Simulación y correlación mensual periodo enero-diciembre 2012

La simulación para la correlación, fue realizada desde el 1 de enero hasta el 31 de diciembre de 2012, para un periodo total de simulación de un año de información (2012), con una frecuencia de impresión de salida mensual.

Las figuras 37 y 38, representan la dinámica y la magnitud de la comparación entre los caudales observados y simulados. Es importante señalar, que para este estudio no se realizaron modificaciones de parámetros, por lo que los resultados presentados son los datos puros que simula el modelo.

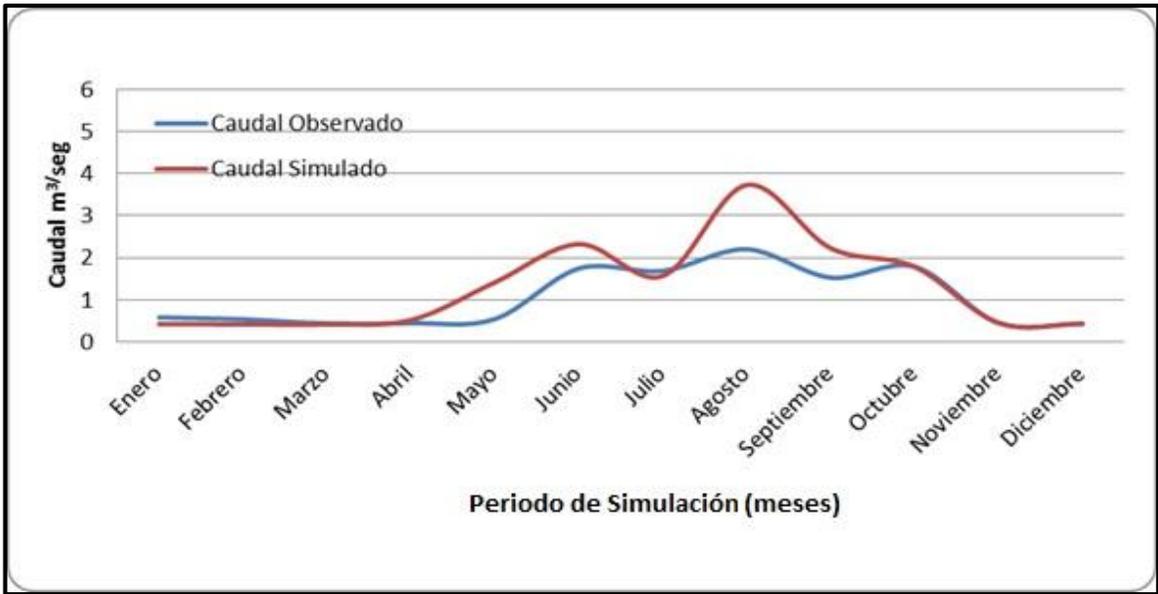


Figura 37: Dinámica y magnitud de los escurrimientos superficiales simulados mensuales (ENERO-DICIEMBRE 2012).

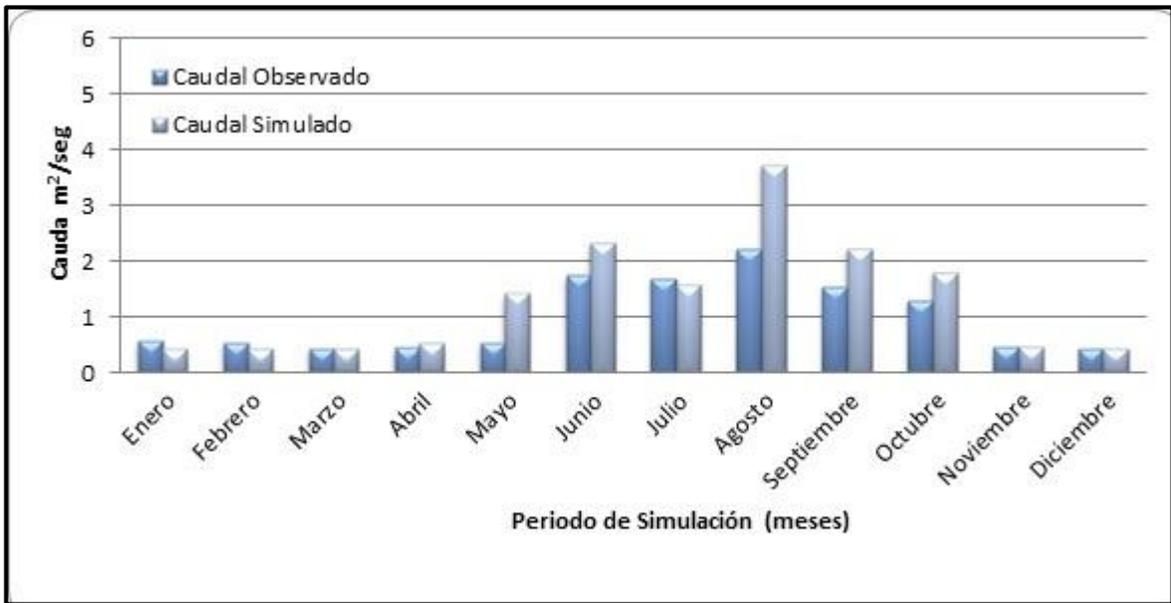


Figura 38: Grafica de barras de la Dinámica y magnitud de los escurrimientos superficiales simulados mensuales (ENERO-DICIEMBRE 2012).

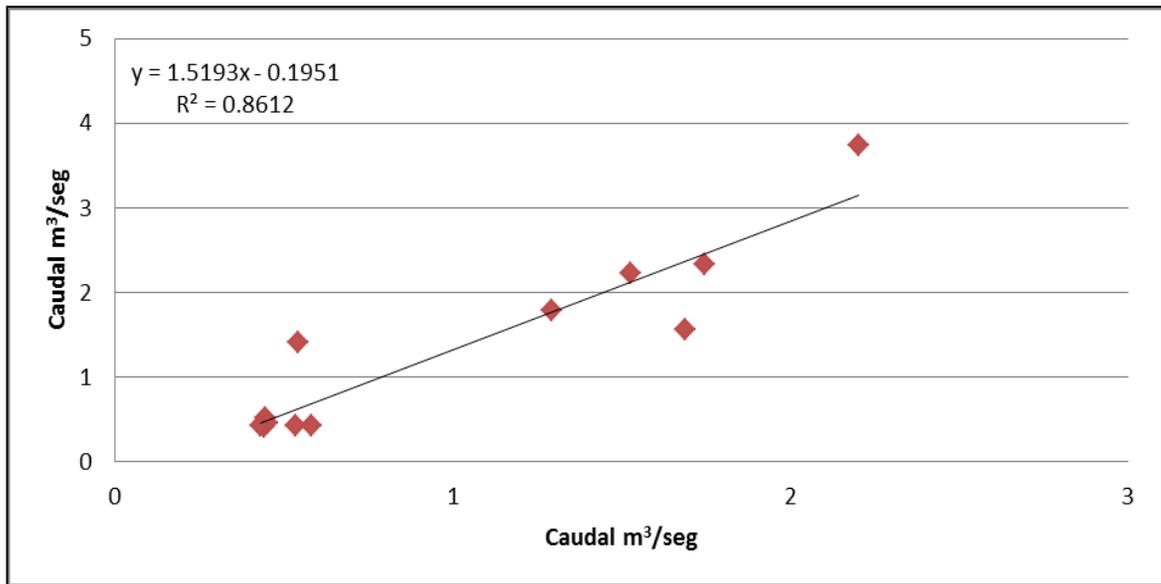


Figura 39: Análisis de regresión de caudales simulados y observados.

En la figura 39, se presenta el comportamiento gráfico de los datos observados y simulados para la simulación. La pendiente de la recta y el coeficiente de determinación ($R^2=0.8612$), indican que existe una correlación aceptable entre los escurrimientos observados y simulados.

2.7.5. Correlación Lluvia Vs. Caudal simulado

Para evaluar los resultados obtenidos por el modelo, se relacionaron los datos de lluvia, con el escurrimiento superficial o caudal simulado.

La figura 40, presenta el comportamiento gráfico de los datos de lluvia diaria y caudal simulado. La pendiente de la recta y el coeficiente de determinación ($R^2=0.75$), indican que existe una alta correspondencia entre los valores de lluvia diaria reportados por la estación meteorológica de Esquipulas y los caudales simulados. Dicho dato sugiere que

esta estación Montecristo ejerce una fuerte influencia sobre la cuenca y los datos simulados.

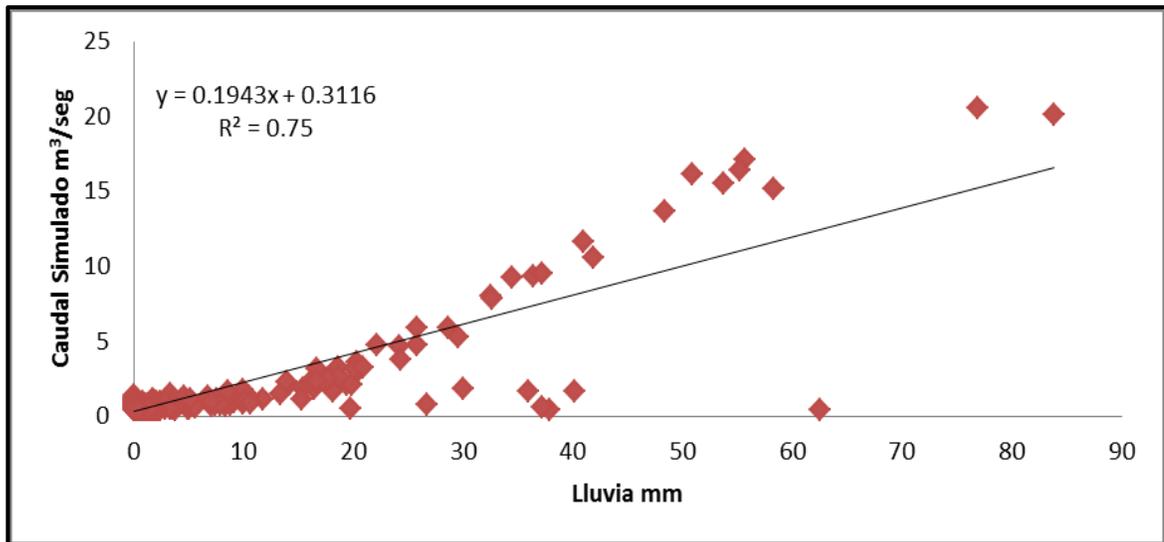


Figura 40: Análisis de regresión de los escurrimientos superficiales medidos y lluvia.

2.7.6. Índices Estadísticos

La figura 35, presenta el análisis de regresión de los datos observados y simulados por el modelo, para un total de 366 observaciones (días), en un periodo de un año. Los resultados obtenidos, coeficiente de determinación ($R^2=0.12$), indican que existe una poca correlación entre los caudales observados y simulados. Para los resultados mensuales como se presentan en la figura 39, el coeficiente de determinación ($R^2=0.8612$), indican que existe una correlación aceptable entre los escurrimientos observados y simulados.

Sin embargo, para conocer la eficiencia en los resultados simulados por el modelo SWAT, además de obtener el coeficiente de determinación (R^2), se realizó el análisis de ajuste

entre los caudales observados y simulados, a través de la determinación del coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe (1970). Este indicador de eficiencia NSE (por sus siglas en inglés, Nash-sutcliffe), indica la eficiencia de simulación de datos del modelo en relación, y se calcula con la siguiente formula:

$$ENS = -1 \left[\frac{\sum(\text{Sim}_i - \text{Obser}_i)^2}{\sum(\text{Obser}_i - \text{Obser}_{\text{Medio}})^2} \right]$$

Dónde:

Sim_i = Valor simulado

Obser_i =Valor Observado

$\text{Obser}_{\text{medio}}$ =Valor promedio de los valores observado

El criterio de Nash-Sutcliffe, es uno de los índices estadísticos más utilizados en hidrología. Este indicador mide cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Los valores sugeridos para la toma de decisiones se presentan en la siguiente tabla.

Cuadro 3: Rangos para evaluar modelos hidrológicos propuesto por Nash-Sutcliffe.

ENS	AJUSTE
<0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6– 0.8	Muy Bueno
> 0.8	Excelente

Fuente: Nash-Sutcliffe (1970)

Cuadro 4: Indicadores estadísticos para evaluar la eficiencia de la simulación.

Diaria		Mensual	
R ²	ENS	R ²	ENS
0.12	0.41	0.86	0.6

En general, se observó una adecuada eficiencia del modelo SWAT y un buen ajuste de los valores simulados respecto de los observados. Un resultado llamativo fue la mayor eficiencia del modelo a escala mensual en relación a los datos diarios. Se esperaba que la eficiencia diaria fuera menor a la escala mensual. El cuadro 4, contiene los valores de R² y R² ENS calculados, para la simulación en frecuencia diaria y mensual durante el periodo de enero-diciembre 2012. La eficiencia resultó adecuada, según los criterios propuestos Ramanarayanan (1997) y de Moriasi (2007), para la evaluación de modelos hidrológicos específicamente. Las eficiencia encontradas a escala mensual (R²: 0,86; R² ENS: 0,6); y pobres para el R² y bueno para el ENS a escala diaria (R²: 0,12; R² ENS: 0,41).

El coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE=0.6), obtenido para la simulación mensual, son valores considerados como aceptables en una situación donde no hubo calibración ni se mejoró ningún parámetro (sólo valores por defecto de la interfaz ARCSWAT). Por su parte los valores de R², indican que el modelo tiene una alta relación entre los datos observados vs. los simulados.

En el cuadro 5, se puede observar los resultados de otros estudios que aplicaron el modelo SWAT para la simulación de caudales. Realizando una comparación de los resultados obtenido en la Microcuenca río Atulapa, se puede comprobar que los

resultados son satisfactorios, ya que en la mayoría de los casos supera los índices estadísticos presentados en otros estudios.

Cuadro 5: Comparación de índices estadísticos en diferentes cuencas.

Área de Estudio	Resultados
Microcuenca Argentina	R2: 0,55; R2 ENS: 0,52
Microcuenca Perú	R2: 0,77; R2 ENS: 0,54
Microcuenca Perú	R2: 0,84; R2 ENS: 0,63

Fuente: Argota (2011)

2.8. CONCLUSIONES

- 1 La aplicación del modelo hidrológico SWAT genera resultados confiables de caudales, a pesar de las restricciones de la información. Las simulaciones sobre producción de escurrimientos superficiales a nivel mensual, fueron modeladas con la mayor precisión posible.
- 2 La comparación de los datos observados y simulados, utilizando el modelo SWAT, realizó una buena simulación de caudales mensuales en la Microcuenca, en una situación donde no hubo calibración ni se mejoró ningún parámetro (sólo valores por defecto de la interfaz ARCSWAT). Los caudales simulados conservan la tendencia de los datos observados, evidenciándose un desplazamiento aproximadamente constante en el eje vertical del gráfico, que es más evidente en la época de invierno. Este desplazamiento se debe al poco número de estaciones meteorológicas cercanas a la microcuenca de estudio, lo que impide representar la distribución de precipitaciones en la microcuenca de una manera más real.
- 3 Según los índices estadísticos, se pudo determinar que la eficiencia resultó adecuada en base a los criterios propuestos Ramanarayanan (1997) y de Moriasi (2007), para la evaluación de modelos hidrológicos. Se encontraron buenas eficiencias a escala mensual (R^2 : 0,86; R^2 ENS: 0,6) y pobres a escala diaria (R^2 : 0,12; R^2 ENS: 0,41).

2.9. RECOMENDACIONES

1. Es recomendable obtener el mayor número de estaciones meteorológicas dentro de la cuenca, lo cual permitirá abastecer al modelo de mejores insumos.
2. Para futuros trabajos, se debe contar con información más detallada de los suelos en la Microcuenca. Esto permitirá contar con una mejor base de datos, puesto que las variables de suelos, son las que más influyen en la confiabilidad y precisión de los resultados
3. Es recomendable tener una copia de los datos que abastecen el modelo. Considerando que el mismo tiene grandes problemas de compatibilidad con algunas versiones de Windows. Se deben concentrar los datos de entrada en una carpeta con el nombre de DATA y generar una carpeta con el nombre SWAT con el número de corrida y una subcarpeta MODEL, el cual contendrá los archivos de salida.
4. Es recomendable explorar las distintas opciones que proporciona la interfaz ARCSWAT, ya que provee de muchas herramientas, como el cálculo de erosión y otras variables del ciclo hidrológico y así abastecer de mejores insumos en los proyectos aprovechamiento y manejo adecuado del recurso hídrico.

2.10. BIBLIOGRAFÍA

1. Araujo, RM. 2013. Estación Montecristo Salvador, meteorología (correo electrónico). San Salvador. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (raraujo@marn.gob.sv).
2. Argota Quiroz, TQ. 2011. Simulación hidrológica de la cuenca del río Amajac, estado de Hidalgo aplicando el modelo SWAT (en línea). México, Institucional Instituto Politécnico Nacional. Consultado 30 oct 2012. Disponible en <http://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/5819/TRINIDAD%20ARGOTA%20QUIROZ.pdf?sequence=1>
3. Arrueta Antequera, MM. 2009. Balance hídrico y análisis de las relaciones precipitación-escorrentía en la microcuenca de la quebrada El Gallo, San Antonio Oriente (en línea). Honduras, Escuela Agrícola Panamericana El Zamorano. Consultado 18 nov 2013. Disponible en <http://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/259/1/T2730.pdf>
4. Cadena hortofrutícola, CO. 2008. Cadenas del sector hortofrutícola de Córdoba (en línea). Colombia, Cadenas del sector hortofrutícola de Córdoba. Consultado 30 oct 2013. Disponible en <https://www.dnp.gov.co/Portals/0/archivos/documentos/DDE/Hortofruticola.pdf>
5. Fong García, MA. 2010. Proyecto SINREM, cuenca del río Atulapa, Esquipulas, Chiquimula, Comisión Trinacional del Plan Trifinio y Universidad de San Carlos de Guatemala (en línea). Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 164 p. Consultado 12 set 2013. Disponible en http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/01/01_2604.pdf
6. IARNA (Universidad Rafael Landívar, Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente, GT). 2004. Elementos esenciales para la compilación del sistema de contabilidad ambiental y económica integrada de Guatemala (en línea). Guatemala. Consultado 5 ene 2014. Disponible en <http://biblio3.url.edu.gt/IARNA/SERIETECNINCA/25.pdf>
7. IGN (Instituto Geográfico Nacional, GT). 2010a. Mapa topográfico de la república de Guatemala: hoja Cerro Montecristo, no. 2359-III. Guatemala. Esc. 1:50,000. Color.
8. _____. 2010b. Mapa topográfico de la república de Guatemala: hoja Esquipulas, no. 2359-IV. Guatemala. Esc. 1:50,000. Color.
9. INE (Instituto Nacional de Estadística). 2002. XI censo nacional de población, IV de habitación. Guatemala. 1 CD.

10. INSIVUMEH (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, GT). 2013. Registro de datos climáticos, Guatemala 1972-2012. Guatemala. s.p.
11. López López, AL; Delgado Soriano, KA. 2009. Modelación hidrológica de la subcuenca Lempa alto (en línea). Honduras, Construcción de Capacidades en el Manejo Integrado de Agua y Areas Costeras. Consultado 12 set 2013. Disponible en <http://www.pnuma.org/agua-miaac/SUBREGIONAL%20MESO/MATERIAL%20ADICIONAL/BIBLIOGRAFIA- WEBGRAFIA/Modulo%20%20Herramientas%20claves%20para%20el%20MIAAC/ Balance%20hidrico%20y%20caudal%20ecologico/Doc%204.%20TESIS%20UNIVERSIDAD.pdf>
12. Moriasi, DN; Arnold, JG; Van Liew, MW; Bingner, RL; Harmel, RD; Veith, TL. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations (en línea). Texas, US, APEX (The Agricultural Policy / Environmental Extender). Consultado 5 ene 2014. Disponible en <http://swat.tamu.edu/media/1312/moriasimodelevel.pdf>
13. Municipalidad de Esquipulas, GT. 2005. Diagnóstico municipal: información general del municipio. Guatemala. 98p.
14. _____. 2012. Diagnóstico ambiental municipal Esquipulas 2012 (en línea). Esquipulas, Chiquimula, Guatemala, SIAM. Consultado 20 ago 2013. Disponible en http://www.infoambiental.org/siam/index.php/bbd-estudios/455-diagn%C3%B3stico-ambiental-municipal-esquipulas-ugam-2012?contentbuilder_download_file=18055b60dfbd5ad9427abb40f947078246431f6a
15. Nash, JE. Sutcliffe, JV. 1970. River flow forecasting through conceptual models, part 1A discussion of principles. (en línea) Agricultural Research Service. Consultado 5 ene 2014. Disponible en [ftp://www.lwr.kth.se/Common/UllaM/For_Imran/\[1970\]%20river%20flow%20forecasting%20through%20conceptual%20models%20part%20i%20-%20a%20discuss%20of%20principles.pdf](ftp://www.lwr.kth.se/Common/UllaM/For_Imran/[1970]%20river%20flow%20forecasting%20through%20conceptual%20models%20part%20i%20-%20a%20discuss%20of%20principles.pdf)
16. Neitsch, SL; Arnold, JG; Kiniry, JR; Srinivasan, R; Williams, JR. 2010. Soil and water assessment tool: input/output file documentation, version 2009 (en línea). T Agricultural Research Service. Consultado 10 ago 2013. Disponible en <http://swat.tamu.edu/media/19754/swat-io-2009.pdf>
17. Ponce, MV, 2005. Apuntes de hidrológica del curso de grado de ingeniería civil (en línea). Argentina, Universidad Nacional del Nordeste de Argentina, Facultad de Ingeniería. Consultado 29 oct 2013. Disponible en http://ing.unne.edu.ar/pub/Modelos%20hidrologicos_Tema9.pdf

18. Ramanarayanan, TS; Williams, JR; Dugas, WA; Hauck, LM; MacFarland, AM. 1997. Waste management: part I model description and validation (en línea). Texas, US, APEX (The Agricultural Policy / Environmental Extender). Consultado 5 ene 2014. Disponible en <http://apex.tamu.edu/media/1631/ramana.pdf>
19. Sánchez Orta, S. 2010 Caracterización morfométrica y simulación del balance de la cuenca "Tres Valles, SLP" (en línea). Chapingo, México, Colegio de Postgraduados de México. Consultado 30 set 2013. Disponible en <http://www.biblio.colpos.mx:8080/jspui/handle/10521/160>
20. Sokolov, AA; Chapman, TG. 1981. Métodos de cálculo del balance hídrico: guía internacional de investigación y métodos (en línea). Francia, Comité Nacional Francés de la AICH. Consultado 18 nov 2013. Disponible en http://hydrologie.org/BIB/Publ_UNESCO/SR_017_S_1981.pdf
21. Te Chow, V; Maidment, DR; Larry, W. 1994. Hidrología aplicada (en línea). España, Scrib. Consultado 5 ene 2014. Disponible en <http://es.scribd.com/doc/119943892/Hidrologia-Aplicada-Ven-Te-Chow>
22. Torres Benites, E; Fernández Reynoso, DS; Oropeza Mota, JL; Mejía Saenz, E. 2004. Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca "El Tejocote", Atlacomulco, estado de México (en línea). México, Instituto Politécnico Nacional. Consultado 30 oct 2013. Disponible en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57311096007>
23. Uribe, N. 2010. Conceptos básicos y guía rápida para el usuario SWAT 2005 (en línea). T Agricultural Research Service. Consultado 10 ago 2013. Disponible en <http://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>
24. Vision Mundial, CR. 2004. Manual de manejo de cuencas (en línea). Costa Rica, CATIE. 60p. Consultado 12 dic 2013, Disponible en http://biblioteca.catie.ac.cr/cursocuencas/documentos/Manual_de_Manejo_de_Cuencas_Vision_Mundial_mod.pdf
25. Zabala, NG. 2007. Centro Cultural Esquipulas, Chiquimula. Esquipulas, Chiquimula, Guatemala. Esquipulas, Chiquimula, Guatemala, Municipalidad de Esquipulas. 40 p.
26. Zeissig Davila, AM. 2007. La situación socioeconómica, caracterización hidromorfológica y uso actual del recurso suelo de la subcuenca del río Panimá, Purulhá, Baja Verapaz (en línea). Tesis Inga. Agra. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 171 p. Consultado 30 oct 2013. Disponible en http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/01/01_2308.pdf

CAPÍTULO III
SERVICIOS REALIZADOS

3.1 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se realizó en las instalaciones del Instituto Geográfico Nacional, durante los meses comprendidos entre febrero y noviembre de 2013, desarrollando una serie de servicios, que proporcionaron apoyo técnico y científico en la ejecución de algunos de los proyectos de dicho instituto. Según las necesidades en ese período, las actividades de servicio realizadas fueron:

- Preparación de información geográfica para la establecimiento del geoportal, del Instituto Geográfico Nacional Ing. Alfredo Álvarez Obiol –IGN-
- Determinación de características morfométricas de la Cuenca Del Rio Ocosito, con sistemas de información geográficos.

La propuesta de dichos servicios, pretende la solución de algunos problemas identificados en el diagnóstico, específicamente la falta de nuevos servicios que el instituto pueda ofrecer al público.

3.2 PREPARACIÓN DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ESTABLECIMIENTO DEL GEOPORTAL DEL INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL ING. ALFREDO ÁLVAREZ OBIOL –IGN-

Esta sección incluye temas relacionados al establecimiento de un geoportal para el Instituto Geográfico Nacional Ing. Alfredo Álvarez Obiol –IGN-

3.2.1 MARCO CONCEPTUAL

3.2.1.1 Información Geográfica

Información geográfica hace referencia a cualquier material con una posición global, como ejemplos se pueden citar los mapas, imágenes de satélite, fotografías aéreas, archivos y ahora con el uso de la tecnología, cualquier fotografía con una posición establecida por un GPS, es decir cualquier tipo de archivo con una posición geográfica.

De cierto modo, la información geográfica puede representarse desde un análisis muy general hasta un análisis muy complejo. Un análisis general podría representar un mapa para indicarles al grupo de trabajo, donde se pueden reunir, interpretar un mapa que facilite la movilización hacia un destino, guiar a través de un navegador GPS, orientar la ruta a seguir durante una excursión, encontrar el camino más corto para ir a las actividades diarias.

La información geográfica ayuda a la planificación gubernamental local y global, por ejemplo determinar qué zonas del planeta sufren más los efectos del cambio climático, establecer un centro de salud en zonas donde actualmente no disponen de este servicio, etc.

Las empresas privadas también hacen uso de la información geográfica, ejemplo de esto es la determinación de zonas estratégicas, para colocar una nueva sede de la compañía, monitorear el traslado de productos en tiempo real, etc.

Cada uno de estos casos necesitan análisis y resolución de problemas, para que la información sea más efectiva, es aquí donde se utiliza el siguiente termino: “Sistemas de información geográficos”, conocidos como SIG.

3.2.1.2 Sistema de Información Geográfica (SIG)

Un sistema de información geográfica, es un sistema para la gestión, análisis y visualización de conocimiento, que se estructura en diferentes conjuntos de información, entre los que se pueden mencionar:

- Mapas Interactivos

Proporciona una visión interactiva de la información geográfica, que permite dar respuestas. Los mapas proporcionan al usuario, las herramientas necesarias para interactuar con la información geográfica.

- Datos geográficos

En la base de datos, se incluye información vectorial y raster, modelos digitales del terreno, redes lineales, información procedente de estudios topográficos, topologías y atributos.

- Modelos de geoprocésamiento

Son flujos de procesos, que permiten automatizar tareas que se repiten con frecuencia, pudiendo enlazar unos modelos con otros.

- Modelos de datos

La información geográfica en la geodatabase, es algo más que un conjunto de tablas almacenadas en un sistema gestor de base de datos. Incorpora, al igual que otros sistemas de información, reglas de comportamiento e integridad de la información. Tanto el esquema como el comportamiento y las reglas de integridad de la información geográfica, juegan un papel fundamental en un sistema de información geográfica.

El manejo de los diferentes grupos de información geográfica, presenta cierta complejidad si se quiere explotar su potencial. Comparación de datos, edición a distintas escalas, reproyectar la información de posición geográfica, se realiza en la actualidad con mayor rapidez, gracias a la ayuda de los denominados programas o software SIG o GIS.

3.2.1.3 Que es un Geoportal?

Es un sitio Web, que funciona en su totalidad con un conjunto de componentes de aplicación, que permiten la publicación, detección y uso de los documentos de metadatos, basados en estándares que describen los servicios y datasets geográficos. Un geoportal permite la unión de varios componentes con el objetivo de visualizar productos geográficos.

3.2.1.4 Componentes de un Geoportal

A continuación se enlistan los componentes que conforman un geoportal:

- Datos
- Metadatos
- Estándares
- Servicios
- Software

3.2.1.5 Datos

Existe un consenso internacional para clasificar los datos espaciales en dos tipos:

Datos de Referencia: Son los que forman el Mapa Base o mapa sobre el que se referencian los datos temáticos, como por ejemplo: el sistema coordinado, las redes de transporte, la red hidrológica, el relieve, los límites administrativos, etc.



Figura 41: Mapa de Carreteras de Guatemala.

Datos Temáticos: Son datos que proporcionan información sobre un fenómeno concreto: clima, educación, industria, vegetación, población, etc.

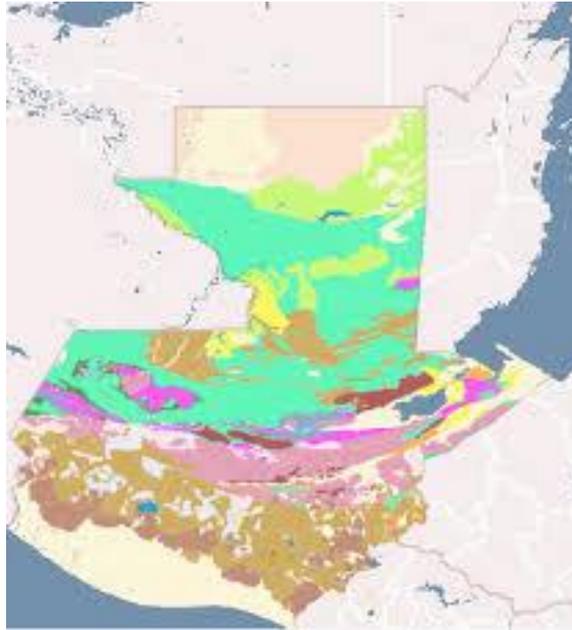


Figura 42: Mapa de zonas de Vida de Guatemala.

3.2.1.6 Metadatos

Son los datos que describen la información geográfica, facilitando información como propietarios, formato, sistema de coordenadas, extensión, etc. de la información geográfica. Los Metadatos brindan información a los usuarios, sobre las características de los datos geográficos. Ofrecen información sobre:

- Título y descripción del conjunto de datos.
- Fecha de creación del conjunto de datos y los ciclos actualizados si existen.
- Responsable de la generación de los datos, del suministrador de los datos y posiblemente de los usuarios a los que van dirigidos.
- La extensión geográfica de los datos, basada en coordenadas, nombres geográficos o áreas administrativas.
- Propietario de los datos
- Calidad de los datos
- Entre otros.

Los principales beneficios que ofrecen los metadatos asociados a la información geográfica son:

- Brinda al usuario un resumen de datos útiles y a determinar cuál es la mejor forma de utilizarlos.
- Se reduce el esfuerzo y el tiempo de trabajo ante posibles cambios de personal.
- Facilita la comprensión de un conjunto de datos desarrollado por otra persona.
- Los datos serán tanto más válidos cuanto más documentación adjunta dispongan.
- Los metadatos conservan el contexto en el que fueron creados los datos.
- Los metadatos facilitan el compartir datos con otros organismos.

La Norma ISO que determina los Metadatos de la información geográfica, es la ISO 19115 “Geographic information – Metadata”.

La ISO19115 “Geographic information – Metadata”, es la norma Internacional de metadatos perteneciente a la familia ISO 19100, que proporciona un modelo de Metadatos y establece un conjunto común de terminología, definiciones y procedimientos de ampliación para Metadatos.

3.2.1.7 Estándares

Un estándar es una especificación dada por una autoridad, acerca de una materia.

A. Estándares web

Es un término muy general utilizado para referirse a estándares y otras especificaciones técnicas, que definen y describen aspectos de la World Wide Web. En años recientes, el término ha sido frecuentemente asociado con la tendencia de aprobar un conjunto de mejores prácticas estandarizadas, para construir sitios web y a la filosofía del diseño y desarrollo web que incluye esos métodos.

La creación y adopción de estándares, hace posible la interoperabilidad y que los sistemas se entienden. Según Wikipedia Interoperabilidad “Es la condición mediante la cual sistemas homogéneos pueden intercambiar procesos o datos”.

Estandarización favorece al proceso de interoperabilidad. Se debe estandarizar todo lo que esté relacionado con el proceso de compartir información:

- Formato de intercambio: Un formato estándar para el intercambio de los datos geográficos
- Descripción de los datos: Metadatos (ISO)
- Especificación de Servicios: instrucciones específicas y consensuadas para que los diferentes componentes informáticos puedan entenderse entre sí, permitiendo la interoperabilidad de contenidos y servicios

3.2.1.8 GeoServicios

A. ¿Qué es un Servicio Web?

Un Servicio Web permite el acceso del usuario a información ubicada en servidores remotos. Este acceso se produce de una manera estándar y a través de cualquier aplicación compatible, sin necesidad de tener que descargar ninguna en local.

B. ¿Qué es un GeoServicio?

Es un Servicio Web específico, que permite intercambiar información únicamente de componente geográfica.



Figura 43: Dinámica de un Geoportal.

Los GeoServicios ofrecen funcionalidades accesibles vía Internet, con un simple navegador o browser, sin necesidad de disponer de otro software específico. Los GeoServicios más importantes de un Geoportal son los siguientes:

- Servicio de Mapas en Web (WMS)

Permite la visualización de cartografía generada, a partir de una o varias fuentes: fichero de datos de un SIG, un mapa digital, una ortofoto, una imagen de satélite, etc. Se puede consultar cierta información disponible acerca del contenido de la cartografía que se visualiza.

- Servicio de Fenómenos en la Web (WFS)

Permite acceder a los datos en formato vectorial, mediante el empleo del formato de un lenguaje específico, denominado GML (Geographic Markup Language). Se accede al archivo que define la geometría descrita, por un conjunto de coordenadas de un objeto cartográfico, como un río, una ciudad, un lago, etc

- Servicio de Coberturas en Web (WCS)

Es un servicio similar a WFS, para datos en formato ráster, el cual permite consultar el valor del atributos o atributos almacenados en cada píxel.

- Servicio de Catálogo (CSW)

Permite publicar y buscar información de datos, servicios, aplicaciones y en general de todo tipo de recursos. Permite la gestión de los Metadatos, descriptores de los datos (“datos de los datos”), para llevar a cabo búsquedas.

- Servicio de Nomenclátor (Gazetteer)

Permite localizar un fenómeno geográfico mediante su nombre, en base a la interrogación de listas de nombres geográficos, los llamados Nomenclátors, que vinculan coordenadas geográficas a cada nombre. Devuelve la localización, mediante unas coordenadas, del fenómeno localizado. La consulta por nombre permite fijar otros criterios, como la extensión espacial en que se desea buscar o el tipo de fenómeno, dentro de una lista disponible (río, montaña, población)

3.2.2 OBJETIVOS

3.2.2.1 Objetivo General

- Preparar información Geográfica que cumpla con los estándares para la implementación de un geoportal.

3.2.2.2 Objetivos Específicos

- Recopilar información geográfica en formato digital para su visualización en un geoportal.
- Modificar la Información Geográfica recopilada para el cumplimiento de estándares internacionales.

3.2.3 METODOLOGÍA

La implementación de un geoportal se puede dividir en dos fases metodológicas:

3.2.3.1 Fase del procesamiento de información geográfica

- **Recopilar**

El proceso de recopilación de información consistió en la búsqueda de las capas, en formato vectorial y raster, en la base de datos de IGN. Estos archivos digitales, fueron reubicados dentro de carpetas individuales que respondían a sus nombres. Para la primera fase del geoportal se enlisto el primer set de capas a publicar.

- ✓ Zonas de Vida de Holdridge
- ✓ Cobertura y Uso de la Tierra
- ✓ Clasificación Taxonómica de Suelos
- ✓ Geológico
- ✓ Ecorregiones Terrestres

- **Depurar**

El proceso de la depuración de la información recopilada, permitió reducir el número de capas digitales, ya que algunos temas o capas temáticas fueron elaborados por varias instituciones, por lo que se llegó a un consenso, para seleccionar la capa que debía ser publicada.

Este consenso también fue aplicado para la temática de Cobertura y Uso de la Tierra, el cual tenía trabajos similares de distintas instituciones, dentro de las cuales se mencionan a continuación:

- ✓ Ocupación del Suelos IGN
- ✓ Uso y Cobertura de la Tierra MAGA
- ✓ Dinámicas forestales UVG

3.2.3.2 Fase de publicación de información geográfica

- **Estandarizar**

El proceso de estandarización se subdivide en otros procesos, que a continuación se enlistan:

- ✓ Re-proyección de Capas

La re-proyección de capas consiste en el cambio del sistema de coordenadas. Muchas de las capas digitales de la primera fase del geoportal, se encontraban en diferentes sistemas de coordenadas, con ayuda del software SIG, se aplicó a todas las capas, el sistema de coordenadas geográficas con Datum WGS 1984

- ✓ Generación de metadatos

La generación de metadatos se realizó con la ayuda del software CatMEdit. EL CatMEdit fue seleccionado, ya que este cumplía con las normas ISO 19115, en comparación con otro software de metadatos.

- ✓ Modificación de tabla de atributos

La edición o modificación de los campos de la tabla de atributos de las capas, se realizó con la ayuda de software SIG. En este caso, se utilizó la plataforma ArcMap, específicamente la herramienta “dissolve”, de los geoprocesamientos de ARCGIS.

- ✓ Asignación de estilos para cada atributo

La asignación de estilo se realizó con el software SIG QGIS. Este software permitió la generación del archivo SDL, el cual contiene los colores para cada atributo. Esto es necesario ya que son capas temáticas, por lo es necesario asignar estilos para cada categoría.

- **Publicar**

La última fase es publicación del material geográfico, la cual consiste en cargar todas las capas generadas, con sus estilos y metadatos al software Geoserver, este

software es gratuito y permite la generación de los geoservicios y la publicación en la web de los mismos.

3.2.4 RESULTADOS

Dentro de los resultados obtenidos, a partir de desarrollar las dos fases de la metodología mencionada anteriormente, se presentan las capas que fueron seleccionadas para la primera fase y su visualización.

3.2.4.1 Zonas de Vida de Holdridge

Con la herramienta “dissolve” de los geoprocесamientos de ARCGIS, se editó la tabla de atributos, dejando los siguientes campos:

- ZONAS
- ZVIDAS

Para la selección de los colores para el tema de “Zonas de Vida de Holdridge”, se utilizaron los AVL de MAGA. Se generaron archivos LYR, para guardar los estilos y se generaron en QGIS los SDL.

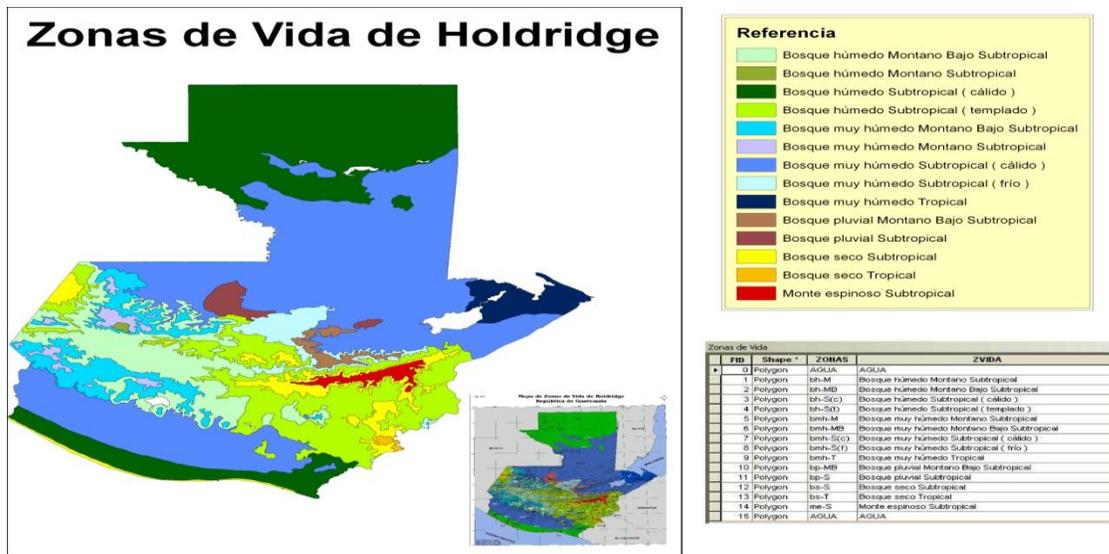


Figura 44: Mapa de Zonas de Vida de Holdridge.

3.2.4.2 Cobertura y Uso de la Tierra

Con la herramienta “dissolve”, de los geoprocесamientos de ARCGIS, se editó la tabla de atributos dejando los siguientes campos:

- GRIDCODE
- S_VALUE

Para la selección de los colores, para el tema de “Cobertura y Uso de la Tierra”, se utilizaron los AVL de MAGA. Se generaron archivos LYR, para guardar los estilos y se generaron los SDL.

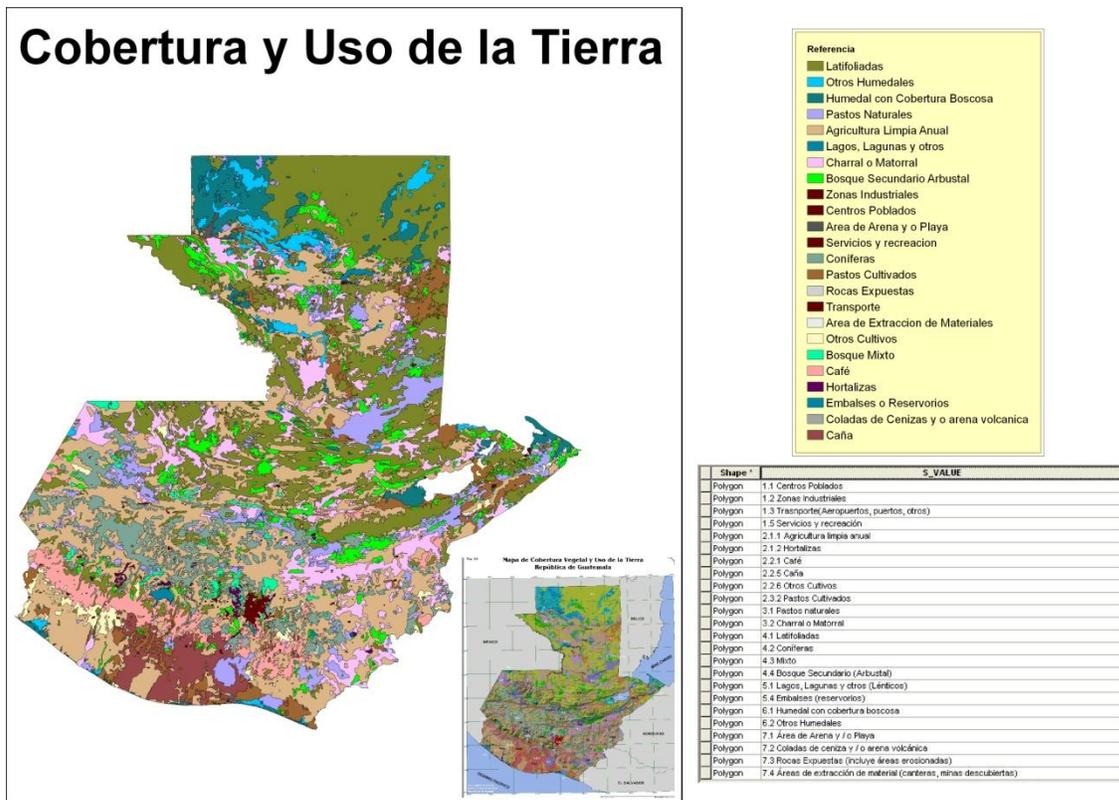


Figura 45: Mapa de Cobertura y Uso de la Tierra.

3.2.4.3 Clasificación Taxonómica de Suelos

Con la herramienta “dissolve”, de los geoprocесamientos de ARCGIS, se editó la tabla de atributos dejando los siguientes campos:

- ORDEN

Para la selección de los colores, para el tema de “Clasificación Taxonómica de Suelos”, se utilizaron los AVL de MAGA. Se generaron archivos LYR, para guardar los estilos y se generaron los SDL.

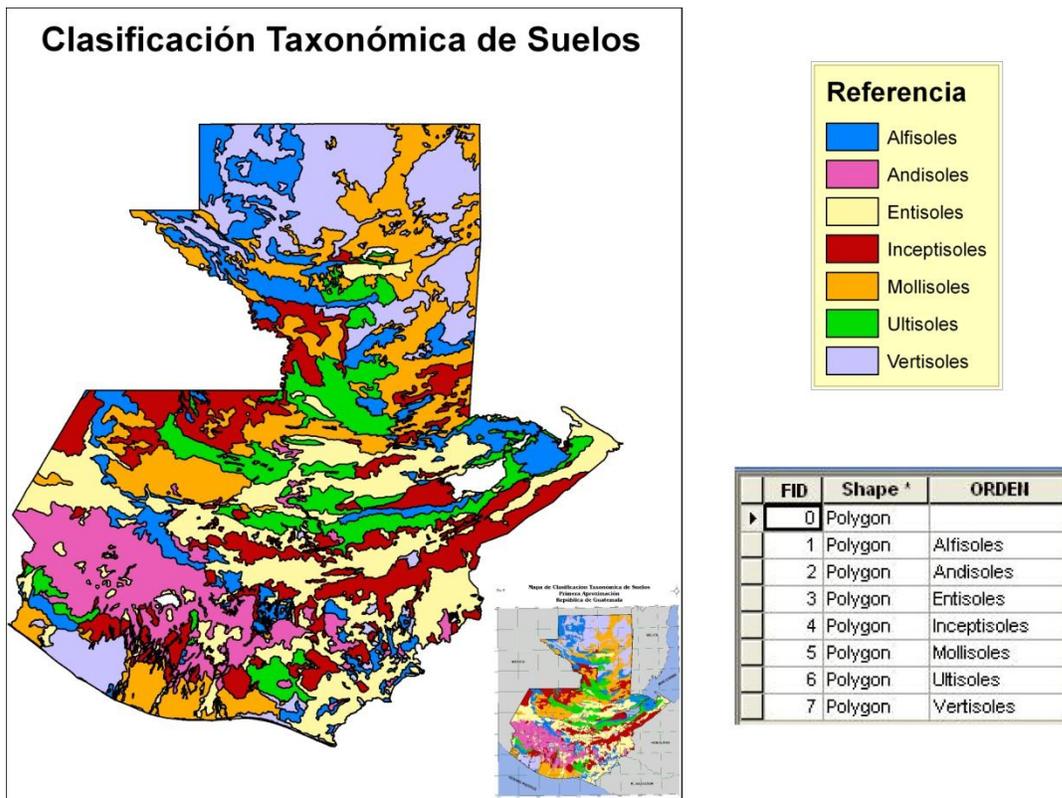


Figura 46: Mapa de Clasificación Taxonómica de Suelos.

3.2.4.4 Geológico

Con la herramienta “dissolve”, de los geoprocесamientos de ARCGIS, se editó la tabla de atributos dejando los siguientes campos:

- GEO
- TIPO_ROCA
- PERIODO

Para la selección de los colores para el tema de “Geología”, se utilizaron los AVL de MAGA. Se generaron archivos LYR, para guardar los estilos y se generaron los SDL.

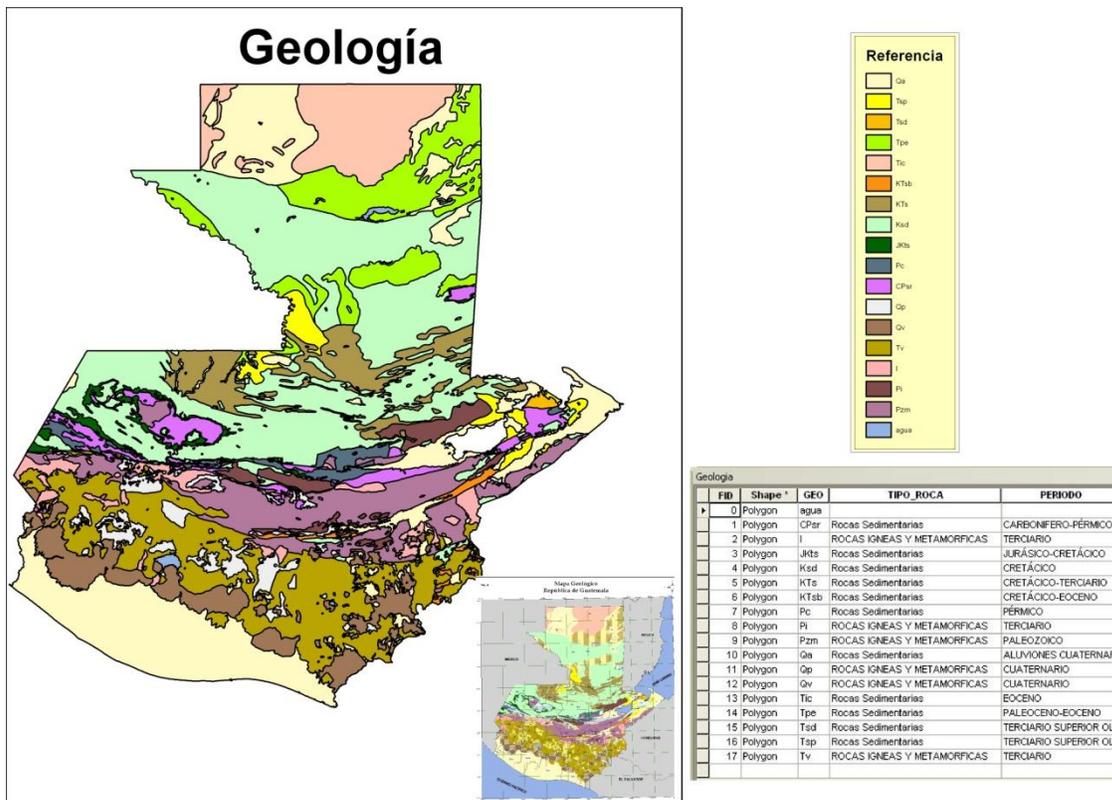


Figura 47: Mapa Geológico.

3.2.4.5 Ecorregiones Terrestres

Con la herramienta “dissolve”, de los geoprocесamientos de ARCGIS, se editó la tabla de atributos dejando los siguientes campos:

- ECORREGION

Para la selección de los colores, para el tema de “Ecorregiones Terrestres”, se utilizaron los estilos asignados por IARNA. Se generaron archivos LYR, para guardar los estilos y se generaron los SDL.

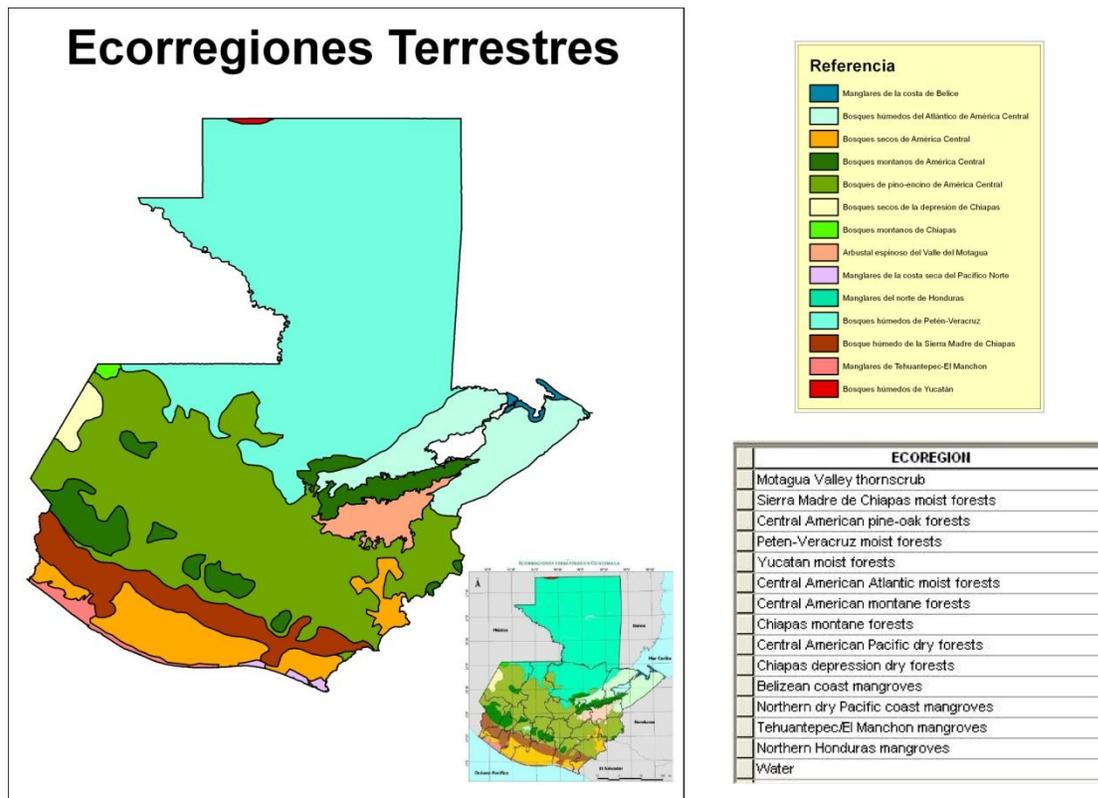


Figura 48: Mapa de Ecorregiones

3.2.5 EVALUACIÓN

El instituto Geográfico Nacional cuenta a partir del 2013, con un Geoportal. Dentro de la página www.ign.gob.gt, se pueden visualizar las capas que se elaboraron durante la primera fase del proyecto. Gracias a los logros alcanzados y a los comentarios hechos por los usuarios de los GeoServicios, ofrecidos por el geoportal de IGN, se ha completado la 1era y 2da. Fase del Geoportal en un 100%.

Este proyecto actualmente se encuentra en su 3era fase, en la cual se espera publicar más información geográfica, cumpliendo con los estándares internacionales y mejorar la interacción con el usuario. Dicho proyecto ha abierto un espacio virtual, para que las diferentes oficinas del instituto Geográfico Nacional, puedan publicar información generada por los mismos y a la vez proporcionarla para su comercialización.

3.2.6 RECOMENDACIONES

- Es recomendable enlazar los archivos generados en ARCGIS con los softwares utilizados para la generación del Geoportal. (División de Informática). Actualmente se realiza una parte en ARCGIS, luego se traslada la información en QuantumGIS y por último la información se traslada en el software CATMEDIT. Estas tres actividades se pueden realizar en ARCGIS, lo cual facilitaría la edición de los distintos temas para el GEOPORTAL.
- Someter a evaluación el uso de la herramienta gratuita de ESRI, para la creación y administración de Geoportales ESRI GEOPORTAL SERVER, para una segunda fase del proyecto, como una posible solución al problema anterior (compatibilidad ESRI-GEOSERVER).



Figura 49: ESRI Geoportal Server.

3.3. DETERMINACIÓN DE CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DE LA CUENCA DEL RIO OCOSITO, CON SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICOS.

3.3.3.1. INTRODUCCIÓN

Para el diseño de proyectos relacionados con el aprovechamiento de los recursos naturales, específicamente del agua, es de suma importancia disponer de adecuada información. Con el propósito de generar información básica para otras instituciones y usuarios que la requieran, se plantean generar la caracterización morfométrica del Rio Ocosito.

Este trabajo analizara algunas características morfométricas de la cuenca del río Ocosito, para establecer el comportamiento de la red de drenaje y la evolución topográfica e hipsométrica, asociada a la morfodinámica de la cuenca. A tal efecto, se emplearon mapas a escala 1:5000, para el cálculo de las mediciones básicas (superficie, perímetro, longitud de la cuenca, cauces, elevación, desnivel del cauce principal y número de cauces de menor orden), y de éstas se derivaron las variables utilizadas en la mayoría de los análisis morfométricos.

3.3.3.2. MARCO CONCEPTUAL

A. Características de la cuenca

La cuenca del río Ocosito se encuentra dentro de la vertiente del pacífico. Está limitada al norte y este por la Cuenca del río Samalá, al Norte y Oeste por la cuenca del río Naranjo y al sur, por el Océano Pacífico.

Por el área de su superficie 2049 km², representa el 8.50% del área de las cuencas que vierten sus aguas al Océano Pacífico, ocupando el cuarto lugar dentro de este sistema. Su superficie cubre total o parcialmente los departamentos y municipios que a continuación se indican:

- San Marcos:
 - ✓ Ocos
- Quetzaltenango:
 - ✓ Quetzaltenango
 - ✓ San Mateo
 - ✓ Concepción Chiquirichapa
 - ✓ San Martín Sacatepéquez
 - ✓ Colimba
 - ✓ El Palmar
 - ✓ Coatepeque
 - ✓ Flores Costa Cuca
 - ✓ Génova
- Retalhuleu:
 - ✓ Nuevo San Carlos
 - ✓ San Felipe Retalhuleu
 - ✓ El Asintal
 - ✓ San Sebastián
 - ✓ Retalhuleu
 - ✓ Champerico

Su ubicación en las hojas topográficas se enlista a continuación:

Cuadro 6: Hojas topográficas.

No.	Nombre	Hoja
1	MANCHON	1759-2
2	OCOS	1759-1
3	CIUDAD TECUN UMAN	1760-2
4	COATEPEQUE	1860-3
5	FLORES COSTA CUCA	1859-4
6	CABALLO BLANCO	1859-3
7	CHAMPERICO	1858-4
8	COLOMBA	1860-2
9	RETALHULEU	1859-1
10	SAN LORENZO	1859-2
11	BRACITOS	1858-1

Queda comprendida entre los paralelos 14°13´ y 14°50´ latitud Norte y los meridianos 91°35´ y 92°12´ longitud oeste.

Vías de comunicación

La red vial que se encuentra en el interior de la cuenca del Rio Ocosito, está formada entre otras, por la Carretera Centroamericana CA-2, 6W, 9s y 13, las Nacionales, las Departamentales No. 3, 4, 5, 7 y 11 y varias vecinales. La red vial se presenta densa al noreste de la cuenca, en tanto que el suroeste de la misma es escaso. No es de extrañar que la Red vial que está dentro de la cuenca, se encuentra en constante cambio, es por ello que en el presente año, se comenzaron los trabajos para la ampliación de la Carretera Centroamericana CA2.

Puertos Marítimos

En la costa que comprende la cuenca del Río Ocosito, se localiza el Puerto de Champerico, el cual es uno de los más importantes que posee Guatemala, en la vertiente del Océano Pacífico.

Aeropuertos

Son numerosas las pistas de aterrizaje que posee la cuenca, casi todas son de grama y están destinadas al servicio de las fincas bananeras y de palma africana y usos particulares de la región.

Posee además un aeropuerto de pistas asfaltadas, que pertenece a la cabecera municipal del Departamento de Retalhuleu.

Principales Accidentes Geográficos

- **Volcanes**

Los volcanes Chicabal (2900 MSNM) y siete Orejas (3200 MSNM) se localizan al Norte de la cuenca, al suroeste de la ciudad de Quetzaltenango. Presenta el volcán de Chicabal, la característica de tener en su cráter una laguna cuya superficie libre se encuentra a 2712 metros sobre el nivel del mar.

- **Lagunas**

La Laguna Chicabal, cuya superficie mide menos de 1 km², se localiza en el cráter del volcán del mismo nombre. Otras lagunas de interés son: El espejo, Guayaba, La Colorada, La Garita, Pampa Dulce, que se localizan al sur de la cuenca, en regiones pantanosas.

- **Ríos**

La cuenca se presenta densamente drenada al Norte y Este, en tanto que al sur y Oeste de la misma, especialmente al Sur, donde los pantanos y manglares predominan, los ríos tributarios decrecen en número.

Clima

Tres tipos de clima se presentan en la Cuenca del Rio Ocosito:

- a) Cálido (temperatura de 23.7°C o más)
- b) Semi cálido (18.7°C a 23.9 °C) y
- c) Templado (14.9°C a 18.7 °C)

Predomina el carácter de clima muy húmedo en la cuenca, exceptuando la región del norte a inmediaciones de Quetzaltenango, donde es menos húmedo. Por su tipo de variación de temperatura, se puede decir que no tiene estación fría bien definida y que esta situación predomina en casi toda la Cuenca. Por la distribución de la lluvia, las regiones donde la estación seca no está bien definida y la de invierno seco, se reparten en proporciones iguales aproximadamente.

Las clasificaciones anteriores obedecen a lo establecido por el sistema Thorntwaite.

3.3.4. OBJETIVOS

3.3.4.1. Objetivo General

- Realizar la caracterización morfométrica de la cuenca del río Ocosito.

3.3.4.2. Objetivos Específicos

- Realizar un análisis morfométrico que incluya la hipsometría de la cuenca.
- Identificar sectores hidrográficos a fin de proponer una subdivisión práctica de la cuenca.

3.3.5. METODOLOGÍA

La caracterización de cuencas se puede dividir en dos fases metodológicas:

3.3.5.1. Fase del procesamiento de información geográfica

- **Revisión Bibliográfica**
 - ✓ Se realizó una búsqueda de información del área ya definida, con el propósito de analizar estudios previos del área.
- **Depurar**
 - ✓ Posterior a la revisión bibliográfica se recopilaron capas digitales, las cuales proporcionaron la primera aproximación del límite de la cuenca y subcuencas.
 - ✓ A partir de obtener las primeras capas del límite de la cuenca y de las subcuencas, se realizó del análisis de estos productos geográficos para mejorar el detalle de su digitalización.

Fase de análisis modelación hidrológica computarizada.

La segunda fase del proyecto consistió en el modelamiento de cuencas, por lo que se utilizaron las herramientas de ArcMap para completar el proyecto.

A continuación se describen los principales pasos a seguir para realizar el análisis morfométrico:

Modelo de elevación Digital

- Análisis y depuración de la información obtenida. Se procedió a homogenizar la información, tanto en coordenadas como en dimensionales, para saber qué resultados se obtuvieron.
- Conversión de archivos: la conversión de archivos implica la adopción de los archivos en formato .SHP y .GRID a formatos IMG y .VCT.
- Generación y corrección del modelo de elevación digital: apoyado de la herramientas "FILL", se logró las correcciones del archivo raster. Estas imperfecciones pueden ser a causa de la existencia de sumideros, lagunas, etc.

Generación de archivos compatibles con el software IDRISI

- ✓ Raster=IMG
- ✓ Vector=VCT
- Dirección de flujo: Partiendo del análisis y la corrección del modelo de elevación digital, se procedió a generar la dirección de flujo para cada celda, teniendo en cuenta la pendiente del terreno y las celdas vecinas. Para este procedimiento se utilizó la herramienta "FLOW DIRECTION"
- Acumulación de Flujo: Con el raster que indica la dirección de flujo, se procedió a calcular la red hídrica en formato raster. Esta información permite calcular la acumulación de flujo, partiendo de los criterios de pendientes y las celdas vecinas. Para este procedimiento se utilizó la herramienta "FLOW ACCUMULATION".
- Delimitación de subcuencas con la herramienta "Catchment Grid Delination". Se obtuvieron las diferentes sub cuencas. Las que posteriormente se convirtieron a formato vectorial, con la herramienta "RASTER TO POLYGON".

- Generación de proyectos de trabajo por subcuenca. En IDRISI: se procedió a generar carpetas que contendrían las capas y los resultados generados a partir del modelamiento con IDRISI.
- Posterior a la generación se procedió a importar los archivos generados en la plataforma ARCMAP, estos archivos contienen el modelo de elevación del terreno y el límite de la cuenca.
- Proyección de los archivos. IDRISI requiere la conversión de coordenadas a un sistema plano, es recomendable trabajar en UTM.
- Vector a Raster. Se convirtió el límite de la cuenta a un formato raster y que el mismo adquiriera los valores del modelo de elevación, con la herramienta "CONVERT"
- Con la herramienta "INTEGRATED WATER MANAGEMENT", se procedió a realizar el modelamiento y calculo automático de los principales parámetros morfométricos.
- Se analizaron los resultados para cada Subcuenca, contenido en las carpetas generados para cada proyecto y se trasladaron los datos a un archivo de Excel, para ser presentados.

3.3.6. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos a partir de las dos fases de la metodología mencionadas anteriormente. Se presentan las tablas resumen, de los parámetros morfométricos obtenidos a partir de la modelación hidrológica por subcuencas, obtenidas del modelo de elevación digital.

Cuadro 7: Características morfométricas Subcuenca 1

CARACTERÍSTICAS DE SUPERFICIE		
Área		215.37
Perímetro de la cuenca		120.96
Parámetros Asociados a la Longitud		
<i>Longitud de la cuenca</i>		36.65
Longitud del Cauce Principal		47.61
Longitud Recta del Cauce Principal		35.96
Forma de la Cuenca		
Índice Gravelius o Índice de compacidad		2.35
Índice de Horton		0.17
Relación elongación		0.46
Relación circular (Rc)		0.18
Parámetros Asociados a la Red Hídrica		
Densidad de Drenaje		
Numero de orden de corrientes		0
Longitud del eje del rio principal en Km		47.61
Longitud directa del rio principal en km		35.96
Altitud Máxima del rio Principal en Msnm		2601.00
Altitud mínima del rio principal en msnm		79.00
Pendiente Promedio del rio principal		6.93
Coefficiente de sinuosidad hidráulico		1.32
Longitud de cauces		
Centroide GTM		
X centroide		368090.3
Y centroide		1620094
Z centroide		1150
Elevación		
Cota máxima		2883
Cota mínima		79
Elevación Media de la cuenca		708.12

Relación hipsométrica		3.35
Características de Relieve		
Pendiente media de la cuenca en grados		11.47
Pendiente media de la cuenca %		21.72
Pendiente Promedio del rio principal		6.93
Gráficos		
Curva Hipsométrica		
Perfil Longitudinal del Cauce Principal		
Tiempo de concentración de Kirpich en horas		4.01
Tiempo de concentración en California Highways and public works en horas		4.03

Cuadro 8: Características morfométricas Subcuenca 2

CARACTERÍSTICAS DE SUPERFICIE		
Área		131.43
Perímetro de la cuenca		119.56
Parámetros Asociados a la Longitud		
<i>Longitud de la cuenca</i>		25.33
Longitud del Cauce Principal		33.15
Longitud Recta del Cauce Principal		21.74
Forma de la Cuenca		
Índice Gravelius o Índice de compacidad		2.97
Índice de Horton		0.28
Relación elongación		0.46
Relación circular (Rc)		0.11
Parámetros Asociados a la Red Hídrica		
Densidad de Drenaje		
Numero de orden de corrientes		0
Longitud del eje del rio principal en Km		33.15
Longitud directa del rio principal en km		21.74
Altitud Máxima del rio Principal en Msnm		678.00
Altitud mínima del rio principal en msnm		30.00
Pendiente Promedio del rio principal		2.68
Coficiente de sinuosidad hidráulico		1.15
Longitud de cauces		
Centroide GTM		
X centroide		356892

Y centroide		1610599
Z centroide		294
Elevación		
Cota máxima		761
Cota mínima		19
Elevación Media de la cuenca		173.59
Relación hipsométrica		3.79
Características de Relieve		
Pendiente media de la cuenca en grados		3.11
Pendiente media de la cuenca %		5.49
Pendiente Promedio del rio principal		2.68
Gráficos		
Curva Hipsométrica		
Perfil Longitudinal del Cauce Principal		
Tiempo de concentración de Kirpich en horas		4.45
Tiempo de concentración en California Highways and public works en horas		4.47

Cuadro 9: Características morfométricas Subcuenca 3

CARACTERÍSTICAS DE SUPERFICIE		
Área		96.36
Perímetro de la cuenca		83
Parámetros Asociados a la Longitud		
<i>Longitud de la cuenca</i>		26.40
Longitud del Cauce Principal		31.42
Longitud Recta del Cauce Principal		24.41
Forma de la Cuenca		
Índice Gravelius o Índice de compacidad		2.40
Índice de Horton		0.16
Relación elongación		0.57
Relación circular (Rc)		0.17
Parámetros Asociados a la Red Hídrica		
Densidad de Drenaje		
Numero de orden de corrientes		0
Longitud del eje del rio principal en Km		31.42
Longitud directa del rio principal en km		24.41
Altitud Máxima del rio Principal en Msnm		911.00
Altitud mínima del rio principal en msnm		30.00

Pendiente Promedio del rio principal		3.79
Coefficiente de sinuosidad hidráulico		1.29
Longitud de cauces		
Centroide GTM		
X centroide		354427.21
Y centroide		1615517.08
Z centroide		399
Elevación		
Cota máxima		983
Cota mínima		19
Elevación Media de la cuenca		282.43
Relación hipsométrica		2.64
Características de Relieve		
Pendiente media de la cuenca en grados		4.74
Pendiente media de la cuenca %		8.41
Pendiente Promedio del rio principal		3.79
Gráficos		
Curva Hipsométrica		
Perfil Longitudinal del Cauce Principal		
Tiempo de concentración de Kirpich en horas		3.72
Tiempo de concentración en California Highways and public works en horas		3.74

3.3.7. EVALUACION

A partir del 2013, la división de información Geográfica del Instituto Geográfico Nacional, aplico una nueva metodología para la determinación de características morfométricas de Cuencas. Esta metodología genera información precisa y en formato digital. Cabe resaltar que este tipo de proyectos no se hacían dentro de la División, por lo que se considera como un nuevo producto de IGN.

El proyecto de Caracterización Morfométrica del Rio Ocosito, se ha completado en un 100%, debido al interés que demandan los usuarios por esta información. Como proyectos para el 2014, se encuentra ejecutando el proyecto de cuencas, en el área del Río Los Esclavos.

3.3.8. RECOMENDACIONES

- Dentro de las recomendaciones es válido mencionar que la ejecución de este tipo de proyectos, pone a la vanguardia en investigaciones al Instituto Geográfico Nacional, ya que este tipo de metodologías aún no han sido aplicadas en nuestro país.
- La recolección de información primaria y secundaria, es de mucha importancia para este tipo de proyectos, ya que de esta dependerá el grado de detalle que se presentaran los resultados.
- Es recomendable tener en claro las escalas de trabajo, para no mezclar información detallada con información muy generalizada. Este error es común e influye mucho en la presentación de resultados.