

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO.
DIRECCIÓN DE POSGRADO
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA U. ZAC.

**SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA
DEL RIO AMAJAC, ESTADO DE HIDALGO
APLICANDO EL MODELO SWAT.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
**MAESTRO EN CIENCIAS
EN HIDRÁULICA**

P R E S E N T A

TRINIDAD ARGOTA QUIROZ

DIRECTORES DE TESIS

M. en C. PINO DURÁN ESCAMILLA

M. en C. LUCIO FRAGOSO SANDOVAL



MÉXICO D.F., OCTUBRE 27 DEL 2011



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México D. F. siendo las 14:00 horas del día 13 del mes de octubre del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E.S.I.A.-U.Z. para examinar la tesis titulada:

"SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RIO AMAJAC, ESTADO DE HIDALGO
APLICANDO EL MODELO SWAT"

Presentada por el alumno:

| | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| <u>Argota</u> Apellido paterno | <u>Quiroz</u> Apellido materno | <u>Trinidad</u> Nombre(s) | | | | |
| Con registro: | | | | | | |
| <u>A</u> | <u>9</u> | <u>8</u> | <u>0</u> | <u>5</u> | <u>0</u> | <u>2</u> |

aspirante de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN HIDRÁULICA

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

M. en C. Pino Durán Escamilla

M. en C. Lucio Fragoso Sandoval

Dr. Juan Manuel Navarro Pineda

Dr. Mario Ulises Ramírez

M. en C. Jaime Roberto Ruiz y Zurvia Flores

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN

M. en C. Pino Durán Escamilla



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D.F. el día 17 del mes Octubre del año 2011, la que suscribe Trinidad Argota Quiroz alumna del Programa de Maestría en Ciencias en Hidráulica con número de registro A980502, adscrita la Maestría de Hidráulica, manifiesta que es autora intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de M en C. Pino Durán Escamilla y M en C. Lucio Fragoso Sandoval y cede los derechos del trabajo intitulado **“SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RIO AMAJAC, ESTADO DE HIDALGO APLICANDO EL MODELO SWAT”**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección targota@ipn.mx Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.



Ing. Trinidad Argota Quiroz

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Politécnico Nacional, Secretaria de Investigación y Posgrado por mi formación profesional y estudios de posgrado.

A mis profesores

M en C. Pino Durán Escamilla por guía del presente trabajo y su excelente análisis crítico.

M en C. Lucio Fragoso Sandoval por su respaldo en el presente trabajo y motivación gracias.

M en C. Jaime Roberto Ruiz y Zurvia Flores por su incondicional ayuda y acertadas sugerencias.

Al Dr. Juan Manuel Navarro Pineda, por su apoyo brindado.

Al Dr. Mario Ulloa Ramírez, por sus buenos consejos.

Al Dr. Miguel Ángel Vergara Sánchez

Al M en C Manuel Meneses

Al Dr. Sergio Cruz León

Para todos mis profesores mi más profundo agradecimiento y admiración a todos ellos.

A la memoria de mis padres Julia y Narciso

A mi esposo Arturo por su ayuda en las horas del trabajo porque sin su ayuda no sería posible este logro, invaluable

A mis hijos Daniel y Omar Arturo porque siempre me motivaron a seguir adelante, a sus esposas Ana Bel y Brenda

A mi nieto Christian que ha venido a darnos alegría a nuestras vidas

A mis queridos hermanos: Virginia, Mauro, Juan, Carmen, Bulmaro, Isabel, Andrés y Laura. Por sus agradables comentarios.

A mis cuñados Guadalupe, Enriqueta, Eduardo y Adriana por sus palabras de aliento.

Al Colegio de Postgraduados por su apoyo y la información obtenida

Al Dr. J. Enrique Rubiños Panta por su apoyo incondicional en mi trabajo de Tesis y su valioso tiempo mi más inmenso agradecimiento.

Al M en C. Armando Mata Espinoza por su paciencia, y sugerencias.

A la M.en C. Elibeth Torres Benites por su apoyo y consejos

A mis amigos Ings.: Diana, Agustina, Alfonso, Raúl y Modesto

Al Ing. José Luis Castro Montufar

Al M en C Humberto Cuevas Ochoa

A la Lic. Consuelo Abad Godínez

A mis compañeros Profesores de la Academia de Hidráulica

A mis estimados alumnos que ellos me motivan a ser cada día mejor ser humano y profesora.

"SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RIO AMAJAC, ESTADO DE HIDALGO APLICANDO EL MODELO SWAT".

I N D I C E

| | |
|--|-----|
| RESUMEN | x |
| ABSTRACT | xi |
| GLOSARIO | xii |
| JUSTIFICACIÓN | xiv |
| OBJETIVOS | xv |
| HIPÓTESIS | xv |
| CONTENIDO | xvi |
| 1. - INTRODUCCION | 1 |
| 1.1.-Hidrología. | 4 |
| 2.- CUENCAS | 10 |
| 2.1 manejo de cuencas | 10 |
| 2.2 Relación lluvia-escorrimento | 11 |
| 3. - ASPECTOS GENERALES SOBRE MODELOS | 13 |
| 3.1.- Clasificación general de los modelos. | 13 |
| 3.2. Modelos hidráulicos | 15 |
| 3.3. Modelos matemáticos hidrológicos | 16 |
| 3.4. Trascendencia de los modelos. | 17 |
| 3.5. El modelo hidrológico SWAT | 21 |
| 4. APLICACIÓN DEL MODELO SWAT A UN CASO REAL | 37 |
| 4.1 Caso de estudio: Cuenca del rio Amajac, Edo. de Hidalgo. | |
| 4.2 Descripción de la estación hidrométrica "Temamatla". | 40 |
| 4.3. Estudios del sitio | 41 |

| | |
|---|-----------|
| 4.4 Modelos de Elevación Digital | 60 |
| 4.5. El generador climático | |
| 4.6. Las estaciones climatológicas | 64 |
| 4.7. Los datos de suelos | 65 |
| 4.8. Desarrollo de la modelación hidrológica. | 73 |
| 4.9 Calibración y validación del modelo SWAT | 75 |
| 5. RESULTADOS. | 78 |
| 5.1 Primera simulación | |
| 5.2 Ajuste del modelo | |
| 5.3 Segunda simulación. | |
| 5.4 Condición hidrológica de la cuenca del río Amajac | |
| CONCLUSIONES. | 87 |
| RECOMENDACIONES | 89 |
| BIBLIOGRAFÍA | 90 |
| ANEXOS | 94 |

INDICE DE TABLAS

| Tabla | | Página |
|-------|--|--------|
| 1. | Municipios que conforman la cuenca del río Amajac, Hidalgo..... | 39 |
| 2. | Zonas fisiográficas en la cuenca del río Amajac, Hidalgo..... | 41 |
| 3. | Uso de suelo..... | 49 |
| 4 | Sistema Pachuca:..... | 50 |
| 5 | Sistema Central..... | 50 |
| 6 | Sistema Singuilucan - Zempoala..... | 51 |
| 7 | Sistema Epazoyucan..... | 51 |
| 8 | Modelos de Elevación Digital utilizados en la cuenca del río Amajac, Hidalgo | 61 |
| 9 | Estaciones climatológicas seleccionadas en la cuenca del río Amajac, Hidalgo | 66 |
| 10. | Parámetros más sensibles del modelo hidrológico SWAT..... | 80 |
| 11. | Comparación de estadísticos sobre la producción de agua en diferentes cuencas y modelos en la etapa de validación..... | 82 |
| 12 | Comparación de estadística de escurrimientos..... | 84 |
| 13 | Resumen de las variables simuladas por el modelo SWAT..... | 86 |

INDICE DE FIGURAS

| Fig. | | PAGINA |
|------|--|--------|
| 1 | Ciclo Hidrológico..... | 5 |
| 2 | La evaluación del agua (IMTA)..... | 7 |
| 3 | Clasificación de modelos..... | 14 |
| 4 | Diagrama de flujo de la operación del modelo SWAT a nivel diario..... | 25 |
| 5 | Componentes hidrológicos del modelo SWAT..... | 26 |
| 6 | Simulación del movimiento de agua por SWAT..... | 28 |
| 7 | Pantalla de inicio del Modelo SWAT..... | 35 |
| 8 | Requerimientos de entrada del SWAT..... | 36 |
| 9 | Localización de la Cuenca..... | 38 |
| 10 | Ríos de la Cuenca de Amajac..... | 44 |
| 11 | Tipos de Suelos en la Cuenca de Amajac..... | 45 |
| 12 | Tipos de Uso de suelos..... | 48 |
| 13 | Modelo de Elevación Digital..... | 62 |
| 14 | Diagrama de flujo metodológico. | 63 |
| 15 | Estaciones Climatológicas..... | 67 |
| 16 | Editor de base de datos de suelos en el modelo SWAT..... | 68 |
| 17 | Diagrama de flujo utilizado en la cuenca del río Amajac, Hidalgo..... | 76 |
| 18 | Procesamiento y despliegue de salidas de la interface AVSWAT..... | 77 |
| 19 | Dinámica y magnitud de los escurrimientos superficiales aforados y simulados en la primera simulación..... | 78 |
| 20 | Análisis de regresión de los escurrimientos medidos y simulados en la etapa de validación..... | 79 |

“SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RIO AMAJAC, ESTADO DE HIDALGO APLICANDO EL MODELO SWAT”.

RESUMEN

El presente trabajo aborda la modelación de la generación de avenidas de agua, los sedimentos y gastos medios de una cuenca hidrológica; para predecir la cantidad de los escurrimientos y sedimentos con el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool).

Para estos propósitos se aplicó el Sistema de Información Geográfica Arc-View. Del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) se tomaron los datos climatológicos para un periodo de diez años (1998-2008), se obtuvieron los datos hidrométricos en la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), para el mismo periodo; la cuenca en estudio cuenta con 24 unidades de suelo; los 19 modelos de elevación digital (MED) fueron suministrados por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) así como los 14 usos de suelo.

Los resultados del SWAT consideran a 12 subcuencas y 138 Unidades de Respuesta Hidrológica y mediante la comparación de los escurrimientos superficiales medidos y simulados, se realizó un análisis de regresión lineal, considerándose el mejor ajuste, el coeficiente de determinación $r^2 = 0.76$, la pendiente de la recta y el coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe.

Palabras clave: Simulación, producción de agua, modelo, hidrológico, SWAT.

A B S T R A C T

"HYDROLOGIC SIMULATION OF AMAJAC RIVER BASIN, HIDALGO STATE'S WITH SWAT MODEL"

This paper treats the modeling of the generation of avenues in water, sediments and media fees of a hydrological basin, to predict the amount of runoff and sediment with the SWAT (Soil and water Assessment Tool) model.

Will apply for this proposes the GIS (Geographic Information System) Arc-View software was utilized. The Servicio Meteorologico Nacional (SMN) provided weather data for a period of ten years (1998-2008), the hydrometric data was obtained from the Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), for the same period, the basin being studied is composed by 24 ground units; the 19 Digital Elevation Model (MDE) were provided by the Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) as well as the 14 land uses.

The SWAT results consider 12 subbasins and 138 Hydrologic Response Units. And through the measured and simulated comparison of the superficial floods, an analysis of lineal regression was realized, considering the best adjustment, the r^2 determination coefficient = 0.76, the slope of the straight line and the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient.

Key words: Simulation, water, hydrologic model, SWAT.

GLOSARIO

| Simbología de las formulas matemáticas empleadas por el SWAT | |
|--|-----------------|
| PARÁMETRO ADIMENSIONAL QUE EXPRESA LA PROPORCIÓN DE LA LLUVIA TOTAL QUE OCURRE DURANTE T_c | α |
| VALOR MÍNIMO DE A | α_{mn} |
| PARÁMETRO DEPENDIENTE DE LA FUERZA MÁXIMA DE LA CORRIENTE PARA EL TRAMO DE CAUCE | α_{sp} |
| CANTIDAD MÁXIMA DE PRECIPITACIÓN DURANTE 0.5 H RESPECTO A LA PRECIPITACIÓN TOTAL DEL DÍA | $\alpha_{0.5}$ |
| COEFICIENTE DEL ESCURRIMIENTO QUE EXPRESA LAS CARACTERÍSTICAS DE INFILTRACIÓN DE LA CUENCA | ρ |
| PENDIENTE DE LA CURVA DE PRESIÓN DE VAPOR A SATURACIÓN ($KPA^{\circ}C^{-1}$) | σ |
| CONSTANTE PSICOMÉTRICA ($KPA^{\circ}C^{-1}$) | γ |
| POROSIDAD DEL SUELO | PO |
| RELACION POROSIDAD - CAPACIDAD DE CAMPO | POFC |
| GASTO PROMEDIO ($mm.h^{-1}$) | q^*_c |
| GASTO PROMEDIO POR UNIDAD DE LLUVIA ($mm.h^{-1}.mm^{-1}$) | q^*_p |
| LAMINA DE ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL AJUSTADO PARA LAS PERDIDAS POR FILTRACION (mm) | QI |
| FLUJO LATERAL ($m^3.h^{-1}$) | q_{lat} |
| GASTO PROMEDIO ($m^3.s^{-1}$) | q_{mx} |
| GASTO PROMEDIO ($m^3.h^{-1}$) | q_o |
| VOLUMEN DE SALIDA (m^3) | QO |
| FLUJO LATERAL ($m^3.h^{-1}$) | q_{lat} |
| GASTO MAXIMO ESPERADO EN EL CAUCE PARA EVENTOS EXTREMOS ($m^3.s^{-1}$) | q_{mx} |
| GASTO PROMEDIO ($m^3.s^{-1}$) | q_o |
| VOLUMEN DE SALIDA (m^3) | QO |
| GASTO PROMEDIO DE UNA HECTAREA ($mm.h^{-1}$) | q^* |
| VOLUMEN DE SALIDA DEL ALMACENAMIENTO (m^3) | QOR |
| GASTO MAXIMO ($m^3.2^{-1}$) | q_p |
| GASTO MAXIMO AJUSTADO POR LAS PERDIDAS POR FILTRACION ($m^3.s^{-1}$) | q_{pi} |
| ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL LATERAL (mm) | QR |
| FLUJO LATERAL DE LA PRIMERA CAPA (mm) | QR ₁ |
| FLUJO ASCENDENTE ($m.d^{-1}$) | Qsat |
| AGUA TOTAL PERDIDA EN LA PRIMERA CAPA (mm) | QT |
| INTENSIDAD DE LLUVIA PARA EL TIEMPO DE CONCENTRACION DE LA CUENCA ($mm.h^{-1}$) | r |
| LLUVIA DIARIA EN EL MES (K) | R_k |
| RADIACION SOLAR ($MJ.m^{-2}$) | RA |
| PROFUNDIDAD DE LA RAIZ EN EL DIA i (mm) | RD _i |
| FRACCION DE LA ZONA RADICAL QUE CONTIENE A LAS RAICES EN EL DIA (n) | RD _N |

| | |
|---|---------------------------------|
| FACTOR DE ESTRÉS QUE REGULA EL CRECIMIENTO EN EL CULTIVO | REG |
| INTENSIDAD MAXIMA DE LA LLUVIA EN EXCESO (mm.h ⁻¹) | r _{ep} |
| PROFUNDIDAD MAXIMA EN LA ZONA RADICAL (mm) | RZ |
| PENDIENTE DE LA SUPERFICIE DEL TERRENO (m.m ⁻¹) | S |
| POTENCIAL DE RETENCION (mm) | S |
| CONCENTRACION DE SOLIDOS SUSPENDIDOS EN EL ALMACENAMIENTO O CUERPO DE AGUA (g.m ³) | S |
| AGUA DRENABLE SATURADA EN LA ZONA SATURADA (AGUA ARRIBA DE LA CAPACIDAD DE CAMPO) (m.m ⁻¹) | S |
| PENDIENTE PROMEDIO DE LA CUENCA (m.m ⁻¹) | S |
| COEFICIENTE DEL SESGO O ASIMETRIA | SCF |
| CONDUCTIVIDAD SATURADA DE LA CAPA i (mm.h ⁻¹) | SC _i |
| PROFUNDIDAD VISIBLE (m) | S _d |
| DESVIACION ESTANDAR DE LA TEMPERATURA MAXIMA DIARIA | SDTMX |
| SEDIMENTOS QUE ENTRAN AL CAUCE (t) | SED _{IN} |
| CANTIDAD DE SEDIMENTOS QUE LLEGAN A LA SALIDA DE LA CUENCA (t) | SED _{OUT} |
| VOLUMEN DE INFILTRACION DE LOS DEPOSITOS (m ³) | SEP |
| VELOCIDAD DE ENTIERRO (m.d) | V _b |
| VELOCIDAD PROMEDIO DEL CAUCE (m.s ⁻¹) | V _c |
| BIOMASA DE LA PARTE AEREA MENOS EL RENDIMIENTO DEL CULTIVO A LA COSECHA (Kg.ha ⁻¹) | WLV |
| PESO DEL NO ₃ -N CONTENIDO EN LA CAPA AL INICIO DEL DIA, EN (g.m ³) | WNO ₃ |
| PESO DEL NO ₃ -N CONTENIDO EN LA CAPA AL INICIO DEL DIA, EN (g.m ³) | WNO _{3o} |
| CANTIDAD DE PLAGUICIDA LAVADO DE LAS PLANTAS POR UNA TORMENTE | WO |
| FRACCION LAVADA DE UN PLAGUICIDA EN PARTICULAR | WOF |
| CONTENIDO DE AGUA A PUNTO DE MARCHITEZ (mm) | WP |
| FACTOR DE ESTRÉS HIDRICO DEL DIA i | WS |
| PARAMETRO DEL CULTIVO QUE SE EXPRESA LA SENSIBILIDAD A LA SEQUIA | WSYF |
| COORDENADAS DEL CENTRO DE LA TORMENTA (Km) | X _c , Y _c |
| COORDENAS DE LOS SITIOS DE MEDICION DE LA LLUVIA (Km) | X _i , Y _i |
| PERDIDA EN EL ESCURRIAMIENTO DE N ORGANICO EN LA SALIDA DE LA CUENCA (Kg.ha ⁻¹) | YON _B |
| PERDIDA DE FOSFORO EN LA FACE DE SEDIMENTOS EN EL ESCURRIAMIENTO (Kg.ha ⁻¹) | YP |
| PRODUCCION DE P EN LA SALIDA DE LA CUENCA (Kg.ha ⁻¹) | YP _B |
| PRODUCCION DE SEDIMENTOS EN LA SALIDA DE LA SUBCUENCA (t.ha ⁻¹) | Y _{SB} |
| P SOLUBLE PERDIDO EN EL ESCURRIAMIENTO (Kg.ha ⁻¹) | YSP |
| FACTOR ADIMENSIONAL PARA LA CONVERSION DE LA TEMPERATURA DEL AIRE A TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE DEL SUELO PARA DIAS SECOS, EN EL MES j | Z _j |
| PROFUNDIDAD HASTA EL FONDO DE LA CAPA DE SUELO 1 (m) | Z |
| DISTANCIA DESDE EL FONDO DE LA ULTIMA CAPA DE SUELO HASTA LA SUPERFICIE (mm) | ZM |

JUSTIFICACION

En nuestro país no se cuenta con la suficiente infraestructura hidrométrica para la medición en cauces, ríos y cuencas ya que solamente las cuencas hidrológicas de mayor impacto cuentan con este sistema de medición.

Para medir la cantidad de agua en las cuencas que no cuentan con estaciones hidrométricas de medición de los caudales, es conveniente el uso de modelos hidrológicos de simulación, por su posible operación a bajo costo y a la confiabilidad de los resultados que arrojan.

Como se indicó en el Cuarto Foro Mundial del Agua, en el año 2006 tres de los cinco ejes temáticos relacionados con los primordiales retos del tema agua a nivel mundial son: agua y saneamiento para todos, en donde una de las actividades contempla el desarrollo de metodologías para reducir pérdidas de agua, recuperar volúmenes y mejorar eficiencias; agua para la subsistencia y el medio ambiente, permite establecer estrategias apropiadas y eficaces para el manejo sustentable del recurso hídrico; manejo de compromisos, permite el perfeccionamiento de sistemas de alerta hidrometeorológico anticipado y en tiempo existente para la prevención de inundaciones y construye instrumentos que ayudan a conocer la reserva y la demanda hídrica para apoyar los diseños sobre el empleo del agua.

OBJETIVOS

General

El objetivo de la presente tesis, es modelar una cuenca hidrológica con el modelo SWAT ya que este puede simular de manera eficiente el comportamiento de los escurrimientos superficiales, sedimentos y gastos medios, que se presentan en la cuenca del Río Amajac, Estado de Hidalgo utilizando el sistema operacional de pronóstico basado en conceptos físicos y eventos aislados.

Particulares

Establecer con el modelo SWAT, las subcuencas que obtienen mayor cantidad de escurrimiento superficial, para consecuentemente realizar una adecuada planeación del uso racional del agua de la cuenca

Comprobar la eficiencia del modelo SWAT mediante la aplicación de pruebas estadísticas tales como: coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe, varianza, coeficiente de variación y error medio absoluto.

HIPOTESIS

El modelo SWAT es una herramienta útil para predecir el comportamiento las variables que intervienen en el proceso hidrológico dentro de la cuenca, y con ello realizar una adecuada planeación de escenarios de operación de la cuenca.

Se puede realizar la simulación de la generación de escurrimientos superficiales en las cuencas mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica, información climatológica e hidrométrica de la zona a estudiar, aplicando el modelo hidrológico SWAT (Soil Water Assessment Tool)

Por lo tanto la hipótesis de esta tesis es comprobar que el modelo SWAT realice la simulación de esta cuenca, adecuadamente obteniendo datos reales

CONTENIDO

La presente tesis está integrada por cinco capítulos, que se describen en lo general en las siguientes líneas:

Capítulo 1

Se presenta una introducción al tema de estudio, con el agua como recurso invaluable, finito y vulnerable; en el que su aprovechamiento y su buena gestión es fundamental. Además se presenta un esquema analítico del agua, en el que la preservación del recurso agua y suelo están estrechamente vinculados. Por otro lado se tratan los antecedentes del modelo SWAT, el se utilizó en la modelación, objetivo de esta tesis y finalmente se describe la Hidrología y a las variables que intervienen en los procesos de precipitación, escurrimiento superficial y el flujo del agua subterránea.

Capítulo 2

En este, se aborda la definición de cuencas hidrológicas, y la gestión y su manejo, presentando también la relación lluvia - escurrimiento.

Capitulo 3

En este capítulo se tratan los aspectos generales sobre modelos, una clasificación general y se describen los modelos hidráulicos y los modelos matemáticos hidrológicos. Además se presenta la trascendencia de estos últimos y se enuncian algunos modelos matemáticos hidrológicos desarrollados para resolver problemas de esta índole. Finalmente se describe al modelo Hidrológico SWAT, presentando sus fundamentos y componentes.

Capitulo 4

El capítulo aborda la aplicación del modelo SWAT a un caso real, con el caso de estudio: Cuenca del rio Amajac, Estado de Hidalgo; presenta la caracterización de la cuenca y la descripción de la estación hidrométrica Temamatla y los estudios realizados en el sitio. Además describe los componentes principales del modelo SWAT (Modelo de Elevación Digital y el Generador Climático), los datos de suelo y la forma de cómo los procesa el modelo. Finalmente presenta

el desarrollo de la modelación hidrológica y su calibración y validación del modelo SWAT.

Capitulo 5

Este presenta los resultados de la primera simulación, el ajuste o calibración del modelo y los resultados obtenidos de la segunda modelación.

Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones derivadas de la presente tesis.

1.- INTRODUCCION

EL AGUA

El agua es un recurso finito y vulnerable, esencial para sostener la vida, el desarrollo y el medio ambiente. El aprovechamiento y la buena gestión del agua deben apoyarse en la participación de los usuarios y de la sociedad al nivel de las cuencas hidrográficas, pues estas desempeñan un papel cada vez más importante en su cuidado y preservación. El agua tiene un valor económico, social y ambiental en todos los usos a los que se destina y por tanto, su análisis, administración, planificación y en general la gestión integrada de este recurso debe contemplar las relaciones existentes entre economía, sociedad y medio ambiente, en el marco geográfico de las cuencas que son los espacios físicos en donde se verifica el ciclo hidrológico. Estos principios ilustran la importancia del agua en el mundo actual.

Sin agua las especies animales y vegetales no existirían. Sin embargo, siendo un recurso natural tan importante y vital, los seres humanos parece que se empeñan en degradarlo y usarlo ineficazmente, suponiendo, por ignorancia o por inconsciencia, que se trata de un recurso natural infinito del que se puede disponer libre e ilimitadamente, pero no es así. El agua se encuentra desigualmente distribuida en el espacio y el ciclo que la produce es irregular en el tiempo. Por ello son cada vez más las regiones en las que se registra una presión creciente sobre los recursos hídricos al aumentar la población y, con ella, la contaminación del agua y la demanda de este recurso esencial para la vida.

México no es la excepción. Por su clima y por sus características geográficas, económicas, sociales y demográficas, enfrenta problemas y retos de gran dimensión y complejidad para satisfacer sus necesidades hídricas y desarrollar sus potencialidades. Las regiones del centro norte del país son áridas o semiáridas y en ellas la escasez y los períodos recurrentes de sequía son mayores pero son territorios en donde se asienta una parte mayoritaria de la producción y la población mexicana. En contrapartida, en la región sureste se verifican las mayores precipitaciones pluviales y por ende se concentran ahí los mayores escurrimientos y disponibilidades de agua y paradójicamente cuentan con una menor densidad demográfica.

Al finalizar el siglo XX fueron múltiples los retos para conciliar la oferta con la demanda nacional de agua. Estos retos son mayores y más complejos, cuando se

analizan a la luz de las tendencias que se perfilan para el futuro en los procesos de crecimiento demográfico, distribución de la población rural y urbana y de la economía por regiones y cuencas hidrográficas. Por ello, en los próximos años existe la necesidad de realizar esfuerzos mayores y cambios de diverso tipo en las instituciones y organizaciones públicas y privadas, así como en las actitudes y comportamientos de la sociedad para asegurar la preservación y sustentabilidad de su fuente primordial de vida: El Agua.

Algunos de estos importantes cambios ya se están perfilando y habrán de consolidarse gradual y progresivamente en el futuro, tal es el caso de la presencia organizada y activa de los usuarios del agua y de grupos diversos de la sociedad en las tareas de gestión integral del recurso al nivel de las principales cuencas hidrográficas del país en la forma de Consejos, Comisiones y Comités de Cuenca y Acuíferos, en donde, en conjunto con representantes de los tres niveles de gobierno habrán de consensarse objetivos, metas, estrategias, políticas y programas para la mejor administración de las aguas nacionales, el desarrollo de la infraestructura hidráulica y la preservación de las cuencas. Además, estas organizaciones colegiadas al nivel de cuenca, son foros de conciliación de intereses para prevenir los conflictos que se derivan de la inadecuada distribución y usos competitivos del agua.

El 30% del agua dulce mundial se encuentra en la humedad del suelo y en los acuíferos profundos. Solo el 1% del agua dulce en el mundo escurre por las cuencas hidrográficas en forma de arroyos y ríos y se deposita en lagos, lagunas y en otros cuerpos superficiales de agua y en acuíferos aseQUIBLES. Esta es el agua que se repone regularmente a través del ciclo hidrológico también llamado el ciclo de la vida. (CONAGUA 2004)

Esquema Analítico del Agua

La preservación de los recursos naturales y entre ellos, preponderantemente el agua y el suelo, están estrechamente relacionados con las prácticas y procesos productivos en el uso del suelo, así como con los comportamientos sociales y la percepción y valoración que la sociedad otorga a sus diferentes formas de uso y manejo.

Con algunas variantes y énfasis, en el mundo se ha generalizado el reconocimiento de que el agua es un bien económico de carácter público, cuyo acceso y uso tiene un valor y un costo material que bajo ciertas condiciones de regulación puede ser objeto de transacciones que dan origen a mercados de agua. Igualmente se admite que las prácticas de uso y aprovechamiento tienen impactos sociales y ambientales que deben irse valorando adecuadamente y en su expresión negativa evitarse para garantizar la sustentabilidad y el desarrollo de las regiones y los países a mediano y largo plazo.

Por otra parte, el uso y aprovechamiento sustentable del agua depende, además de las prácticas de manejo, de múltiples factores entre los que destacan: la educación o cultura de la sociedad con relación al agua; las formas de organización, características y la eficacia de las instituciones que atienden los asuntos hídricos, así como las características, modalidades y alcances de las políticas públicas relacionadas con el agua; la participación ordenada y organizada de los usuarios y de la sociedad en su cuidado y preservación; los sistemas de información, administración y planificación que se ponen en práctica para ordenar sus usos; los recursos financieros que se destinan a su aprovechamiento y manejo y la calidad de los recursos humanos que participan en estas actividades.

Así, cada vez se comprende más ampliamente y mejor que el agua es un sistema natural complejo que se encuentra íntimamente vinculado y en interacción permanente con otros sistemas principalmente ambientales, económicos y sociales, lo que significa que para lograr su integral aprovechamiento y eficaz administración, sin afectar su calidad ni la capacidad del ciclo que la reproduce en la naturaleza, es indispensable tomar en cuenta todas sus relaciones de interdependencia, así como las múltiples y complejas funciones que desempeña en las actividades humanas y en los sistemas y procesos naturales.

Una serie de informes nacionales han demostrado que la erosión de los suelos, la tala de bosques, la desertificación y otras formas de degradación de tierras son importantes. Se han detectado altos índices de transporte de sedimentos en aguas superficiales. Sin embargo, el suelo es el recurso más importante para asegurar la sostenibilidad y la pérdida del suelo, superficial, a causa de la erosión, renovable en uno no renovable.

El manejo inadecuado de suelos y aguas en la agricultura provoca degradación de las tierras. Los países del mundo deberían promover la aplicación de medidas para detener la erosión de los suelos y disminuir el transporte de sedimentos en las

aguas superficiales (mejores prácticas de manejo agrícola, pecuario y forestal para el control de la erosión). Para tener éxito en este propósito, es preciso tener un mayor conocimiento de las interacciones entre los sistemas para promover su integración con los de preservación natural de las tierras. (CONAGUA 2004)¹⁹

ANTECEDENTES DEL MODELO

El modelo SWAT (Soil Water Assessment Tool) es una herramienta desarrollada por el Dr. Jeff Arnold del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos con el apoyo de La Universidad de Texas de 1980 a 1987. El propósito del modelo es predecir el impacto que originan las prácticas del manejo del suelo en el recurso agua y en la generación de sedimentos dentro de una cuenca hidrográfica.

Es decir el Modelo nos permite predecir el transporte de sedimentos, con el manejo de suelo en la agricultura, como en los usos de suelo y de químicos, en cuencas donde no se cuenta con infraestructura de aforos.

En México la calidad del agua es esencial, para el abastecimiento de las comunidades. El impacto del cambio climático es continuo y los Modelos hidrológicos numéricos nos ayudan en forma importante a predecir, los escurrimientos hidrológicos.

El modelo es una herramienta para predecir el comportamiento de las cuencas hidrológicas y nos llevan a resultados confiables, en periodos de tiempo cortos y rápidamente, así como, a determinar las mejores condiciones de manejo de este recurso vital²⁸. (Van Liew *et al.*, 2005)

1.1 Hidrología

El Ciclo Hidrológico.- En el ciclo hidrológico, el sol provoca la evaporación constante del agua que pasa a la atmósfera para volver a la tierra en forma de lluvia, nieve o granizo. Parte de esa precipitación se evapora rápidamente y vuelve otra vez a la atmósfera. Otra parte del agua que se precipita periódicamente fluye a través de la superficie de las cuencas formando arroyos y ríos para iniciar su viaje de retorno al mar. En su tránsito forma lagos y lagunas o se deposita en almacenamientos artificiales formados por represas y diques. Otra parte del agua que llega a la superficie terrestre en forma de lluvia, se deposita en el suelo donde

se convierte en humedad o en almacenamientos subterráneos denominados acuíferos. (Ver figura 1).

En condiciones normales, las aguas subterráneas se abren camino gradualmente hacia la superficie y brotan en forma de manantiales para volver a unirse a las aguas superficiales y engrosar los caudales de los ríos. Las plantas y la vegetación incorporan en sus tejidos parte de la humedad del suelo y de las aguas subterráneas y luego, una parte se desprende de ellas por transpiración para pasar a integrarse nuevamente a la atmósfera. Este es un ciclo natural que se repite intermitentemente.

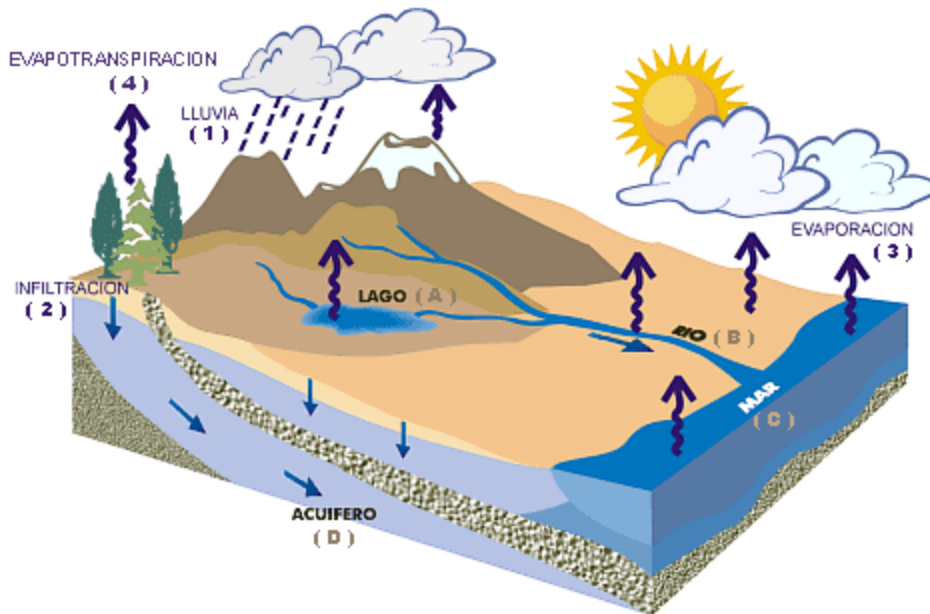


Figura 1 Ciclo Hidrológico

Escurrimiento superficial: El modelo simula los escurrimientos superficiales y los gastos máximos, que se producen por la lluvia diaria. El modelo SWAT, proporciona dos métodos para estimar el escurrimiento superficial y los datos diarios de precipitación; el modelo SWAT proporciona dos formas de modelar los escurrimientos superficiales estima con la técnica modificada de las curvas numéricas, propuestas por el Servicio de Conservación del Suelo (SCS) (USDA - SCS, 1972).

La ecuación racional cuenta con un componente de tipo estocástico que permite la simulación real del gasto máximo, con base en la lluvia diaria y la intensidad de la lluvia mensual.

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. La percolación también es afectada por la temperatura del suelo.

Flujo lateral subsuperficial.- La percolación y el flujo lateral subsuperficial en el perfil del suelo (0-2 m), se calcula simultáneamente. Para predecir el flujo lateral en cada capa de suelo, se usa un modelo cinemático de almacenamiento y requiere la variación en la conductividad, la pendiente y el contenido de agua en el suelo. Una capa adyacente, variación hacia arriba del flujo o de la superficie.

Flujo de agua subterránea: La unidad básica para el manejo del agua es la cuenca hidrológica, en la cual se considera la forma en que escurre el agua en la superficie (cuencas hidrográficas) y en el subsuelo (acuíferos). Con esta base, se integraron las trece regiones hidrológico-administrativas en que se organiza el país para fines de administración del agua.

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

Evapotranspiración: Se define como la suma de pérdidas de agua por evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración de las plantas. Tiene el fin de contabilizar las pérdidas de agua y obtener un saldo, respecto del total de la precipitación. (Figura 2)



Figura 2 La evaluación del agua (IMTA)

El modelo ofrece tres opciones para su estimación: Hargreaves (Hargreaves an Samani, 1985), Priestley Taylor (Priestley and Taylor. 1972), y Penman -Monteinth (Monteinth, 1965). El método de Penman requiere de la radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento, si la velocidad del viento, la humedad relativa, la radiación solar, no están disponibles (valores diarios) pueden ser generados a partir de valores promedio mensuales. Los métodos Hargreaves y de Priestley Taylor dan opciones que dan resultados realísticos en la mayoría de los casos. El método calcula la evapotranspiración de suelos y plantas separadamente.

La Evapotranspiración potencial del agua del agua en el suelo se estima como función de la evapotranspiración y el índice de área foliar (el área de la hojas de una planta en relación al área del suelo 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.

La evapotranspiración es un término en conjunto para todos los procesos por los cuales el agua en su fase sólida o líquida en/o cerca de la superficie terrestre se convierte en vapor de agua atmosférica. La evapotranspiración incluye la evaporación de ríos y lagos, suelo desnudo, y superficies con vegetación; la evaporación desde las hojas de las plantas (transpiración); y sublimación de las superficies de hielo y nieve. La evaporación potencial del agua en el suelo se estima como una función de la evapotranspiración potencial y el índice de área foliar (el

área de las hojas de una planta respecto al área de la Unidad de Respuesta Hidrológica, en este caso, el suelo). La evaporación actual del agua en el suelo se estima al usar funciones exponenciales de la profundidad del suelo y el contenido de agua. La transpiración de las plantas se simula como una función lineal de la evapotranspiración potencial y el índice de área foliar.

La evapotranspiración potencial es el índice por el cual la evapotranspiración pudiera ocurrir en una gran área completa y uniformemente cubierta con vegetación en desarrollo, misma que tiene acceso a un suministro ilimitado de agua en el suelo. Se supone que esta razón no influye en los procesos microclimáticos tales como los efectos advección o almacenamiento de calor.

Deshielo de Nieve: El deshielo es la fusión de las nieves y de los heleros como consecuencia del aumento de las temperaturas en la primavera.

El componente de derretimiento de nieve del modelo SWAT es similar al del modelo CREAMS (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management System). El modelo SWAT clasifica éste componente nieve, usando la temperatura media diaria.

El componente de derretimiento de hielo del modelo SWAT también es similar al del modelo CREAMS, si hay nieve ésta se derrite en días cuando la temperatura máxima excede los 0° C, usando una función lineal de la temperatura, la nieve derretida es transferida en la misma forma que la lluvia para estimar el escurrimiento y la precipitación. Sin embargo la energía de la lluvia es considerada como cero y la tasa del escurrimiento pico se estima asumiendo una distribución uniforme de la lluvia para una duración de 24 horas.

Pérdidas por transmisión: Muchas cuencas semiáridas tienen canales aluviales que sustraen grandes volúmenes de agua de la corriente (Lane, 1982). 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 descrito en el manual de hidrología del SCS (USDA, 1986) 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.

Cuerpos de agua: Los cuerpos de agua son pequeñas estructuras que se presentan dentro de una subcuenca. El almacenamiento de los cuerpos de agua se simula en función de la capacidad del cuerpo de agua, entradas y salidas diarias de agua, transmisión y evaporación. Se asume que en los almacenamientos se tienen solamente vertedores de emergencia. Los datos requeridos son la capacidad y área de la superficie del almacenamiento. El área superficial debajo de la capacidad del de almacenamiento se estima a partir de una función no lineal de almacenamiento. La Figura 6 ilustra el esquema general de la simulación del movimiento del agua en la unidad de respuesta hidrológica (URH)

1.4 Clima.- Conjunto de las condiciones del tiempo que predominan en alguna región del planeta Tierra por un largo período de tiempo.

Elementos del clima, al conjunto de componentes que lo caracterizan y que interactúan entre sí en las capas inferiores de la atmósfera, la llamada tropósfera. Estos componentes o elementos son el producto de las relaciones que se producen entre distintos fenómenos físicos que les dan origen y que a su vez se relacionan con otros elementos.

2. CUENCAS

Cuenca de recepción, se llama a todo el territorio que recibe las aguas meteóricas que luego alimentan el río correspondiente, aunque parte del territorio sea montañoso y aunque forme cimas y crestas.

Cuenca hidráulica es parte de la corteza terrestre donde se aloja el agua que ahí fluye luego de haberse infiltrado por la superficie de la cuenca de alimentación.

Cuenca hidrográfica o superficial.- Territorio cuyas aguas superficiales fluyen todas a un mismo río, lago o mar situado en la parte más baja. No siempre coinciden los límites de la cuenca hidrográfica superficial.

La cuenca hidrológica es una superficie de tierra que drena hacia una corriente en un lugar dado y que se compone de una línea divisoria que separa la superficie de tierra cuyo drenaje fluye hacia un río de las demás superficies de tierra. Ven Te Chow *et al.* (1994).

Se llama cuenca endorreica, a aquella que en su interior se forma un lago o serie de lagos por no tener desagüe la cuenca (Aparicio 2001).

Gestión de Cuencas Hídricas

Se entiende así a la dirección de acciones coordinadas que el hombre realiza considerando su efecto en el sistema natural formado por dicha cuenca y en la dinámica de dicho sistema. Territorio cuyas aguas concurren a un mismo río.

2.1 MANEJO DE CUENCAS

Se entiende así al conjunto de acciones que se realizan en una cuenca. Gestión de los elementos y recursos naturales de una cuenca, considerando su efecto en la descarga de agua de la misma.

En la década de los ochentas el manejo de cuencas recibió gran atención en Latinoamérica como una manera de manejar la severa degradación de los suelos en

las zonas bajas especialmente donde las reservas se veía amenazadas por la sedimentación.

Manejo Integral de Cuencas

Conjunto de esfuerzos tendientes a identificar y aplicar opciones técnicas, socioeconómicas y legales, que establecen una solución a la problemática causada por el deterioro y mal uso de los recursos naturales renovables, así como de las cuencas hidrográficas, para lograr un mejor desarrollo de la sociedad humana inserta en ella y de la calidad de vida de su población.

2.2 RELACIÓN LLUVIA-ESCURRIMIENTO

Descripción de La Relación Lluvia-Escorrimento.

La relación entre el escurrimiento directo y la lluvia puede ser considerado por los siguientes tres aspectos:

- La relación entre el volumen de lluvia que se da en una tormenta es el resultado del escurrimiento directo.
- La relación entre el tiempo de distribución o hidrograma, es el escurrimiento directo y el tiempo de distribución del hietograma o la lluvia efectiva.
- La relación entre la frecuencia de la lluvia y la frecuencia del gasto.

Cuando se requiere conocer la relación de lluvia-escorrimento se debe deducir la avenida de diseño. Se indica la forma de cuantificar la lluvia en exceso y se proporcionan las características del hidrograma unitario triangular a utilizar para ello se integra la avenida de diseño.

Lluvia en exceso.- la lluvia en exceso se define como la parte de la lluvia que contribuye al escurrimiento directo, siendo este el escurrimiento superficial y en mayor o menor grado por el escurrimiento subsuperficial rápido.

1. Los factores que afectan la cantidad de lluvia en exceso o llamado también escurrimiento directo son:

- El uso de la tierra
- Condición de la superficie
- Tipo de suelo y cantidad
- Duración de la lluvia

3 ASPECTOS GENERALES SOBRE MODELOS.

Definición de modelo.

Una definición bastante generalizada de modelo, originada en ámbitos geográficos, es "una representación simplificada de la realidad en la que aparecen algunas de sus propiedades"³³ (Joly, 1988:111).

Los modelos se realizan para ayudar a predecir algún fenómeno con ciertas características o del proyecto del objeto real.

"Un modelo es un objeto, concepto o conjunto de relaciones que se utiliza para representar y estudiar de forma simple y comprensible una porción de la realidad empírica" Ríos³³ (1995:23)

El modelo es una representación de un fenómeno natural. Un modelo es "una descripción física o matemática de un sistema físico, incluyendo la interacción con el mundo que lo rodea, que puede utilizarse para simular el efecto de los cambios en el sistema mismo, o el efecto de los cambios en las condiciones impuestas sobre él. (Verwey, 1995)³¹.

3.1. Clasificación general de los modelos.

Con el manejo de los modelos matemáticos se pueden entender los fenómenos naturales bajo ciertas condiciones que pueden ser hechas por pronóstico dentro de una visión determinística o probabilística. El comprender un evento, implica que se pueda dar una explicación segura de este. Los modelos usados en cualquier disciplina, pueden ser clasificados según se muestra en la figura 3.

Modelo Físicos es una representación física de un sistema complejo, se asume que es más simple que el sistema que representa, también se asume que tienen propiedades similares con aquellas de las que provienen.. El modelo material también se divide en modelos icónicos y analógicos

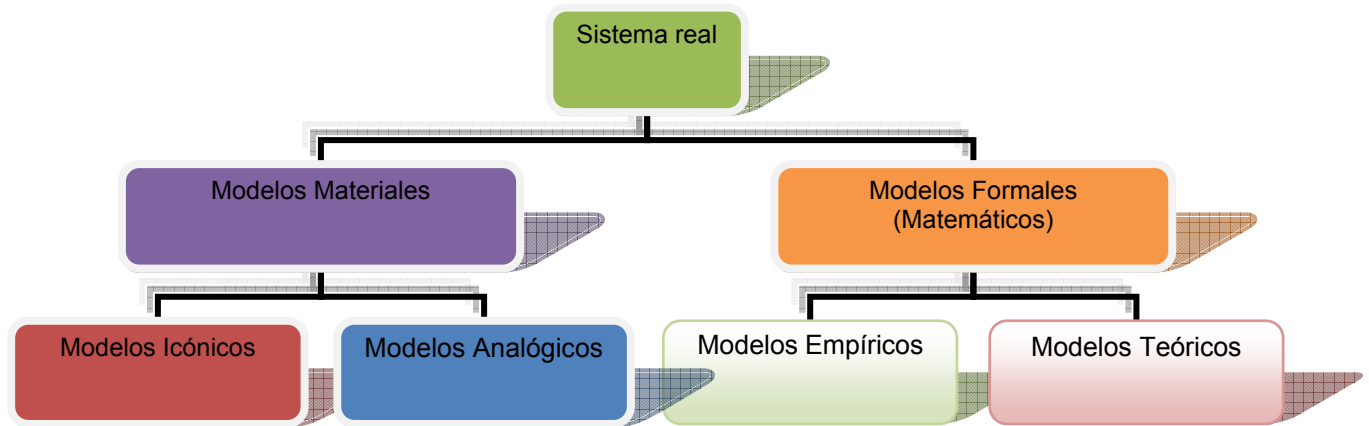


Figura 3 Clasificación de modelos

Modelos Icónicos son aquellos que representan físicamente un sistema real con solo una transformación de escala, ya que conservan las dimensiones de los objetivos originales, por ejemplo los simuladores de lluvia, lisímetros, parcelas y cuencas experimentales (Figueroa, 1998; Woolhiser y Brakiensiek, 1982).

Modelos Analógicos. Este tipo de modelos pueden utilizarse cuando existen dos fenómenos de diferente naturaleza, los cuales pueden expresarse en forma exacta mediante las mismas ecuaciones matemáticas; por ejemplo un flujo eléctrico que es un fenómeno análogo, con el flujo hídrico.

Modelos matemáticos

Este tipo de modelos proporciona resultados generalmente a partir de condiciones idealizadas a las que se pueda dar solución mediante algoritmos matemáticos, en algunos casos estas técnicas son métodos aproximados como el de "diferencias finitas" o los "elementos finitos" entre otros; los cuales para proporcionar soluciones rápidas requieren la asistencia de computadoras.

Teóricos así se les denomina a estos modelos que se dividen, y se fundamentan se basan en el conocimiento de leyes físicas que determinan el movimiento de los materiales y la energía (Waring y Schelesing, 1985) incluyen un grupo de leyes generales con principios teóricos y un grupo de afirmaciones de circunstancias empíricas.

Todos los modelos teóricos simplifican un sistema físico, por tanto son más o menos incorrectos. Teoría y empirismo están generalmente así, interrelacionados con la teoría de los modelos hidrológicos, por lo tanto son híbridos que incluyen ambos componentes, teóricos y empíricos (Ozgbaseda, 1976).

Los modelos anteriores, aunque no son exclusivos de los fenómenos hidrológicos, todos se han utilizado en mayor o menor medida en esta rama del conocimiento. Debe resaltarse que los modelos matemáticos han tenido mayor desarrollo, debido a la característica de brindar resultados de manera cuantitativa y EMPÍRICA omiten las leyes generales y se basan en una realidad proporcionada por observaciones de campo o laboratorio sobre un rango amplio de condiciones (Waring y Schlesing, 1985; Woolhiser y Brakensiek. 1982)

3.2. Modelos hidráulicos. -

En términos de obras hidráulicas, numerosos fenómenos permiten soluciones y descripciones analíticas, sin embargo y debido a la complejidad de algunos de estos no siempre es posible obtener soluciones analíticas confiables (Velázquez, 2005).

Cuando la complejidad de los fenómenos rebasa toda posibilidad de obtener una solución puramente analítica se hace presente la necesidad de modelar el fenómeno con la mayor cantidad de condiciones y fuerzas que intervienen en su desarrollo. De esta necesidad se desprende una especialidad de la Ingeniería Hidráulica, que permite obtener mediante observaciones, en condiciones controladas, soluciones con un alto grado de certidumbre, para diversos fenómenos físicos presentes en las diferentes obras Hidráulicas. Esta especialidad es la Ingeniería Experimental. Algunas de las herramientas de trabajo que le permiten a los especialistas realizar con precisión sus proyectos son los modelos físicos y los modelos matemáticos.

Modelo Físico Reducido

Para generar un modelo Físico es necesario que este cumpla determinadas leyes de similitud que relacionan magnitudes físicas entre el modelo y el prototipo (realidad), de no cumplir con estas leyes la estructura en escala reducida será considerada solamente como una maqueta. Una vez que se considera la opción de resolver un problema, mediante la utilización de técnicas experimentales en un Modelo Físico, es necesario hacer notar que este tipo de modelos "solo pueden resolver problemas puntuales" o similares, es decir un modelo tendrá una aplicación única a menos que se traten problemas con características similares y que puedan adaptarse al modelo en cuestión.

3.3. Modelos matemáticos hidrológicos

Modelo matemático de simulación hidrológica, se utilizan para estudiar situaciones extremas, difícilmente observables en la realidad, como por ejemplo los efectos de precipitaciones muy intensas y prolongadas en cuencas hidrográficas, en su estado natural, o en las que se ha intervenido con obras como canales, represas, diques de contención, puentes, etcétera.

La cuenca hidrográfica es dividida en sub-cuencas consideradas homogéneas desde el punto de vista: del tipo de suelo, de la declividad, de su cobertura vegetal. El número y tipo de las variables hidrológicas que intervienen en el modelo son función de objetivo específico para el cual se elabora el mismo.

Clasificación de los modelos hidrológicos

El objetivo de un modelo hidrológico es predecir con eficacia y exactitud fenómenos de frecuencia rara del ciclo hidrológico en una región y determinar el caudal.

El uso de los modelos hidrológicos es primordial para apreciar, simular y predecir los daños causados por las inundaciones, para resolver problemas prácticos de inventarios y para la administración y planeación del uso de los recursos hídricos, en una cuenca, región o país.

Validación de modelos

Según Palacios (1987), frecuentemente los datos disponibles X_i , Y_i , con $i = 1, 2, \dots, n$, deben servir tanto para calibrar como para validar al modelo seleccionado o desarrollado. Estos dos procesos son complementarios pero excluyentes, en cuanto a la información que utilizan.

La calibración de un modelo hidrológico es esencialmente complicado por el hecho de que los valores para una gran cantidad de parámetros deben ser estimados (Jacomino *et al.*, 1997).

La calibración es la obtención de valores numéricos de los parámetros supuestamente conocidos del modelo y del prototipo mientras que la validación es una medición de la capacidad predictiva del modelo. Por ejemplo, comparando valores calculados y observados, siempre y cuando éstos últimos no hayan sido tomados en cuenta en el proceso de calibración, puesto que de otra manera sólo se

estaría midiendo la bondad de dicha calibración y no el poder predictivo del modelo.

Para evitar estas confusiones, una forma de proceder es dividiendo los valores disponibles en dos grupos, utilizando un subgrupo para comparar los valores calculados con los observados y de esta forma, medir el poder predictivo del modelo.

Limites de aplicación

En todo modelo matemático se debe especificar claramente el marco dentro del cual fue desarrollado; su jerarquía, los objetivos considerados (generales, particulares. Con esta información el usuario podrá conocer el campo de aplicación real y los límites físicos y analíticos más allá de los cuales el uso del modelo puede ser inadecuado.

Como límites físicos se pueden citar por ejemplo, las condiciones climáticas extremas bajo las cuales el modelo fue validado, de otra manera no podrán ser en regiones tropicales o templadas, ya que existe el riesgo de tener diferencias y errores. Como límites analíticos se pueden considerar el número máximo de observaciones requeridas, la precisión considerada, el coeficiente de eficiencia necesaria para comparar los valores observados y calculados, entre otros.

3.4. Trascendencia de los modelos.

Los modelos matemáticos no son herramientas nuevas, con el auge de la computación, los modelos han tenido un impresionante auge en todas las áreas del conocimiento humano y del quehacer cotidiano, como es la economía, ecología, agricultura, planeación, manejo de bosques, manejo de recursos naturales, astronomía, hidrológica, erosión y manejo de cuencas entre muchos otros. Por lo tanto, se encuentran modelos en todas las ramas del conocimiento humano y algunos con un empleo muy eficiente.

La importancia de los modelos radica, entre otros aspectos, en la predicción de fenómenos a largo plazo en un tiempo relativamente corto, también permiten obtener relaciones de causa-efecto, sin haber realizado cambios en los sistemas reales, (Benavides, 1998)⁴.

Los modelos matemáticos tienen una infinidad de usos. Figueroa (1998), menciona las siguientes ventajas de los modelos:

- Se tiene respuestas cuantitativas de los fenómenos.
- Dan idea de los puntos en los cuales no se tienen información.
- Ayudan a caracterizar.
- Ayudan a la investigación debido a que categorizan variables.
- Estimulan la participación o colaboración en equipo.
- Ayudan a interpolar o predecir.
- Ayudan a sugerir prioridades en la investigación y desarrollo.
- Ayudan a predecir el funcionamiento del fenómeno físico.
- Ayudan a tener comunicación entre investigadores.
- Son una herramienta para experimentar sin destruir.

Algunos modelos utilizados en la predicción de la erosión y estudios hidrológicos

Un modelo de los ejemplos empíricos para predecir la erosión son: La Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo (EUPS) y la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo Modificada (EUPSM), el primero tiene la característica de estimar el promedio anual de la pérdida de suelo en el sitio, bajo ciertas condiciones de cobertura (Hudson, 1995), no es aplicable para una tormenta en particular o para utilizarse en una cuenca. Para evitar esos inconvenientes se hicieron modificaciones a la ecuación original, por lo que el primer factor de la energía de la lluvia se reemplaza por el factor de escurrimiento superficial y de esta manera poder utilizarse para predecir la producción de sedimento en forma más exacta y ser aplicable en tormentas individuales (Williams y Berndt, 1977). El factor de escurrimiento superficial representa la energía utilizada para desprender y transportar partículas de suelo.

Los modelos basados en el proceso son varios y aunque proveen una mejor explicación de los procesos de la erosión que los modelos empíricos, su uso ha sido

limitado comparado con los modelos empíricos antes descritos (Hudson, 1995), entre los más importantes se tienen los siguientes:

ANSWEARS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Respose Simulation), es un modelo para manejarse en cuencas, creado para evaluar la fuente no puntual de producción de sedimento y el costo de los posibles tratamientos (Beasley Et Al., 1980). El modelo se basa en eventos de lluvia específicos en lugar de periodos largos de tiempo, permitiendo un análisis temporal y espacial de los eventos. Se compone de dos submodelos, hidrológico y el de erosión. El primero simula procesos hidrológicos que ocurren en una cuenca y el segundo simula el desprendimiento transporte y sedimentación del suelo producto de la precipitación pluvial y el escurrimiento superficial.

El modelo EPIC (Erosion- Productivity Impact Calculator), fue creado para determinar las relaciones entre erosión y productividad. El modelo consta de varios componentes los cuales se pueden agrupar como sigue (Sharpley y Williams, 1990):

1. Componentes físicos para simular la erosión, crecimiento de las plantas y procesos relacionados.
2. Componente económico para estimar el costo de la erosión y para determinar estrategias de manejo óptimo.

El modelo consta de varios componentes que pertenecen a las siguientes áreas: Hidrología, clima, nutrimentos, crecimiento de las plantas, temperatura del suelo, labranza, economía y control ambiental de la planta.

El modelo WEPP (Water Erosion Predictios Project), fue desarrollado para simular la erosión laminar, en canalillos y efímera en forma diaria (Laflen et al., 1991). El modelo WEPP es un intento para remplazar a la EUPS. El WEPP se presenta en tres versiones para ser aplicadas a varios tamaños de áreas de estudio. La versión de perfil es utilizada para analizar el desprendimiento del suelo, transporte y depositación de sedimentos en una ladera. La versión de cuenca se utiliza para estimar la producción de sedimento en una escala de cuenca y la versión de malla es utilizada para situaciones en las cuales el área de estudio es diferente al de una cuenca.

El **modelo CREAMS** (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems) fue desarrollado para evaluar los efectos de los contaminantes químicos de las prácticas agrícolas en el escurrimiento superficial (Lane et al., 1992). El modelo comprende tres partes; hidrología, erosión y química. El modelo de erosión divide el proceso de la misma en tres secciones: flujo superficial, flujo en canales y depositación del sedimento (Hudson, 1995).

El **modelo MOPEAU** (Modèle de Production d'eau), adaptado para las condiciones de México por Oropeza (1993), el cual se compone de dos submodelos: submodelo hidrológico y submodelo de erosión, el cual determina la relación de erosión-escurrimiento pérdida de nutrimentos en pequeñas cuencas agrícolas a través del muestreo del escurrimiento superficial generado por evento de lluvia dentro de la cuenca y del manejo del cultivo. El modelo predice el escurrimiento con una eficiencia mayor del 88% que el modelo tradicional propuesto por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) del El Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA).

El **modelo SWRRB** (Simulator for Water Resources in Rural Basins), desarrollado para predecir el efecto del manejo del suelo bajo ciertas características del agua como son la producción de sedimentos, nutrimentos y plaguicidas. Este modelo fue diseñado para modificar el modelo CREAMS con el propósito de ser utilizado en cuencas grandes, complejas y con recursos naturales, los principales cambios fueron: 1) el modelo fue ampliado para permitir manejos simultáneos de varias subcuencas y 2) algunos componentes fueron incluidos para simular el clima, flujo de retorno, almacenamiento en presas y depósitos, crecimiento de los cultivos, pérdidas por transito y movimiento de sedimentos a través de depósitos, presas, arroyos y valles (Arnold et al., 2000). Además el modelo SWRRB, también obtuvo ciertos procesos y componentes del modelo EPIC.

Los principales componentes del modelo son: Clima, Hidrología, Producción de sedimentos y manejo del suelo. Los principales procesos que considera son: escurrimiento superficial, flujo de retorno, precolación, escurrimiento subsuperficial, evapotranspiración, pérdidas por filtración en cauces, balance de aguas en almacenamientos y cuerpos de agua y sedimentación.

Recientemente el modelo SWRRB ha sido utilizado para predecir el balance hídrico en dos diferentes cuencas de México y Guatemala, con el propósito de -comparar resultados.

3.5 EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT

Descripción del Modelo SWAT.- (Soil and Water Assessment Tool) es un modelo que se ha venido realizando con dedicación a largo plazo y es el resultado de varios modelos hidrológicos como el GLEAMS (Groundwater Loading Effect on Agricultural Management Systems) (Leonard) CREAMS (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems) (Knisel), Y EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculador) (Williams), directamente estos modelos contribuyeron finalmente al modelo de simulación hidrológica.

MODELAMIENTOS HIDRICOS - SWAT

Para realizar sus análisis, el SWAT calcula el balance hídrico utilizando información cartográfica, temática y climática debidamente organizada. El trabajar con un modelo para simulación hídrica, y la posibilidad de reproducir todos los componentes del ciclo hidrológico mediante un sistema de información geográfica, permite a los investigadores crear diferentes escenarios para condiciones presentes, pasadas y/o futuras, determinando cómo afectará el cambio de una u otra variable en la producción de caudales y sedimentos.

En el modelo SWAT se trabaja dividiendo al espacio geográfico de estudio seleccionado en pequeñas subcuencas, de manera que los cálculos que se realicen se obtengan con la mayor exactitud posible. El uso del suelo y cobertura vegetal y el tipo de suelo dando como resultado las denominadas **UNIDADES DE RESPUESTA HIDROLÓGICA-HRU**; debido a que el comportamiento del agua en el suelo depende de estos dos factores.

Para conseguir mejores resultados en la simulación de la Subcuenca fue importante calibrar los resultados con caudales reales; para posteriormente realizar simulaciones creando escenarios con diferentes usos de suelo, con el objetivo de analizar el impacto de las prácticas agrícolas en la generación de agua, y determinar posibles soluciones que mejoren la cantidad y calidad de agua en la Subcuenca.

El modelo SWAT. - durante su desarrollo, se ha tratado de crear varios métodos artificiales donde se involucre el comportamiento del agua en el medio, para esto creo un sistema llamado SWAT, constituido con una sucesión de pasos para hacer posible estos fenómenos. Este sistema se basa en una expresión general de equilibrio hídrico que se muestra a continuación:

El modelo SWAT consiste en un modelo hidrológico integrado sobre un Sistema de Información Geográfica, en concreto en el SIG, basado en el modelo EPIC. El modelo hidrológico está basado en la ecuación general de balance hídrico:

$$SW_t = SW + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \dots \dots \dots (1)$$

Donde:

- SW_t. Contenido de agua en el suelo durante un tiempo específico (mm).
- SW. Es el agua aprovechable por las plantas o el contenido de agua en el suelo(mm)
- t. Tiempo (en días).
- R. Precipitación diaria (mm).
- Q. Cantidad diaria de escurrimiento (mm).
- ET. Cantidad diaria de evapotranspiración (mm).
- P. Cantidad de flujo subterráneo (mm.)
- QR. Flujo de retorno

El modelo SWAT está basado físicamente en:

- Datos de entrada disponibles de lluvia, temperatura máxima y mínima radiación solar, suelos.
- Es computacionalmente eficiente para operar en grandes cuencas en tiempo razonable.
- Es de tiempo continuo y capaz de simular grandes periodos para calcular los efectos de los cambios bajo diferentes escenarios.

Para utilizar este programa es necesario disponer de una serie de archivos en los que se contenga la información de suelos, cultivos, topográfica, etc.; de la cuenca objeto de estudio. Comandos adicionales han sido desarrollados para permitir el ingreso de datos pedidos y de fuente puntual al modelo y dirigidos en un flujo simulado.

El SWAT es un modelo de simulación continua, el cual analiza los impactos a largo plazo, es decir obtiene la sedimentación en los almacenamientos en periodos de 10, 15, 50 y 100 años, así como en la programación de las prácticas agrícolas en un año, como son rotación de cultivos, fechas de siembra y cosecha, riego, fertilización y las tasas y fechas de aplicación de plaguicidas.

El modelo está basado en principios físicos, es decir, en lugar de integrar ecuaciones regresivas para describir la relación entre variables de entrada y de salida, SWAT necesita datos específicos del clima, propiedades físicas del suelo, topografía, vegetación y prácticas de manejo del suelo, que ocurren en la cuenca.

En concreto SWAT (Soil and Water Assessment Tool) es un modelo hidrológico a escala de cuenca capaz de realizar complejas simulaciones incluyendo hidrología, pesticidas, ciclo de nutrientes, erosión y transporte de sedimentos. Proporciona simultáneamente herramientas para el procesamiento de imágenes, realización de mapas y modelización; fácilmente se podrán obtener mapas de pendientes, aspectos, delimitación de cuenca, sendas de flujo, etc., necesarios para utilizar el modelo

El objetivo del modelo es predecir el impacto del manejo del agua, sedimentos y carga de químicos agrícolas en grandes cuencas sin estaciones de monitoreo, para satisfacer este objetivo el modelo presenta las siguientes características:

Los procesos físicos relacionados con movimientos de agua, movimientos de sedimento, desarrollo de cultivo, ciclo de nutrientes, entre otros, son modelados directamente por SWAT empleando los datos de entrada arriba mencionados.

Los beneficios del modelo son:

- Las cuencas sin datos de control (escurrimientos máximos) se pueden simular.

- El impacto relativo de datos de entrada alternativos (variaciones en prácticas del manejo, clima, vegetación, etc.), en la calidad del agua, u otras variables de interés se pueden cuantificar.
- Computacionalmente es eficiente en la simulación de cuencas muy grandes con una variedad de estrategias de manejo que se pueden realizar sin invertir demasiado tiempo o dinero.
- Permite el estudio de impactos a largo plazo. Generalmente muchos de los problemas examinados por usuarios incluye la gradual incorporación de contaminantes y el impacto en cuerpos de agua río abajo

SWAT incorpora características de varios modelos del ARS y el resultado directo del modelo SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) (Williams et al., 1985; Arnold et al., 1990).

Como el objetivo del modelo es predecir el impacto del manejo del agua, sedimentos y carga de químicos agrícolas en grandes cuencas sin estaciones de monitoreo, para satisfacer este objetivo el modelo es:

- a) Basado en procesos físicos (su calibración no es posible en microcuencas sin estaciones de monitoreo).
- b) Usa información disponible (actual).
- c) Es eficiente desde el punto de vista computacional para operar grandes cuencas en tiempo razonable.
- d) Es continuo y capaz de simular largos periodos para evaluar los efectos de los cambios en el manejo de agua, sedimentos y carga de químicos agrícolas.
- e) La figura 4 muestra un esquema general de los procesos operacionales utilizados por el modelo SWAT.

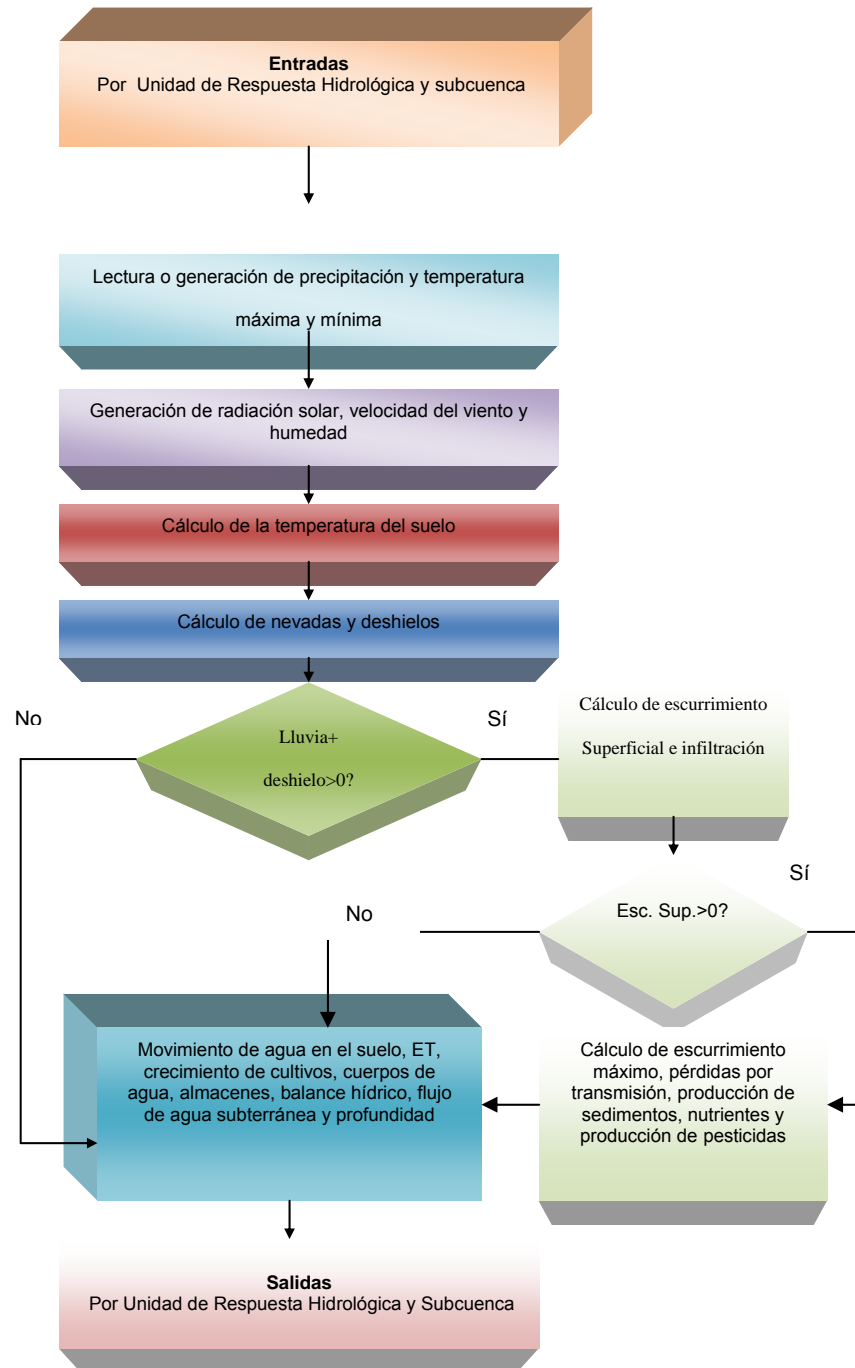


Figura 4. Diagrama de flujo de la operación del modelo SWAT a nivel diario

Validación del modelo SWAT

Actualmente el modelo SWAT ha sido probado en diferentes estudios ya que este tipo de herramientas permite conocer más de cerca nuestras cuencas y determinar posibles formas de manejo como: implementación de estaciones hidroclimáticas a nivel de microcuenca; mayor investigación relacionada con la escorrentía; y los impactos que produce la erosión y la degradación de suelos respecto a la vegetación y al recurso agua, entre otros.

Componentes del modelo SWAT

Los componentes del modelo pueden ser ubicados en ocho principales fracciones: hidrología, clima, sedimentación, temperatura del suelo, crecimiento de cultivos, nutrientes, pesticidas y manejo de cultivos (Figura 5).

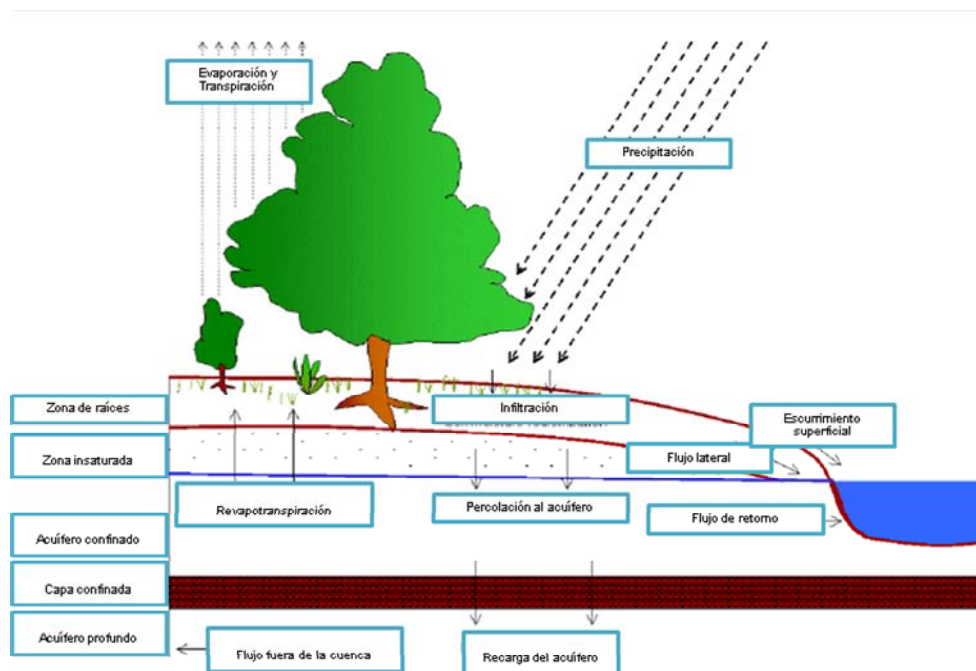


Figura 5 Componentes hidrológicos del modelo SWAT.

Entre los elementos del clima más familiares (percibidos por el hombre), están:

- Temperatura
- Precipitación
- Humedad
- Radiación Solar
- Viento
- Presión atmosférica
- Evaporación
- Nubosidad

Las variables climáticas necesarias para correr el modelo SWAT son: precipitación, temperatura del aire, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa; El modelo registra valores de éstos elementos para ser ingresados como registros de datos observados o generados durante la simulación. Si la precipitación diaria y las temperaturas máximas y mínimas no están disponibles pueden ser introducidas directamente al modelo, 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 simularse para toda la cuenca o clima diferente también se pueden simular para cada subcuenca, ver figura 6.

1. Precipitación:

La precipitación es el agua que recibe la superficie terrestre en cualquier estado físico, proveniente de la atmósfera. En meteorología, la precipitación se define: cualquier forma de hidrometeoro que cae del cielo y llega a la superficie terrestre. Esto incluye lluvia, llovizna, nieve, cinarra (nieve menuda en forma de grajea), granizo.

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. Cuando un evento de precipitación ocurre, la lamina se calcula a partir de la generación de una distribución de la

precipitación diaria.

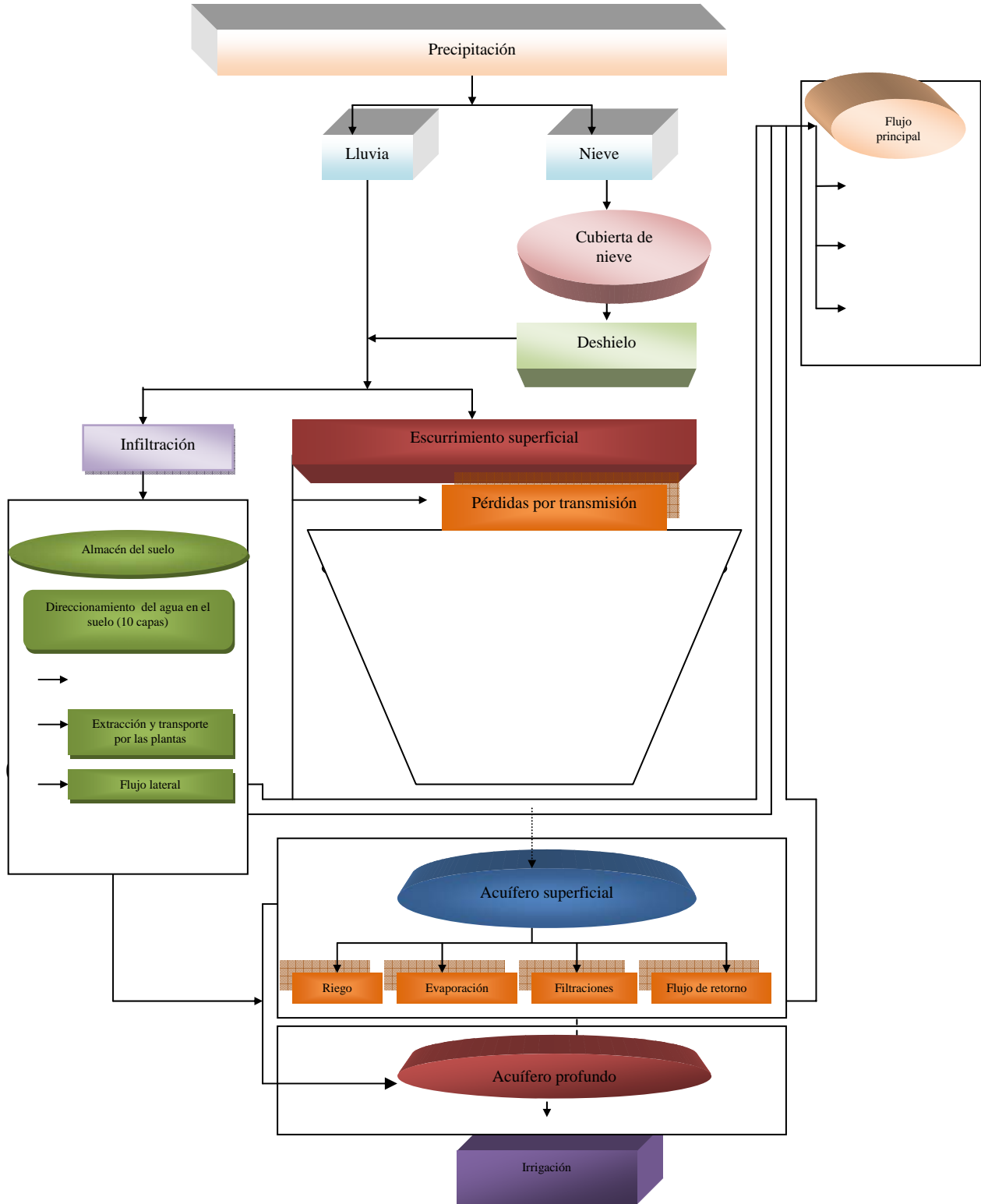


Figura 6. Simulación del movimiento de agua por SWAT

La cantidad de la precipitación diaria se reparte entre la lluvia y la nieve usando la temperatura diaria promedio del aire.

2. Temperatura del aire.

Se define como los rayos solares que atraviesan la atmósfera sin que el aire absorba una cantidad apreciable del calor de aquellos. Pero, en cambio, la radiación solar es absorbida por la tierra, la cual a su vez calienta por contacto las capas inferiores de la atmósfera, y estas luego transmiten su calor a las capas más altas, en virtud de las corrientes de convección que se establecen. Así pues, en general, las capas bajas de la atmósfera se hallan a mayor temperatura que las situadas encima de ellas y, por tanto, la temperatura del aire, igual que la presión, disminuye con la altitud. Esta afirmación puede tomarse como cierta para los 11 ó 12 primeros kilómetros de la atmósfera, siendo la disminución (gradiente) de unos 0.55°C . por cada 100 m. de aumento en la altura.

La temperatura del aire máximo 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 en 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.

3 Radiación solar, la radiación solar la componen ondas electromagnéticas emitidas por el Sol, que puede considerarse un cuerpo esférico.

4 Velocidad del viento y humedad relativa, la velocidad del viento mide la componente horizontal del desplazamiento del aire en un punto y en un instante determinado. Se mide mediante un anemómetro, y la unidad de medida es habitualmente metros por segundo (m/s). Las ausencias de viento se denominan calmas.

En meteorología es importante tener en cuenta que la dirección nos indica de dónde viene el viento, no hacia dónde va. Se mide en grados, desde 0° (excluido) hasta 360° (incluido), girando en el sentido de las agujas del reloj en el plano horizontal visto desde arriba. Si por ejemplo el viento sopla hacia el suroeste, la dirección marcará unos 225° , y nos referiremos a él como viento del nordeste. La dirección del viento se mide mediante una **veleta**. La velocidad y la dirección del

viento se miden a 10 metros de altura sobre el nivel del suelo en la mayoría de las estaciones, y a 2 metros de altura en algunas de ellas.

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 se 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.

La humedad relativa es una medida del contenido de humedad del aire y, en esta forma, es útil como indicador de la evaporación, transpiración y probabilidad de lluvia convectiva. No obstante, los valores de humedad relativa tienen la desventaja de que dependen fuertemente de la temperatura del momento.

Sedimentación

Producción de sedimentos: La sedimentación es el proceso por el cual el material sólido, transportado por una corriente de agua, se deposita en el fondo del río, embalse.

Ecuación universal de pérdida del suelo

a) Es una ecuación que permite predecir la pérdida de suelo, evaluarla matemáticamente y tener una guía de ayuda para el planeamiento de la conservación de suelos. Esta ecuación es más refinada y no tiene restricciones geográficas y es aplicable en todos los lugares donde sea posible evaluar los factores individuales.

b) Es una técnica que sirve para estimar la pérdida de suelo, se desarrollo principalmente para proporcionar un instrumento de planificación para los técnicos en conservación por la facilidad de su aplicación, ésta fue la consideración más importante en su formulación.

c) A = Promedio anual de pérdida de suelo (TM/unid. de área) R = Factor de lluvia, es el número de unidades de índice de erosión que ocurre en un año normal de lluvias K = Factor del suelo (TM de pérdida de suelo por unidad de área y por unidad de erosión para una pendiente de dimensiones específicas (9% y 22.13 m de largo). C = Factor de cultivos, combina el efecto del tipo de cultivos, rotación de los cultivos y las varias prácticas de manejo de los mismos. L = Factor de la longitud de pendiente, es la relación de pérdida de suelo entre un campo de longitud y pendiente determinada. S = Factor de inclinación de la pendiente, es la

relación de pérdida de suelo entre una pendiente determinada cualquiera y la pendiente de 9% empleada para calcular el valor de K. P = Factor de prácticas de control de erosión, es la relación de pérdida de suelo entre un campo con prácticas de control (terrazas, surcos en contorno, etc.) y otro que no lo tiene.

Con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada, la producción de sedimentos se estima para cada subcuenca. 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. Otros factores de la ecuación de erosión se evalúan como los describe Wischmeier y Smith (1978).

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (Williams, 1975) es:

$$\text{sed} = 11.8 \cdot (Q_{\text{surf}} \cdot q_{\text{peak}} \cdot \text{area}_{\text{hru}})^{0.56} \cdot K_{\text{USLE}} \cdot \text{LS}_{\text{USLE}} \cdot C_{\text{USLE}} \cdot P_{\text{USLE}} \cdot \text{CFRG} \dots\dots\dots (2)$$

Donde:

- sed La producción de sedimento en un día dado (toneladas métricas).
- Q_{surf} El volumen del escurrimiento superficial (mm H₂O/ha).
- q_{peak} La tasa pico del escurrimiento (m³/s).
- area_{hru} El área de la unidad de respuesta hidrológica (ha).
- K_{USLE} El factor de erodabilidad del suelo (0.013 ton m² hr/m³ ton cm) de la ecuación universal de pérdida de suelo.
- LS_{USLE} El factor topográfico de la ecuación universal de pérdida de suelo.
- C_{USLE} El factor de cobertura vegetal y manejo de la ecuación universal de pérdida de suelo.
- P_{USLE} El factor de prácticas mecánicas de la ecuación universal de pérdida de suelo
- CFRG El factor de fragmentos ásperos (rugosidad).

Temperatura del suelo: en el modelo SWAT los promedios diarios de la temperatura del suelo se simulan para el centro de cada capa de suelo para

aplicarse en la hidrología y la degradación del remanente. La temperatura de la superficie del suelo se estima usando la temperatura diaria del aire máxima y mínima y la cantidad de nieve, planta y las coberturas de residuos para el día de interés más los cuatro días inmediatos anteriores. La temperatura del suelo se simula para cada capa usando una función de la profundidad, La temperatura de una capa de suelo es una función de la temperatura superficial, la temperatura media anual del aire y la profundidad del suelo en la cual hay variación de temperatura.

Componentes de transporte de sedimentos

Transporte de agua en los cauces, se entiende por sedimento a las partículas de suelo y roca de una cuenca que son arrastradas y transportadas por una corriente de agua.

El transporte en cauces usa el método de coeficiente variable de almacenamiento, los parámetros del cauce incluyen: longitud del cauce, pendiente del cauce, ancho y profundidad del banco del cauce, la inclinación de los taludes de los cauces, la pendiente del lecho del cauce y la 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.

Según su comportamiento, al ser transportado por el flujo, el transporte de sedimento se puede diferenciar en dos grandes grupos: el de fondo y el de lavado. Al estudiar un tramo del río, el primero es el material que forma el fondo o álveo del cauce y el segundo el que no se encuentra dentro de este material. Este último está formado por partículas muy finas como limos y arcillas que el agua transporta en suspensión.

El fenómeno del transporte de sedimentos consiste en dos componentes que operan simultáneamente (depositación y degradación). El componente de depositación se basa en la velocidad de caída y el componente de degradación en el concepto del poder de la corriente.

Transito de agua y sedimentos en almacenamientos.

Balance y transporte de agua en almacenamientos: en todo sistema o subsistema del ciclo hidrológico, el principio indica que el agua ni se crea ni se destruye, se refleja en la denominada Ecuación del Balance Hidrológico. (Campos Aranda 1983).

Entradas - salidas = Cambio de almacenamiento

El balance hídrico se basa en la aplicación del principio de conservación de masa, también conocido como ecuación de continuidad.

Esta establece que, para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier período de tiempo, la diferencia entre las entradas y las salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada. R. Heras (1981).

El balance de agua en almacenamientos incluye flujos de entrada, flujos de salida, lluvia en la superficie del almacenamiento, evaporación, transmisión en el lecho del almacenamiento, desviaciones y flujo de retorno. Actualmente existen tres métodos para estimar el flujo de salida. El primer método simplemente considera el flujo de salida medido y permite al modelo simular los otros componentes del balance hídrico, el segundo método es para pequeños almacenamientos no controlados y el flujo de salida ocurre a una tasa de salida especificada cuando el volumen excede la capacidad de almacenamiento y el tercer método es para grandes almacenamientos con manejo y se utiliza la estrategia de un volumen mensual especificado.

Manejo del cultivo. El SWAT permite rotaciones del cultivo sin límite y hasta tres cultivos por año, se puede también introducir riego, nutrientes y aplicación de pesticidas (fechas y cantidades).

Labranza y residuos.- El componente de labranza fue designado para repartir la biomasa aérea al momento de la cosecha, otra parte incorporada al suelo y la restante se deja en la superficie como residuo.

El incremento potencial de la biomasa para un día es una función de la energía interceptada y la eficiencia de la planta al convertir la energía a biomasa. La interceptación de la energía se estima como una función de la radiación solar y el índice de área foliar de la planta.

Riego.- Se tiene la opción de simular agricultura de temporal o bajo riego, cuando se selecciona la irrigación se debe especificar el coeficiente de escurrimiento (volumen de agua que sale/volumen aplicado) y un nivel de estrés hídrico de la planta para accionar el riego. El factor de estrés hídrico de la planta varía entre 0-1 (1 significa sin estrés y 0 no hay crecimiento).

Transporte de nutrientes y pesticidas en los cauces.- Los químicos solubles son considerados conservativamente, mientras que los químicos adsorbidos al sedimento se permite que sean depositados con el sedimento.

Transporte de sedimentos en almacenamientos.- La producción de sedimentos del flujo de entrada a los cuerpos de agua y almacenamientos, se calcula con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada. El flujo de salida de la producción de sedimentos a los almacenamientos, se calcula como el producto del volumen de salida por la concentración de sedimentos. La concentración de la producción de sedimento en los almacenamientos del flujo de salida se estima usando una simple ecuación de continuidad basada en los volúmenes y concentración del flujo de entrada, flujo de salida y el almacenamiento del cuerpo de agua.

Interface con Sistema de Información Geográfica

En la actualidad el modelo de simulación hidrológico SWAT se aplica con la interface que utiliza el software Arc-View. La interface de datos de entrada automáticamente subdivide una cuenca en subcuencas y después extrae los datos de entrada al modelo a partir de mapas bases de datos asociados para cada subcuenca. Los datos de suelos, uso del suelo, clima, manejo y topografía se obtienen y escriben en un archivo de entrada con extensión .dbf, y al final en Unidades de Respuesta Hidrológica. El sistema de Información Geográfica (SIG) en los cuales se encuentran datos con formato .dbf.

En años recientes ha habido considerables esfuerzos encaminados a utilizar Sistemas de información Geográfica (SIG) para obtener datos de "entrada" y ser utilizados en modelos de simulación integrales y para el despliegue espacial de los datos de salida de un modelo. Muchas de estas investigaciones inicialmente fueron encaminadas a unir modelos de cuadrículas para un solo evento con SIG basados en formato raster.

El modelo de elevación digital DEM (Digital Elevation Model), Interface con sistemas de información geográfica proporciona el uso del modelo mediante la interface SWAT-Arc View, la composición de datos geográficos digitales, como estaciones climatológicas, hidrografía, uso de suelo y mapas de suelos. Adicionalmente el uso de agua, agua subterránea, cuerpos de agua, la calidad del agua y química del suelo. Con estos datos se obtiene en la interface.

El proceso de modelado del SWAT es a menudo de carácter cíclico, esto es, que varias de las rutinas se repiten. En el proceso de la información bajo el uso de la interface se describen de una manera lineal, como si ninguna rutina se repitiera. En la Figura 8 se presentan los requisitos y claves de control para cada una de estas rutinas.

La interface de salida permite el despliegue de mapas y datos de salida en forma grafica seleccionando una subcuenca a partir de un mapa de un Sistema de Información Geográfica.

Proceso de Modelación, Datos de Estructura y Requerimientos de SWAT, (ver figura 7 y 8)

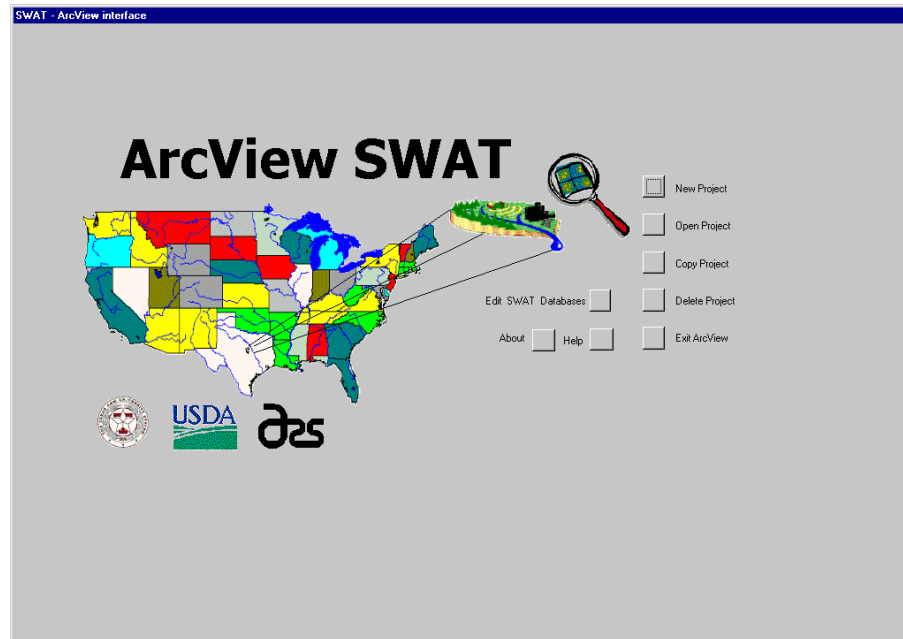


Figura 7, Pantalla de inicio del Modelo SWAT

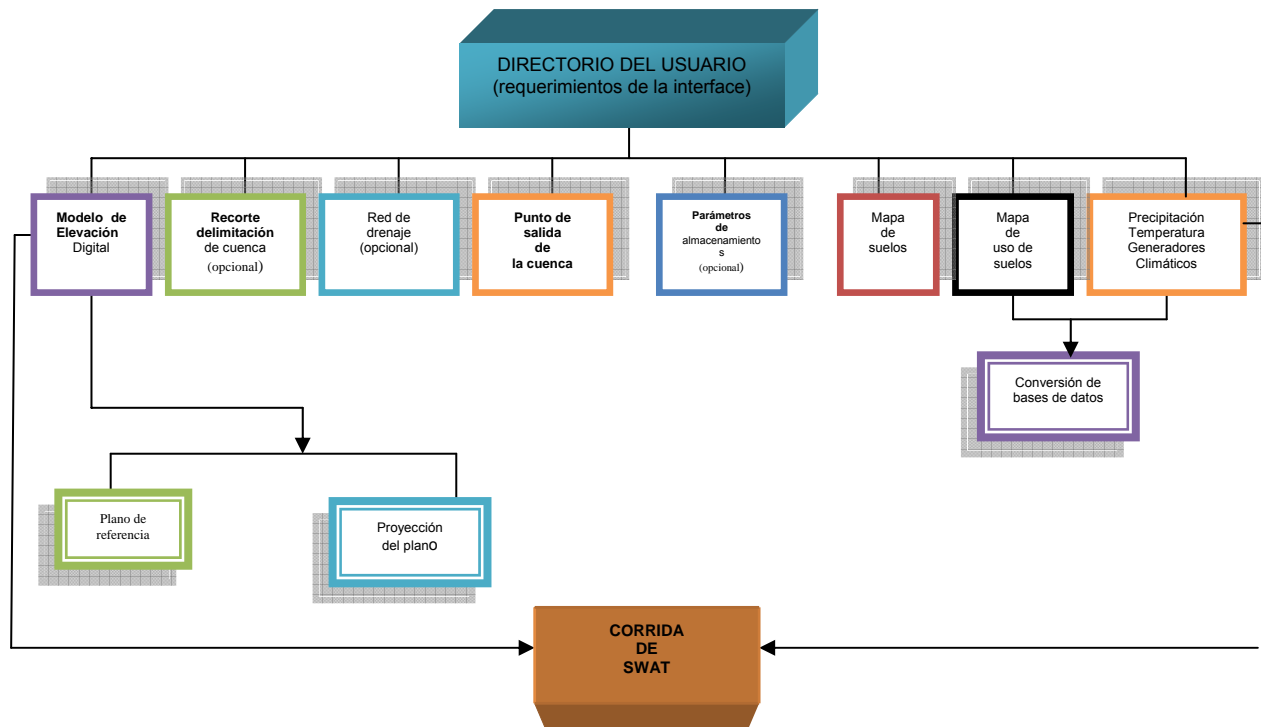


Figura .8. Requerimientos de entrada del SWAT.

4.- APLICACIÓN DEL MODELO SWATT A UN CASO REAL

4.1 Caso de estudio: Cuenca del río Amajac, Estado de Hidalgo.

Se tomo la cuenca del río Amajac por estar en un lugar geográfico al centro del Estado de Hidalgo y tener afluentes importantes de la cuenca del río Panuco, ver figura 9.

Caracterización de la cuenca del río Amajac

Localización de la cuenca

La Sub Cuenca del Amajac se encuentra ubicada en el Estado de Hidalgo, en México y pertenece al Consejo de Cuenca del Pánuco - Región Hidrográfica IX-3, ver figura 9.

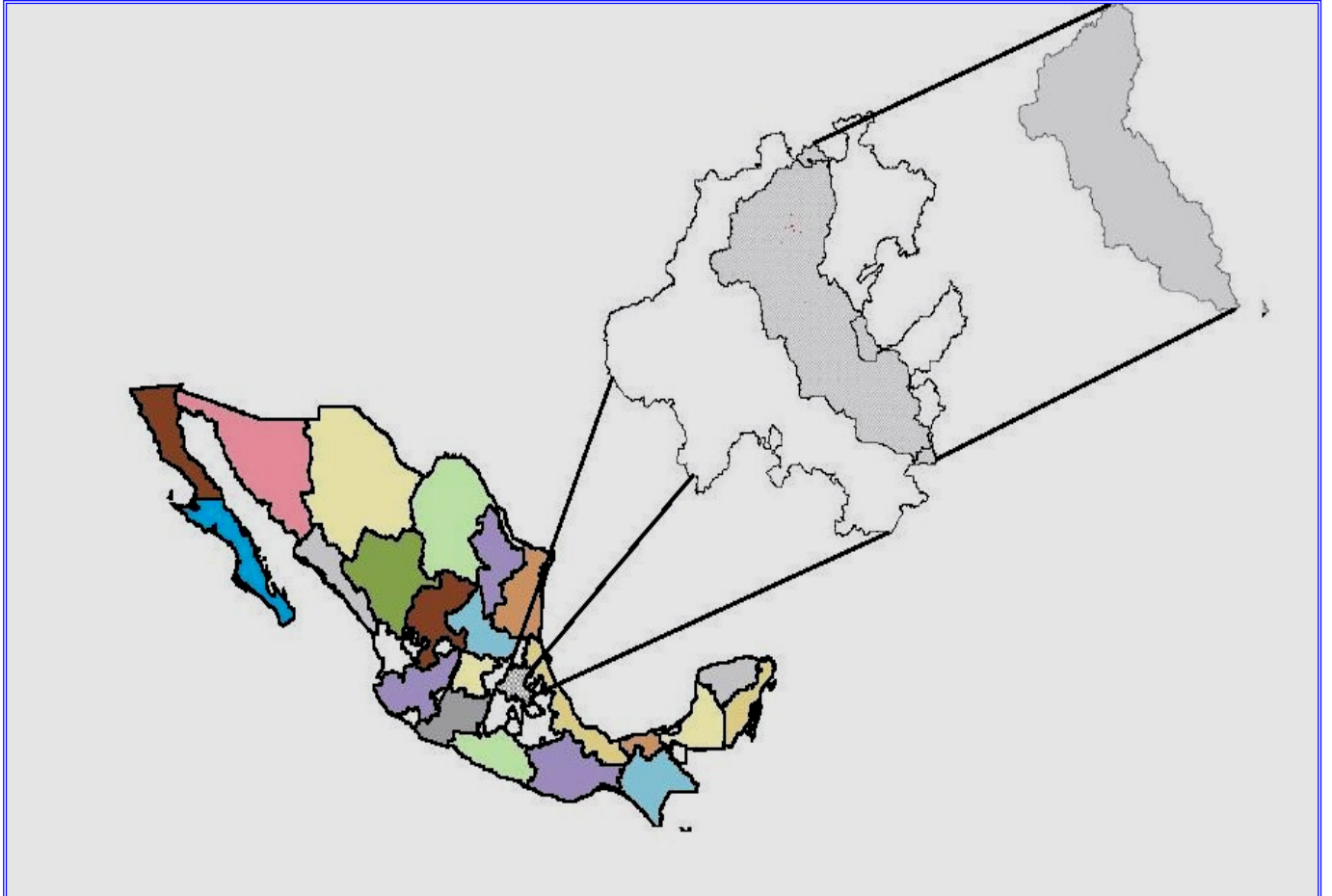
Esta cuenca tiene una área de 6826.50 Km², con un sistema de drenaje que ha experimentado evolución en el tiempo, debido a la gran demanda del recurso hídrico por los usuarios en esta zona.

La subcuenca de Amajac consta de 37 municipios, mismos que se presentan en la tabla 1.

Los principales cauces son: el río Cocula que después se transforma en el río Meztitlán y que se une con el río Amajac.

La cuenca del río Amajac se localiza en la porción central del estado de Hidalgo, entre las siguientes colindancias: al norte con el estado de San Luis Potosí, al sureste con el estado de Puebla, al noreste con el estado de Veracruz, al sur con Tlaxcala y el Estado de México, al oeste con Querétaro y al oeste con los municipios de Ixmiquilpan, Mineral de La Reforma, San Agustín Tlaxiaca y Zempoala, Hidalgo

Figura 9 Localización de la Cuenca



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
DIRECCIÓN DE POSGRADO

“SIMULACION DEL MODELO SWAT EN LA CUENCA DEL RIO AMAJAC ESTADO DE HIDALGO”

MAPA DE LOCALIZACION DE LA CUENCA DE AMAJAC

ELABORÓ

REVISÓ

APROBÓ

ING. TRINIDAD ARGOTA Q

M en C. LUCIO FRAGOSO SANDOVAL

M en C. PINO DURAN ESCAMILLA

Tabla 1. Municipios que conforman la cuenca del río Amajac, Hidalgo

| No | Municipio | Estado | Superficie (km ²) | Superficie (%) |
|----|-----------------------------|---------|-------------------------------|----------------|
| 1 | Acatlán | Hidalgo | 235.01 | 3.44 |
| 2 | Acaxochitlán | Hidalgo | 24.39 | 0.36 |
| 3 | Actopan | Hidalgo | 139.06 | 2.04 |
| 4 | Agua Blanca de Iturbide | Hidalgo | 87.01 | 1.27 |
| 5 | Atotonilco El Grande | Hidalgo | 458.40 | 6.72 |
| 6 | Cardonal | Hidalgo | 348.94 | 5.11 |
| 7 | Chapulhuacán | Hidalgo | 146.75 | 2.15 |
| 8 | Cuautepec de Hinojosa | Hidalgo | 257.95 | 3.78 |
| 9 | El Arenal | Hidalgo | 19.56 | 0.29 |
| 10 | Eloxochitlán | Hidalgo | 239.92 | 3.51 |
| 11 | Epazoyucan | Hidalgo | 1.89 | 0.03 |
| 12 | Huasca de Ocampo | Hidalgo | 306.33 | 4.49 |
| 13 | Ixmiquilpan | Hidalgo | 39.85 | 0.58 |
| 14 | Jacala de Ledesma | Hidalgo | 272.49 | 3.99 |
| 15 | Juárez Hidalgo | Hidalgo | 111.18 | 1.63 |
| 16 | La Misión | Hidalgo | 87.50 | 1.28 |
| 17 | Lolotla | Hidalgo | 155.51 | 2.28 |
| 18 | Metepec | Hidalgo | 138.52 | 2.03 |
| 19 | Metztitlán | Hidalgo | 811.12 | 11.88 |
| 20 | Mineral del Chico | Hidalgo | 168.19 | 2.46 |
| 21 | Mineral del Monte | Hidalgo | 37.19 | 0.54 |
| 22 | Molango de Escamilla | Hidalgo | 175.47 | 2.57 |
| 23 | Nicolás Flores | Hidalgo | 258.19 | 3.78 |
| 24 | Omitlán de Juárez | Hidalgo | 76.83 | 1.13 |
| 25 | Pachuca de Soto | Hidalgo | 4.98 | 0.07 |
| 26 | San Agustín Metzquititlán | Hidalgo | 196.53 | 2.88 |
| 27 | San Bartolo Tutotepec | Hidalgo | 2.63 | 0.04 |
| 28 | Santiago de Anaya | Hidalgo | 108.09 | 1.58 |
| 28 | Santiago Tulantepec de Lugo | Hidalgo | 65.86 | 0.96 |
| 30 | Singuilucan | Hidalgo | 170.20 | 2.49 |
| 31 | Tenango de Doria | Hidalgo | 5.24 | 0.08 |
| 32 | Tepehuacán de Guerrero | Hidalgo | 350.23 | 5.13 |
| 33 | Tlahuiltepa | Hidalgo | 521.94 | 7.65 |
| 34 | Tlanchinol | Hidalgo | 98.95 | 1.45 |
| 35 | Tulancingo de Bravo | Hidalgo | 220.55 | 3.23 |
| 36 | Xochicoatlán | Hidalgo | 1.15 | 0.02 |

| | | | | |
|----|------------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| 37 | Zacualtipan de Angeles | Hidalgo | 61.40 | 0.90 |
| 38 | Zimapán | Hidalgo | 73.80 | 1.08 |
| 39 | Chignahuapan | Puebla | 70.93 | 1.04 |
| 40 | Huayacocotla | Veracruz | 176.18 | 2.58 |
| 41 | Tamazunchale | San Luis Potosí | 100.59 | 1.47 |
| | TOTAL | | 6 826.50 | 100.00 |

4.2 Descripción de la estación hidrométrica "Temamatla".

El Rió Amajac es uno de los afluentes más importantes de la cuenca del río Pánuco. Drena parte de las derivaciones por la parte poniente de la Sierra Madre Oriental, en la parte sur de la cuenca del río Panuco. Esta cuenca es en general de relieve montañosa, excepto en la parte de la región de Tulancingo, Hgo.

Tiene sus orígenes en el estado de Puebla cerca de los límites con el estado de Hidalgo con una elevación de 2, 950 msnm. adquiriendo en esta región el nombre del río Tlancholoya; sigue un rumbo nor-poniente; pasa al poniente de Tulancingo, Hgo. Cambiando su nombre al de rió Grande de Tulancingo siendo normalizado por la Laguna de Meztitlán, embalse natural drenado actualmente mediante túneles artificiales, pasando esta laguna cambia su nombre a río Almolón; recibe por margen izquierda a su afluente más importante el río Amajaque que cambia su nombre por el río Amajac, ratificando su rumbo al noroeste, converge al colector general por su margen izquierda, ligeramente aguas debajo de la población de Tamazunchale, S.L.P.

El área de la cuenca es de 6,884 Km²
 Coordenada Long. W.G. 98° 45.5'
 Lat N 21° 14.5'

En el poblado de ejido Temamatla, municipio de Tamazunchale, estado de San Luis Potosí, a 3 Km. aguas arriba de la confluencia del rió Amajac al Moctezuma se ubica, la estación hidrométrica de Temamatla.

Estructura para aforos: Para efectuar los aforos se utiliza el puente de la carretera, el cual tiene un claro total de 8.66 m. y está formado por una losa de concreto reforzado, con los estribos de mampostería. La sección de aforo forma parte del puente, con ambas márgenes de mampostería y fondo de concreto. La sección es perpendicular a la corriente. Un banco de nivel en concreto se encuentra en el extremo derecho del pasamanos del puente, (cabeza de la escalera), con una altitud de 2485.935 msnm.

4.3. Estudios del sitio

Fisiográfico

La geografía de la región de estudio está incluida dentro de dos provincias fisiográficas: la Sierra Madre Oriental y el Sistema Volcánico Transversal, se caracterizan por presentar relieve de gran contraste y el sector sur al Cinturón Volcánico Transmexicano (Lugo-Hubb, 1990). En la parte centro-sur se advierte una zona de rocas volcánicas de mayor relieve extremadamente disectado. La Sierra Madre Oriental se caracteriza por estar compuesta principalmente de rocas carbonatadas, ígneas intrusivas de composición granodiorítica y metamórficas.

En Santa María Amajac, rocas clásticas en estratos horizontales que forman lomeríos bajos cortados por numerosos arroyos.

En el Tabla 2, se señalan las provincias y subprovincias que pertenecen a la cuenca del río Amajac.

| SIERRAS EN LA CUENCA | LUGAR |
|-------------------------------|------------------------------|
| Sierra Madre Oriental | Carso Huasteco |
| Sistema Volcánico Transversal | Lagos y volcanes del Anáhuac |

Fuente: INEGI (1992).

Tabla. 2. Zonas fisiográficas en la cuenca del río Amajac, Hidalgo.

Hidrografía

El estado de Hidalgo se encuentra casi en su totalidad dentro de la región hidrológica Pánuco (RH 26) con una superficie de 19,793.60 km², que corresponde a la vertiente del Golfo de México y tiene como corriente principal el río

Moctezuma, que se origina en el cerro La Bufa, estado de México, a 3,800 msnm. En su inicio es denominado San Jerónimo.

La región hidrológica 26 es calificada como una de las más significativas del país, tanto por su superficie, que la sitúa en el cuarto lugar nacional, como por la capacidad de sus escurrimientos, que le otorgan el quinto lugar. Debido a su gran superficie, dicha región se divide en dos: Alto Pánuco y Bajo Pánuco.

Hidalgo está compuesto por tres sistemas hidrográficos: El río Amajac y Meztlán donde recibe diversos afluentes, los ríos Tula y San Juan del Río. Tempoal, Moctezuma, así como Extóraz, Pánuco y Bajo Amajac. Metztlán e Ixmiquilpan es el límite de los municipios.

El tercer sistema hidrográfico en el estado de Hidalgo está constituido por el río Moctezuma, con margen en el noroeste de la ciudad de México, que penetra al mismo estado de Hidalgo por el municipio de Tepeji de Ocampo, donde recibe el nombre de río Tula. A lo largo de este recorrido recoge las aguas de varios afluentes, hasta llegar a los límites con el estado de Querétaro, donde se le une el gran caudal del río San Juan y las aguas del Tecozautla, en este sitio cambia su nombre por el de río Moctezuma.

Los principales ríos en el estado de Hidalgo son: Amajac, Tula y Metztlán.

En la cuenca del río Amajac se encuentran en funcionamiento dos Distritos de Riego: DR08 Metztlán y DR028 Tulancingo. El primero, localizado en el municipio del mismo nombre, en el que se dispone de alrededor de 4, 907 ha para riego (CNA, 2002), aprovecha las aguas del río Venados y principalmente las aguas de La Laguna Metztlán.

En Tulancingo, el Distrito 028 se localiza en la parte oriental de la cuenca, en los municipios de Tulancingo y Epazoyucan, en el estado de Hidalgo, aprovecha las corrientes de Tizahuapán y Tulancingo, para irrigar una superficie aproximada de 1, 350 has. Además, éste Distrito cuenta con el agua de las presas La Esperanza (sobre el río Tulancingo), con capacidad útil de 2.5 Mm³ para lograr regar aproximadamente unas 800 ha y El Girón (sobre el arroyo Mora), con capacidad útil de 1.3 Mm³ para aprovechamiento del riego en aproximadamente 280 has. La superficie restante (270 has), es regada con aguas negras. Figura 10.

En el Párrafo Quinto del Artículo 27 Constitucional, se establece que la propiedad de las aguas comprendidas dentro del territorio nacional corresponde originariamente a la nación, al igual que la de sus mares territoriales.

La distribución de los climas dentro del área de estudio se debe principalmente a tres factores: altitud, configuración del relieve y posición del territorio con relación al flujo dominante de los vientos; éstos últimos están influenciados en gran medida por la humedad procedente del Golfo de México.

Son dos los factores principales que determinan el clima en la Reserva de la Biosfera, que en términos generales es seco y semiseco cálido en diferentes partes. Su carácter seco o semiseco es determinado por el efecto de proyección de lluvia que la Sierra Madre Oriental ejerce sobre esta región.

En la temporada de lluvias, en verano, los vientos alisios descargan su humedad sobre la zona de barlovento (la dirección desde la cual llega el viento) y las partes elevadas de dicha cadena montañosa, donde se encuentran bosques de pino y encino, entre otros tipos de vegetación templado-fría. Tales vientos arriban a la cañada de Metztitlán con poca humedad y la cruzan por encima contribuyendo a su carácter semiseco. En realidad las nubes todavía cuentan con algo de humedad, pero terminan de descargarla en las montañas elevadas al oeste de la Barranca de Metztitlán, Ver. Figura 11

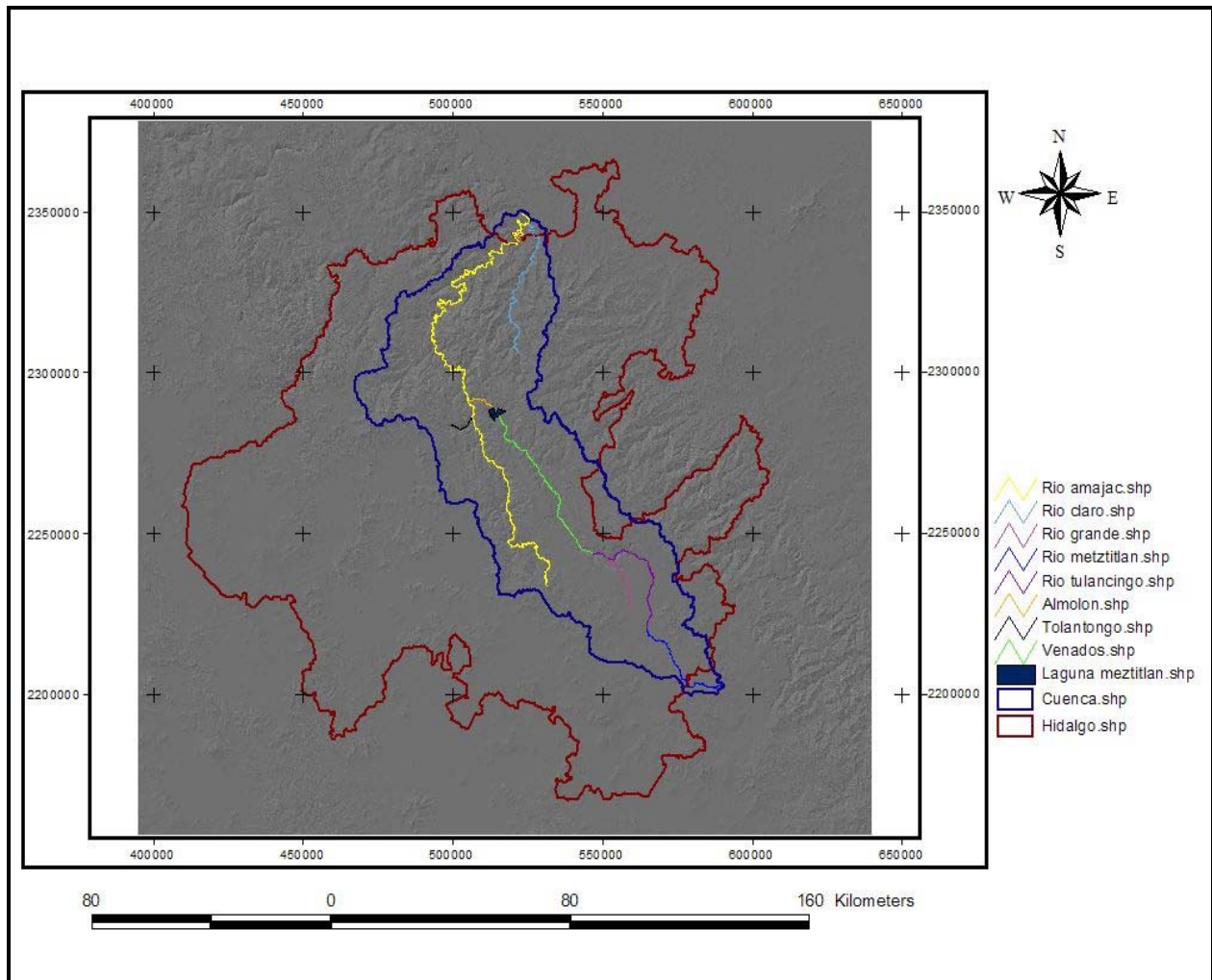
El carácter cálido del clima se relaciona con la altitud. Mientras que las montañas al este y noreste se yerguen entre 1 800 a 2 600 msnm, en la vega la altitud es del orden de 1 200 a 1 300 msnm en las cercanías de la laguna los factores contribuyen a la presencia de mayores temperaturas en la Barranca de Metztitlán son la latitud y el gradiente adiabático.

Suelos

De acuerdo con la Dirección General de Geografía del Territorio Nacional (1980) y según el Sistema de Clasificación FAO-UNESCO (1970), las unidades de suelo presentes en la cuenca del río Amajac, son: (ver anexo A, B y D)

Acrisol (A): Tiene acumulación de arcilla en el subsuelo, es ácido muy pobre en nutrientes, de zonas tropicales a templadas muy lluviosas. En condiciones naturales tienen vegetación de selva o bosque. Se presentan en colores rojos o amarillos claros. Son suelos susceptibles a la erosión.

Figura 10 Mapa de Ríos en la Cuenca de Amajac



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
DIRECCIÓN DE POSGRADO

“SIMULACION DEL MODELO SWAT EN LA CUENCA DEL RIO AMAJAC ESTADO DE HIDALGO”

MAPA DE RIOS EN LA CUENCA DE AMAJAC

ELABORÓ

REVISÓ

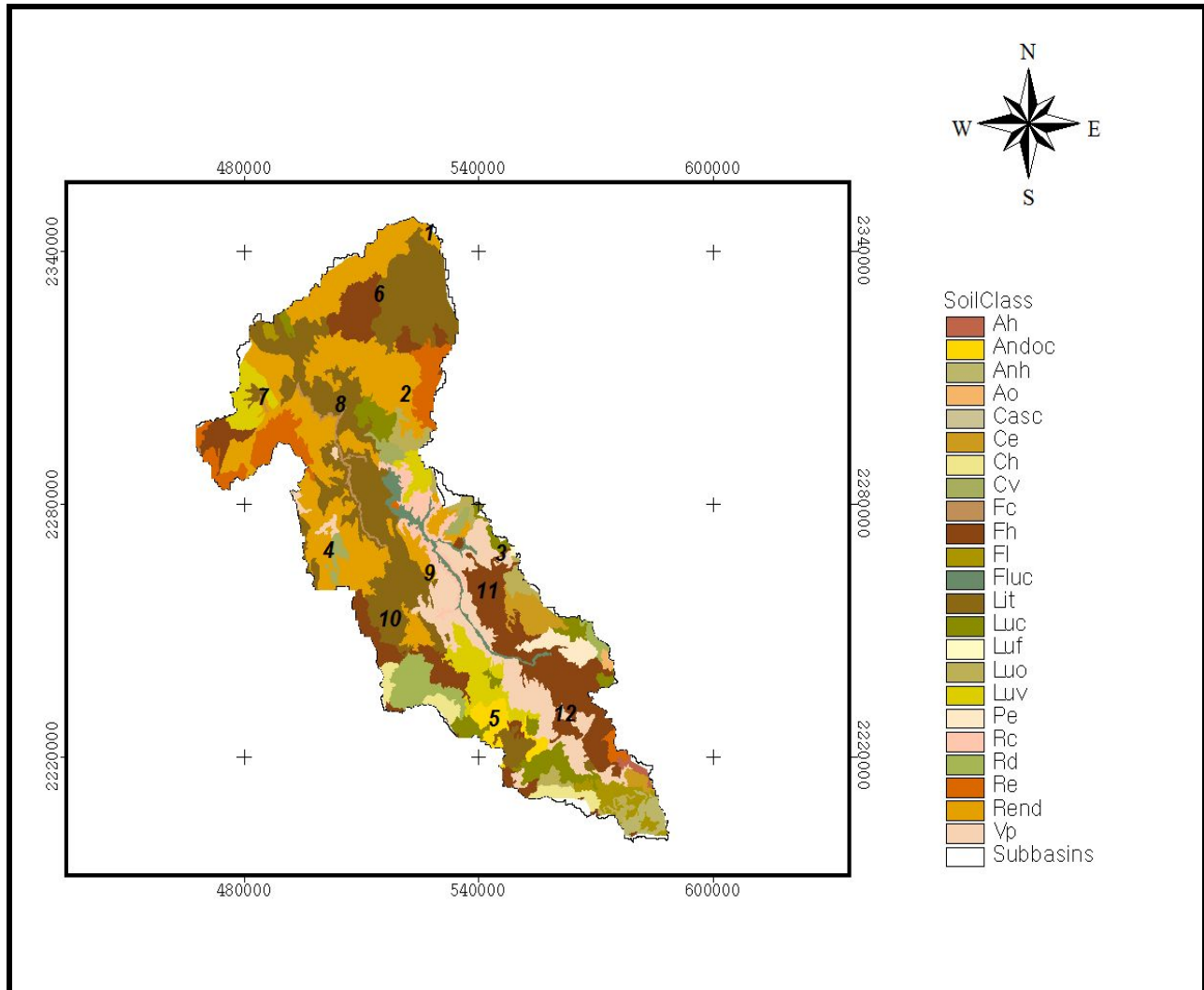
APROBÓ

ING.TRINIDAD ARGOTA.

M en C.LUCIO FRAGOSO SANDOVAL

M en C. PINO DURÁN ESCAMILLA

Figura 11 Tipos de suelo en la Cuenca de Amajac



| | | |
|--|--------------------------------|------------------------------|
| INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL | | |
| SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO | | |
| DIRECCIÓN DE POSGRADO | | |
| "SIMULACION DEL MODELO SWAT EN LA CUENCA DEL RIO AMAJAC ESTADO DE HIDALGO" | | |
| MAPA DE TIPOS DE SUELOS EN LA CUENCA DE AMAJAC | | |
| ELABORÓ | REVISÓ | APROBÓ |
| ING. TRINIDAD ARGOTA Q. | M en C. LUCIO FRAGOSO SANDOVAL | M en C. PINO DURÁN ESCAMILLA |

Andosol (T): Se formaron a partir de cenizas volcánicas. En condiciones naturales tienen vegetación de pino, abeto, encino, etc., si está en zonas templadas, de selva o en zonas tropicales. Contiene una capa superficial de color negro, son sueltos y muy susceptibles a la erosión.

Cambisol (B): Es un suelo joven, poco desarrollado, de cualquier clima, menos zonas áridas, con cualquier tipo de vegetación, en el subsuelo tiene una capa con terrones que presentan un cambio con respecto al tipo de roca subyacente, con alguna acumulación de arcilla, calcio, etc. Susceptibilidad de moderada a alta a la erosión.

Castañozem (K): Tiene una capa superficial de color pardo, rica en materia orgánica y acumulación de calcio en el subsuelo, son de zonas semiáridas a transición a climas muy lluviosos. En condiciones naturales, tienen vegetación de pastizal o matorral. Moderadamente susceptibles a la erosión.

Feozem (H): Presenta una capa superficial oscura, suave y rica en materias orgánicas y nutrientes, se encuentran desde zonas semiáridas hasta templadas o tropicales. En condiciones naturales, tienen casi cualquier tipo de vegetación, se encuentran en terrenos desde planos hasta montañosos y la susceptibilidad a la erosión depende del tipo de terreno donde se encuentren.

Fluvisol (J): Se formó por materiales de depósitos aluviales recientes, excepto los marinos. Están constituidos por material suelto que no forma terrones y son poco desarrollados. Se encuentran en todo tipo de clima, cercanos a zonas de acarreo por agua y la vegetación varía desde selva a matorrales y pastizales.

Litosol (I): Es un suelo de distribución muy amplia, se encuentra en todos los climas y con muy diversos tipos de vegetación, son suelos sin desarrollo, con profundidad menor de 10 cm, tienen características muy variables, según el material que los forma. Su susceptibilidad a la erosión depende de la zona donde se encuentren, pudiendo ser desde moderada a alta.

Luvisol (L): Tiene acumulación de arcilla en el subsuelo, son de zonas templadas o tropicales lluviosas, su vegetación natural es de selva o bosque, de color rojo o claro, son moderadamente ácidos. Son suelos de susceptibilidad alta a la erosión.

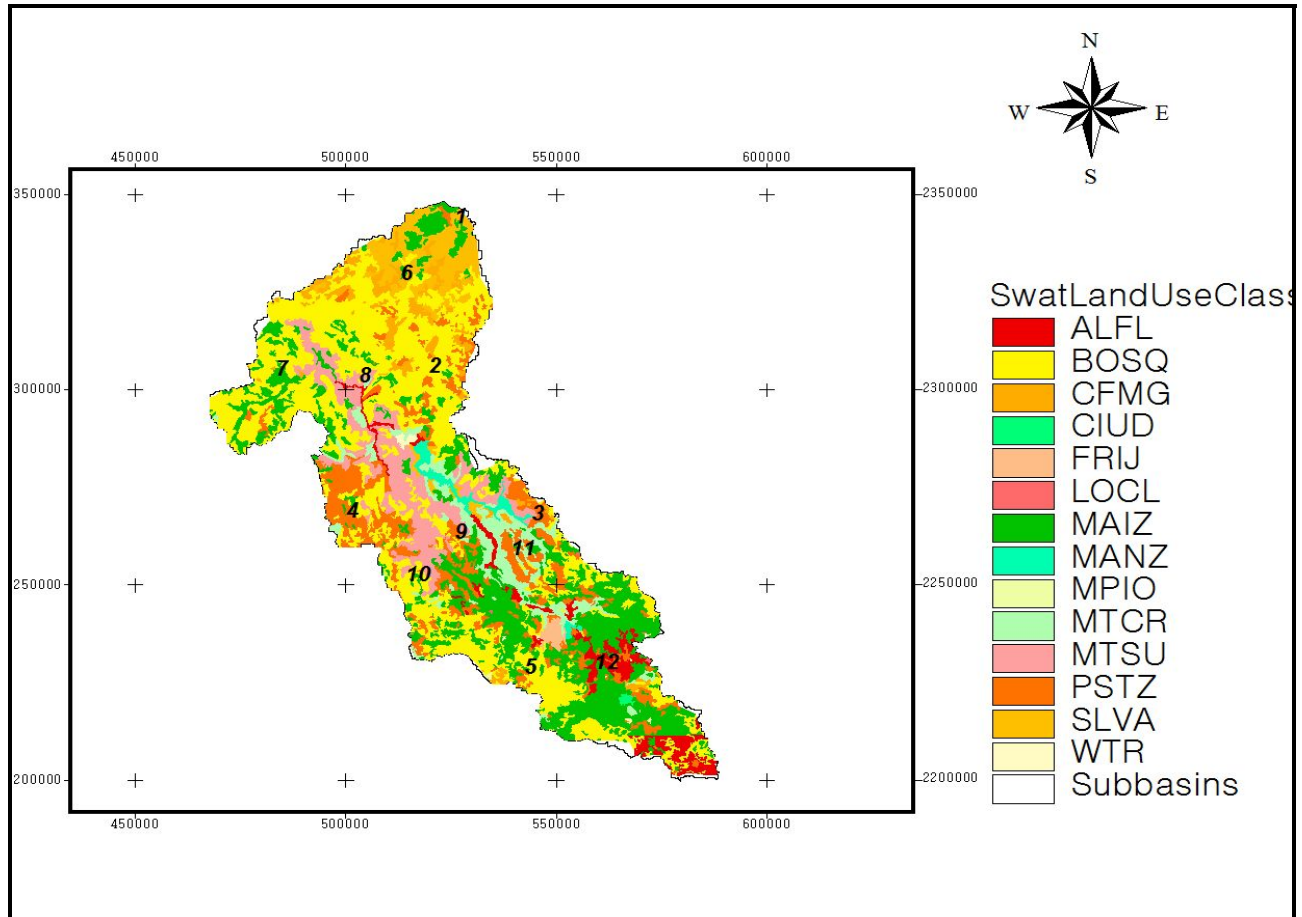
Planosol (W): Este presenta debajo de la capa más superficial, una capa más o menos delgada de un material claro, ácido e infértil que a veces impide el paso de las raíces. Por debajo de esta capa se presenta un subsuelo arcilloso e impermeable o bien roca o un "tepetate". Son de climas semiáridos o templados y su vegetación natural es de pastizal. Son muy susceptibles a la erosión.

Regosol (R): Se caracteriza por no presentar capas distintas, son claros y se parecen a la roca que les dio origen. Se pueden presentar en muy diferentes climas y con diversos tipos de vegetación. Su susceptibilidad a la erosión es muy variable y depende del terreno en el que se encuentren.

Rendzina (E): Tiene una capa superficial rica en materia orgánica que descansa sobre roca caliza o algún material rico en cal. No son muy profundos, son arcillosos y se presentan en climas cálidos o templados, con lluvias moderadas o abundantes. Su susceptibilidad a la erosión es moderada.

Vertisol (V): Es un suelo que presenta grietas anchas y profundas en la época de sequía, son suelos muy duros, arcillosos y masivos, frecuentemente negros, grises y rojizos. Son de climas templados y cálidos con una marcada estación seca y otra lluviosa. Su vegetación natural es muy variada. Su susceptibilidad a la erosión es baja. Ver Figura 12.

De esta manera, las subunidades de suelo presentes en la cuenca son: acrisol órtico, andosol (húmico y ócrico), cambisol (vértico, éutrico y húmico), castañozem cálcico, feozem (calcárico, lúvico y háplico), fluvisol calcárico, litosol, luvisol (vértico, férrico, crómico y órtico), planosol éutrico, regosol (calcárico, éutrico y dístrico), rendzina y vertisol (crómico y pélico) para las fases físicas dúrica, dúrica profunda, lítica, lítica profunda, pedregosa y petrocálcica (DGGTN, 1980).(Anexo D).



| | | |
|--|--------------------------|-------------------------------|
| INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL | | |
| SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO | | |
| DIRECCIÓN DE POSGRADO | | |
| "SIMULACION DEL MODELO SWAT EN LA CUENCA DEL RIO AMAJAC ESTADO DE HIDALGO" | | |
| MAPA DE USO DE SUELOS EN LA CUENCA DE AMAJAC | | |
| ELABORÓ | REVISÓ | APROBÓ |
| ING. TRINIDAD ARGOTA. | M en C. LUCIO FRAGOSO S. | M en C. PINO DURAN ESCAMILLA. |

Figura. 12 Tipos de Uso de suelos

Uso del suelo

El estado de Hidalgo tiene regiones en condiciones territoriales son muy beneficiosas para su desarrollo agrícola. Sin embargo, la agricultura representa una de los fundamentos de su economía. Los cultivos son de temporal y de riego. Las zonas irrigadas se encuentran en Tula, Metztitlán, Ixmiquilpan y Tulancingo. Se encuentran las presas que tienen capacidad mayor de 5 Mm³: Endhó, Requena, Vicente Aguirre, Huichapan y Tesoyo. Entre los cultivos de mayor importancia económica son: maíz, alfalfa, cebada, jitomate, frijol, trigo, maguey pulquero, nopal, café, caña de azúcar, papa y chile verde; también se cultivan tomate, avena para forraje, y ajo, en menor escala. (INEGI, 1992), Tabla 3.

Existen áreas de agricultura de temporal en parcelas muy reducidas en los lomeríos donde es posible realizar esta actividad, destinada principalmente a la producción de cultivos para autoconsumo como frijol y maíz, asociados al cultivo de maguey pulquero.

La demanda de mano de obra que se tiene en la vega de Metztitlán, contribuye a que exista poca o prácticamente nula presión sobre el suelo en las partes altas donde el uso agrícola es restringido por las condiciones ambientales. La mano de obra de las comunidades ubicadas en la parte alta se mueve al valle para trabajar en la agricultura de riego. Ver figura 12

Tabla 3 Uso de suelo

| DESCRIPCIÓN Has. | SUPERFICIE | PORCENTAJE DEL ESTADO |
|-----------------------------|-------------|-----------------------|
| Superficie total del Estado | 2'098,700.0 | 100.00% |
| Superficie agrícola | 625,814.50 | 29.80% |
| Temporal | 479,689.50 | |
| Riego | 146,125.00 | |
| Superficie ganadera | 799,286.50 | 38.10% |
| Pastizales praderas | 90,577.50 | |
| Agostadero | 354,170.00 | |
| Matorrales | 354,539.00 | |
| Superficie forestal | 459,649.00 | 21.90% |
| Bosques | 435,546.00 | |
| Selva | 24,103.00 | |
| Superficie cuerpos de agua | 21,229 | 1.00% |
| Otros usos | 192,721.00 | 9.20% |

Fuente INEGI

Población

Descripción de la infraestructura existente:

Agua Potable:

El abastecimiento de agua potable a la ciudad de Pachuca se realiza a través de la infraestructura de los sistemas descritos en las siguientes tablas 4, 5,6 y 7.

Tabla 4. Sistema Pachuca.

| Pozos en operación: | | |
|----------------------------------|-----------|--|
| Ramal Tizayuca – Pachuca: | 12 | |
| Ramal Téllez – Pachuca: | 9 | |
| Ramal Tezontle – Nopancalco | 3 | |
| Ramal Nuevos Pozos – Palma Gorda | 9 | |
| Total | 33 | |

| | | |
|-------------------------------|---------|----------------|
| Rebombeos en operación | 17 | |
| Regulación (tanques) | 46 | |
| Capacidad de regulación | 44,545 | m ³ |
| Líneas de conducción | 224,710 | m |
| Red de distribución | 776,712 | m |

Tabla 5 Sistema Central:

| | | |
|-------------------------------|--------|----------------|
| Rebombeos en operación | 5 | |
| Regulación (tanques) | 26 | |
| Capacidad de regulación | 2,375 | m ³ |
| Líneas de conducción | 64,876 | km |
| Red de distribución | 26,061 | km |
| Planta potabilizadora | 1 | |

Sistemas externos:

Tabla 6. Sistema Singuilucan - Zempoala:

| | | |
|-------------------------|-------|----------------|
| Rebombeos en operación | 7 | |
| Regulación (tanques) | 35 | |
| Capacidad de regulación | 1,995 | m ³ |
| Líneas de conducción | 100 | km |
| Red de distribución | 300 | km |

Tabla 7. Sistema Epazoyucan:

| | | |
|-------------------------|-------|----------------|
| Rebombeos en operación | 5 | |
| Regulación (tanques) | 42 | |
| Capacidad de regulación | 2,194 | m ³ |
| Líneas de conducción | 25 | km |
| Red de distribución | 180 | m |

Fuente. CNA 2006

Alcantarillado:

El sistema de alcantarillado de la ciudad de Pachuca tiene una cobertura actual del 88% y se encuentra en aceptables condiciones, excepto en las zonas altas de la ciudad (parte norte), las cuales presentan una topografía accidentada y con suelo rocoso, por lo que el servicio es casi nulo en dichas colonias.

La mayor parte de la red de atarjeas existente funciona como alcantarillado combinado, las descargas domiciliarias se efectúan directamente en las barrancas existentes, sin previo tratamiento.

En la zona sur de la ciudad existen algunas colonias que descargan directamente a canales de riego.

Saneamiento:

En la ciudad se construyó un sistema de tratamiento a base de "Wetland" para tratar las aguas residuales generadas por el rastro municipal, con capacidad de 5 l/s, actualmente se encuentra fuera de operación, también se construyó un sistema patentado para tratar 10 l/s de aguas residuales en un fraccionamiento de la ciudad, el cual también está fuera de operación. Se encuentran construidas tres

plantas más de 20, 10 y 5 l/s respectivamente, de las cuales esta última se encuentra en operación, las aguas negras son vertidas al río de "Las Avenidas". Actualmente se está elaborando el proyecto ejecutivo para la planta de tratamiento con una capacidad de tratamiento de 1,000 l/s de aguas servidas generadas en la ciudad.

Problemática:

Descripción de la problemática de agua potable:

Fuentes de abastecimiento.

Pozos profundos.

- ◆ Producción de agua con sustancias alcalinas y ferrosas fuera de norma.
- ◆ Producción de agua sólidos que dañan prematuramente los equipos.
- ◆ Producción de agua con temperatura fuera de normas.
- ◆ Producción de agua turbia en ciertos periodos.

Líneas de conducción:

- ◆ Las líneas por gravedad de las presas de "La Estanzuela" y "Jaramillo", presentan falta de mantenimiento, además de que existen tomas clandestinas en ruta.

Líneas por bombeo:

Servicio en ruta.

- ◆ Poco mantenimiento preventivo y correctivo.
- ◆ Las líneas por su antigüedad, fallan continuamente, principalmente el acueducto de "Téllez" y "La Paz - Cubitos".
- ◆ Falta de macromedidores para el control de gastos.

Redes de distribución:

- ◆ Tuberías muy antiguas.
- ◆ Servicios directos de líneas de conducción por bombeo a la red.

- Tuberías de materiales de mala calidad.
- Material en toma domiciliaria de pésima calidad.

Descripción de la problemática de alcantarillado:

- Falta de mantenimiento en la red de atarjeas.
- Gran parte de los pozos de visita están cubiertos por la carpeta asfáltica, lo que dificulta su inspección y desazolve.
- Falta de colchón mínimo en la tubería y mala construcción de los pozos de visita.

Descripción de la problemática del saneamiento:

De las cinco plantas de tratamiento de aguas residuales existentes, sólo opera una de ellas, con un gasto tratado de 5 l/s.

PROPUESTA DE MEJORAMIENTO

Propuesta de mejoramiento del sistema de agua potable:

- Realizar un estudio sobre la rehabilitación de las líneas de conducción de las presas: "La Estanzuela" y "Jaramillo", ya que tienen servicio en ruta, ocasionando que no se tenga el aprovechamiento adecuado, también es necesario hacer una rehabilitación integral de la planta potabilizadora.

Propuesta de mejoramiento del sistema de alcantarillado:

- Dar mantenimiento constante a las tuberías que conforman la red de alcantarillado, principalmente en aquellas que funcionan como subcolectores y se encuentran en vialidades sin pavimentar.
- Implementar un programa de sustitución de tubería en aquellas zonas de la ciudad en que fueron diseñadas para gastos menores a los que actualmente captan y conducen.

- ♦ Reubicar el tramo del emisor general de la ciudad, que con las obras de ampliación y profundización del río de "Las Avenidas", quedó dentro del cauce de éste.

Propuesta de mejoramiento del sistema de saneamiento:

- ♦ Se tiene integrado el proyecto ejecutivo para la construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales de Pachuca.
- ♦ Construcción de 3.0 Km. de emisor.
(Fuente Conagua, 2003)⁷

Vegetación

De acuerdo con el Ordenamiento Ecológico Territorial del estado de Hidalgo (2001), a continuación se describe la vegetación existente en la cuenca del río Amajac.

En la zona de climas cálidos y semicálidos de la Huasteca, en el noreste de la cuenca, se encuentran selvas altas perennifolias, selvas medianas subperennifolias, selvas bajas caducifolias y algunas ecotonias con el bosque mesófilo de montaña.

En la zona de climas templados de la Sierra Madre Oriental y Eje Neovolcánico, se encuentran los bosques mesófilos de montaña, bosques de pino, bosques de encino, asociación de especies en bosques de pino-encino y de encino-pino, así como bosques de oyamel y bosques de táscate.

En la zona de climas secos y semisecos de la Sierra Madre Oriental y Eje Neovolcánico, se encuentran matorrales crasicaules, matorrales submontanos, matorrales desérticos rosetófilos, chaparrales, mezquites y pastizales naturales.

Selvas altas y medianas

La selva alta perennifolia se localiza en el norte, este y noreste de la cuenca, en las inmediaciones del municipio de Chapulhuacán, Hidalgo. Esta asociación vegetal se presenta en los climas cálidos húmedos con lluvias todo el año (precipitación de 1,500 a 2,500 mm) y temperaturas medias anuales de 20 a 24 °C.

Selvas bajas caducifolias

Esta vegetación se localiza en la parte noroeste de la cuenca, en los límites con el estado de San Luis Potosí, en las márgenes del río Moctezuma. En la parte central de la misma, la selva baja caducifolia se encuentra en manchones, sobre las laderas de los cerros cercanos a los poblados de Tres Cruces y La Paila, en el municipio de Metztlán, Hidalgo.

Se presenta en regiones con temperaturas medias anuales superiores a 20 °C y precipitaciones de 800 mm, con una temporada seca que puede durar siete o hasta ocho meses.

Bosques Mesófilos de Montaña

Este tipo de bosque se desarrolla en suelos Feozems, Regosoles y Luvisoles con fases líticas profundas, constituidas por calizas, lutitas, areniscas y conglomerados, en las laderas este de la Sierra Madre Oriental, al noreste de la cuenca, en altitudes generalmente superiores a 1 000 m y menores de 2 000 m, de relieve accidentado y pendientes abruptas. En las zonas donde crece el bosque mesófilo de montaña son frecuentes las neblinas, la alta humedad atmosférica y, por consiguiente, la disminución de la luminosidad.

Bosques de Pino

Su distribución es amplia. En el centro de la cuenca se les encuentra en la Sierra de Pachuca, que comprende los municipios de Mineral del Chico, Mineral del Monte, Pachuca, Huasca de Ocampo, Acatlán y Tulancingo, formados en su mayoría por *Pinus montezumae*, *P. rudis*, *P. patula* y *P. teocote*. En los municipios de Agua Blanca, Metepec y Tenango de Doria, se encontraron bosques con *P. patula*, *P. teocote*, *P. ayacahuite* y *P. pseudostrobus* var. *apulcencis*.

Al sureste, casi en los límites con Puebla, en los municipios de Acaxochitlán y Cuautepec, se encontró bosque de *P. patula* y *P. teocote*; y al sur, en los municipios de Santiago Tulantepec y Singuilucan se presentó *P. montezumae*, *P. rudis*, *P. hartwegii* y *P. leiophylla*. Hacia el noreste, en los municipios de Molango, Xochicoatlán, Eloxochitlán, Metztlán y Zacualtipán, se localizaron bosques de

pino, en los cuales domina el *P. patula*, aunque también existe *P. teocote* y *P. greggii*; y finalmente, en el norte, en el municipio de Zimapán y en los límites del sur de Jacala y del norte de Nicolás Flores, se encontró *P. teocote*, *P. greggii*, *P. pseudostrobus* y *P. cembroides* en las porciones más secas.

Bosques de Encino

Los bosques de encino que se encuentran en condiciones de mayor humedad, están relacionados con los de oyamel, que se presentan generalmente a altitudes de 2 000 a 3 000 m. En la parte noreste, por los municipios de La Misión, Nicolás Flores y Zimapán, se encontraron importantes bosques de encino, cuyas especies más representativas son: *Quercus sartorio*, *Q. castanea*, *Q. germana*, *Q. eduardii*, *Q. rugosa*, *Q. crassifolia*, *Q. rugulosa* y *Q. macrophylla*. Estos también se encontraron en la zona centro-noreste, específicamente en los municipios de Metztlán, Metzquitlán y Zacualtipán de Angeles.

Bosques Mixtos de Pino-Encino y Encino-Pino

Se desarrollan sobre sierras y mesetas al este, oeste y centro de la parte norte de la cuenca. Los límites en que crece, van desde los 1 500 hasta los 2 000 msnm. Sin embargo, en la Sierra de Juárez, cercana a Zimapán, se localiza entre los 2 600 y 3 100 msnm.

Las especies más abundantes son: *Pinus teocote*, *P. montezumae*, *P. cembroides*, *Quercus crassipes*, *Q. crassifolia* y *Q. rugosa*. En la zona de Jacala, entre los 1 600 y 2 500 msnm son comunes los bosques de *Quercus mexicana* mezclados con *P. teocote*, *Arbutus xalapensis*, *Juniperus flaccida* y *Juglans mollis*.

En los municipios de Jacala, Zimapán, Nicolás Flores, Tlahuiltepa y El Cardonal, comenzando por la parte norte de la cuenca, los bosques mixtos de pino se distribuyen en manchones fragmentados. Las especies más comunes en esta región son: *P. cembroides*, *P. teocote* y *P. pseudostrobus*. Otra región importante que presenta este tipo de vegetación está ubicada en la parte noreste, en los municipios de Eloxochitlán, Zacualtipán y Metzquitlán. Las especies más comunes son: *P. patula*, *P. teocote*, *P. greggii*, *Q. rugosa*, *Q. sartorii* y *Q. obtusata*.

Finalmente, en la parte de la Sierra de Pachuca y en los municipios de Mineral del Chico, Mineral del Monte y Omitlán de Juárez, se localizan bosques de *P. leiophylla*, *P. montezumae*, *P. patula* y *P. rudis* mezclados con *Q. rugosa*, *Q. laurina*, *Q. castanea*, *Q. eduardii* y *Q. mexicana*, principalmente.

Bosques de Oyamel

Este tipo de vegetación requiere de condiciones especiales para subsistir, tales como: mucha humedad, precipitaciones superiores a los 1 000 mm anuales a grandes altitudes en zonas muy inclinadas o cañadas, donde los vientos se manifiestan muy fuertes, se desarrolla bajo un clima semifrío. Generalmente se presenta sobre suelos volcánicos. Los principales oyametales se localizan en la Sierra de Pachuca, en los municipios de Mineral del Chico, Mineral del Monte, Huasca de Ocampo, Singuilucan y sólo en manchones en el municipio de Santiago Tulantepec.

Bosques de Juniperus

Dentro de este grupo se incluyen los bosques de táscate o sabino (*Juniperus spp*), que se caracterizan por la presencia de árboles achaparrados, siempre verdes, de 1 a 2 m de alto, aunque también son comunes los de 3 a 8 m, o incluso más altos, según el tipo de clima. También es usual encontrarlos intercalados con bosques de encino y pino, con algunos elementos de matorrales y pastizales.

Matorral Xerófilo

Según las asociaciones vegetales que lo forman, se presentan cuatro áreas fisonómicamente diferentes, independientemente de la dominancia de las especies. En la zona de estudio se encuentran los siguientes: matorral crasicaule, matorral crasicaule-nopalera, matorral desértico rosetófilo, matorral subinerme y matorral espinoso.

Estos dos últimos se refieren a la cantidad de plantas espinosas que contenga el matorral a simple vista. Si tiene el 50 % de especies sin espinas, se considera subinerme.

El matorral crasicaule se distribuye a todo lo largo y ancho de la parte centro-oeste de la cuenca, se le observa en rodales grandes y pequeños. Lo caracterizan las cactáceas de tallos suculentos que le dan una fisonomía distintiva; es un matorral abierto dominado por especies crasicaules mezcladas con especies arbustivas, sufrutescentes y herbáceas. Todas ellas son xerófilas, a menudo espinosas. Su altura varía en función de las especies que constituyen el estrato principal de 4 a 6 m. Se distribuye entre los 1 000 y 2 000 msnm, sobre las partes bajas de las sierras y en lomeríos y llanuras.

El matorral crasicaule con fisonomía de nopalera, se refiere a que tiene dominancia de nopales del género *Opuntia sp.* En éstas áreas dominan los carbonatos de calcio, y se localizan en el límite de la subprovincia con la Sierra Madre Oriental, en los municipios de Metzquititlán, Huasca de Ocampo y el sureste de Metztitlán.

El matorral desértico rosetófilo es una vegetación semiarbustiva que se desarrolla en áreas muy restringidas en cuanto a humedad y suelos someros, por lo general de origen sedimentario (calizas). Las plantas que lo constituyen tienen hojas alargadas de punta fibrosa y tienen forma de roseta. Lo caracterizan elementos como la lechuguilla (*Agave lechuguilla*), el espadín (*Dasyilirion acrotiche*) y algunas cactáceas.

El tipo de matorral con fisonomía de subinerme y crasirosulifolio se localiza al norte del municipio de Progreso y oeste de El Cardonal, sobre las laderas de las sierras y lomeríos. Asimismo, se desarrolla al igual que el matorral submontano y el crasicaule en el cañón y parte del Río Tulancingo, en terrenos con suelos someros y climas secos o semisecos.

El matorral espinoso presenta dos estratos: uno arbustivo denso de 4 a 6 m de altura, y el otro, herbáceo discontinuo menor de 50 cm de altura. Además, se caracteriza porque más del 60 % de las especies son espinosas. Las especies que lo conforman son: *Acacia amentacea*, *A. farnesiana*, *Capparis incana*, *Celtis pallida*, *Dalea bicolor*, *Helietta parviflora*, entre otras. Se presenta en los municipios de Ixmiquilpan, Zimapán y Tlahuiltepa.

Matorral Submontano

Este matorral es inerme (sus especies no presentan espinas, generalmente), de 3 a 5 m de altura, denso y en ocasiones perennifolio. Las especies predominantes son: *Neopringlea integrifolia* y *Montanoa sp.* Otras plantas leñosas importantes son de

los géneros *Pistacia*, *Rhus*, *Dodonaea*, *Fouquieria*, *Helietta*, *Sophora*, *Karwinskia*, *Portlandia*, *Croton*, *Salvia*, *Bursera* y *Acacia*, entre otros.

El matorral submontano adopta la distribución espacial de la depresión de la Barranca de Metztlán, que corre en una diagonal con dirección sureste-noroeste, desde Atotonilco El Grande, pasando por Metztlán, Eloxochitlán, Tlahuiltepa y Jacala, hasta llegar a Pacula.

Otras porciones significativas se localizan en las márgenes del río Moctezuma, en el municipio de Zimapán, así como en el municipio de Metzquitlán, en las márgenes del río San Agustín, afluente del río Grande de Tulancingo o Venados.

Chaparral

Es una asociación de arbustos generalmente densa, resistentes al fuego, de 1 a 2 m de altura, que se desarrolla principalmente en laderas de cerros por arriba del nivel de los matorrales xerófilos y de pastizales naturales y en ocasiones mezclados con bosques de pino y encino. Está formado por especies arbustivas de *Quercus sp.*, *Adenostoma sp.*, *Arctostaphylos sp.*, *Cercocarpus sp.*, *Opuntia sp.*, entre otras. Generalmente se desarrolla sobre suelos poco profundos con material arcilloso.

Mezquital y Huizachal

Las comunidades vegetales que se agrupan en esta clasificación se caracterizan por presentar árboles bajos espinosos de 4 a 5 m de altura, predominando los géneros *Prosopis* y *Acacia*, acompañados de *Fouquieria campanulata*, *Lantana sp.*, *Coryphanta octacantha*, *Bursera fagaroides*, *Nolina nelson*, *Yucca filifera*, *Mimosa sp.*, *Hechita sp.*, *Jatropha sp.*, *Machaonia sp.*, *Parthenium sp.* y *Croton sp.* Los terrenos que los sustentan son muy codiciados para la agricultura, por tener suelos profundos y fértiles.

Pastizal

Los pastizales son una asociación vegetal constituida por individuos gramínoles que pueden existir por diferentes causas: los naturales y los inducidos. Éstos últimos crecen en áreas en donde la actividad humana interviene, ya sea en terrenos agrícolas abandonados o en bosques talados con la introducción del fuego.

La distribución del pastizal adopta una forma irregular y aleatoria, con fragmentos en la mayor parte de la cuenca y asociado prácticamente a todas las condiciones climáticas y edáficas. No obstante, una mayor proporción se concentra en la región huasteca, donde las condiciones climáticas favorecen el establecimiento de potreros y un consecuente aumento de la ganadería con predominancia del ganado bovino.

El pastizal se emplea en la alimentación del ganado bovino y equino, de manera extensiva, aunque en algunas ocasiones el mal uso y excesivo sobrepastoreo provoca la elevada tasa de erosión en los suelos.

4.4. Modelos de Elevación Digital

Puesto que el objetivo principal del trabajo es determinar la eficiencia del modelo hidrológico SWAT y comparar las salidas hidrológicas del modelo al establecer pronósticos sobre la producción de agua en el punto de salida de la cuenca del río Amajac, el uso de los Modelos de Elevación Digital (DEM) constituye la base para iniciar éste estudio. El mosaico para generar el DEM de la cuenca en estudio está constituido por las cartas topográficas correspondientes a la cartografía digital de la zona del INEGI a escala 1:50 000 (Tabla 8 y Figura 13).

4.5. El generador climático

Para la realización de este trabajo se siguieron una serie de pasos, los cuales se indican en el diagrama que se presenta en la figura 14.

Utilizando el modelo SWAT se realizó la delimitación de la cuenca. Se localizaron dentro y fuera de la cuenca, las estaciones climatológicas. Consecutivamente se dispuso la información climática de dichas estaciones por medio del Extractor Rápido de Información Climatológica (IMTA). En esta etapa, se seleccionaron aquellas estaciones con un mínimo de 10 años completos de información consistente y se obtuvieron las variables de precipitación, temperatura mínima y temperatura máxima diarias, además de considerar como años incompletos aquellos que sólo presenten 20% de datos faltantes. (Ver Anexo E).

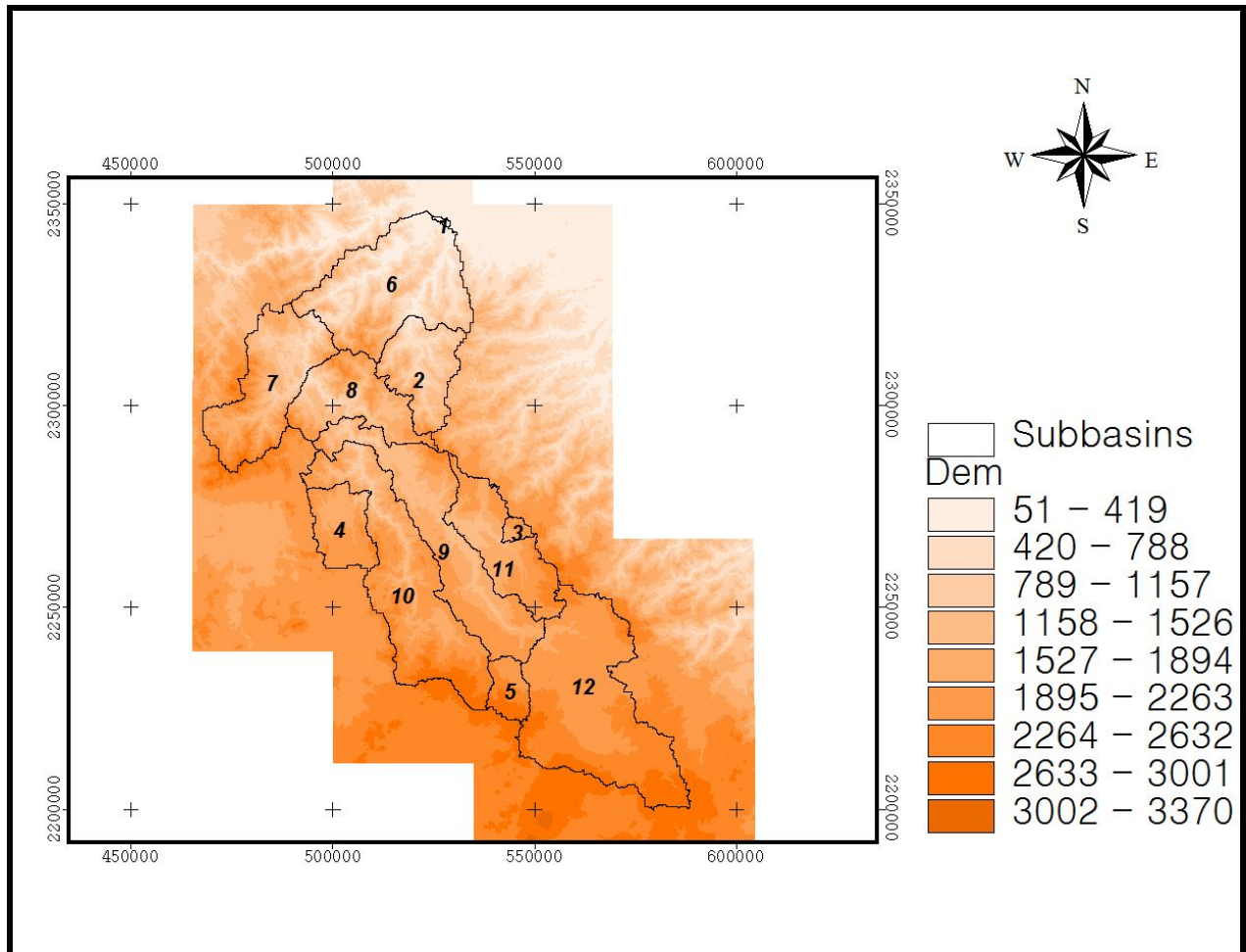
En segundo lugar se revisó el historial de cada estación para considerar los años completos variables de precipitación, temperatura mínima y temperatura máxima diarias y el porcentaje de datos faltantes en los años incompletos, considerando el periodo de 1950 a 2008.

Definidas 49 estaciones que cumplieron con los criterios con las cantidades antes mencionadas considerados, para cada estación se generó un archivo con años completos (*.dat) Los generadores de clima utilizados en el modelo SWAT provienen fundamentalmente del modelo EPIC. En el cual se incluyen dos algoritmos climáticos: Wxparm y Wxgen para generar sintéticamente los datos faltantes en los registros diarios de las estaciones climatológicas, mismos que pueden ser aprovechados para aumentar el número de años completos de las variables consideradas en los generadores, mismos que habrán de utilizarse en las proyecciones del clima a futuro.

| CLAVE | NOMBRE |
|---------|---|
| F14-D31 | Tamazunchale, San Luis Potosí |
| F14-C49 | Jacala, Hidalgo y San Luis Potosí |
| F14-D41 | Chapulhuacán, Hidalgo |
| F14-D42 | Huejutla, Hidalgo y San Luis Potosí |
| F14-C59 | San Nicolás, Hidalgo |
| F14-D51 | Molango, Hidalgo |
| F14-D52 | Calnali, Hidalgo y Veracruz |
| F14-C69 | Tasquillo, Hidalgo |
| F14-D61 | Metztitlán, Hidalgo |
| F14-D62 | Zacualtipan, Hidalgo y Veracruz |
| F14-C79 | Ixmiquilpan, Hidalgo |
| F14-D71 | Actopan, Hidalgo |
| F14-D72 | Carbonera Jacales, Hidalgo |
| F14-D73 | Pahuatlán, Hidalgo y Veracruz |
| F14-D81 | Pachuca, Hidalgo y estado de México |
| F14-D82 | Tulancingo, Hidalgo |
| F14-D83 | Huauchinango, Puebla e Hidalgo |
| E14-B12 | Cd. Sahagún, Hidalgo y estado de México |
| E14-B13 | Chignahuapan, Puebla e Hidalgo |

FUENTE: INEGI (2000).

Tabla 8. Modelos de Elevación Digital utilizados en la cuenca del río Amajac, Hidalgo



| | | |
|--|--------------------------------|------------------------------|
| INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL | | |
| SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO | | |
| DIRECCIÓN DE POSGRADO | | |
| "SIMULACION DEL MODELO SWAT EN LA CUENCA DEL RIO AMAJAC ESTADO DE HIDALGO" | | |
| MAPA DE MODELO DE ELEVACION DIGITAL | | |
| ELABORÓ | REVISÓ | APROBÓ |
| ING. TRINIDAD ARGOTA | M en C. LUCIO FRAGOSO SANDOVAL | M en C. PINO DURÁN ESCAMILLA |

Figura 13 Modelo de Elevación Digital

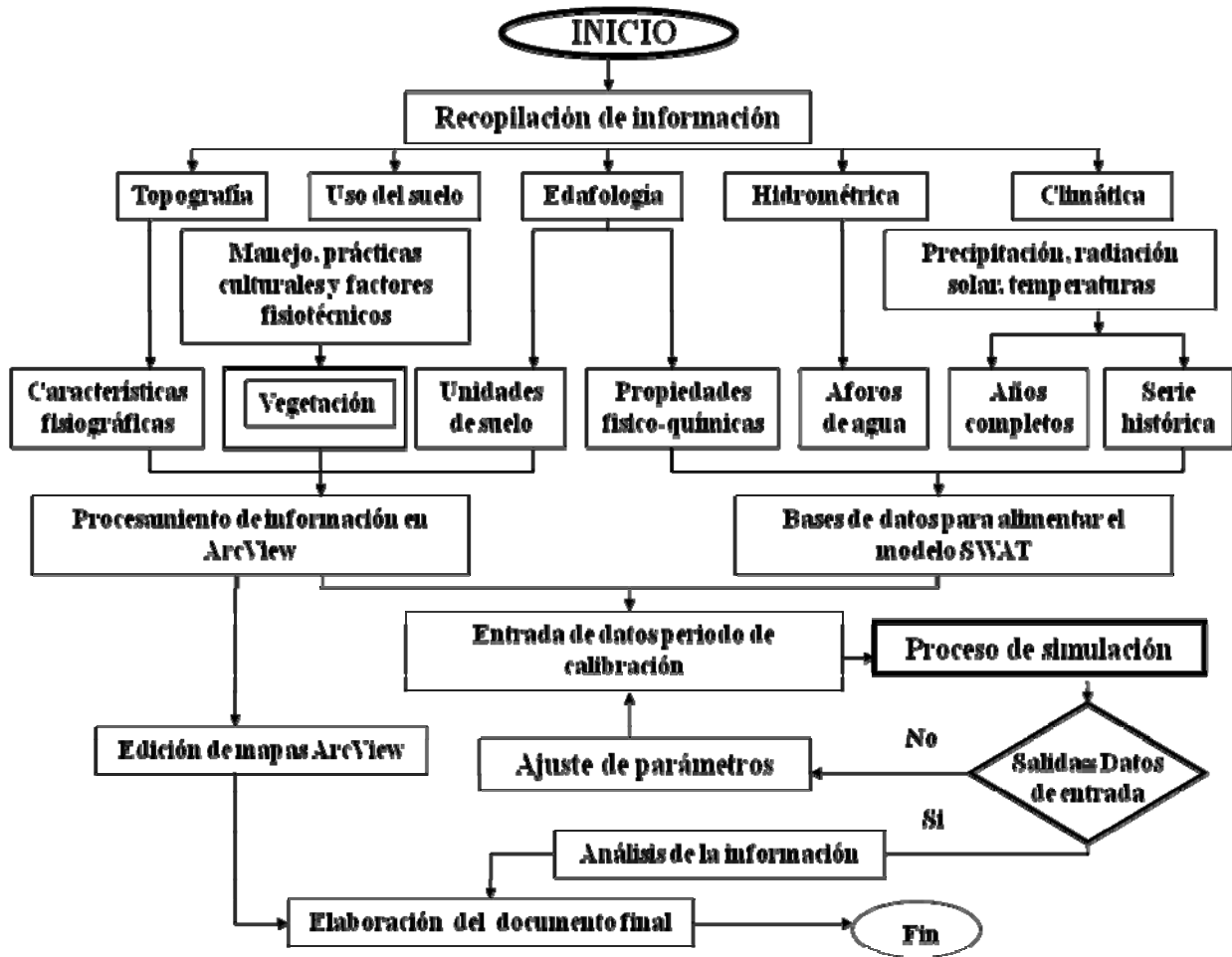


Figura 14. Diagrama de flujo metodológico.

Para ser procesados con el generador Wxparm del modelo EPIC. Una vez obtenida la "semilla climática" (archivo *.dat), se actualizó con los datos de número de años totales de la estación (completos más incompletos), año de inicio para generar los datos faltantes, variables climáticas a leer de los datos históricos (y automáticamente se definen las variables a generar, tales como: precipitación, temperatura mínima, temperatura máxima, radiación solar y humedad relativa), latitud en la que se ubica la estación, su elevación sobre el nivel medio del mar y la opción de considerar los años bisiestos. Es importante mencionar que los generadores del modelo EPIC requieren que la información climática a procesar tenga un formato específico para ejecutarse de manera adecuada (Sharpley y Williams, 1990).

Con la "semilla climática" actualizada, se procesaron los archivos *1.dat y *2.dat con el Wxgen, en donde este último contiene los datos de años completos e incompletos también con formato específico para los generadores; en esta corrida se genera un archivo con datos diarios (*.dly), el cuál contiene el listado de años totales de la estación incluyendo los datos generados de las variables con datos faltantes además de la radiación solar y humedad relativa estimadas. Este archivo se procesa nuevamente con el Wxparm y se obtiene la "semilla climática" final de cada estación.

En las simulaciones realizadas con modelos de erosión e hidrológicos se pueden usar datos climáticos observados o generados sintéticamente, de ahí la importancia de los generadores climáticos para proyecciones a futuro. De esta manera, cuando se cuenta con un registro suficientemente amplio de años completos (10 o más años de preferencia) de datos de precipitación, temperatura máxima y mínima diarias (cuando menos estas tres variables), el algoritmo Wxparm genera la distribución estadística correspondiente a dicho registro; dado que en general para muchas estaciones meteorológicas en el país existen datos faltantes en los registros históricos, se hace uso del generador Wxgen el cual basado en la primera semilla generada por Wxparm (con un mínimo de 10 años completos del registro histórico para tener consistencia en la generación sintética), realiza la estimación de los datos faltantes logrando con esto un mayor número de años completos, sobre los cuales se genera la "semilla climática" final para las simulaciones a futuro a realizar. Las variables climáticas que se incluyen en las semillas generadas.

4.6. Las estaciones climatológicas

De 49 estaciones procesadas en el generador climático, se seleccionaron únicamente once estaciones climatológicas (Tabla 9) y su información se concentró en la base de datos propuesta por el modelo SWAT, en la cual se incluyen todos los parámetros mensuales calculados por EPIC. Con los datos almacenados en SWAT, se genera el archivo .wgn.

La información de precipitación diaria, temperatura mínima y máxima diaria, para el periodo de 1998 al año 2008 de las once estaciones climatológicas (Figura 15) fue proporcionada por el Servicio Meteorológico Nacional. Con esta información se generaron las bases de datos en formato *.dbf y posteriormente se agregaron en la carpeta AVS2000, subcarpeta AvSwatDB, subcarpeta rio_amajac. (Anexo F)

4.7. Los datos de suelos

La información de suelos así como sus unidades y perfiles, fueron obtenidos de las cartas edafológicas del INEGI escala 1: 50 000.

En el caso de SWAT, el archivo de entrada de suelo (.sol) define las propiedades físicas para todas las capas de suelo. A continuación, se muestra una descripción de las variables en el archivo de entrada de suelo (base de datos) y se enlistan en el orden en que aparecen en el archivo. El archivo de entrada de suelo (Figura 16) puede soportar datos hasta para 10 capas del perfil del suelo.

1. SNAM

El nombre del suelo puede obtenerse de las tablas contenidas en el anexo de las Unidades de Respuesta Hidrológica (Arnold *et al.*, 2002b).

Para éste caso, el nombre que se asignó corresponde a las claves que maneja el INEGI. Por ejemplo, el nombre de suelo Ah corresponde a un Acrisol húmico.

2. NLAYERS

Es el número de capas que contiene el perfil del suelo.

Considerando la información proporcionada por INEGI, en cada uno de los muestreos de las unidades de suelos se puede identificar el número de capas que contiene ese suelo (Anexo D).

3. HYDGRP

Es el grupo hidrológico del suelo (A, B, C ó D). El Servicio de Conservación de los Recursos Naturales (NRCS, por sus siglas en inglés) clasifica a los suelos dentro de cuatro grupos hidrológicos, basados en las características de infiltración de los suelos. NRCS Soil Survey Staff (1996) define un grupo hidrológico como un grupo de suelos que tienen condiciones similares de escurrimiento potencial bajo condiciones similares de tormenta y cobertura (Anexo A).

Tabla 9. Estaciones climatológicas seleccionadas en la cuenca del río Amajac, Hidalgo

| Estación | Nombre | Latitud | Longitud | Elevación (msnm) |
|----------|-------------------------|---------|----------|------------------|
| 13017 | Mineral el Chico | 20.22 | 98.73 | 2351 |
| 13028 | San Miguel Allende | 20.23 | 98.57 | 1528 |
| 13029 | San Lorenzo Sayula | 19.96 | -98.35 | 1528 |
| 13031 | Santiago Tulantepec | 20.05 | 98.37 | 2000 |
| 13050 | Zacualtipan | 20.65 | 98.67 | 2026 |
| 13086 | Presa la Esperanza | 20.05 | 98.33 | 2210 |
| 13087 | San Cristóbal, Metztlán | 20.63 | -98.83 | 1300 |
| 13093 | Venados | 20.47 | 98.68 | 1370 |
| 13096 | Atotonilco | 20.28 | 98.67 | 2110 |
| 13100 | Omitlan | 20.17 | 98.63 | 2370 |
| 24091 | Temamatla, Tamazunchale | 21.23 | -98.76 | 125 |

FUENTE: IMTA (1995).

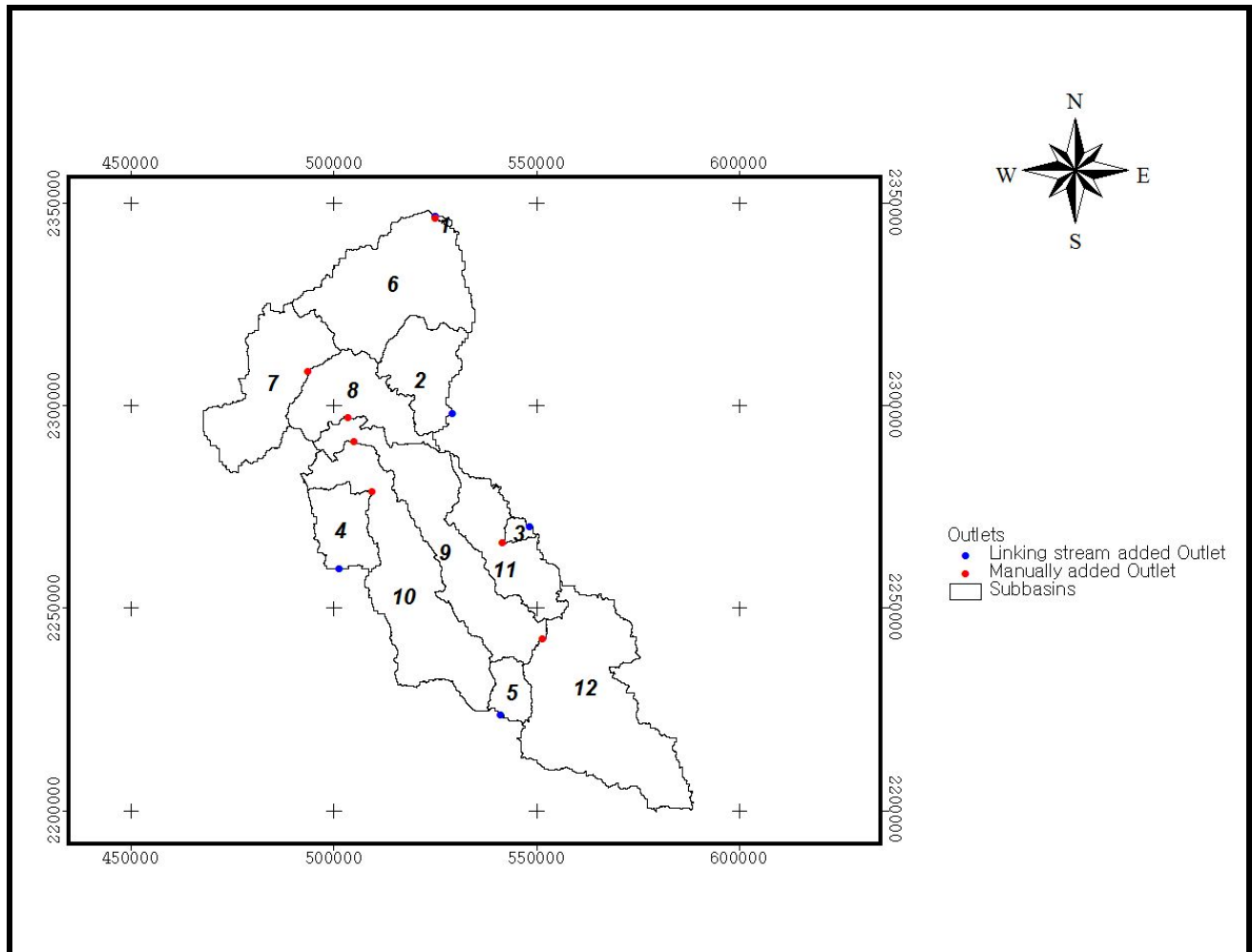
De acuerdo con la información de los perfiles de suelo proporcionada por el INEGI, así como las propiedades físicas del suelo presentadas en el Anexo D, se definió el grupo hidrológico para cada capa de suelo.

4. SOL_ZMX

Es la profundidad máxima de enraizamiento en el perfil de suelo (mm). Si no se especifica la profundidad, el modelo asume que las raíces pueden desarrollarse completamente a lo largo de toda la profundidad del perfil de suelo.

Esta profundidad máxima es la suma total de cada una de las profundidades encontradas en cada capa de la unidad de suelo (SOL_Z).

Figura 15 Estaciones Climatológicas



| | | |
|--|--------------------------------|------------------------------|
| INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL | | |
| SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO | | |
| DIRECCIÓN DE POSGRADO | | |
| "SIMULACION DEL MODELO SWAT EN LA CUENCA DEL RIO AMAJAC ESTADO DE HIDALGO" | | |
| MAPA DE ESTACIONES CLIMATOLOGICAS | | |
| ELABORÓ | REVISÓ | APROBÓ |
| ING. TRINIDAD ARGOTA | M en C. LUCIO FRAGOSO SANDOVAL | M en C. PINO DURÁN ESCAMILLA |

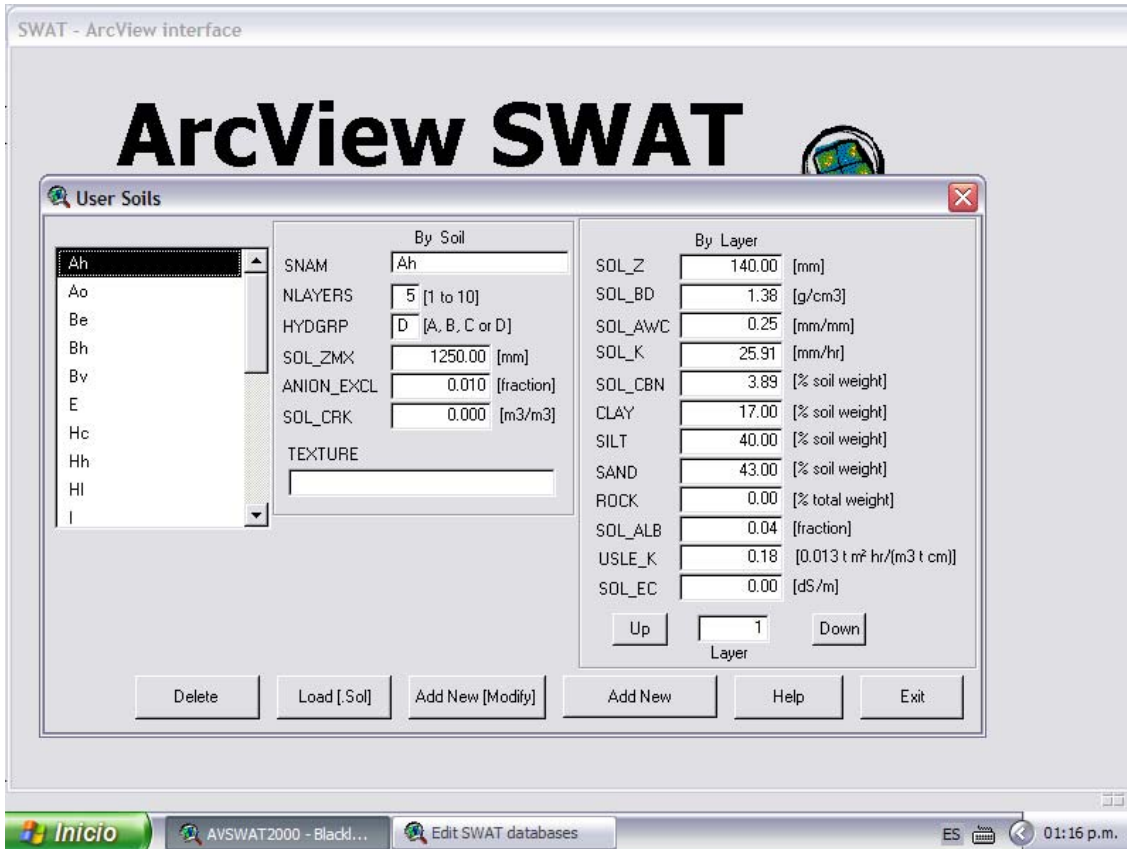


Figura 16. Editor de base de datos de suelos en el modelo SWAT

5. ANION_EXCL

Es una fracción de la porosidad (espacio vacío) donde los aniones son excluidos. La mayoría de los suelos minerales están cargados negativamente con un pH normal y la interacción neta con los aniones, tal como el nitrato, es una repulsión de las partículas superficiales. Dicha repulsión es un término de absorción negativa o exclusión de aniones.

Los aniones son excluidos del área próxima inmediata a las superficies minerales, debido a la atracción preferencial de los cationes en éstos sitios. Este proceso tiene un impacto directo en el transporte de aniones a través del suelo. Para ello, efectivamente excluye los aniones de la porción más lenta que está en movimiento del volumen de suelo-agua, que se encuentra más cercano a las superficies de la partícula cargada (Jury *et al.*, 1991). En efecto, la ruta neta del anión a través del suelo sería más corta si se usara toda el agua en el suelo (Thomas y McMahon, 1972).

Si no se ingresa un valor para ANION_EXCL, el modelo puede asumir un valor de 0.50.

En éste caso, no se encontraron valores de éste parámetro y por consiguiente, el modelo SWAT asignó un valor para cada capa de suelo.

6. SOL_CRK

El volumen potencial o volumen máximo de ruptura del perfil del suelo se expresa como una fracción del volumen total de suelo.

Para pronosticar con precisión el escurrimiento superficial e infiltración en áreas en las que dominan los Vertisoles, debe cuantificarse el cambio temporal en el volumen del suelo. Bronswijk (1989, 1990) emplea métodos del perfil para determinar el volumen máximo de ruptura. Es un dato opcional que puede o no ser ingresado a las características del perfil del suelo.

7. TEXTURE

La textura de la capa de suelo es un dato que no procesa el modelo y su espacio puede permanecer en blanco.

8. SOL_Z (layer #)

Es la profundidad desde la superficie del suelo hasta la parte inferior de cada capa (mm).

En algunas unidades de suelo se pueden encontrar hasta cinco capas de suelo. El modelo tiene la opción para ingresar los valores de las propiedades físicas de una sola capa, posteriormente guardar ésta información y luego incluirse sucesivamente los demás datos para las capas siguientes.

9. SOL_BD (layer #)

La densidad aparente del suelo SOL_BD (Mg/m^3 o g/cm^3), expresa la relación de la masa de partículas sólidas M_s respecto al volumen total de suelo V_T , de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\rho_b = \frac{M_s}{V_T} \dots\dots\dots(3)$$

Para determinar la densidad aparente ρ_b , la masa del suelo húmedo es secado en el horno y el volumen total de suelo se determina cuando el suelo está a capacidad de campo o cercano a ésta. Los valores de la densidad aparente deben oscilar entre 1.1 y 1.9 Mg/m³.

En éste caso, los valores de la densidad aparente para cada unidad de suelo se reportan en el Anexo D, de acuerdo al perfil de suelo proporcionado por INEGI.

10. SOL_AWC (layer #)

El agua disponible por las plantas, también llamada capacidad de agua disponible AWC, se calcula al sustraer la fracción de agua presente a punto de marchitez permanente WP de esa capacidad de campo presente FC, según la siguiente ecuación:

$$AWC = FC - WP \dots\dots\dots (4)$$

La capacidad de agua disponible en la capa de suelo (mm H₂O/mm de suelo) se puede obtener al determinar la cantidad de agua liberada entre la capacidad de campo *in situ* (el contenido de agua en el suelo a potencial mátrico del suelo, es decir, -0.033 MPa) y el punto de marchitez permanente (el contenido de agua en el suelo a potencial mátrico, es decir, - 1.5 MPa).

Los valores de la capacidad de agua disponible para cada una de las capas presentes en las unidades de suelo de la cuenca del río Amajac, se presentan en el Anexo B, según la clase textural.

11. SOL_K (layer #)

La conductividad hidráulica saturada (mm/hr) K_{sat} , relaciona la proporción del flujo de agua (densidad del fluido) y el gradiente hidráulico. Es una medida de la disminución del movimiento de agua a través del suelo.

Los valores de la conductividad hidráulica saturada para cada una de las capas presentes en la cuenca, se presentan en el Anexo B, según la clase textural.

12. SOL_CBN (layer #)

Es el contenido de carbono orgánico (% del peso del suelo) en el suelo. Se define como la porción de la muestra que pasa a través del tamiz de 2 mm.

El contenido porcentual de materia orgánica OM de una capa puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$OM = 1.72 \cdot \text{orgC} \dots\dots\dots(5)$$

Donde:

orgC = el contenido porcentual de carbono orgánico en la capa (%).

Cuando no se dispone del contenido de carbono orgánico, pero se cuenta con la cantidad de materia orgánica en la capa de suelo, entonces, se despeja de la ecuación para obtener orgC.

13. CLAY (layer #)

Es el contenido de arcilla (% del peso del suelo). Es el porcentaje de partículas de suelo de diámetro equivalente menor a 0.002 mm.

14. SILT (layer #)

Es el contenido de limo (% del peso del suelo). Es el porcentaje de partículas de suelo que tienen un diámetro equivalente entre 0.05 y 0.002 mm.

15. SAND (layer #)

Es el contenido de arena (% del peso del suelo). Es el porcentaje de partículas de suelo que tienen un diámetro entre 2.0 y 0.05 mm.

Los contenidos de arena, limo y arcilla se obtuvieron de los perfiles de suelo proporcionados por el INEGI, según las cartas edafológicas escala 1:50 000 (Anexo D).

16. ROCK (layer #)

Es el contenido de fragmento de roca (% del peso total). El porcentaje de la muestra que tiene un diámetro de la partícula mayor a 2 mm. Es decir, el porcentaje de la muestra que no pasa a través del tamiz de 2 mm.

En este caso, no se consideró el contenido de roca en el suelo.

17. SOL_ALB (layer #)

El albedo del suelo es la relación de la cantidad de radiación solar reflejada por un cuerpo por la cantidad incidente sobre éste, expresado como una fracción. El valor para el albedo debería ser reportado cuando el suelo está a (o cerca de) capacidad de campo.

El albedo del suelo se reporta en los perfiles de suelo elaborados por el INEGI para la zona en estudio. Sin embargo, cuando no se cuenta con la suficiente información, se puede calcular mediante una sencilla ecuación.

Según Romo y Arteaga (1989) citado por Muñoz (1997), el albedo es un término que expresa la reflectividad de un cuerpo, con respecto a la radiación solar. En este sentido, el albedo de la superficie del suelo se puede estimar en función de la materia orgánica, como lo propone Baumer (1990):

$$A = \frac{0.6}{\exp(0.4 \cdot OM)} \dots\dots\dots(6)$$

Donde:

A = el albedo del suelo

OM= la materia orgánica del suelo (%).

La determinación de materia orgánica se puede realizar por el método de combustión húmeda de Walkley y Black (1934). Este método determina el carbono del suelo a partir del cual se puede estimar el contenido de materia orgánica.

18. USLE_K (layer #)

Es el factor K de erodabilidad del suelo de la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo. Wischmeier y Smith (1978) definen el factor de erodabilidad del suelo como la proporción de pérdida de suelo por unidad de índice de erosión para un suelo específico como medida en una parcela de 22.1 m de longitud, con una pendiente uniforme de 9 % en el sentido de la longitud, en barbecho continuo, cultivado hacia arriba y abajo de la pendiente. El barbecho continuo se define

como la tierra que ha sido cultivada y mantenida libre de vegetación por más de dos años.

Wischmeier y Smith (1978) notaron que un tipo de suelo usualmente llega a ser menos susceptible a la erosión cuando disminuye la fracción de limo, aunque se incrementa la fracción de arena o arcilla.

Wischmeier *et al.* (1971) desarrollaron una ecuación general para calcular el factor de erodabilidad del suelo (Anexo N) cuando el contenido de limo y arena muy fina llegan a ser menores que el 70 % de la distribución del tamaño de la partícula del suelo.

Para incluir el valor del factor K en la base de datos de suelos de SWAT, en ocasiones se hace uso de la información contenida en las cartas edafológicas elaboradas por INEGI, para la zona en estudio. Sin embargo, cuando no se cuenta con la suficiente información, pero se dispone de la unidad de suelo y su textura, se puede obtener éste valor (Figueroa *et al.*, 1991). Puesto que en el Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión se emplean unidades distintas a las del editor de base de datos de suelo de SWAT, se hace necesaria la conversión de dichas unidades.

19. SOL_EC

La conductividad eléctrica (dS/m) no se encuentra activa actualmente en la interface SWAT-Arc View.

4.8. Desarrollo de la modelación hidrológica.

La modelación se rigió con la metodología desarrollada por Torres (2000), de la cual se derivaron las actividades que se presentan a continuación:

1. Se elaboró un mosaico de los 19 Modelos de Elevación Digital que cubren la cuenca (en formato grid).
2. Se elaboró una máscara de la cuenca (en formato grid).
3. Se concentró la información necesaria para alimentar el modelo, tal como: hidrografía, edafología y vegetación (en formato .shp).

4. Se elaboró la "semilla climática" final de las 49 estaciones climatológicas que se ubican dentro y fuera de la cuenca.
5. Se elaboraron las bases de datos de precipitación diaria y temperatura mínima y máxima diaria para once estaciones climatológicas que presentaron información consistente del año 1998 al año 2008 (en formato .dbf).
6. Se elaboró una base de datos de aforos diarios de la estación hidrométrica Temamatla para el mismo periodo (en formato .xls).
7. Se generaron las bases de datos de las unidades de suelo (en el formato propuesto por SWAT), en la que se incluyó la información presentada en el Anexo D.
8. Con la información de la semilla climática final, se elaboraron las bases de datos de las siete estaciones climatológicas con parámetros mensuales (en el formato del generador climático de SWAT).
9. Se elaboraron las bases de datos de cobertura vegetal (en formato de SWAT).
10. Se elaboraron las bases de datos de áreas urbanas (en formato de SWAT).
11. Una vez que el modelo generó las carpetas para el nuevo proyecto, se concentraron las bases de datos elaboradas en formato .dbf, el mosaico de los modelos de elevación digital y los archivos .shp en la carpeta AVS2000, subcarpeta AvSwatDB, subcarpeta rio_amajac.
12. Se realizó una primera simulación, en la que se consideró un periodo de un año (2008), con una frecuencia de impresión de salida mensual y sin realizar un ajuste de los parámetros más sensibles del modelo.
13. Se efectuó una segunda simulación para un periodo de dos años de información (2007- 2008) con una frecuencia de impresión de salida mensual. Se realizó un ajuste de los parámetros con alto grado de

sensibilidad y se compararon los escurrimientos medidos y los escurrimientos simulados. En esta etapa de calibración, los datos de entrada (datos medidos u observados por la estación) deben presentar concordancia con los datos simulados.

14. Una vez concluido el proceso de calibración, se realizó la etapa de validación para un periodo de tres años (1998 al 2008).

15. Se efectuó el análisis de los resultados mediante pruebas estadísticas tales como: el coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe, la varianza, el coeficiente de variación y el error medio absoluto.

16. Se elaboró el documento final. Ver Fig. 17

En la Figura 17 se indica el diagrama de flujo empleado en el presente trabajo

La alimentación de la información al modelo se realizó de acuerdo a las claves de control de la interface SWAT-Arc View, como se indica en la Figura 18

4.9 Calibración y validación del modelo SWAT

La función objetivo para la calibración de un modelo generalmente consiste de una prueba estadística, tal como: minimizar el error relativo (RE), minimizar el error medio (AE), u optimización del coeficiente Nash-Sutcliffe. El proceso de validación es similar al de calibración, en donde los valores medidos y simulados se comparan para determinar si la función objetivo es encontrada

En la etapa de validación, los resultados indican generalmente una relación similar entre los resultados de salida tanto medidos como predichos.

De la etapa de validación, derivada de diversos estudios en cuencas del mundo, se han obtenido resultados satisfactorios al evaluar la capacidad predictiva que tiene el modelo SWAT al realizar la comparación de los escurrimientos medidos contra los simulados para determinados periodos.

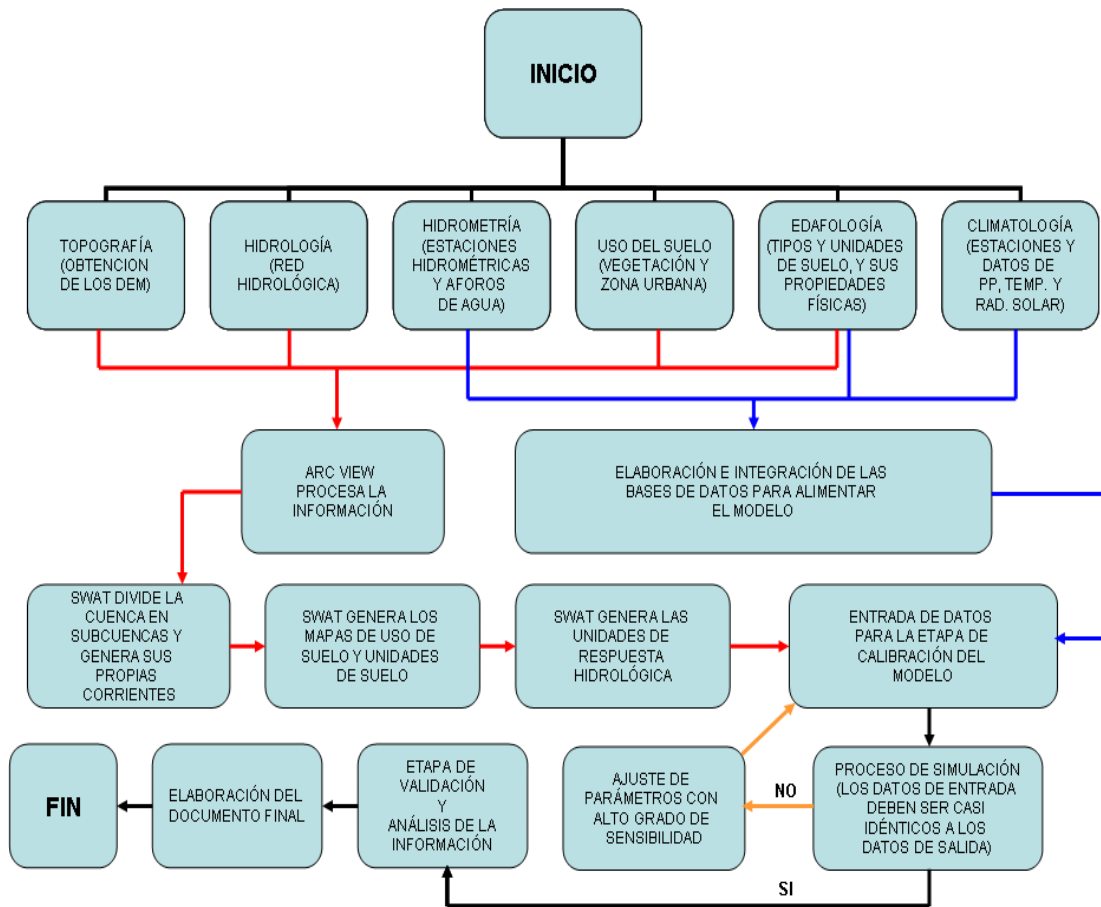


Figura 17 Diagrama de flujo utilizado en la cuenca del río Amajac, Hidalgo

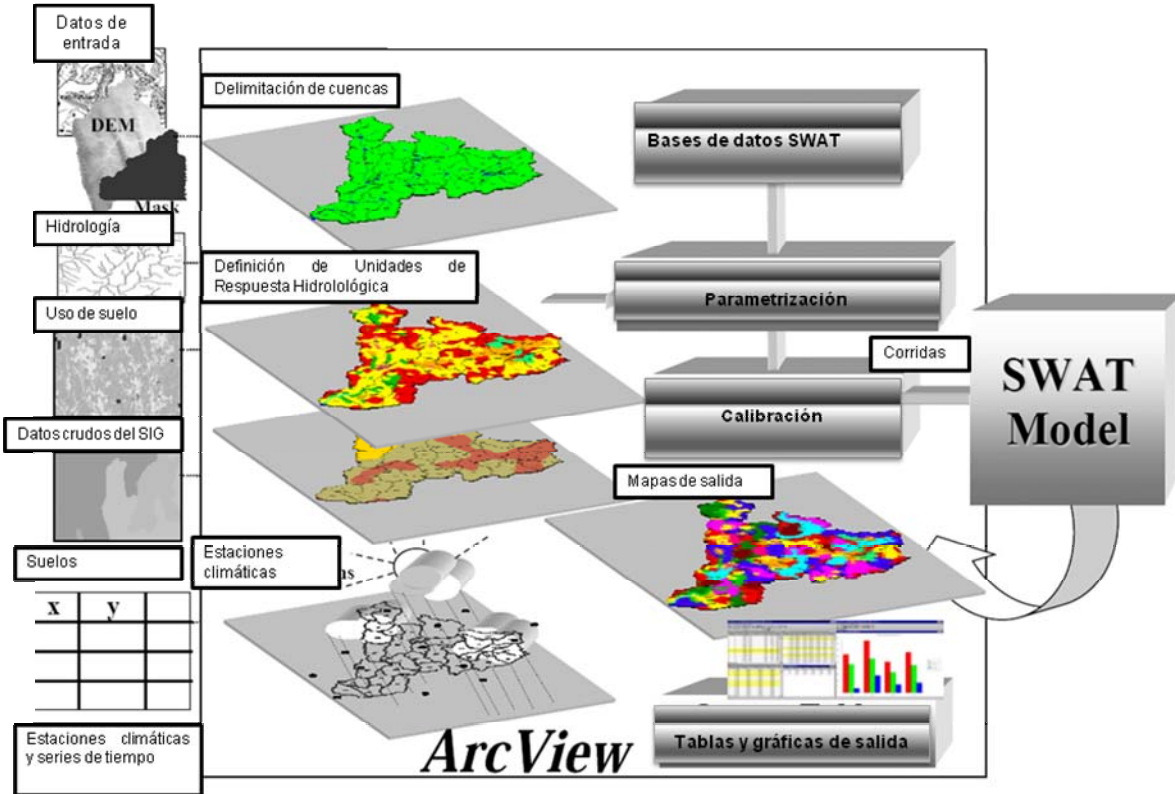


Figura 18. Procesamiento y despliegue de salidas de la interface AVSWAT

5. RESULTADOS

5.1 Resultados de la primera simulación

Se consideró en la primera simulación el periodo de cinco años de información (2004-2008), con una frecuencia de impresión de salida cuatrimestral.

Después de la corrida del modelo, se generó el archivo de salida output.std, que se localiza en la subcarpeta txtinout (éste archivo puede ser visualizado en la hoja de cálculo Excel o en Bloc de notas). Este archivo sirve para efectuar el análisis de los escurrimientos simulados (SURQ) contra los escurrimientos aforados por la estación hidrométrica.

En la Figura 19 se muestra la dinámica y la magnitud de la comparación entre los escurrimientos medidos y simulados, sin utilizar la calibración de los parámetros más sensibles del modelo. Es importante señalar que, el modelo realiza subestimaciones en los meses con mayor precipitación.

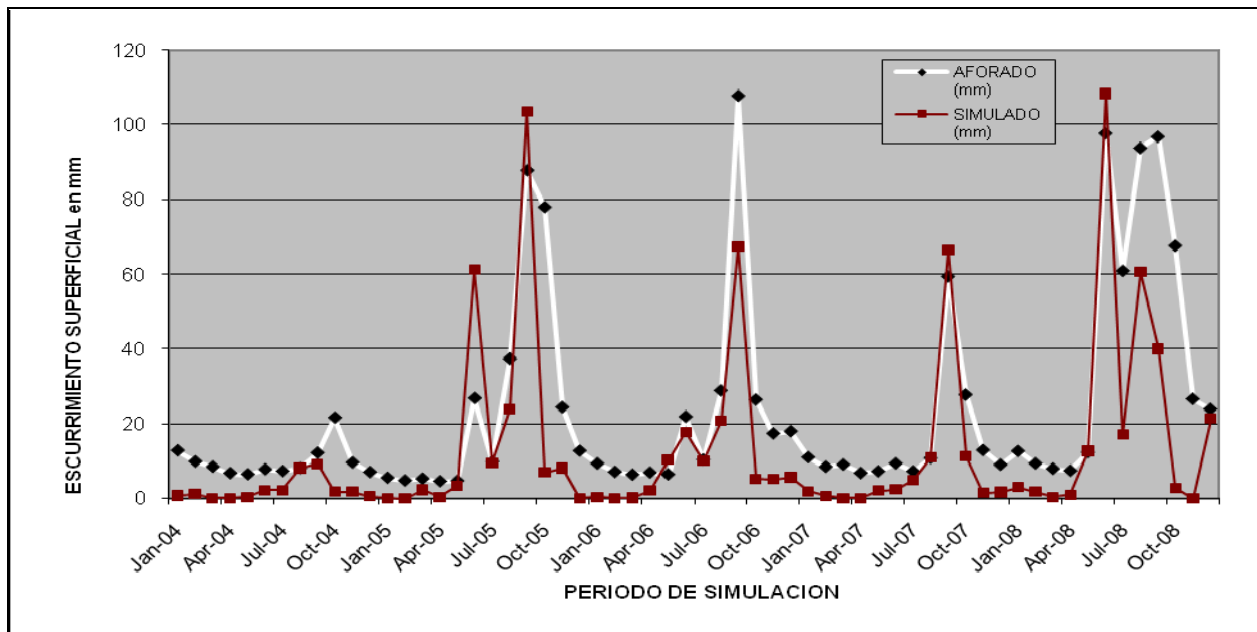


Figura 19. Dinámica y magnitud de los escurrimientos superficiales aforados y simulados en la segunda simulación.

En la Figura 20 se representa el análisis de la regresión entre los datos medidos y simulados para la primera simulación. La pendiente de la recta y el coeficiente de determinación R^2 indican que no existe una correlación aceptable entre los escurrimientos medidos y simulados.

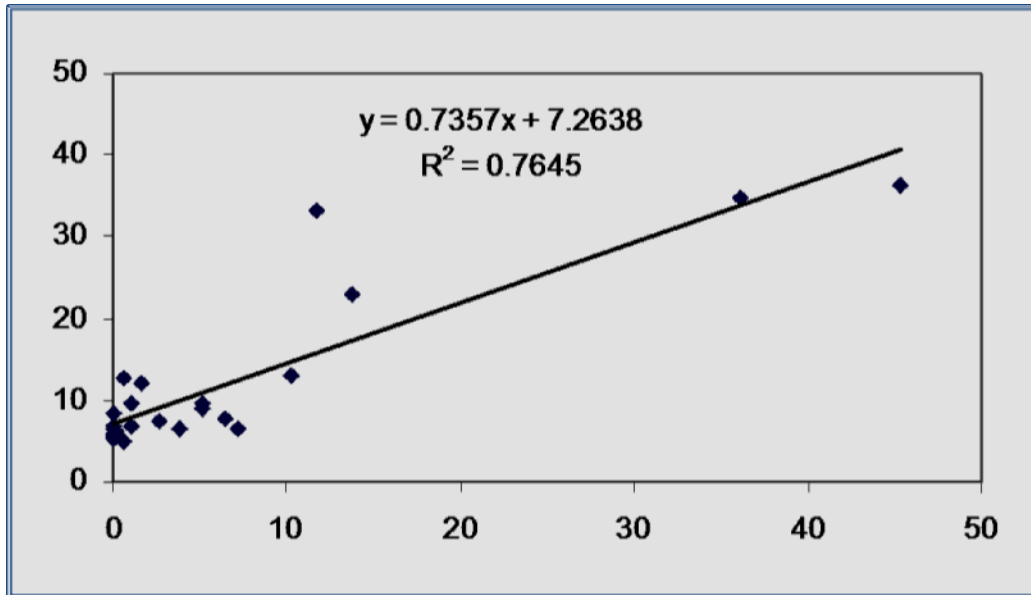


Figura 20. Análisis de regresión de los escurrimientos superficiales medidos y simulados en la segunda simulación

5.2 Ajuste (calibración) de los parámetros más sensibles del modelo

Observando las sugerencias hechas en el manual del usuario del SWAT, los parámetros más sensibles que afectan significativamente los valores del modelo para el resultado de agua, se muestran en el tabla 10.

En el caso de la cuenca del río Amajac, para la calibración de los parámetros más sensibles del modelo se utilizaron en primer lugar, los datos de Curva Numérica CN2 (Torres, 2000) (Anexo C), tomando como base el grupo hidrológico C para cada capa de suelo. Posteriormente se ajustó la capacidad de agua disponible (SOL_AWC) del archivo de entrada (.sol) para cada una de las 29 subcuencas. Finalmente, el factor ESCO (con valor de 1.0), contribuyó a obtener un mejor ajuste de los escurrimientos simulados.

Tabla 10. Parámetros más sensibles del modelo hidrológico SWAT

| Parámetro a modificar | Significado | Archivo de entrada |
|-----------------------|---|--------------------|
| CN2 | Curva numérica | .mgt |
| SOL_AWC | Capacidad de agua disponible en el suelo | .sol |
| ESCO | Factor de compensación de la evaporación en el suelo | .hru |
| GW_REVAP | Coeficiente de agua subterránea | .gw |
| GWQMN | Profundidad del umbral de agua en el acuífero superficial | .gw |

FUENTE: Arnold *et al.* (2002b).

Los otros dos parámetros (*GW_REVAP*, *GWQMN*) no mostraron cambios significativos en los escurrimientos simulados en ésta etapa de calibración.

5.3 Resultados de la segunda simulación

En el archivo de salida .sbs se muestra información resumida para cada Unidad de Respuesta Hidrológica en la cuenca. De esta manera, en el proceso de calibración se consideraron los resultados de la producción de agua, así como su análisis de regresión. Dicha producción de agua calculada por el modelo SWAT se obtiene con la ecuación siguiente:

$$WYLD = SURQ + LATQ + GWQ - TLOSS - \text{pond abstractions} \dots\dots\dots(7)$$

Donde:

WYLD= la producción de agua. Es la cantidad total de agua producida por la Unidad de Respuesta Hidrológica y que ingresa al canal principal con el paso del tiempo (mm).

SURQ= la contribución de los escurrimientos superficiales al flujo de la corriente en el canal principal con el paso del tiempo (mm).

LATQ = la contribución del flujo lateral al flujo de la corriente (mm). El agua fluye lateralmente dentro del perfil del suelo, que entra al canal principal con el paso del tiempo.

GWQ = la contribución del agua subterránea al flujo de la corriente (mm). El agua del acuífero poco profundo que entra al canal principal con el paso del tiempo. El flujo del agua subterránea también se denomina flujo base.

TLOSS = las pérdidas por transmisión (mm). El agua se pierde de canales tributarios en la Unidad de Respuesta Hidrológica a través de la transmisión por medio del lecho. Dicha agua llega a recargar el acuífero poco profundo con el paso del tiempo. La contribución neta del escurrimiento superficial al flujo de la corriente en el canal principal se calcula al restar TLOSS de SURQ.

pond abstractions = las extracciones de agua en estanques, pozos y cuerpos de agua (mm).

En esta etapa de simulación, se consideró el periodo del 2004 al 2008, con una frecuencia de impresión mensual.

Sin embargo, para conocer la eficiencia en los resultados arrojados por el modelo SWAT, se realizó el análisis con la bondad de ajuste entre los valores medidos y simulados a través de la determinación del coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe (1970), tal como lo cita Larousse (2004). Este Indicador de Eficiencia NSE (por sus siglas en inglés, Nash-Sutcliffe Efficiency), se puede calcular con cualquiera de las siguientes expresiones:

$$NSE = 1 - \frac{\sum (y - x)^2}{\sum (x - x_m)^2} \dots\dots\dots (8)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (O_j - S_j)^2}{\sum_{j=1}^n (O_j - \bar{O}_j)^2} \dots\dots\dots (9)$$

Donde:

y ó S_j = valor simulado

x u O_j = valor observado o medido

x_m u \bar{O}_j = valor promedio de los valores observados

De esta manera, en el Tabla 11, se muestra un comparativo del valor del coeficiente de eficiencia obtenido para la cuenca del río Amajac, así como valores del mismo coeficiente obtenidos en estudios de otras cuencas.

Tabla 11. Comparación de estadísticos sobre la producción de agua en diferentes cuencas y modelos en la etapa de validación

| Cuenca | País | Área (km ²) | Modelo | R ² | NSE |
|--|-----------|-------------------------|-----------------|----------------|------|
| Wagga Research C. | Australia | 0.081 | Boughton | 0.41 | 0.35 |
| Dandenong River | Australia | 270.00 | Porter-MacMahon | 0.76 | 0.76 |
| El Tejocote | México | 176.60 | SWAT | 0.93 | 0.85 |
| Amajac | México | 6826.50 | SWAT | 0.76 | 0.91 |
| R ² = Coeficiente de Determinación, NSE = Coeficiente de Eficiencia Nash-Sutcliffe. | | | | | |

FUENTE: Benavides (1998) y Torres (2000).

Entre los descriptores de tendencia central se encuentra la media aritmética, que es probablemente el parámetro más ampliamente utilizado. Esta media para valores discretos, es el promedio aritmético obtenido al dividir la suma de las magnitudes de los individuos de la población entre el número total de éstos. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \dots\dots\dots (10)$$

Donde:

$\mu = \bar{X}$ = media aritmética de la población

X_i = magnitud de la unidad poblacional i

N = tamaño de la población.

Entre los descriptores de dispersión o variabilidad de uso común, se encuentran la varianza, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

El estimador de la varianza se calcula con la siguiente expresión:

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \dots\dots\dots (11)$$

Donde:

$i = 1, 2, \dots, n$

n = el tamaño de la muestra.

La desviación estándar es la medida de la dispersión de los valores respecto a la media \bar{X} y se calcula con cualquiera de las siguientes expresiones:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{(n-1)}} \dots\dots\dots (12)$$

ó

$$S_x = \sqrt{S^2} \dots\dots\dots (13)$$

El coeficiente de variación permite comparar la dispersión entre dos poblaciones distintas, e incluso, comparar la variación del producto de dos variables diferentes (que pueden provenir de una misma población).

El estimador del coeficiente de variación CV es la relación entre la desviación típica o estándar S_x y su media aritmética \bar{X} , así:

$$CV = \frac{S_x}{\bar{X}} \dots\dots\dots (14)$$

El **error medio absoluto MAE**, es un índice de tipo absoluto y simple que resume la diferencia promedio entre los valores medidos y simulados en sus propias unidades. Se determina con la siguiente ecuación:

$$MAE = \sum_{i=1}^n \frac{E_i - M_i}{n} \dots\dots\dots (15)$$

Donde:

E = valores simulados.

M = valores medidos.

En el Tabla 12, se puede notar las estadísticas básicas obtenidas del comparativo de los escurrimientos medidos y simulados en el periodo 1998 a 2000.

Es importante señalar que el error medio absoluto calculado (0.15 mm) es desfavorable en los meses de enero a abril de 1998; enero a abril de 1999 y febrero de 2000, debido a que su valor es superior a los valores de simulación calculados por SWAT.

Tabla 12. Comparación de estadística de escurrimientos

| | Escurrecimiento medido | Escurrecimiento simulado |
|---------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| No. de datos | 36 | 36 |
| Suma | 862.21 | 662.35 |
| Promedio | 23.95 | 18.40 |
| Varianza | 776.73 | 1148.82 |
| Desviación Estándar | 27.87 | 33.89 |
| Coefficiente de Variación | 1.16 | 1.84 |
| Error medio absoluto | 0.15 | |

Condición hidrológica de la cuenca del río Amajac

Considerando que el modelo SWAT arroja resultados de manera diaria, mensual y anual, se optó por mostrar los resultados de forma mensual, ya que presentan mayor consistencia y eficiencia en el manejo de la información. (Anexo C)

En este sentido, en la Figura 21 se puede apreciar el balance hídrico para el periodo 1998 a 2008. En ésta se distingue que cuando se incrementa la precipitación (PREC), se eleva el escurrimiento superficial (SURQ), el escurrimiento subsuperficial (LATQ) y la evapotranspiración actual (ET), mientras que la descarga de agua subterránea (GWQ) se mantiene constante y su valor es mínimo.

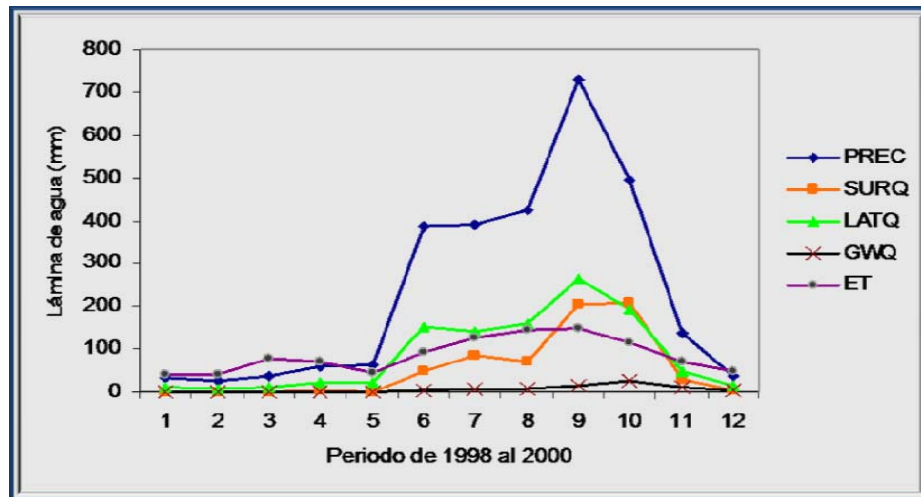


Figura 21 Balance hídrico en la cuenca del río Amajac (1998 a 2000)

Se muestra que las mayores aportaciones del escurrimiento se atribuyen al escurrimiento subsuperficial, que representan 37% respecto al total de agua precipitada, mientras que la descarga de agua subterránea constituye únicamente 3%. En esta gráfica, se observa que durante los meses de mayo a noviembre, la evapotranspiración actual se presenta en mayor escala, debido al desarrollo vegetativo de los cultivos, mientras que en la época de sequía (diciembre a abril), la evapotranspiración excede a la precipitación, y se asume que se debe a una mayor evaporación de agua contenida en el suelo (Figura 21).

Se aprecia que, gran parte del agua que precipita, se convierte en la principal fuente de producción de agua (64 %), y únicamente 36 % regresa a la atmósfera por medio de la evapotranspiración. En el Tabla 13, se muestra el resumen de éstas variables simuladas por el modelo SWAT.

Tabla 13. Resumen de las variables simuladas por el modelo SWAT

| AÑO | PREC (mm) | SURQ (mm) | LATQ (mm) | GWQ (mm) | ET (mm) |
|-------|--------------|--------------|--------------|-------------|------------|
| 1998 | 1002.96 | 228.73 | 390.53 | 33.9 | 325.38 |
| 1999 | 1122.22 | 339.81 | 396.18 | 32.1 | 354.53 |
| 2000 | 695.79 | 93.81 | 264.06 | 12.3 | 337.44 |
| TOTAL | 2820.97 | 662.35 | 1050.8 | 78.3 | 1017.35 |

SIGNIFICADO DE LAS LITERALES

PREC.- Precipitación (mm).

SURQ.- Esgurrimiento superficial (mm).

LATQ.- Esgurrimiento lateral ó subsuperficial (mm).

GWQ.- Descarga de agua subterránea (mm).

ET.- Evapotranspiración actual (mm).

Debido a que la producción de agua considera únicamente las variables SURQ, LATQ y GWQ, según la ecuación no se contempló la percolación en éste resumen.

CONCLUSIONES

El modelo SWAT reproduce de forma confiable los archivos históricos tanto de precipitación como de caudales a pesar de las restricciones de la información. Las predicciones sobre producción de escurrimientos superficiales a nivel mensual fueron modeladas con la mayor precisión posible.

El modelo se consideró con los escurrimientos simulados en los meses con mayor precipitación.

La versión 2000 del modelo SWAT es compatible con el Sistema de Información Geográfica Arc View, lo cual facilita el manejo de la información climatológica, hidrométrica, edafológica y de uso del suelo. Al trabajar con Unidades de Respuesta Hidrológica, el modelo permite agrupar áreas con condiciones similares. Se debe manejar lo más escrupulosamente permisible (que se puede permitir) porque la conductividad de hidráulica menoscaba perceptiblemente al escurrimiento superficial y al flujo base,

Las conclusiones de esta tesis son las siguientes:

Las subcuencas 1, 5 y 6 ubicadas en la parte noreste de la cuenca, presentaron la mayor cantidad de precipitación media anual, considerando los años 2006 al 2008, en un rango de 1735.0 a 1840.6 mm, mientras que los mayores escurrimientos superficiales para el mismo periodo, se concentraron en las subcuencas 1, 2, 3, y 10, en un rango de 510.9 a 675.7 mm. Estos últimos se deben principalmente a la cobertura vegetal del suelo, compuesta por selva baja, maíz, bosque mixto y pastos, al tipo de suelo, con predominancia de Litosol y Rendzina, así como al relieve existente en la zona (Anexo F y G).

Gran parte de la vegetación en la cuenca está constituida por bosque mixto (35.44 % respecto al área total). Los demás usos del suelo se concentran en cultivos de maíz (22.64 %), seguido por pastizales (12.37 %), matorral submontano (8.69 %), matorral crasicaule (5.54 %), selvas (5.38 %), alfalfa-cebada (4.06 %), café-maguey (3.81 %), manzano (1.25 %), y en menor proporción: frijol (0.50 %), cuerpos de agua (0.17 %), ciudades (0.12 %) y cabeceras municipales (0.05 %).

En la etapa de validación, los valores de los coeficientes de eficiencia (NSE) obtenidos en estudios de otras cuencas, (el coeficiente de regresión R^2); fueron comparados con el obtenido en esta tesis, siendo esta satisfactoria, ver tabla 11.

En base con estas conclusiones se observa que a través del modelo SWAT, se simula en forma adecuada a la cuenca del río Amajac.

RECOMENDACIONES

Para optimizar la red de estaciones climatológicas e hidrométricas en el estado de Hidalgo y automatizarlas es fundamental contar con información actualizada; y así garantizar un buen resultado, para la realización de un buen análisis y obtener resultados confiables.

Se debe continuar con la investigación en el área de modelación hidrológica, por la importancia que reviste para la población.

Realizar estudios de perfiles de suelos que contemplen la toma de muestras a diferentes profundidades y efectuar su análisis en laboratorio para estimar las variables físicas y químicas del suelo en la zona de estudio. Ello permitirá contar con una base de datos consistente, puesto que esto influye en la confiabilidad y precisión de los resultados que el modelo arrojará en el futuro.

Considerando que el modelo tiene limitantes, se sugiere que la información necesaria para la corrida del SWAT se concentre desde el inicio en la carpeta AVS2000, en la subcarpeta AvSwatDB, al momento de generar un nuevo proyecto.

Se deben realizar estudios detallados del uso actual del suelo, debido al constante crecimiento de la población, la elevada tasa de deforestación y el cambio en el uso del suelo, con apoyo de las imágenes de satélite actualizadas.

BIBLIOGRAFIA

- 1 Aparicio F.J.M. Fundamentos de Hidrología de superficie Editorial Noriega Editores tomo versión 2001
- 2 Arnold, J. G., S. L. Neitsch, J. R. Kiniry and R. Srinivasan. 2002b. Soil and Water Assessment Tool User's Manual. Version 2000. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station. Temple, Texas. Email: arnold@brc.ta
- 3 Arnold, J. G., S. L. Neitsch, J. R. Kiniry, J. R. Williams and K. W. King. 2002a. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Version 2000. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station. Temple, Texas.
- 4 Beasley, D.B., L.F. Huggins y E. J. Monke 1980. ANSWERS. A model for watershed planning Transactions of Agricultural Engineers. 23 (4): 938-944
- 5 Benavides S., J. de D. 1998. Calibración y validación del modelo hidrológico SWRRB en la cuenca forestal El Carrizal, Tapalpa, Jalisco. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Instituto de Recursos Naturales. Especialidad de Ciencias Forestales. Montecillo, México. 261 p.
- 6 Bronswijk, J. J. B. 1989. Prediction of actual cracking and subsidence in clay soils. Soil Science 148: 87-93.
- 7 Campos A.D. "Procesos del Ciclo Hidrológico".Universidad de San Luis Potosí Volumen I septiembre 1983
- 8 Comisión Nacional del Agua "Ley de Aguas Nacionales". México, D.F., 2002
- 9 Comisión Nacional del Agua Subgerencia de Agua potable Alcantarillado y Saneamiento Fichas Técnicas Pachuca Hidalgo.
- 10 Consejo Estatal de Ecología. 2001. Ordenamiento Ecológico Territorial del estado de Hidalgo. Hidalgo, México. 307 p.
- 11 Dirección General de Geografía del Territorio Nacional (DGGTN). 1980. Carta edafológica. Escala 1:50 000. México, D.F.
- 12 Elaboración del Plan de Manejo Integral de La Cuenca del Río Zanatenco Municipio de Tonalá, Chiapas. (2002-2003) Escuela de Posgraduados Chapingo.
- 13 Felicísimo, Á. M. Biólogo "Conceptos Básicos, Modelos y Simulación"
- 14 Figueroa S., B., A. Amante O., H. G. Cortés T., J. Pimentel L., E. S. Osuna C., J. M. Rodríguez O. y F. J. Morales F. 1991. Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. Colegio de Postgraduados. Instituto de Recursos Naturales. Montecillo, México. p. 83-90.
- 15 Gutiérrez G.,G. 2000. "La Gestión Integral de Cuencas Hidrológicas: Una Alternativa de Solución al Problema Internacional de los Recursos Hidráulicos". Tesis México, D.F. 179 p

- 16 Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A. 1985. Reference crop evaporation from temperature. *Applied Engr. Agric.* 96-99
- 17 Hudson, N. 1995. *Soil Conservation*. Iowa State University Press USA. 391 p.
- 18 Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) 1995. *Extractor Rápido de Información Climatológica II*. (ERIC). Jiutepec, Morelos, México.
- 19 Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1992. *Síntesis Geográfica del estado de Hidalgo*. Apéndice II. Datos de los perfiles representativos de las unidades de suelos. Aguascalientes, Ags. México. 134
- 20 Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2000. *Claves de las cartas topográficas*. Escala 1: 50 000. México.
- 21 Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, Gobierno del Estado de Hidalgo.
- 22 Jacomino, V. M. F., and D. E. Fields. 1997. A critical approach to the calibration of a watershed model. *Journal American Water Resources Association*. 33(1): 143-154.
- 23 Lane, L. J. 1982. Distributed model for small semi-arid watersheds. *J. Hydraulic Eng., ASCE*, 108 (HY 10): 1114-1131.
- 24 Mejía S., E., J. Cortés B., E. Palacios V. y A. Exebio G. 2005. Adaptación de un modelo de simulación hidrológica a la cuenca del río Laja, Guanajuato, México. *Revista Agrociencia*, ISSN 1405-3195, null 39, No. 5. pp: 481-490.
- 25 Nicks, A. D. 1974. *Generación estocástica de la ocurrencia, forma y localización de la cantidad máxima de lluvia diaria*. *In: Proc. Symp. Statistical Hydrology*, Tucson, AZ. U.S. Gov. Print. Office, Washington, D.C. pp: 154-171.
- 26 Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala - Comisión Nacional del Agua - Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales(2004)<http://www.conagua.gob.mx/ocavm/Espaniol/TmpContenido.aspx?id=510b0111-d204-4734-957a-a14f8064598c%7CConsejos%20de%20Cuenc a%7C0%7C5%7C0%7C0%7C0>
- 26 Ozga Zielinka, M. 1976. Structure and operator functions of mathematical models of hydrologic system, design of water resource system. Cambridge, E.E.U.U., Harvard University Press 19 p.
- 28 Palacios V., O. L. 1987. El uso de modelos en irrigación y áreas afines. *Revista Terra*. Volumen 3. México.
- 29 Pristtley C.H.B. and R.J. Taylor 1972. On the .assessment of surface heat flux and evaporation using lage-scattersale parameters. *Mon Weathers Rev* 100:81-92.
- 30 Programa de Manejo de La Reserva de La Biosfera Barranca de Metztitlán Septiembre 2002.
- 31 R. Heras 1981 .-<http://ing.unne.edu.ar/pub/infi.pdf>
- 32 Romo G., J. R. y R. Arteaga R. 1989. *Meteorología Agrícola*. Segunda edición.

- Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- 33 Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH). 1968 Datos hidrométricos de la Región Hidrológica No. 26 Bajo Pánuco (excluyendo al río Guayalejo). Cuenca del río Pánuco. Tomo I. Boletín Hidrológico No. 32. Dirección de Hidrología México.
 - 34 Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH). 1968. Datos hidrométricos de la Región Hidrológica No. 26 Parcial (Alto Pánuco). Cuenca de la Laguna de Metztlán Boletín Hidrológico No. 46 Subsecretaría de Planeación. México. pp: 1-17.
 - 35 Sharpley, A. N., and J. R. Williams. 1990. EPIC. Erosion-Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation. U. S. Department of Agriculture. Technical Bulletin No. 1768. 235 p.
 - 36 Sharpley, A. N., and J. R. Williams. 1990. EPIC. Erosion-Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation. U. S. Department of Agriculture. Technical Bulletin No. 1768. 235 p.
 - 37 Springall G., R. "Hidrología, Primera Parte" Enfoque de los problemas hidrológicos Profesor investigador Instituto de Ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM.
 - 38 Thomas, G. W., and M. McMahon. 1972. The relation between soil characteristics, water movement and nitrate concentration of groundwater. University of Kentucky Water Resources Institute Research Report No. 52, Lexington, KY.
 - 39 Torres B., E. 2000. Comparación de los modelos de simulación hidrológica SWRRB y SWAT en la cuenca El Tejocote, Atlacomulco, estado de México. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Instituto de Recursos Naturales. Especialidad en Edafología. Montecillo, México. 250 p.
 - 40 Torres B., E. 2008. "Adaptación del Modelo de Simulación Hidrológica Swat a las Microcuencas Zona Sureste" (Texcoco) Estado de México.
 - 41 Torres B., E., D. S. Fernández R., J. L. Oropeza M. y E. Mejía S. 2004. Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca "El Tejocote", Atlacomulco, estado de México. Artículo científico. Revista Terra Latinoamericana 22: 437-444.
 - 42 USDA, Soil Conservation Service. 1972. National Engineering Handbook Section 4 Hydrology, chapter 4-10
 - 43 USDA, Soil Conservation Service. 1986. Urban hydrology for small watershed. Tech. Release 5
 - 44 Van Liew, M. W., J. G. Arnold, and D. D. Bosch. 2005. Problems and potential of autocalibrating a hydrologic model. Transactions of the ASAE. American Society of Agricultural Engineers ISSN 0001-2351. Vol. 48(3): 1025-1040.
 - 45 Velázquez Galicia: Felipe Bardomiano.- Optimización de Flujos, en una transición de un conducto abierto a un conducto cerrado, Tesis de grado 2005
 - 46 Vega G.I.: Gestión del Agua de La Sub Cuenca del Río Amajac Estado de

- Hidalgo- México, Considerando su entorno socioeconómico y ambiental Ingeniera Agrícola. Maestra en Ciencias del Agua. Estudiante del doctorado Desarrollo Rural en el Colegio de Posgraduados, Montecillo Texcoco, Estado de México. México. vegagriselle@colpos.mx
- 47 Ven Te Chow, D. R. Maidment and L. W. Mays. 1994. Hidrología Aplicada. Mc Graw Hill, Inc. Chicago, IL. 584 p.
- 48 Verwey, A. 1995. Introducción a los modelos. In: Curso Nacional de Drenaje Agrícola y Control de Inundaciones a nivel de posgrado (2.,1995, Guatemala). Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía.
- 49 Walkley y Black .- http://www.suelos.org.ar/publicaciones/vol_12n2/galanti.pdf
- 50 Waring, R.H. and W.H. Schlesinger. 1985. Foster ecosystems. Concepts and management. Academic Press Inc. Orlando. 340 pp.
- 51 Williams, J.R. and H. D. Berndt. 1977 Sediment yield prediction based on watershed hydrology transactions of ASAE. Vol 20(4) 1100-1104 pp.
- 52 Williams, J.R., Nicks and J.G. Arnold . 1985 Simulation for watershed resources in rural basins of Hydraulic Engineering 111(6):970-986.
- 53 Wischmeier, W. H., and D. D. Smith. 1978. Predicting rainfall losses: A guide to conservation planning. USDA Agricultural Handbook No. 537. U. S. Gov. Print. Office, Washington, D. C.
- 54 Wischmeier, W. H., C. B. Johnson, and B. V. Cross. 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. Journal of Soil and Water Conservation 26: 189-193.
- 55 Woolhiser, D.A.,and D.L. Brakiensiek, 1982 Hydrologic modeling of small watersheds. In: Hydrologic modeling of small waterheds. Eds.C.T. Haan, H.P. Johnson and D.L. Brakiensiek ASAE. Michigan 3-16 pp

Sitios Web:

- 56 <http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/>
- 57 http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/CursoMDT/Tema_1.pdf
- 58 http://www.metztitlan.com.mx/_Historia/MarcoEstatat.pdf
- 59 http://www.rte.espol.edu.ec/archivos/Revista_2004/20%20APLICACION%20DEL%20MODELO%20SWAT.pdf

ANEXOS

ANEXO A. GRUPO HIDROLÓGICO PARA CADA CAPA DE SUELO

| | Descripción |
|---|---|
| A Bajo potencial de escurrimiento | Los suelos tienen una elevada tasa de infiltración inclusive cuando están totalmente húmedos. Consisten principalmente de grava y arena, profundos y bien drenados a excesivamente drenados. Tienen una tasa elevada de transmisión de agua. |
| B | Los suelos tienen una moderada tasa de infiltración cuando están totalmente húmedos. Son suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente bien drenados a bien drenados. Suelos con textura moderadamente fina a moderadamente áspera. Tienen una tasa moderada de transmisión de agua. |
| C | Los suelos tienen una lenta tasa de infiltración cuando están totalmente húmedos. Presentan una capa que impide el movimiento de agua hacia abajo o tienen una textura moderadamente fina a fina. Tienen una tasa lenta de transmisión de agua. |
| D Elevado potencial de escurrimiento | Los suelos tienen una muy lenta tasa de infiltración cuando están totalmente húmedos. Usualmente constan de suelos arcillosos que tienen un alto potencial de expansión. Suelos que tienen una capa permanente de agua, una capa de arcilla en (o cerca de) la superficie y suelos poco profundos que descansan sobre material impermeable. Tienen una tasa muy lenta de transmisión de agua. |

FUENTE: Arnold, J. G. *et al.*, 2002.

ANEXO B. PROPIEDADES HIDROLÓGICAS DEL SUELO CON BASE EN LA CLASE TEXTURAL.

| Clase textural | Capacidad de agua disponible (cm/cm) | Conductividad hidráulica saturada (mm/hr) | Grupo hidrológico de suelo según SCS |
|-------------------------|--------------------------------------|---|--------------------------------------|
| Arena | 0.35 | 210.06 | A |
| Arena migajosa | 0.31 | 61.21 | A |
| Migajón arenoso | 0.25 | 25.91 | B |
| Franco | 0.19 | 13.21 | B |
| Migajón limoso | 0.17 | 6.86 | C |
| Migajón arcillo-arenoso | 0.14 | 4.32 | C |
| Migajón arcilloso | 0.14 | 2.29 | D |
| Migajón arcillo-limoso | 0.11 | 1.52 | D |
| Arcilla arenosa | 0.09 | 1.27 | D |
| Arcilla limosa | 0.09 | 1.02 | D |
| Arcilla | 0.08 | 0.51 | D |

FUENTE: Wanielista (1990).

ANEXO C. VALORES DE CURVA NUMÉRICA CN2 EMPLEADOS EN LA CALIBRACIÓN DE ESCURRIMIENTOS.

| Uso del suelo y práctica mecánica | Grupo hidrológico de suelo | | | |
|--|----------------------------|----|----|----|
| | A | B | C | D |
| Área sin vegetación | 77 | 86 | 91 | 94 |
| Agricultura de riego | 76 | 85 | 90 | 93 |
| Agricultura de riego + fajas al contorno | 67 | 78 | 85 | 89 |
| Agricultura de riego + surcado al contorno | 65 | 75 | 82 | 86 |
| Agricultura de riego + terrazas | 62 | 71 | 78 | 81 |
| Zona Urbana | 76 | 85 | 89 | 91 |
| Agricultura de temporal | 76 | 85 | 90 | 93 |
| Agricultura de temporal + fajas al contorno | 71 | 80 | 87 | 90 |
| Agricultura de temporal + surcado al contorno | 70 | 79 | 84 | 88 |
| Agricultura de temporal + terrazas | 66 | 74 | 80 | 82 |
| Zona Urbana con vegetación | 49 | 69 | 79 | 84 |
| Bosque de Encino (vegetación primaria-secundaria-arbórea) | 38 | 63 | 76 | 89 |
| Bosque de Encino (vegetación secundaria-arbustiva y arbórea) | 45 | 60 | 77 | 83 |
| Bosque de Encino (vegetación secundaria-arbustiva y herbácea) | 47 | 68 | 78 | 84 |
| Bosque de Encino (vegetación secundaria-arbustiva) | 36 | 62 | 73 | 79 |
| Bosque de Oyamel (vegetación primaria-secundaria-arbórea) | 25 | 55 | 70 | 77 |
| Bosque de Pino-Encino (vegetación primaria-secundaria-arbustiva) | 27 | 58 | 72 | 79 |
| Bosque de Pino-Encino (vegetación secundaria-arbustiva y arbórea) | 45 | 66 | 77 | 86 |
| Bosque de Pino-Encino (vegetación secundaria-arbustiva y herbácea) | 47 | 68 | 79 | 88 |
| Bosque de Pino (vegetación primaria-secundaria-arbustiva) | 26 | 57 | 72 | 78 |
| Bosque de Pino (vegetación secundaria-arbustiva y herbácea) | 46 | 66 | 76 | 85 |
| Banco de material | 77 | 86 | 91 | 94 |
| Cuerpo de agua | 49 | 69 | 79 | 84 |
| Matorral (vegetación secundaria-herbácea) | 45 | 66 | 79 | 84 |
| Pastizal | 49 | 70 | 80 | 85 |
| Plantación forestal-pastizal | 45 | 66 | 75 | 82 |
| Plantación forestal (vegetación arbórea densa) | 26 | 56 | 71 | 77 |
| Pradera de alta montaña | 45 | 65 | 75 | 80 |
| Vegetación de galería (pirul) | 45 | 65 | 75 | 82 |

FUENTE: Adaptado de USDA (1986).

ANEXO D. PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS UNIDADES DE SUELO PRESENTES EN LA CUENCA DEL RIO AMAJAC, HIDALGO, MÉXICO.

| CLASIFICA | BY SOIL | | | | | |
|-----------|------------------------------|--------------|-------------------|-------------------------------|-------------------------|---------|
| | SNAM | NLAYERS | HYDGRP | SOL_ZMX | TEXTURE | TEXTURA |
| Número | Nombre de la unidad de suelo | No. de capas | Grupo hidrológico | Prof. Máxima de enraizamiento | Textura | |
| 1 | Acrisol húmico | 1 | D | 125 | migajon arenoso | media |
| 1 | Acrisol húmico | 2 | D | 125 | franco | media |
| 1 | Acrisol húmico | 3 | D | 125 | migajon arcilloso | media |
| 1 | Acrisol húmico | 4 | D | 125 | migajon arcilloso | media |
| 1 | Acrisol húmico | 5 | D | 125 | migajon arcilloso | media |
| 2 | Acrisol órtico | 1 | C | 91 | migajon arcillo-arenoso | media |
| 2 | Acrisol órtico | 2 | B | 91 | migajon arenoso | media |
| 2 | Acrisol órtico | 3 | D | 91 | migajon arcilloso | gruesa |
| 2 | Acrisol órtico | 4 | D | 91 | arcilla | gruesa |
| 3 | Andosol húmico | 1 | D | 125 | arcilla | media |
| 3 | Andosol húmico | 2 | B | 125 | franco | media |
| 3 | Andosol húmico | 3 | B | 125 | arena migajosa | media |
| 4 | Andosol ótrico | 1 | D | 72 | migajon arcilloso | media |
| 5 | Cambisol éútrico | 1 | C | 125 | migajon arenoso | media |
| 5 | Cambisol éútrico | 2 | C | 125 | migajon arcillo-arenoso | media |
| 5 | Cambisol éútrico | 3 | C | 125 | migajon arcillo-arenoso | media |
| 5 | Cambisol éútrico | 4 | C | 125 | migajon arcillo-arenoso | media |
| 6 | Cambisol húmico | 1 | D | 100 | arcilla limosa | media |
| 6 | Cambisol húmico | 2 | D | 100 | migajon arcilloso | media |
| 7 | Cambisol vértico | 1 | C | 45 | migajon arcillo-arenoso | gruesa |
| 8 | Castañozem calcárico | 1 | D | 125 | arcilla | media |
| 8 | Castañozem calcárico | 2 | B | 125 | migajon arenoso | media |
| 9 | Feozem calcárico | 1 | D | 125 | migajon arcilloso | fin |
| 9 | Feozem calcárico | 2 | D | 125 | arcilla | fin |
| 9 | Feozem calcárico | 3 | D | 125 | arcilla | media |
| 9 | Feozem calcárico | 4 | D | 125 | arcilla | media |
| 10 | Feozem háplico | 1 | D | 41 | arcilla arenosa | media |
| 11 | Feozem lúvico | 1 | D | 70 | arcilla | fin |
| 11 | Feozem lúvico | 2 | C | 70 | migajon arcillo-arenoso | fin |
| 11 | Feozem lúvico | 3 | D | 70 | arcilla | media |
| 11 | Feozem lúvico | 4 | D | 70 | arcilla | media |
| 12 | Fluvisol calcárico | 1 | B | 110 | migajon arenoso | gruesa |
| 12 | Fluvisol calcárico | 2 | B | 110 | migajon arenoso | media |
| 12 | Fluvisol calcárico | 3 | B | 110 | migajon arenoso | media |
| 13 | Litosol | 1 | D | 38 | arcilla | media |
| 14 | Luvisol crómico | 1 | D | 53 | migajon arcilloso | fin |
| 14 | Luvisol crómico | 2 | D | 53 | arcilla | fin |
| 15 | Luvisol férrico | 1 | B | 125 | migajon arenoso | media |
| 15 | Luvisol férrico | 2 | C | 125 | migajon arcillo-arenoso | media |
| 15 | Luvisol férrico | 3 | D | 125 | migajon arcilloso | media |
| 15 | Luvisol férrico | 4 | C | 125 | migajon arcillo-arenoso | media |
| 16 | Luvisol órtico | 1 | D | 71 | arcilla | gruesa |
| 16 | Luvisol órtico | 2 | D | 71 | arcilla | media |
| 16 | Luvisol órtico | 3 | D | 71 | arcilla | media |
| 17 | Luvisol vértico | 1 | B | 17 | franco | fin |
| 18 | Planosol éútrico | 1 | D | 45 | migajon arcillo-limoso | fin |
| 19 | Regosol calcárico | 1 | D | 125 | franco | media |
| 19 | Regosol calcárico | 2 | D | 125 | migajon arcilloso | media |
| 19 | Regosol calcárico | 3 | D | 125 | arcilla | fin |
| 20 | Regosol dístrico | 1 | D | 125 | franco | fin |
| 20 | Regosol dístrico | 2 | D | 125 | migajon arcilloso | fin |
| 20 | Regosol dístrico | 3 | D | 125 | migajon arcilloso | media |
| 21 | Regosol éútrico | 1 | B | 15 | franco | media |
| 22 | Rendzina | 1 | D | 35 | arcilla | media |
| 23 | Vertisol crómico | 1 | D | 32 | migajon arcilloso | media |
| 24 | Vertisol pélico | 1 | D | 11 | arcilla | fin |

ANEXO D. PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS UNIDADES DE SUELO PRESENTES EN LA CUENCA DEL RIO AMAJAC, HIDALGO, MÉXICO.(Continuación).

| CLASIFICA | BY LAYER | | | | | | | | | | |
|-----------|-----------------------|-------------------|------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|---------|------|-------|------------------|----------|----------------------|
| | SOL_Z | SOL_BD | SOL_AWC | SOL_K | SOL_CBN | CLAY | SILT | SAND | SOL_ALB | USLE_K | OM |
| Número | Prof. de la capa (cm) | Densidad aparente | Capacidad de agua disponible | Conductividad hidráulica saturada | Porcentaje de carbono orgánico | Arcilla | Limo | Arena | Albedo del suelo | t/h/m/cm | Materia orgánica (%) |
| 1 | 14 | 1.38 | 0.25 | 25.91 | 3.89 | 17 | 40 | 43 | 0.041 | 0.181 | 6.70 |
| 1 | 40 | 1.60 | 0.19 | 13.21 | 1.16 | 16 | 46 | 38 | 0.270 | 0.181 | 2.00 |
| 1 | 70 | 1.60 | 0.14 | 2.29 | 0.99 | 38 | 38 | 24 | 0.304 | 0.181 | 1.70 |
| 1 | 95 | 1.60 | 0.14 | 2.29 | 0.70 | 34 | 34 | 32 | 0.371 | 0.181 | 1.20 |
| 1 | 125 | 1.60 | 0.14 | 2.29 | 0.99 | 30 | 36 | 34 | 0.304 | 0.181 | 1.70 |
| 2 | 15 | 1.60 | 0.14 | 4.32 | 2.15 | 20 | 28 | 52 | 0.137 | 0.362 | 3.70 |
| 2 | 28 | 1.60 | 0.25 | 25.91 | 0.23 | 10 | 30 | 60 | 0.511 | 0.362 | 0.40 |
| 2 | 50 | 1.60 | 0.14 | 2.29 | 0.29 | 36 | 30 | 34 | 0.491 | 0.235 | 0.50 |
| 2 | 91 | 1.40 | 0.08 | 0.51 | 0.23 | 56 | 18 | 26 | 0.511 | 0.235 | 0.40 |
| 3 | 36 | 1.56 | 0.08 | 0.51 | 3.33 | 52 | 36 | 12 | 0.060 | 0.181 | 5.74 |
| 3 | 75 | 1.26 | 0.19 | 13.21 | 11.19 | 13 | 35 | 52 | 0.0003 | 0.181 | 19.30 |
| 3 | 125 | 1.26 | 0.31 | 61.21 | 4.64 | 6 | 12 | 82 | 0.024 | 0.181 | 8.00 |
| 4 | 72 | 1.60 | 0.14 | 2.29 | 1.10 | 36 | 34 | 30 | 0.281 | 0.362 | 1.90 |
| 5 | 18 | 1.52 | 0.25 | 25.91 | 1.04 | 20 | 26 | 54 | 0.292 | 0.362 | 1.80 |
| 5 | 48 | 1.31 | 0.14 | 4.32 | 0.41 | 26 | 28 | 46 | 0.453 | 0.362 | 0.70 |
| 5 | 78 | 1.28 | 0.14 | 4.32 | 0.17 | 26 | 28 | 46 | 0.532 | 0.362 | 0.30 |
| 5 | 125 | 1.05 | 0.14 | 4.32 | 0.17 | 24 | 24 | 52 | 0.532 | 0.362 | 0.30 |
| 6 | 34 | 1.28 | 0.09 | 1.02 | 1.51 | 46 | 40 | 14 | 0.212 | 0.181 | 2.60 |
| 6 | 100 | 1.03 | 0.14 | 2.29 | 5.46 | 30 | 30 | 40 | 0.014 | 0.181 | 9.41 |
| 7 | 45 | 1.35 | 0.14 | 4.32 | 4.90 | 25 | 26 | 49 | 0.021 | 0.479 | 8.44 |
| 8 | 36 | 1.28 | 0.08 | 0.51 | 1.68 | 69 | 22 | 9 | 0.188 | 0.362 | 2.90 |
| 8 | 125 | 1.30 | 0.25 | 25.91 | 1.04 | 14 | 22 | 64 | 0.292 | 0.362 | 1.80 |
| 9 | 15 | 1.60 | 0.14 | 2.29 | 2.49 | 32 | 32 | 36 | 0.107 | 0.063 | 4.30 |
| 9 | 45 | 1.40 | 0.08 | 0.51 | 1.86 | 46 | 26 | 28 | 0.167 | 0.063 | 3.20 |
| 9 | 80 | 1.40 | 0.08 | 0.51 | 0.29 | 48 | 28 | 24 | 0.491 | 0.181 | 0.50 |
| 9 | 125 | 1.40 | 0.08 | 0.51 | 0.17 | 48 | 24 | 28 | 0.532 | 0.181 | 0.30 |
| 10 | 41 | 1.54 | 0.09 | 1.27 | 2.09 | 36 | 13 | 51 | 0.142 | 0.181 | 3.61 |
| 11 | 23 | 1.32 | 0.08 | 0.51 | 2.62 | 46 | 30 | 24 | 0.099 | 0.063 | 4.51 |
| 11 | 28 | 1.60 | 0.14 | 4.32 | 0.64 | 26 | 24 | 50 | 0.386 | 0.063 | 1.10 |
| 11 | 51 | 1.40 | 0.08 | 0.51 | 0.70 | 52 | 14 | 34 | 0.371 | 0.181 | 1.20 |
| 11 | 70 | 1.40 | 0.08 | 0.51 | 0.17 | 40 | 18 | 42 | 0.532 | 0.181 | 0.30 |
| 12 | 9 | 1.60 | 0.25 | 25.91 | 1.07 | 18 | 28 | 54 | 0.286 | 0.118 | 1.85 |
| 12 | 40 | 1.60 | 0.25 | 25.91 | 1.19 | 10 | 22 | 68 | 0.264 | 0.181 | 2.05 |
| 12 | 110 | 1.60 | 0.25 | 25.91 | 0.39 | 14 | 32 | 54 | 0.459 | 0.181 | 0.67 |
| 13 | 38 | 1.51 | 0.08 | 0.51 | 1.98 | 49 | 20 | 31 | 0.153 | 0.181 | 3.42 |
| 14 | 29 | 1.20 | 0.14 | 2.29 | 4.57 | 34 | 29 | 37 | 0.026 | 0.118 | 7.88 |
| 14 | 53 | 1.43 | 0.08 | 0.51 | 0.99 | 66 | 14 | 20 | 0.304 | 0.118 | 1.70 |
| 15 | 20 | 1.60 | 0.25 | 25.91 | 0.93 | 20 | 24 | 56 | 0.316 | 0.181 | 1.60 |
| 15 | 40 | 1.60 | 0.14 | 4.32 | 0.81 | 24 | 20 | 56 | 0.343 | 0.181 | 1.40 |
| 15 | 90 | 1.60 | 0.14 | 2.29 | 0.58 | 38 | 18 | 44 | 0.402 | 0.181 | 1.00 |
| 15 | 125 | 1.60 | 0.14 | 4.32 | 0.29 | 35 | 20 | 45 | 0.491 | 0.181 | 0.50 |
| 16 | 20 | 1.40 | 0.08 | 0.51 | 1.80 | 48 | 26 | 26 | 0.174 | 0.034 | 3.10 |
| 16 | 42 | 1.40 | 0.08 | 0.51 | 1.04 | 50 | 20 | 30 | 0.292 | 0.362 | 1.80 |
| 16 | 71 | 1.40 | 0.08 | 0.51 | 0.81 | 46 | 24 | 30 | 0.343 | 0.362 | 1.40 |
| 17 | 17 | 1.20 | 0.19 | 13.21 | 7.47 | 24 | 33 | 43 | 0.003 | 0.235 | 12.87 |
| 18 | 45 | 1.53 | 0.11 | 1.52 | 3.40 | 38 | 44 | 18 | 0.057 | 0.235 | 5.87 |
| 19 | 45 | 1.35 | 0.19 | 13.21 | 5.64 | 16 | 44 | 40 | 0.012 | 0.181 | 9.73 |
| 19 | 90 | 1.34 | 0.14 | 2.29 | 5.95 | 39 | 34 | 27 | 0.010 | 0.181 | 10.26 |
| 19 | 125 | 1.53 | 0.08 | 0.51 | 5.10 | 53 | 26 | 21 | 0.018 | 0.063 | 8.79 |
| 20 | 22 | 1.17 | 0.19 | 13.21 | 13.05 | 20 | 42 | 38 | 0.0001 | 0.118 | 22.50 |
| 20 | 58 | 1.60 | 0.14 | 2.29 | 1.28 | 34 | 28 | 38 | 0.249 | 0.118 | 2.20 |
| 20 | 125 | 1.60 | 0.14 | 2.29 | 0.29 | 34 | 26 | 40 | 0.491 | 0.362 | 0.50 |
| 21 | 15 | 1.27 | 0.19 | 13.21 | 3.18 | 24 | 39 | 37 | 0.067 | 0.362 | 5.48 |
| 22 | 35 | 1.53 | 0.08 | 0.51 | 5.57 | 43 | 15 | 42 | 0.013 | 0.181 | 9.61 |
| 23 | 32 | 1.35 | 0.14 | 2.29 | 3.19 | 32 | 32 | 36 | 0.066 | 0.714 | 5.50 |
| 24 | 11 | 1.41 | 0.08 | 0.51 | 0.98 | 63 | 22 | 15 | 0.305 | 0.235 | 1.69 |

ANEXO E. GENERADORES CLIMÁTICOS.

| Generador climático de la estación 13017 Mineral Chico | | | | | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| MES | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
| TMPMX | 18.2 | 20.1 | 23.1 | 25.1 | 25.0 | 22.1 | 19.6 | 20.0 | 18.8 | 18.5 | 18.9 | 18.1 |
| TMPMN | 5.4 | 6.1 | 7.9 | 9.7 | 10.5 | 10.5 | 9.6 | 9.4 | 9.7 | 8.3 | 6.8 | 6.2 |
| TMPSTDMX | 3.8 | 4.1 | 4.1 | 3.8 | 3.7 | 3.9 | 2.5 | 2.5 | 2.9 | 3.6 | 3.7 | 3.8 |
| TMPSTDMN | 2.7 | 2.9 | 2.9 | 2.6 | 2.0 | 1.9 | 1.7 | 1.6 | 1.9 | 2.5 | 2.6 | 2.4 |
| PCPMM | 23.5 | 17.7 | 23.7 | 52.6 | 91.3 | 236.0 | 240.3 | 233.3 | 292.9 | 145.2 | 42.0 | 23.0 |
| PCPSTD | 8.53 | 5.75 | 6.32 | 9.61 | 10.65 | 15.12 | 14.05 | 13.44 | 18.31 | 14.94 | 7.54 | 5.65 |
| PCPSKW | 3.459 | 2.239 | 3.275 | 2.905 | 2.997 | 1.416 | 2.418 | 1.805 | 3.143 | 2.589 | 2.481 | 2.307 |
| PR_W1 | 0.086 | 0.093 | 0.113 | 0.137 | 0.229 | 0.286 | 0.500 | 0.433 | 0.460 | 0.257 | 0.146 | 0.109 |
| PR_W2 | 0.398 | 0.375 | 0.444 | 0.561 | 0.571 | 0.760 | 0.756 | 0.733 | 0.771 | 0.659 | 0.458 | 0.433 |
| PCPD | 3.9 | 3.7 | 5.3 | 7.1 | 10.8 | 16.3 | 20.8 | 19.2 | 20.0 | 13.3 | 6.4 | 5.0 |
| RAINHHMX | 4.10 | 4.50 | 5.60 | 13.00 | 19.70 | 21.90 | 19.00 | 18.50 | 13.20 | 8.00 | 6.60 | 3.20 |
| SOLARAV | 14 | 17 | 20 | 23 | 24 | 22 | 20 | 19 | 17 | 17 | 16 | 14 |
| DEWPT | 0.69 | 0.64 | 0.60 | 0.59 | 0.61 | 0.71 | 0.74 | 0.76 | 0.80 | 0.75 | 0.72 | 0.73 |

| Generador climático de la estación 13029 San Lorenzo Sayula | | | | | | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| MES | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
| TMPMX | 19.7 | 20.8 | 23 | 24.8 | 24.6 | 22.3 | 20.9 | 20.9 | 20.4 | 20 | 20.3 | 19.8 |
| TMPMN | 3.2 | 4 | 6.5 | 8.7 | 9.9 | 10 | 9.1 | 8.7 | 8.9 | 7.2 | 5.2 | 3.9 |
| TMPSTDMX | 3.7 | 3.9 | 4.2 | 3.5 | 3 | 2.9 | 2.1 | 2 | 2.6 | 3.2 | 3.5 | 3.5 |
| TMPSTDMN | 3.6 | 3.6 | 3.4 | 2.6 | 2.2 | 2.2 | 2.2 | 2.1 | 2.5 | 2.9 | 3.7 | 4.3 |
| PCPMM | 8.1 | 12.8 | 14.7 | 39.6 | 60.2 | 116.8 | 103.2 | 92.3 | 116.2 | 49.3 | 18.1 | 8.3 |
| PCPSTD | 4.2 | 4.66 | 5.04 | 6.33 | 7.99 | 10.7 | 10.47 | 9.34 | 12.25 | 7.29 | 4.17 | 4.64 |
| PCPSKW | 2.474 | 2.353 | 2.317 | 2.547 | 4.76 | 2.273 | 3.226 | 3.094 | 3.21 | 3.444 | 2.254 | 4.28 |
| PR_W1 | 0.049 | 0.103 | 0.091 | 0.145 | 0.226 | 0.288 | 0.322 | 0.346 | 0.325 | 0.22 | 0.115 | 0.073 |
| PR_W2 | 0.391 | 0.292 | 0.315 | 0.545 | 0.568 | 0.648 | 0.612 | 0.56 | 0.621 | 0.475 | 0.337 | 0.293 |
| PCPD | 2.3 | 3.6 | 3.7 | 7.3 | 10.6 | 13.5 | 14.1 | 13.6 | 13.9 | 9.1 | 4.4 | 2.9 |
| RAINHHMX | 5.1 | 5.9 | 6.8 | 13.5 | 17.2 | 22.5 | 17.9 | 18.8 | 19.2 | 12.8 | 8.9 | 3.3 |
| SOLARAV | 17 | 19 | 21 | 23 | 24 | 22 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 |
| DEWPT | 0.54 | 0.53 | 0.53 | 0.56 | 0.61 | 0.69 | 0.71 | 0.71 | 0.71 | 0.67 | 0.61 | 0.58 |

Simulación Hidrológica de la cuenca del Río Amajac, Estado de Hidalgo aplicando el modelo Swat

Generador climático de la estación 13031 Santiago Tulantepec

| MES | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| TMPMX | 21.2 | 22.7 | 25.1 | 26.7 | 26.9 | 24.5 | 23.0 | 23.0 | 22.4 | 22.1 | 22.0 | 21.2 |
| TMPMN | 4.0 | 4.8 | 7.0 | 9.5 | 10.9 | 11.3 | 10.6 | 10.2 | 10.7 | 8.5 | 5.8 | 5.0 |
| TMPSTDMX | 4.0 | 4.2 | 4.6 | 3.7 | 3.3 | 3.2 | 2.2 | 2.0 | 2.6 | 3.3 | 3.6 | 3.7 |
| TMPSTDMN | 2.6 | 2.9 | 3.1 | 2.5 | 2.4 | 2.4 | 2.2 | 2.1 | 2.3 | 2.9 | 3.1 | 2.8 |
| PCPMM | 7.9 | 8.6 | 13.0 | 41.0 | 54.8 | 94.4 | 94.9 | 76.2 | 88.5 | 46.0 | 15.7 | 7.7 |
| PCPSTD | 4.46 | 3.35 | 5.39 | 7.98 | 6.51 | 8.99 | 10.41 | 7.20 | 8.72 | 9.78 | 6.11 | 2.58 |
| PCPSKW | 2.130 | 2.356 | 2.294 | 2.708 | 2.063 | 1.855 | 3.722 | 1.914 | 2.797 | 5.351 | 2.836 | 0.667 |
| PR_W1 | 0.052 | 0.070 | 0.051 | 0.117 | 0.170 | 0.219 | 0.304 | 0.249 | 0.295 | 0.179 | 0.086 | 0.048 |
| PR_W2 | 0.268 | 0.280 | 0.420 | 0.533 | 0.512 | 0.611 | 0.535 | 0.530 | 0.570 | 0.386 | 0.281 | 0.300 |
| PCPD | 2.0 | 2.5 | 2.5 | 6.0 | 8.0 | 10.8 | 12.3 | 10.8 | 12.2 | 7.0 | 3.2 | 2.0 |
| RAINHHMX | 5.40 | 5.20 | 7.20 | 12.80 | 15.80 | 20.40 | 15.80 | 15.70 | 17.80 | 10.60 | 8.10 | 3.20 |
| SOLARAV | 17 | 19 | 22 | 24 | 25 | 23 | 22 | 22 | 20 | 20 | 19 | 17 |
| DEWPT | 0.51 | 0.49 | 0.47 | 0.51 | 0.56 | 0.68 | 0.69 | 0.69 | 0.71 | 0.64 | 0.57 | 0.56 |

Generador climático de la estación 13087 San Cristobal, Metztlán

| MES | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| TMPMX | 22.3 | 24.5 | 28.9 | 30.2 | 31.3 | 28.7 | 27.7 | 28.1 | 26.1 | 24.8 | 23.9 | 22.7 |
| TMPMN | 9.5 | 10.3 | 13.4 | 15.5 | 17.0 | 16.9 | 16.5 | 16.7 | 16.2 | 14.7 | 12.1 | 10.7 |
| TMPSTDMX | 5.2 | 5.2 | 5.2 | 4.7 | 4.0 | 3.2 | 2.5 | 2.4 | 3.1 | 3.6 | 4.1 | 4.3 |
| TMPSTDMN | 2.9 | 2.7 | 2.9 | 2.2 | 1.8 | 1.3 | 1.2 | 1.1 | 1.9 | 2.3 | 2.7 | 2.8 |
| PCPMM | 8.8 | 2.7 | 9.1 | 23.3 | 47.6 | 69.9 | 48.5 | 47.1 | 91.9 | 28.1 | 7.5 | 6.2 |
| PCPSTD | 5.11 | 1.86 | 5.78 | 5.66 | 8.91 | 10.04 | 7.73 | 5.91 | 10.49 | 4.89 | 2.66 | 4.51 |
| PCPSKW | 2.695 | 1.305 | 1.337 | 1.761 | 3.294 | 2.479 | 6.964 | 2.796 | 3.936 | 3.208 | 2.398 | 2.366 |
| PR_W1 | 0.047 | 0.042 | 0.039 | 0.098 | 0.139 | 0.182 | 0.211 | 0.205 | 0.284 | 0.149 | 0.083 | 0.047 |
| PR_W2 | 0.367 | 0.111 | 0.304 | 0.453 | 0.510 | 0.589 | 0.597 | 0.551 | 0.672 | 0.538 | 0.340 | 0.321 |
| PCPD | 2.1 | 1.3 | 1.6 | 4.6 | 6.9 | 9.2 | 10.6 | 9.7 | 13.9 | 7.6 | 3.4 | 2.0 |
| RAINHHMX | 5.90 | 8.20 | 9.50 | 23.90 | 37.20 | 35.90 | 32.60 | 28.30 | 28.70 | 18.30 | 10.50 | 7.50 |
| SOLARAV | 15 | 17 | 21 | 22 | 23 | 22 | 21 | 21 | 19 | 17 | 16 | 14 |
| DEWPT | 0.68 | 0.64 | 0.57 | 0.62 | 0.63 | 0.70 | 0.73 | 0.72 | 0.75 | 0.74 | 0.73 | 0.72 |

Simulación Hidrológica de la cuenca del Río Amajac, Estado de Hidalgo aplicando el modelo Swat

| Generador climático de la estación 13093 Venados | | | | | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| MES | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
| TMPMX | 26.1 | 27.8 | 31.6 | 32.8 | 33.3 | 30.6 | 29.1 | 29.5 | 28.4 | 27.6 | 27.3 | 26.3 |
| TMPMN | 6.7 | 7.5 | 9.9 | 12.8 | 15.3 | 15.8 | 15.4 | 15.5 | 15.1 | 13.2 | 9.5 | 7.9 |
| TMPSTDMX | 5.5 | 5.0 | 5.0 | 4.7 | 4.1 | 3.5 | 2.8 | 2.7 | 3.2 | 3.9 | 4.5 | 4.7 |
| TMPSTDMN | 2.7 | 2.8 | 3.0 | 2.6 | 2.1 | 2.0 | 1.8 | 1.6 | 2.4 | 2.7 | 3.3 | 3.1 |
| PCPMM | 9.0 | 6.1 | 9.3 | 24.9 | 53.8 | 70.9 | 61.3 | 55.7 | 104.5 | 35.8 | 8.2 | 4.7 |
| PCPSTD | 5.73 | 2.35 | 6.69 | 5.23 | 7.45 | 12.51 | 8.77 | 7.27 | 12.35 | 6.54 | 3.01 | 2.68 |
| PCPSKW | 2.663 | 0.542 | 2.000 | 1.742 | 1.286 | 3.637 | 3.411 | 3.442 | 2.950 | 1.909 | 1.937 | 0.876 |
| PR_W1 | 0.037 | 0.043 | 0.041 | 0.112 | 0.161 | 0.168 | 0.184 | 0.223 | 0.249 | 0.137 | 0.079 | 0.036 |
| PR_W2 | 0.483 | 0.304 | 0.292 | 0.355 | 0.449 | 0.564 | 0.593 | 0.473 | 0.574 | 0.484 | 0.211 | 0.167 |
| PCPD | 2.1 | 1.6 | 1.7 | 4.4 | 7.0 | 8.4 | 9.6 | 9.2 | 11.1 | 6.5 | 2.7 | 1.3 |
| RAINHHMX | 5.40 | 6.60 | 8.20 | 19.20 | 29.40 | 29.60 | 26.30 | 23.60 | 22.70 | 14.00 | 9.40 | 5.60 |
| SOLARAV | 18 | 20 | 24 | 25 | 27 | 24 | 23 | 23 | 22 | 21 | 19 | 17 |
| DEWPT | 0.46 | 0.43 | 0.36 | 0.46 | 0.49 | 0.63 | 0.65 | 0.64 | 0.66 | 0.61 | 0.55 | 0.51 |

| Generador climático de la estación 13096 Atotonilco | | | | | | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| MES | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
| TMPMX | 19.7 | 21.4 | 25.0 | 26.2 | 26.5 | 23.6 | 22.0 | 22.0 | 20.9 | 20.4 | 20.8 | 20.2 |
| TMPMN | 6.0 | 6.6 | 8.8 | 11.0 | 12.7 | 12.9 | 12.2 | 12.3 | 12.0 | 9.9 | 8.1 | 6.6 |
| TMPSTDMX | 4.5 | 4.6 | 4.9 | 4.3 | 3.6 | 3.3 | 2.2 | 2.1 | 2.7 | 3.7 | 3.8 | 4.0 |
| TMPSTDMN | 2.7 | 2.5 | 3.0 | 2.3 | 2.0 | 1.8 | 1.6 | 1.5 | 1.9 | 2.6 | 2.6 | 2.5 |
| PCPMM | 10.8 | 13.4 | 16.3 | 32.9 | 63.8 | 118.9 | 116.1 | 127.6 | 153.3 | 60.8 | 20.2 | 8.7 |
| PCPSTD | 4.78 | 2.82 | 6.23 | 5.09 | 7.58 | 10.38 | 7.94 | 11.31 | 11.68 | 7.84 | 5.00 | 3.28 |
| PCPSKW | 3.144 | 2.008 | 2.486 | 2.349 | 1.947 | 2.112 | 2.307 | 3.821 | 3.358 | 2.446 | 2.563 | 1.997 |
| PR_W1 | 0.077 | 0.107 | 0.078 | 0.174 | 0.217 | 0.293 | 0.394 | 0.344 | 0.393 | 0.208 | 0.118 | 0.064 |
| PR_W2 | 0.271 | 0.427 | 0.358 | 0.459 | 0.513 | 0.622 | 0.672 | 0.626 | 0.685 | 0.583 | 0.398 | 0.390 |
| PCPD | 3.0 | 4.4 | 3.3 | 7.3 | 9.6 | 13.1 | 16.9 | 14.9 | 16.6 | 10.3 | 4.9 | 3.0 |
| RAINHHMX | 4.60 | 5.00 | 6.50 | 14.40 | 21.60 | 23.30 | 20.20 | 19.10 | 15.90 | 9.50 | 7.50 | 3.80 |
| SOLARAV | 15 | 17 | 21 | 22 | 23 | 21 | 20 | 19 | 17 | 18 | 16 | 15 |
| DEWPT | 0.64 | 0.60 | 0.56 | 0.61 | 0.64 | 0.73 | 0.77 | 0.76 | 0.79 | 0.73 | 0.70 | 0.66 |

| Generador climático de la estación 24091 Temamatla, Tamazunchale | | | | | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| MES | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
| TMPMX | 23.0 | 24.6 | 28.7 | 31.8 | 33.2 | 33.3 | 32.1 | 32.8 | 31.6 | 29.2 | 27.1 | 24.2 |
| TMPMN | 12.3 | 13.0 | 16.0 | 19.2 | 21.3 | 22.1 | 21.3 | 21.5 | 21.3 | 19.0 | 16.6 | 13.7 |
| TMPSTDMX | 5.3 | 5.2 | 5.0 | 4.9 | 3.6 | 3.1 | 2.9 | 2.5 | 3.0 | 3.4 | 4.2 | 4.8 |
| TMPSTDMN | 3.6 | 3.1 | 3.4 | 3.2 | 2.9 | 2.3 | 2.0 | 1.8 | 2.0 | 3.0 | 3.3 | 3.4 |
| PCPMM | 49.1 | 37.9 | 39.0 | 79.0 | 117.9 | 223.0 | 206.0 | 165.9 | 291.7 | 162.6 | 64.0 | 41.3 |
| PCPSTD | 11.28 | 5.64 | 8.44 | 22.05 | 23.20 | 29.89 | 26.40 | 19.75 | 30.95 | 29.82 | 18.16 | 8.91 |
| PCPSKW | 6.578 | 2.268 | 3.117 | 3.255 | 2.500 | 2.888 | 4.334 | 2.267 | 2.188 | 3.642 | 4.527 | 4.525 |
| PR_W1 | 0.192 | 0.176 | 0.150 | 0.139 | 0.167 | 0.206 | 0.253 | 0.215 | 0.241 | 0.180 | 0.149 | 0.179 |
| PR_W2 | 0.380 | 0.506 | 0.437 | 0.425 | 0.454 | 0.596 | 0.590 | 0.557 | 0.578 | 0.502 | 0.401 | 0.405 |
| PCPD | 7.3 | 7.4 | 6.5 | 5.8 | 7.3 | 10.1 | 11.8 | 10.1 | 10.9 | 8.2 | 6.0 | 7.2 |
| RAINHHMX | 8.70 | 14.20 | 15.00 | 40.90 | 66.70 | 58.60 | 55.40 | 45.30 | 53.50 | 34.90 | 16.90 | 14.20 |
| SOLARAV | 13 | 15 | 18 | 21 | 21 | 21 | 21 | 20 | 19 | 17 | 15 | 13 |
| DEWPT | 0.73 | 0.70 | 0.67 | 0.68 | 0.71 | 0.73 | 0.74 | 0.74 | 0.75 | 0.74 | 0.74 | 0.74 |

DESCRIPCION DE LAS VARIABLES:

TMPMX: Temperatura máxima del aire en el mes

TMPMN: Temperatura mínima del aire en el mes

TMPSTDMX: Desviación estándar de la temperatura máxima del aire en el mes

TMPSTDMN: Desviación estándar de la temperatura mínima del aire en el mes

PCPMM: Cantidad de precipitación en el mes

PCPSTD: Desviación estándar de la precipitación en el mes

PCPSKW: Coeficiente de asimetría de la precipitación en el mes

PR_W1: Probabilidad de un día húmedo seguido de un día seco en el mes

PR_W2: Probabilidad de un día húmedo seguido de un día húmedo en el mes

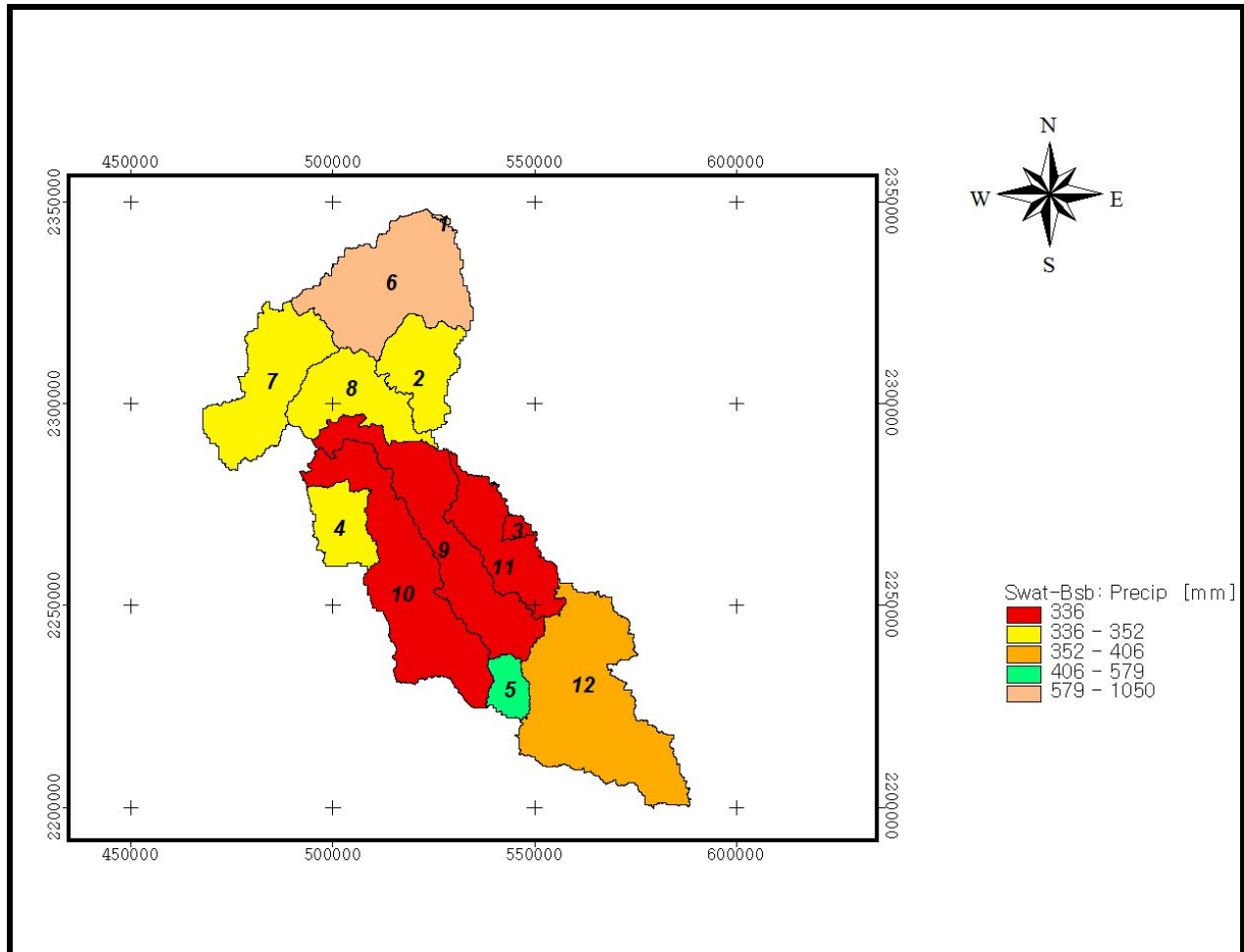
PCPD: Número de días de precipitación en el mes

RAINHHMX: Intensidad máxima de la lluvia en 30 minutos para un periodo de retorno de 10 años

SOLARAV: Radiación solar diaria en el mes

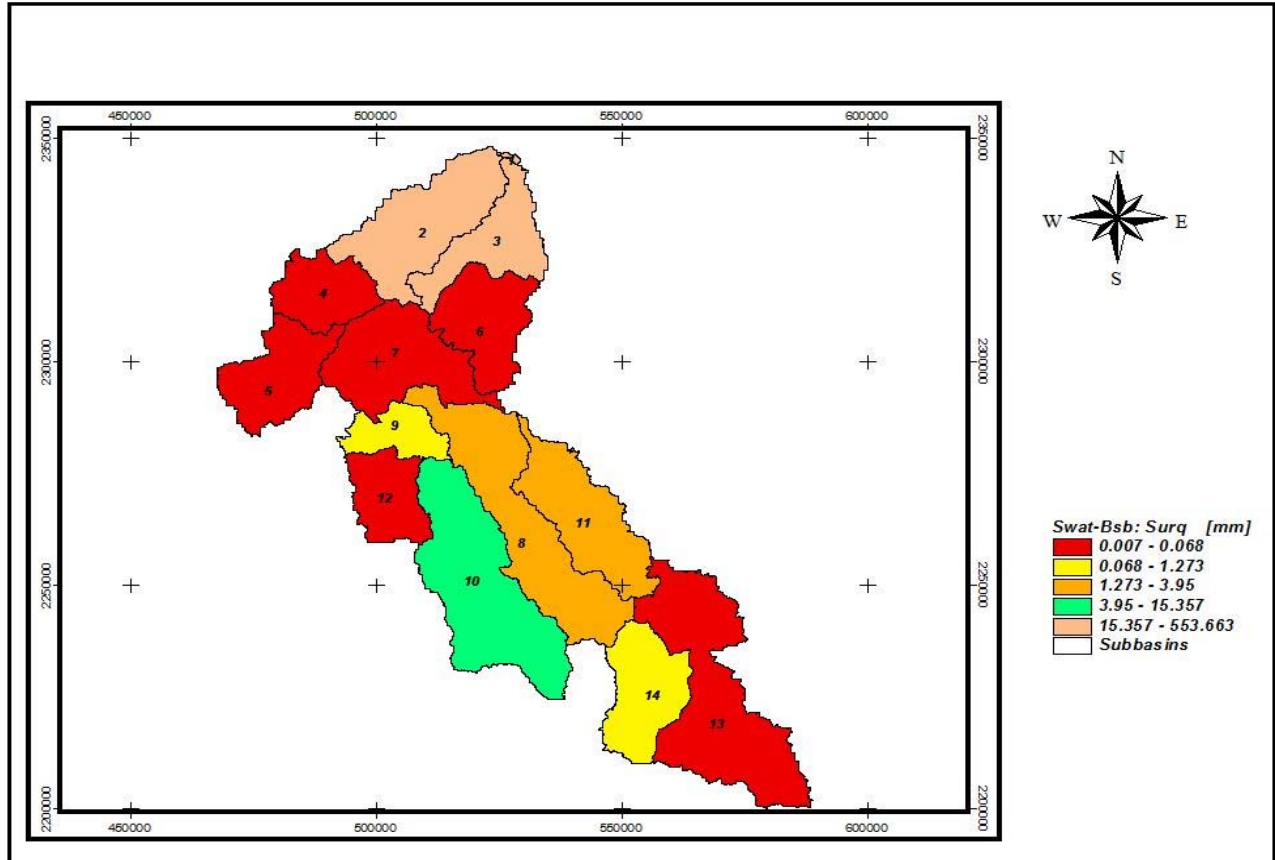
DEWPT: Temperatura a punto de rocío en el mes

ANEXO F. ESTIMACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL DEL PERIODO 2006 A 2008.



| | | |
|--|--------------------------------|------------------------------|
| INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL | | |
| ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA | | |
| SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION | | |
| "SIMULACION DEL MODELO SWAT EN LA CUENCA DEL RIO AMAJAC ESTADO DE HIDALGO" | | |
| MAPA DE PRECIPITACION CUENCA DE AMAJAC | | |
| ELABORÓ | REVISÓ | APROBÓ |
| ING. TRINIDAD ARGOTA | M en C. LUCIO FRAGOSO SANDOVAL | M en C. PINO DURÁN ESCAMILLA |

ANEXO G. ESTIMACIÓN DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL MEDIO ANUAL DEL PERIODO 2006 A 2008.



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION

“SIMULACION DEL MODELO SWAT EN LA CUENCA DEL RIO AMAJAC ESTADO DE HIDALGO”

MAPA DE ESCURRIMIENTO MEDIO ANUAL

| | | |
|---------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| ELABORÓ | REVISÓ | APROBÓ |
| ING.TRINIDAD ARGOTA | M en C.LUCIO FRAGOSO SANDOVAL | M en C.PINO DURÁN ESCAMILLA |

ANEXO G. SALIDAS GENERALES DEL MODELO SWAT (ARCHIVO OUTPUT.STD)

SWAT Feb '01 VERSION 2000 1/14/2011 12:26:30 p.m.

General Input/Output section (file.cio): Sat Nov 20 00:06:262010 AVSW

Number of years in run: 2
Area of watershed: 6486.323km2

1
SWAT Feb '01 VERSION200

General Input/Output section (file.cio): Sat Nov 20 00:06:26 2010 AVSW

Annual Summary for Watershed in year 1 of simulation

| UNIT TIME | PREC (mm) | SURQ (mm) | LATQ (mm) | PERCO GWQ (mm) | LATE (mm) | TILE Q (mm) | SW (mm) | ET (mm) | PET (mm) | WATER YIELD (mm) | SED YIELD (t/ha) | NO3 SURQ | NO3 LATQ | NO3 PERC | NO3 CROP | N ORGANICS (kg nutri ent/ha) | P SOLUBLE | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------|-----------|-------------|---------|---------|----------|------------------|------------------|----------|----------|----------|----------|------------------------------|-----------|------|
| 1 | 9.23 | 0.27 | 3.39 | 0.03 | 0.09 | 0 | 6.77 | 7.96 | 67.39 | 3.67 | 0.06 | 0 | 0.12 | 0.01 | 0 | 0.3 | 0 | |
| 2 | 13.77 | 0.45 | 4.99 | 0.04 | 0.06 | 0 | 8.15 | 6.8 | 76.45 | 5.47 | 0.12 | 0 | 1.44 | 0.01 | 0 | 0.62 | 0 | |
| 3 | 26.17 | 3.5 | 9.13 | 0.13 | 0.49 | 0 | 4.75 | 16.56 | 115.91 | 12.75 | 1.49 | 0.01 | 1.68 | 0.16 | 5.38 | 6.3 | 0 | |
| 4 | 114.77 | 11.97 | 40.19 | 0.69 | 2.83 | 0 | 10.34 | 54.05 | 106.21 | 52.81 | 1.11 | 0.03 | 1.03 | 0.22 | 11.79 | 5.17 | 0 | |
| 5 | 67.81 | 9.38 | 20.75 | 1.62 | 2.99 | 0 | 12.54 | 32.46 | 142.95 | 31.72 | 1.42 | 0.04 | 0.71 | 0.2 | 1.23 | 4.94 | 0 | |
| 6 | 126.43 | 23.67 | 46.42 | 2.46 | 8.15 | 0 | 23.63 | 36.78 | 122.04 | 72.44 | 3.29 | 0.07 | 1.08 | 0.27 | 0.14 | 11.3 | 0 | |
| 7 | 142.06 | 46.33 | 38.93 | 6.07 | 10.72 | 0 | 22.9 | 46.26 | 112.61 | 91.17 | 5.82 | 0.12 | 0.58 | 0.2 | 0.12 | 15.39 | 0.01 | |
| 8 | 68.55 | 12.07 | 16.19 | 7.41 | 8.21 | 0 | 23.64 | 31.78 | 130.4 | 35.59 | 1.81 | 0.03 | 0.81 | 0.23 | 0.04 | 4.16 | 0 | |
| 9 | 74.42 | 9.48 | 18.09 | 8.87 | 12.53 | 0 | 23.28 | 33.51 | 107.31 | 36.31 | 1.29 | 0.03 | 0.71 | 0.25 | 0.01 | 2.82 | 0 | |
| 10 | 39.62 | 6.87 | 13.61 | 9.78 | 3.27 | 0 | 18.02 | 22.39 | 85.3 | 30.2 | 0.92 | 0.02 | 0.29 | 0.05 | 0.01 | 2.04 | 0 | |
| 11 | 9.06 | 0.43 | 2.94 | 4.98 | 0.03 | 0 | 13.09 | 10.67 | 75.58 | 8.34 | 0.04 | 0 | 0.2 | 0 | 0 | 0.04 | 0 | |
| 12 | 13.21 | 0.28 | 4.21 | 1.47 | 0.25 | 0 | 12.69 | 8.94 | 58.75 | 5.96 | 0.02 | 0 | 0.56 | 0.02 | 0.01 | 0.03 | 0 | |
| 2010 | 705.1 | 124.71 | 218.84 | 4 | 3.55 | 49.64 | 0 | 12.69 | 308.15 | 1200.89 | 386.43 | 17.4 | 0.36 | 9.19 | 1.62 | 18.74 | 53.11 | 0.02 |

1
S WAT Feb '01 VERSION200
G eneral I nput/Ou tput se ct ion (file.c io): Sat No v 20 00 :06:26 2010 AVSW

Annual Summary for Watershed in year 2 of simulation

| UNIT TIME | PREC (mm) | SURQ (mm) | LATQ (mm) | PERCO GWQ (mm) | LATE (mm) | TILE Q (mm) | SW (mm) | ET (mm) | PET (mm) | WATER YIELD (mm) | SED YIELD (t/ha) | NO3 SURQ | NO3 LATQ | NO3 PERC | NO3 CROP | N ORGANICS (kg nutri ent/ha) | P SOLUBLE | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------|-----------|-------------|---------|---------|----------|------------------|------------------|----------|----------|----------|----------|------------------------------|-----------|------|
| 1 | 8.06 | 1.08 | 3.13 | 0.60 | 0.11 | 0 | 10.15 | 6.33 | 67.14 | 4.8 | 0.12 | 0 | 0.07 | 0 | 0.01 | 0.28 | 0 | |
| 2 | 3.75 | 0 | 1.39 | 0.26 | 0.00 | 0 | 7.45 | 5.1 | 78.72 | 1.65 | 0 | 0 | 1.34 | 0 | 0.01 | 0 | 0 | |
| 3 | 3.18 | 0.12 | 1.24 | 0.12 | 0.00 | 0 | 2.9 | 6.41 | 112.15 | 1.48 | 0.01 | 0 | 0.16 | 0 | 2 | 0.02 | 0 | |
| 4 | 50.14 | 3.81 | 16.9 | 0.05 | 0.88 | 0 | 16.43 | 13.95 | 116.26 | 20.76 | 0.37 | 0.01 | 7.08 | 0.03 | 1.41 | 0.86 | 0 | |
| 5 | 60.58 | 7.17 | 19.66 | 0.88 | 2.28 | 0 | 15.28 | 33.51 | 142.8 | 27.67 | 1.14 | 0.04 | 0.92 | 0.12 | 2.43 | 2.42 | 0 | |
| 6 | 148.07 | 34.11 | 45.46 | 2.62 | 10.56 | 0 | 22.13 | 50.95 | 124.13 | 82.04 | 5.2 | 0.16 | 3.23 | 0.91 | 0.18 | 10.51 | 0 | |
| 7 | 55.58 | 8.25 | 16.19 | 5.27 | 3.28 | 0 | 16.25 | 33.75 | 129.94 | 29.61 | 2.07 | 0.03 | 0.79 | 0.1 | 0.1 | 2.12 | 0 | |
| 8 | 44.27 | 6.86 | 14.34 | 4.01 | 1.30 | 0 | 14.57 | 23.42 | 133.98 | 25.19 | 0.87 | 0.02 | 1.17 | 0.09 | 0.02 | 0.89 | 0 | |
| 9 | 75.26 | 18.09 | 23.36 | 2.58 | 3.05 | 0 | 18.92 | 25.96 | 116.06 | 43.93 | 1.86 | 0.06 | 1.93 | 0.14 | 0.02 | 1.87 | 0 | |
| 10 | 73.1 | 14.63 | 24.56 | 3.32 | 3.89 | 0 | 20.15 | 29.31 | 88.5 | 42.42 | 1.97 | 0.04 | 1.02 | 0.1 | 0.02 | 1.95 | 0 | |
| 11 | 42.13 | 6.84 | 13.34 | 2.80 | 2.34 | 0 | 19.71 | 20.07 | 71.15 | 22.91 | 0.64 | 0.02 | 0.72 | 0.06 | 0.01 | 0.51 | 0 | |
| 12 | 12.05 | 0.63 | 6.2 | 1.98 | 0.57 | 0 | 14.09 | 10.29 | 62.07 | 8.79 | 0.06 | 0 | 0.03 | 0 | 0.02 | 0.02 | 0 | |
| 2010 | 576.18 | 101.61 | 185.77 | 2 | 4.49 | 28.27 | 0 | 14.09 | 259.07 | 1242.9 | 311.25 | 14.31 | 0.38 | 18.45 | 1.55 | 6.23 | 21.46 | 0.01 |

1

Simulación Hidrológica de la cuenca del Río Amajac, Estado de Hidalgo aplicando el modelo Swat

FINAL VALUES

1

SWAT Feb.'01 VERSION 2000

General Input/Output section (file.cio):Sat Nov 20 00:06:26 2010 AVSW

| | | | | Crop 1 | | Averag e Crop | | Values | | Crop 3 | | |
|------|-----|--------|---|---------|----|---------------|------|--------|------|--------|------|-----|
| | (k | Yld | | Biomass | | Yld | Biom | ass | | Yld | Biom | ass |
| | | g/ha) | | (kg/ha) | (| kg/ha) | (kg/ | ha) | (| kg/ha) | (kg/ | ha) |
| MAIZ | HRU | 1 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 9 | 57.3 | 2943.8 | 0 | 0 |
| SLVA | HRU | 2 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 2 | 68.1 | 543.3 | 0 | 0 |
| CFMG | HRU | 3 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 6 | 71.1 | 2032.1 | 0 | 0 |
| CFMG | HRU | 4 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 5 | 26.3 | 1627 | 0 | 0 |
| CFMG | HRU | 5 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 7 | 4.2 | 2128.2 | 0 | 0 |
| BOSQ | HRU | 6 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 5 | 45.8 | 995.1 | 0 | 0 |
| BOSQ | HRU | 7 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 4 | 66.4 | 869 | 0 | 0 |
| PSTZ | HRU | 8 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 20 | 42.7 | 2914.1 | 0 | 0 |
| PSTZ | HRU | 9 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 13 | 52.9 | 1930.7 | 0 | 0 |
| PSTZ | HRU | 10 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 21 | 42.8 | 3058 | 0 | 0 |
| CFMG | HRU | 11 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 9 | 15.4 | 2698.6 | 0 | 0 |
| CFMG | HRU | 12 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 11 | 1.1 | 3384.2 | 0 | 0 |
| CFMG | HRU | 13 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 6 | 45.9 | 1979.1 | 0 | 0 |
| MTSU | HRU | 14 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | | 28 | 765.3 | 0 | 0 |
| MTSU | HRU | 15 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | | 12.1 | 391.9 | 0 | 0 |
| MANZ | HRU | 16 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | | 45.8 | 695.6 | 0 | 0 |
| BOSQ | HRU | 17 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 7 | 25 | 1359.5 | 0 | 0 |
| BOSQ | HRU | 18 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 3 | 87.7 | 812.7 | 0 | 0 |
| PSTZ | HRU | 19 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 24 | 61.5 | 3534.8 | 0 | 0 |
| PSTZ | HRU | 20 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 30 | 76.2 | 4418.8 | 0 | 0 |
| PSTZ | HRU | 21 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 5 | 44.2 | 769.6 | 0 | 0 |
| BOSQ | HRU | 22 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 4 | 22.2 | 887.1 | 0 | 0 |
| BOSQ | HRU | 23 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 4 | 37.8 | 825.3 | 0 | 0 |
| BOSQ | HRU | 24 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 4 | 48.1 | 843.8 | 0 | 0 |
| PSTZ | HRU | 25 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 18 | 80.6 | 2681.1 | 0 | 0 |
| PSTZ | HRU | 26 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 20 | 94.8 | 2986.9 | 0 | 0 |
| BOSQ | HRU | 27 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| BOSQ | HRU | 28 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| MAIZ | HRU | 29 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 27 | 10.9 | 7036.5 | 0 | 0 |
| MAIZ | HRU | 30 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 27 | 76.4 | 7212.2 | 0 | 0 |
| MAIZ | HRU | 31 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 19 | 9.1 | 4963.7 | 0 | 0 |
| PSTZ | HRU | 32 Rot | 1 | 0 | .0 | 8955. | 8 | | 0 | 6515.5 | 0 | 0 |
| PSTZ | HRU | 33 Rot | 1 | 0 | .0 | 8382. | 5 | | 0 | 4343.2 | 0 | 0 |
| PSTZ | HRU | 34 Rot | 1 | 0 | .0 | 7472. | 1 | | 0 | 3512.6 | 0 | 0 |
| CFMG | HRU | 35 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 9 | 24.4 | 2951.5 | 0 | 0 |
| CFMG | HRU | 36 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 7 | 27.5 | 2326 | 0 | 0 |
| CFMG | HRU | 37 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 7 | 75.8 | 2477.2 | 0 | 0 |
| BOSQ | HRU | 38 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 5 | 23.3 | 1118.4 | 0 | 0 |
| BOSQ | HRU | 39 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 4 | 80 | 1031.3 | 0 | 0 |
| BOSQ | HRU | 40 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 4 | 63.3 | 997 | 0 | 0 |
| MAIZ | HRU | 41 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 7 | 35.7 | 2253.6 | 0 | 0 |
| MAIZ | HRU | 42 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 9 | 42.3 | 2895.5 | 0 | 0 |
| SLVA | HRU | 43 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 3 | 19.5 | 624.4 | 0 | 0 |
| SLVA | HRU | 44 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 2 | 77.4 | 561.1 | 0 | 0 |
| SLVA | HRU | 45 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 2 | 65 | 536.8 | 0 | 0 |
| MTSU | HRU | 46 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | | 15.2 | 454.1 | 0 | 0 |
| MTSU | HRU | 47 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | | 16.4 | 483.9 | 0 | 0 |
| BOSQ | HRU | 48 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 4 | 38.6 | 839.9 | 0 | 0 |
| BOSQ | HRU | 49 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 4 | 47.5 | 837.7 | 0 | 0 |
| BOSQ | HRU | 50 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 5 | 24.2 | 959.3 | 0 | 0 |
| BOSQ | HRU | 51 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 5 | 38.1 | 982.3 | 0 | 0 |
| BOSQ | HRU | 52 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 4 | 60.1 | 860.3 | 0 | 0 |
| MAIZ | HRU | 53 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 5 | 9.7 | 1355.1 | 0 | 0 |
| MAIZ | HRU | 54 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 5 | 88.9 | 1549.7 | 0 | 0 |
| MAIZ | HRU | 55 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 4 | 45.6 | 1177.4 | 0 | 0 |
| MAIZ | HRU | 56 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 6 | 7.3 | 1603.6 | 0 | 0 |
| MTSU | HRU | 57 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | | 15.1 | 452 | 0 | 0 |
| MTSU | HRU | 58 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | | 16.2 | 481.5 | 0 | 0 |
| BOSQ | HRU | 59 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 4 | 43.5 | 832.6 | 0 | 0 |
| BOSQ | HRU | 60 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 4 | 68.4 | 933.4 | 0 | 0 |
| BOSQ | HRU | 61 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 5 | 33 | 974.6 | 0 | 0 |
| BOSQ | HRU | 62 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 4 | 55.6 | 854.3 | 0 | 0 |
| MAIZ | HRU | 63 Rot | 1 | 0 | .0 | 0. | 0 | 5 | 65.7 | 1498.2 | 0 | 0 |

Simulación Hidrológica de la cuenca del Río Amajac, Estado de Hidalgo aplicando el modelo Swat

| HRU STATISTICS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|--------|--------|-------|----|---|-------|-------|---------|-------|--------|--------|-----|-----|----|-----|------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|
| AVERAGE ANNUAL VALUES | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| HRU | SUBCPM | NSOIL | AREA | km | 2 | CN | AWQmm | USLE_LS | ISRRm | mAUTON | khAUTO | Fkh | MIX | EF | PR | EQmm | S | URQmm | GAQmm | ETmm | SEDtH | |
| 1 | 1MAI | ZRend | .300E | 0 | 1 | 87.00 | 28 | 0.16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 196 | 5.50 | 9 | 72.77 | 573.42 | 411.93 | 71.56 | |
| 2 | 1SLV | ARend | .271E | 0 | 1 | 77.00 | 28 | 0.16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 196 | 5.50 | 5 | 69.26 | 961.16 | 419.35 | 36.75 | |
| 3 | 2CFM | GfH | .644E | 0 | 1 | 87.00 | 36.9 | 0.38 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 38.86 | 175.94 | 229.78 | 5.81 | | |
| 4 | 2CFM | GRe | .182E | 0 | 2 | 77.00 | 28.5 | 0.38 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 7.73 | 176.66 | 261.11 | 1.81 | | |
| 5 | 2CFM | GRend | .227E | 0 | 2 | 87.00 | 28 | 0.38 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 38.81 | 183.68 | 223.95 | 6.7 | | |
| 6 | 2BOS | QRe | .759E | 0 | 2 | 60.00 | 28.5 | 0.38 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 0.22 | 182.01 | 263.14 | 0.01 | | |
| 7 | 2BOS | QRend | .198E | 0 | 3 | 79.00 | 28 | 0.38 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 11.29 | 204.75 | 229.95 | 0.83 | | |
| 8 | 2PST | ZfH | .108E | 0 | 2 | 84.00 | 36.9 | 0.38 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 20.46 | 185.33 | 238.57 | 0.61 | | |
| 9 | 2PST | ZRe | .399E | 0 | 2 | 69.00 | 28.5 | 0.38 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 1.84 | 179.03 | 264.7 | 0.27 | | |
| 10 | 2PST | ZRend | .140E | 0 | 2 | 84.00 | 28 | 0.38 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 21.87 | 193.96 | 230.42 | 0.63 | | |
| 11 | 3CFM | GfH | .569E | 0 | 0 | 87.00 | 36.9 | 3.07 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 26.19 | 12.01 | 270.11 | 14.03 | | |
| 12 | 3CFM | GLuc | .359E | 0 | 1 | 87.00 | 59.8 | 3.07 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 14.76 | 1.19 | 265.02 | 10.14 | | |
| 13 | 3CFM | GLuf | .562E | 0 | 0 | 83.00 | 197 | 3.07 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 0.61 | 95.52 | 225.11 | 0.74 | | |
| 14 | 3MFS | UfH | .128E | 0 | 1 | 83.00 | 36.9 | 3.07 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 13.69 | 17.34 | 276.45 | 14.83 | | |
| 15 | 3MFS | Uvp | .574E | 0 | 1 | 83.00 | 8.8 | 3.07 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 1.09 | 108.4 | 187.18 | 0.98 | | |
| 16 | 3MAN | Zvp | .208E | 0 | 1 | 25.00 | 8.8 | 3.07 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 0 | 106.85 | 189.78 | 0 | | |
| 17 | 3BOS | QLuc | .687E | 0 | 0 | 79.00 | 59.8 | 3.07 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 1.89 | 1.29 | 306.84 | 0.36 | | |
| 18 | 3BOS | QLuf | .242E | 0 | 1 | 73.00 | 197 | 3.07 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 0 | 96.69 | 225.61 | 0 | | |
| 19 | 3PST | ZfH | .238E | 0 | 1 | 84.00 | 36.9 | 3.07 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 12.39 | 12.69 | 283.27 | 1.65 | | |
| 20 | 3PST | ZLuc | .995E | 0 | 1 | 84.00 | 59.8 | 3.07 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 5.45 | 1.23 | 303.62 | 0.32 | | |
| 21 | 3PST | Zvp | .505E | 0 | 1 | 84.00 | 8.8 | 3.07 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 1.6 | 105.24 | 190.11 | 2.37 | | |
| 22 | 4BOS | QCv | .178E | 0 | 2 | 73.00 | 63 | 0.16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 1.82 | 177.76 | 260.69 | 0.11 | | |
| 23 | 4BOS | QLit | .133E | 0 | 2 | 79.00 | 30.4 | 0.16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 8.55 | 204.31 | 232.76 | 0.2 | | |
| 24 | 4BOS | QRend | .668E | 0 | 2 | 79.00 | 28 | 0.16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 10.93 | 203.82 | 231.53 | 0.34 | | |
| 25 | 4PST | ZLit | .239E | 0 | 2 | 84.00 | 30.4 | 0.16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 16.45 | 195.65 | 233.79 | 0.24 | | |
| 26 | 4PST | ZRend | .150E | 0 | 3 | 84.00 | 28 | 0.16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 21.14 | 193.83 | 231.61 | 0.2 | | |
| 27 | 5BOS | QAndoc | .521E | 0 | 2 | 79.00 | 100.8 | 2.59 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 67 | 6 | 36.48 | 162.32 | 436.76 | 107.03 | | |
| 28 | 5BOS | QLit | .192E | 0 | 2 | 79.00 | 30.4 | 2.59 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 67 | 6 | 97.93 | 178.59 | 372.53 | 148.81 | | |
| 29 | 5MAI | ZAndoc | .166E | 0 | 2 | 87.00 | 100.8 | 2.59 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 67 | 6 | 78.17 | 90.99 | 468.7 | 59.21 | | |
| 30 | 5MAI | ZLuc | .484E | 0 | 1 | 87.00 | 59.8 | 2.59 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 67 | 6.00 | 1 | 47.12 | 56.34 | 451.44 | 35.23 | |
| 31 | 5MAI | ZLuv | .207E | 0 | 2 | 77.00 | 32.3 | 2.59 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 67 | 6 | 51.43 | 186.17 | 413.48 | 26.29 | | |
| 32 | 5PST | ZAndoc | .766E | 0 | 1 | 84.00 | 100.8 | 2.59 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 67 | 6 | 28.56 | 64.91 | 576.78 | 0.53 | | |
| 33 | 5PST | ZLuc | .436E | 0 | 1 | 84.00 | 59.8 | 2.59 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 67 | 6 | 88.63 | 42.83 | 541.87 | 4.84 | | |
| 34 | 5PST | ZLuv | .575E | 0 | 1 | 69.00 | 32.3 | 2.59 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 67 | 6 | 13.49 | 169.41 | 475.72 | 1.15 | | |
| 35 | 6CFM | GfH | .377E | 0 | 2 | 87.00 | 36.9 | 0.41 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 196 | 5.50 | 10 | 6.06 | 521.15 | 430.36 | 122.34 | |
| 36 | 6CFM | GLit | .527E | 0 | 2 | 87.00 | 30.4 | 0.41 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 196 | 5.50 | 9 | 28.62 | 612.24 | 415.4 | 114.22 | |
| 37 | 6CFM | GRend | .721E | 0 | 2 | 87.00 | 28 | 0.41 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 196 | 5.50 | 9 | 71.09 | 576.94 | 410.39 | 133.44 | |
| 38 | 6BOS | QfH | .729E | 0 | 2 | 79.00 | 36.9 | 0.41 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 196 | 5.50 | 6 | 77.93 | 816.64 | 456.56 | 24.63 | |
| 39 | 6BOS | QLit | .126E | 0 | 3 | 79.00 | 30.4 | 0.41 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 196 | 5.50 | 5 | 76.81 | 940.76 | 431.54 | 22.51 | |
| 40 | 6BOS | QRend | .136E | 0 | 3 | 79.00 | 28 | 0.41 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 196 | 5.50 | 6 | 30.55 | 866.59 | 424.94 | 37.11 | |
| 41 | 6MAI | ZLit | .415E | 0 | 2 | 87.00 | 30.4 | 0.41 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 196 | 5.50 | 9 | 30.68 | 609.31 | 416.37 | 128.71 | |
| 42 | 6MAI | ZRend | .603E | 0 | 2 | 87.00 | 28 | 0.41 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 196 | 5.50 | 9 | 72.09 | 573.68 | 412.82 | 187.49 | |
| 43 | 6SLV | AfH | .398E | 0 | 2 | 77.00 | 36.9 | 0.41 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 196 | 5.50 | 6 | 17.34 | 877.49 | 454.31 | 48.64 | |
| 44 | 6SLV | ALit | .181E | 0 | 3 | 77.00 | 30.4 | 0.41 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 196 | 5.50 | 5 | 12.70 | 1 | 5.69 | 429.22 | 42.96 |
| 45 | 6SLV | ARend | .991E | 0 | 2 | 77.00 | 28 | 0.41 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 196 | 5.50 | 5 | 66.55 | 961.17 | 422.86 | 119.53 | |
| 46 | 7MFS | ULit | .284E | 0 | 2 | 83.00 | 30.4 | 0.39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 18.06 | 199.75 | 227.7 | 1.37 | | |
| 47 | 7MFS | URend | .181E | 0 | 2 | 83.00 | 28 | 0.39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 23 | 197.59 | 225.61 | 2.03 | | |
| 48 | 7BOS | QfH | .497E | 0 | 2 | 79.00 | 36.9 | 0.39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 10.5 | 195.21 | 238.53 | 0.7 | | |
| 49 | 7BOS | QLit | .121E | 0 | 3 | 79.00 | 30.4 | 0.39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 8.74 | 204.63 | 232.03 | 0.58 | | |
| 50 | 7BOS | QLuv | .777E | 0 | 2 | 60.00 | 32.3 | 0.39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 0.3 | 179.26 | 265.4 | 0.01 | | |
| 51 | 7BOS | QRe | .788E | 0 | 2 | 60.00 | 28.5 | 0.39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 0.22 | 181.57 | 263.68 | 0.01 | | |
| 52 | 7BOS | QRend | .116E | 0 | 3 | 79.00 | 28 | 0.39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 11.16 | 204.41 | 230.5 | 1.02 | | |
| 53 | 7MAI | ZfH | .245E | 0 | 2 | 87.00 | 36.9 | 0.39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 41.34 | 174.93 | 228.42 | 10.84 | | |
| 54 | 7MAI | ZLuv | .336E | 0 | 2 | 77.00 | 32.3 | 0.39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 8.31 | 173.51 | 263.33 | 1.87 | | |
| 55 | 7MAI | ZRe | .442E | 0 | 2 | 77.00 | 28.5 | 0.39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 7.82 | 175.79 | 262.11 | 2.79 | | |
| 56 | 7MAI | ZRend | .648E | 0 | 2 | 87.00 | 28 | 0.39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 40.62 | 182.6 | 223.31 | 10.45 | | |
| 57 | 8MFS | ULit | .315E | 0 | 2 | 83.00 | 30.4 | 0.39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 17.88 | 199.64 | 228.07 | 1.32 | | |
| 58 | 8MFS | URend | .466E | 0 | 2 | 83.00 | 28 | 0.39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 22.79 | 197.5 | 225.97 | 2.04 | | |
| 59 | 8BOS | QLit | .119E | 0 | 3 | 79.00 | 30.4 | 0.39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 8.66 | 204.5 | 232.32 | 0.53 | | |
| 60 | 8BOS | QLuc | .546E | 0 | 2 | 79.00 | 59.8 | 0.39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 2.29 | 182.25 | 260.7 | 0.08 | | |
| 61 | 8BOS | QRe | .407E | 0 | 2 | 60.00 | 28.5 | 0.39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 0.22 | 181.22 | 264.11 | 0.01 | | |
| 62 | 8BOS | QRend | .707E | 0 | 2 | 79.00 | 28 | 0.39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 11.07 | 204.16 | 230.93 | 0.96 | | |
| 63 | 8MAI | ZLit | .126E | 0 | 2 | 87.00 | 30.4 | 0.39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 32.65 | 186.6 | 226.69 | 7.22 | | |
| 64 | 8MAI | ZLuc | .159E | 0 | 2 | 87.00 | 59.8 | 0.39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 21.2 | 170.69 | 253.4 | 3.33 | | |
| 65 | 8MAI | ZRe | .161E | 0 | 2 | 77.00 | 28.5 | 0.39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 7.74 | 175.51 | 262.55 | 2.55 | | |
| 66 | 8MAI | ZRend | .233E | 0 | 2 | 87.00 | 28 | 0.39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 40.3 | 182.63 | 223.67 | 9.75 | | |
| 67 | 8PST | ZCv | .177E | 0 | 2 | 79.00 | 63 | 0.39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 3.89 | 175.64 | 280.28 | 0.34 | | |
| 68 | 8PST | ZLit | .849E | 0 | 1 | 84.00 | 30.4 | 0.39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 16.66 | 195.75 | 233.34 | 0.57 | | |
| 69 | 8PST | ZLuc | .818E | 0 | 1 | 84.00 | 56.8 | 0.39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 44 | 9 | 2.91 | 217.63 | 229.45 | 0.01 | | |
| 70 | 9MIC | FRc | .885E | 0 | 2 | 80.00 | 176.5 | 0.15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 0.4 | 119.76 | 197.32 | 0.04 | | |

Simulación Hidrológica de la cuenca del Rio Amajac, Estado de Hidalgo aplicando el modelo Swat

| HRU STATISTICS | | AVE ANNUAL VALUES | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|---------|-------------------|-------|----|---|-------|-------|---------|------|---------|---------|-----|-----|-------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|
| HRU | SUB CPM | N SOIL | AREA | km | 2 | CN | AWCmm | USLE_LS | IRRm | m AUTON | kh AUTO | Pkh | MIX | EF PR | ECmm S | URQmm | GWQmm | ETmm | SEDth | |
| 70 | 9 MTC | RRc | .885E | 0 | 2 | 80.00 | 176.5 | 0.15 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 0.4 | 119.76 | 197.32 | 0.04 |
| 71 | 9 MTC | RVp | .125E | 0 | 3 | 80.00 | 8.8 | 0.15 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 0.3 | 160.02 | 153.17 | 0.01 |
| 72 | 9 ALF | LFluc | .263E | 0 | 2 | 59.00 | 275 | 0.15 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 0 | 113.33 | 215.24 | 0 |
| 73 | 9 ALF | LRc | .965E | 0 | 1 | 79.00 | 176.5 | 0.15 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 0.28 | 118.83 | 198.16 | 0.03 |
| 74 | 9 ALF | LVP | .159E | 0 | 2 | 79.00 | 8.8 | 0.15 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 0.19 | 163.3 | 149.88 | 0.03 |
| 75 | 9 MTS | ULit | .532E | 0 | 2 | 83.00 | 30.4 | 0.15 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 2.15 | 137.69 | 174.74 | 0.23 |
| 76 | 9 MTS | URc | .165E | 0 | 2 | 83.00 | 176.5 | 0.15 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 1.02 | 118.18 | 197.82 | 0.1 |
| 77 | 9 MTS | URend | .560E | 0 | 2 | 83.00 | 28 | 0.15 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 3.89 | 136.81 | 174.05 | 0.4 |
| 78 | 9 BOS | QFh | .161E | 0 | 2 | 79.00 | 36.9 | 0.15 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 1.67 | 135.53 | 177.09 | 0.19 |
| 79 | 9 BOS | QLit | .159E | 0 | 2 | 79.00 | 30.4 | 0.15 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 0.7 | 138.27 | 175.61 | 0.07 |
| 80 | 9 BOS | QLuv | .311E | 0 | 2 | 60.00 | 32.3 | 0.15 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 0 | 118.23 | 197.29 | 0 |
| 81 | 9 BOS | QRc | .172E | 0 | 2 | 79.00 | 176.5 | 0.15 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 0.26 | 119.76 | 197.75 | 0.02 |
| 82 | 9 BOS | QRend | .440E | 0 | 2 | 79.00 | 28 | 0.15 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 1.52 | 137.87 | 175.35 | 0.16 |
| 83 | 9 MAI | ZLuv | .140E | 0 | 3 | 77.00 | 32.3 | 0.15 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 1.06 | 117.82 | 196.64 | 0.14 |
| 84 | 9 MAI | ZVp | .942E | 0 | 2 | 87.00 | 8.8 | 0.15 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 3.47 | 159.51 | 150.65 | 0.41 |
| 85 | 9 PST | ZFh | .289E | 0 | 2 | 84.00 | 36.9 | 0.15 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 4.02 | 134.22 | 176.03 | 0.19 |
| 86 | 9 PST | ZLit | .122E | 0 | 2 | 84.00 | 30.4 | 0.15 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 2.19 | 137.41 | 174.93 | 0.09 |
| 87 | 9 PST | ZLuv | .131E | 0 | 2 | 69.00 | 32.3 | 0.15 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 0 | 118.07 | 197.45 | 0 |
| 88 | 9 PST | ZRc | .120E | 0 | 2 | 84.00 | 176.5 | 0.15 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 1.24 | 118.99 | 197.7 | 0.14 |
| 89 | 9 PST | ZVp | .367E | 0 | 2 | 84.00 | 8.8 | 0.15 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 1.31 | 159.61 | 152.72 | 0.14 |
| 90 | 10 MTS | ULit | .238E | 0 | 3 | 83.00 | 30.4 | 0.29 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 2.14 | 137.69 | 174.78 | 0.33 |
| 91 | 10 MTS | URend | .424E | 0 | 2 | 83.00 | 28 | 0.29 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 3.87 | 136.82 | 174.09 | 0.83 |
| 92 | 10 BOS | QCh | .447E | 0 | 2 | 79.00 | 123 | 0.29 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 0.56 | 136.46 | 183.24 | 0.06 |
| 93 | 10 BOS | QFh | .933E | 0 | 2 | 79.00 | 36.9 | 0.29 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 1.66 | 135.53 | 177.14 | 0.33 |
| 94 | 10 BOS | QLit | .112E | 0 | 3 | 79.00 | 30.4 | 0.29 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 0.69 | 138.27 | 175.65 | 0.12 |
| 95 | 10 BOS | QRd | .859E | 0 | 2 | 79.00 | 186 | 0.29 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 0.15 | 120.11 | 200.75 | 0.01 |
| 96 | 10 BOS | QRend | .596E | 0 | 2 | 79.00 | 28 | 0.29 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 1.51 | 137.86 | 175.4 | 0.31 |
| 97 | 10 MAI | ZFh | .392E | 0 | 2 | 87.00 | 36.9 | 0.29 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 10.78 | 131.03 | 172.53 | 2.5 |
| 98 | 10 MAI | ZLit | .359E | 0 | 2 | 87.00 | 30.4 | 0.29 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 6.19 | 135.58 | 172.84 | 1.55 |
| 99 | 10 MAI | ZLuv | .310E | 0 | 2 | 77.00 | 32.3 | 0.29 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 1.05 | 117.8 | 196.7 | 0.36 |
| 100 | 10 MAI | ZRd | .500E | 0 | 2 | 87.00 | 186 | 0.29 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 2.14 | 118 | 199.45 | 0.36 |
| 101 | 10 MAI | ZRend | .335E | 0 | 2 | 87.00 | 28 | 0.29 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 9.79 | 133.76 | 171.21 | 2.31 |
| 102 | 10 PST | ZFh | .323E | 0 | 2 | 84.00 | 36.9 | 0.29 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 4.01 | 134.22 | 176.08 | 0.38 |
| 103 | 10 PST | ZLit | .466E | 0 | 2 | 84.00 | 30.4 | 0.29 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 2.18 | 137.41 | 174.97 | 0.17 |
| 104 | 10 PST | ZRd | .223E | 0 | 2 | 84.00 | 186 | 0.29 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 0.9 | 119.4 | 201 | 0.1 |
| 105 | 10 PST | ZRend | .639E | 0 | 2 | 84.00 | 28 | 0.29 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 3.73 | 136.62 | 174.42 | 0.64 |
| 106 | 11 MTC | RFh | .553E | 0 | 2 | 80.00 | 36.9 | 3.86 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 7.82 | 19.09 | 279.82 | 2.84 |
| 107 | 11 MTC | RVp | .342E | 0 | 2 | 80.00 | 8.8 | 3.86 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 0.3 | 104.51 | 191.83 | 0.42 |
| 108 | 11 MTS | ULuo | .585E | 0 | 1 | 83.00 | 56.8 | 3.86 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 8.14 | 1.01 | 301.73 | 0.21 |
| 109 | 11 MTS | URc | .127E | 0 | 2 | 83.00 | 176.5 | 3.86 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 1.7 | 10.68 | 296.89 | 2.43 |
| 110 | 11 MTS | URend | .162E | 0 | 2 | 83.00 | 28 | 3.86 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 14.14 | 24.76 | 268.46 | 22.04 |
| 111 | 11 MTS | UVp | .133E | 0 | 2 | 83.00 | 8.8 | 3.86 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 1.08 | 108.99 | 186.39 | 1.53 |
| 112 | 11 MAN | ZFluc | .119E | 0 | 2 | 25.00 | 275 | 3.86 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 0 | 92.55 | 235.58 | 0 |
| 113 | 11 MAN | ZRc | .476E | 0 | 1 | 25.00 | 176.5 | 3.86 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 0 | 10.87 | 298.88 | 0 |
| 114 | 11 MAN | ZVp | .127E | 0 | 2 | 25.00 | 8.8 | 3.86 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 0 | 107.42 | 189 | 0 |
| 115 | 11 BOS | QCe | .464E | 0 | 2 | 73.00 | 194.8 | 3.86 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 0.01 | 60.96 | 259.7 | 0 |
| 116 | 11 BOS | QFh | .179E | 0 | 2 | 79.00 | 36.9 | 3.86 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 6.5 | 18.89 | 281.54 | 8.28 |
| 117 | 11 BOS | QLuo | .254E | 0 | 2 | 79.00 | 56.8 | 3.86 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 1.76 | 0.98 | 307.88 | 0.07 |
| 118 | 11 MAI | ZCe | .259E | 0 | 2 | 83.00 | 194.8 | 3.86 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 1.73 | 59.71 | 258.15 | 12.25 |
| 119 | 11 MAI | ZCv | .130E | 0 | 2 | 83.00 | 63 | 3.86 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 12.68 | 6.3 | 288.17 | 91.65 |
| 120 | 11 MAI | ZFh | .242E | 0 | 2 | 87.00 | 36.9 | 3.86 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 26.93 | 11.46 | 270.59 | 63.94 |
| 121 | 11 MAI | ZLuo | .217E | 0 | 2 | 87.00 | 56.8 | 3.86 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 18.13 | 0.92 | 292.97 | 5.19 |
| 122 | 11 PST | ZCe | .160E | 0 | 2 | 79.00 | 194.8 | 3.86 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 0.47 | 60.62 | 259.55 | 0.25 |
| 123 | 11 PST | ZFh | .772E | 0 | 2 | 84.00 | 36.9 | 3.86 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 12.44 | 13.43 | 282.39 | 2.8 |
| 124 | 11 PST | ZVp | .313E | 0 | 2 | 84.00 | 8.8 | 3.86 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 1.59 | 105.83 | 189.31 | 3.86 |
| 125 | 12 ALF | LAnh | .331E | 0 | 2 | 59.00 | 257.9 | 1.82 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 55 | 2 | 0.15 | 29.39 | 461.85 | 0.12 |
| 126 | 12 ALF | Lfh | .676E | 0 | 2 | 79.00 | 36.9 | 1.82 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 55 | 2 | 34.27 | 109.84 | 388.42 | 29.82 |
| 127 | 12 ALF | Lfi | .549E | 0 | 2 | 79.00 | 59 | 1.82 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 55 | 2 | 32.98 | 53.76 | 446.53 | 5.16 |
| 128 | 12 ALF | LVP | .501E | 0 | 2 | 79.00 | 8.8 | 1.82 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 55 | 2 | 3.99 | 233.33 | 285.42 | 2.33 |
| 129 | 12 BOS | QCh | .973E | 0 | 2 | 79.00 | 123 | 1.82 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 55 | 2 | 18.04 | 39.39 | 467.7 | 0.11 |
| 130 | 12 BOS | QLit | .116E | 0 | 3 | 79.00 | 30.4 | 1.82 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 55 | 2 | 31.53 | 115.66 | 385 | 0.2 |
| 131 | 12 BOS | QLuo | .749E | 0 | 2 | 79.00 | 56.8 | 1.82 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 55 | 2 | 28.03 | 54.1 | 449.89 | 0.03 |
| 132 | 12 MAI | ZFh | .286E | 0 | 3 | 87.00 | 36.9 | 1.82 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 55 | 2 | 81.93 | 77.3 | 378.77 | 28.13 |
| 133 | 12 MAI | ZLuc | .195E | 0 | 3 | 87.00 | 59.8 | 1.82 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 55 | 2 | 66.7 | 42.93 | 429.03 | 15.84 |
| 134 | 12 MAI | ZVp | .178E | 0 | 3 | 87.00 | 8.8 | 1.82 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 55 | 2 | 25.84 | 215.07 | 283.51 | 16.74 |
| 135 | 12 PST | ZFh | .505E | 0 | 2 | 84.00 | 36.9 | 1.82 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 55 | 2 | 44.88 | 70.16 | 422.72 | 0.51 |
| 136 | 12 PST | ZFi | .157E | 0 | 2 | 84.00 | 59 | 1.82 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 55 | 2 | 34.54 | 33.29 | 473.89 | 0.1 |
| 137 | 12 PST | ZPe | .187E | 0 | 2 | 84.00 | 49.5 | 1.82 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 55 | 2 | 32.17 | 61.61 | 442.89 | 0.29 |
| 138 | 12 PST | ZVp | .282E | 0 | 2 | 84.00 | 8.8 | 1.82 | 0 | 0 | 0 | .00 | 0 | 20 | 55 | 2 | 10.47 | 209.55 | 304.67 | 1.72 |

Simulación Hidrológica de la cuenca del Rio Amajac, Estado de Hidalgo aplicando el modelo Swat

| MON | AVE MONTHLY BASIN VALUES | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|--------------------------|--------|--------|------------|---|---------|----------|----------|-------------|--------|---------|------------|------------|---------------|----------|-----------|
| | RAI (MM) | N) | F (| ALL MM) | S | UR (| F MM) | Q MM) | LAT (MM) | Q) | YI (| TER MM) | ET (MM) | SED (T/HA) | P (M) | ET (M) |
| 1 | 8.6 | 4 | 0 | 0 | | 0 | .67 | 3.2 | | 6 | 4 | 0.23 | 7.15 | 0.09 | 67 | 26 |
| 2 | 9 | 7 | 0 | 0 | | 0 | .24 | 3.3 | | 0 | 3 | 0.69 | 6.16 | 0.06 | 80 | 36 |
| 3 | 14.6 | 8 | 0 | 0 | | 1 | .81 | 5.1 | | 8 | 7 | 0.12 | 11.49 | 0.75 | 114 | 3 |
| 4 | 82.4 | 6 | 0 | 0 | | 7 | .89 | 28.5 | | 5 | 36 | 0.78 | 34 | 0.74 | 111 | 24 |
| 5 | 64.1 | 9 | 0 | 0 | | 8 | .27 | 20.2 | | 0 | 29 | 0.7 | 32.99 | 1.28 | 142 | 88 |
| 6 | 137.2 | 5 | 0 | 0 | | 28 | .89 | 45.9 | | 4 | 77 | 0.24 | 43.86 | 4.25 | 123 | 8 |
| 7 | 98.8 | 2 | 0 | 0 | | 27 | .29 | 27.5 | | 6 | 60 | 0.39 | 40.01 | 3.94 | 121 | 27 |
| 8 | 56.4 | 1 | 0 | 0 | | 9 | .47 | 15.2 | | 7 | 30 | 0.39 | 27.6 | 1.34 | 132 | 19 |
| 9 | 74.8 | 4 | 0 | 0 | | 13 | .78 | 20.7 | | 3 | 40 | 0.12 | 29.74 | 1.57 | 111 | 68 |
| 10 | 56.3 | 6 | 0 | 0 | | 10 | .75 | 19.0 | | 9 | 36 | 0.31 | 25.85 | 1.45 | 86 | 90 |
| 11 | 25.6 | 0 | 0 | 0 | | 3 | .64 | 8.1 | | 4 | 15 | 0.63 | 15.37 | 0.34 | 73 | 36 |

Simulación Hidrológica de la cuenca del Rio Amajac, Estado de Hidalgo aplicando el modelo Swat

HRU STATISTICS

AVE ANNUAL VALUES

| HRU | SUB CPM | N SOIL | AREA | km | 2 | CN | AWCmm | USLE_LS | IRRM | m AUTON | kh AUTO | Pkh MIX | EF PR | ECmm S |
|-----|---------|--------|-------|----|-----|-------|-------|---------|------|---------|---------|---------|--------|---------|
| 1 | 1 MAI | ZRend | .300E | | 0 1 | 87.00 | 28 | 0.16 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 196 | 5.50 9 |
| 2 | 1 SLV | ARend | .271E | | 0 1 | 77.00 | 28 | 0.16 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 196 | 5.50 5 |
| 3 | 2 CFM | GFh | .644E | | 0 1 | 87.00 | 36.9 | 0.38 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | |
| 4 | 2 CFM | GRe | .182E | | 0 2 | 77.00 | 28.5 | 0.38 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 5 | 2 CFM | GRend | .227E | | 0 2 | 87.00 | 28 | 0.38 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 6 | 2 BOS | QRe | .759E | | 0 2 | 60.00 | 28.5 | 0.38 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 7 | 2 BOS | QRend | .198E | | 0 3 | 79.00 | 28 | 0.38 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 8 | 2 PST | ZFh | .108E | | 0 2 | 84.00 | 36.9 | 0.38 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 9 | 2 PST | ZRe | .399E | | 0 2 | 69.00 | 28.5 | 0.38 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 10 | 2 PST | ZRend | .140E | | 0 2 | 84.00 | 28 | 0.38 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 11 | 3 CFM | GFh | .569E | | 0 0 | 87.00 | 36.9 | 3.07 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 31 | 4.5 |
| 12 | 3 CFM | GLuc | .359E | | 0 1 | 87.00 | 59.8 | 3.07 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 31 | 4.5 |
| 13 | 3 CFM | GLuf | .562E | | 0 0 | 83.00 | 197 | 3.07 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 31 | 4.5 |
| 14 | 3 MTS | UFh | .128E | | 0 1 | 83.00 | 36.9 | 3.07 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 31 | 4.5 |
| 15 | 3 MTS | UVp | .574E | | 0 1 | 83.00 | 8.8 | 3.07 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 31 | 4.5 |
| 16 | 3 MAN | ZVp | .208E | | 0 1 | 25.00 | 8.8 | 3.07 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 31 | 4.5 |
| 17 | 3 BOS | QLuc | .687E | | 0 0 | 79.00 | 59.8 | 3.07 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 31 | 4.5 |
| 18 | 3 BOS | QLuf | .242E | | 0 1 | 73.00 | 197 | 3.07 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 31 | 4.5 |
| 19 | 3 PST | ZFh | .238E | | 0 1 | 84.00 | 36.9 | 3.07 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 31 | 4.5 |
| 20 | 3 PST | ZLuc | .995E | | 0 1 | 84.00 | 59.8 | 3.07 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 31 | 4.5 |
| 21 | 3 PST | ZVp | .505E | | 0 1 | 84.00 | 8.8 | 3.07 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 31 | 4.5 |
| 22 | 4 BOS | QCv | .178E | | 0 2 | 73.00 | 63 | 0.16 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 23 | 4 BOS | QLit | .133E | | 0 2 | 79.00 | 30.4 | 0.16 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 24 | 4 BOS | QRend | .668E | | 0 2 | 79.00 | 28 | 0.16 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 25 | 4 PST | ZLit | .239E | | 0 2 | 84.00 | 30.4 | 0.16 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 26 | 4 PST | ZRend | .150E | | 0 3 | 84.00 | 28 | 0.16 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 27 | 5 BOS | QAndoc | .521E | | 0 2 | 79.00 | 100.8 | 2.59 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 67 | 6 |
| 28 | 5 BOS | QLit | .192E | | 0 2 | 79.00 | 30.4 | 2.59 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 67 | 6 |
| 29 | 5 MAI | ZAndoc | .166E | | 0 2 | 87.00 | 100.8 | 2.59 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 67 | 6 |
| 30 | 5 MAI | ZLuc | .484E | | 0 1 | 87.00 | 59.8 | 2.59 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 67 | 6.00 1 |
| 31 | 5 MAI | ZLuv | .207E | | 0 2 | 77.00 | 32.3 | 2.59 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 67 | 6 |
| 32 | 5 PST | ZAndoc | .765E | | 0 1 | 84.00 | 100.8 | 2.59 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 67 | 6 |
| 33 | 5 PST | ZLuc | .436E | | 0 1 | 84.00 | 59.8 | 2.59 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 67 | 6 |
| 34 | 5 PST | ZLuv | .575E | | 0 1 | 69.00 | 32.3 | 2.59 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 67 | 6 |
| 35 | 6 CFM | GFh | .377E | | 0 2 | 87.00 | 36.9 | 0.41 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 196 | 5.50 10 |
| 36 | 6 CFM | GLit | .527E | | 0 2 | 87.00 | 30.4 | 0.41 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 196 | 5.50 9 |
| 37 | 6 CFM | GRend | .721E | | 0 2 | 87.00 | 28 | 0.41 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 196 | 5.50 9 |
| 38 | 6 BOS | QFh | .729E | | 0 2 | 79.00 | 36.9 | 0.41 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 196 | 5.50 6 |
| 39 | 6 BOS | QLit | .126E | | 0 3 | 79.00 | 30.4 | 0.41 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 196 | 5.50 5 |
| 40 | 6 BOS | QRend | .138E | | 0 3 | 79.00 | 28 | 0.41 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 196 | 5.50 6 |
| 41 | 6 MAI | ZLit | .415E | | 0 2 | 87.00 | 30.4 | 0.41 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 196 | 5.50 9 |
| 42 | 6 MAI | ZRend | .603E | | 0 2 | 87.00 | 28 | 0.41 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 196 | 5.50 9 |
| 43 | 6 SLV | AFh | .398E | | 0 2 | 77.00 | 36.9 | 0.41 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 196 | 5.50 6 |
| 44 | 6 SLV | ALit | .181E | | 0 3 | 77.00 | 30.4 | 0.41 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 196 | 5.50 5 |
| 45 | 6 SLV | ARend | .991E | | 0 2 | 77.00 | 28 | 0.41 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 196 | 5.50 5 |
| 46 | 7 MTS | ULit | .284E | | 0 2 | 83.00 | 30.4 | 0.39 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 47 | 7 MTS | URend | .181E | | 0 2 | 83.00 | 28 | 0.39 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 48 | 7 BOS | QFh | .497E | | 0 2 | 79.00 | 36.9 | 0.39 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 49 | 7 BOS | QLit | .121E | | 0 3 | 79.00 | 30.4 | 0.39 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 50 | 7 BOS | QLuv | .777E | | 0 2 | 60.00 | 32.3 | 0.39 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 51 | 7 BOS | QRe | .788E | | 0 2 | 60.00 | 28.5 | 0.39 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 52 | 7 BOS | QRend | .116E | | 0 3 | 79.00 | 28 | 0.39 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 53 | 7 MAI | ZFh | .245E | | 0 2 | 87.00 | 36.9 | 0.39 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 54 | 7 MAI | ZLuv | .336E | | 0 2 | 77.00 | 32.3 | 0.39 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 55 | 7 MAI | ZRe | .442E | | 0 2 | 77.00 | 28.5 | 0.39 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 56 | 7 MAI | ZRend | .648E | | 0 2 | 87.00 | 28 | 0.39 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 57 | 8 MTS | ULit | .315E | | 0 2 | 83.00 | 30.4 | 0.39 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 58 | 8 MTS | URend | .465E | | 0 2 | 83.00 | 28 | 0.39 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 59 | 8 BOS | QLit | .119E | | 0 3 | 79.00 | 30.4 | 0.39 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 60 | 8 BOS | QLuc | .546E | | 0 2 | 79.00 | 59.8 | 0.39 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 61 | 8 BOS | QRe | .407E | | 0 2 | 60.00 | 28.5 | 0.39 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 62 | 8 BOS | QRend | .707E | | 0 2 | 79.00 | 28 | 0.39 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 63 | 8 MAI | ZLit | .126E | | 0 2 | 87.00 | 30.4 | 0.39 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 64 | 8 MAI | ZLuc | .159E | | 0 2 | 87.00 | 59.8 | 0.39 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 65 | 8 MAI | ZRe | .161E | | 0 2 | 77.00 | 28.5 | 0.39 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 66 | 8 MAI | ZRend | .233E | | 0 2 | 87.00 | 28 | 0.39 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 67 | 8 PST | ZCv | .177E | | 0 2 | 79.00 | 63 | 0.39 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 68 | 8 PST | ZLit | .849E | | 0 1 | 84.00 | 30.4 | 0.39 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 69 | 8 PST | ZLuo | .818E | | 0 1 | 84.00 | 56.8 | 0.39 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 44 | 9 |
| 70 | 9 MTC | RRc | .885E | | 0 2 | 80.00 | 176.5 | 0.15 | 0 0 | 0.0 | 0.0 | .00 0. | 20 31 | 4.5 |

Simulación Hidrológica de la cuenca del Río Amajac, Estado de Hidalgo aplicando el modelo Swat

HRU STATISTICS

AVE ANNUAL VALUES

| HRU | SUBCFM | NSQIL | AREA | km | 2 | CN | AWCmm | USLE_LS | IRRm | m | AUTON | kh | AUTO | Pkh | MX | EF | FR | EOmm | SURQmm | GAQmm | ETmm | SEDth | NO3kg | ORGNkg | BIOMth | YLDth | |
|-----|--------|--------|-------|----|---|-------|-------|---------|------|---|-------|----|------|-----|----|----|-----|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|------|
| 1 | 1MA | ZRend | .30E | 0 | 1 | 87.00 | 28 | 0.16 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 196 | 5.50 | 9 | 72.77 | 573.42 | 411.93 | 71.56 | 18.88 | 311.59 | 2.94 | 0.96 |
| 2 | 1SLV | ARend | .271E | 0 | 1 | 77.00 | 28 | 0.16 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 196 | 5.50 | 5 | 69.26 | 961.16 | 419.35 | 36.75 | 25.14 | 231.67 | 0.54 | 0.27 |
| 3 | 2CFM | GFh | .644E | 0 | 1 | 87.00 | 36.9 | 0.38 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 44 | 9 | 38.86 | 175.94 | 229.78 | 5.81 | 14.63 | 18.05 | 2.03 | 0.67 | |
| 4 | 2CFM | GRe | .182E | 0 | 2 | 77.00 | 28.5 | 0.38 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 44 | 9 | 7.73 | 176.66 | 261.11 | 1.81 | 5.97 | 7.86 | 1.63 | 0.53 | |
| 5 | 2CFM | GRend | .227E | 0 | 2 | 87.00 | 28 | 0.38 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 44 | 9 | 38.81 | 183.68 | 223.95 | 6.7 | 29.96 | 52.29 | 2.13 | 0.7 | |
| 6 | 2BOS | GRe | .759E | 0 | 2 | 60.00 | 28.5 | 0.38 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 44 | 9 | 0.22 | 182.01 | 263.14 | 0.01 | 8.4 | 0.07 | 1 | 0.55 | |
| 7 | 2BOS | QRend | .198E | 0 | 3 | 79.00 | 28 | 0.38 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 44 | 9 | 11.29 | 204.75 | 229.95 | 0.83 | 31.57 | 8.38 | 0.87 | 0.47 | |
| 8 | 2PST | ZFh | .108E | 0 | 2 | 84.00 | 36.9 | 0.38 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 44 | 9 | 20.46 | 185.33 | 238.57 | 0.61 | 11.83 | 2.8 | 2.91 | 2.04 | |
| 9 | 2PST | ZRe | .399E | 0 | 2 | 69.00 | 28.5 | 0.38 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 44 | 9 | 1.84 | 179.03 | 264.7 | 0.27 | 5.23 | 1.36 | 1.93 | 1.35 | |
| 10 | 2PST | ZRend | .140E | 0 | 2 | 84.00 | 28 | 0.38 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 44 | 9 | 21.87 | 193.96 | 230.42 | 0.63 | 26.46 | 7.87 | 3.06 | 2.14 | |
| 11 | 3CFM | GFh | .569E | 0 | 0 | 87.00 | 36.9 | 3.07 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 26.19 | 12.01 | 270.11 | 14.03 | 0.15 | 30.71 | 2.7 | 0.92 | |
| 12 | 3CFM | GLuc | .359E | 0 | 1 | 87.00 | 59.8 | 3.07 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 14.76 | 1.19 | 235.02 | 10.14 | 0.18 | 46.3 | 3.38 | 1.1 | |
| 13 | 3CFM | GLuf | .562E | 0 | 0 | 83.00 | 197 | 3.07 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 0.61 | 95.52 | 225.11 | 0.74 | 6.32 | 0.68 | 1.98 | 0.65 | |
| 14 | 3MTS | UFh | .128E | 0 | 1 | 83.00 | 36.9 | 3.07 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 13.69 | 17.34 | 276.45 | 14.83 | 0.12 | 26.13 | 0.77 | 0.03 | |
| 15 | 3MTS | UUp | .574E | 0 | 1 | 83.00 | 8.8 | 3.07 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 1.09 | 108.4 | 187.18 | 0.98 | 0.09 | 0.94 | 0.39 | 0.01 | |
| 16 | 3MAN | ZUp | .208E | 0 | 1 | 25.00 | 8.8 | 3.07 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 0 | 106.85 | 189.78 | 0 | 0.09 | 0 | 0.7 | 0.05 | |
| 17 | 3BOS | QLuc | .687E | 0 | 0 | 79.00 | 59.8 | 3.07 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 1.89 | 1.29 | 306.84 | 0.36 | 0.05 | 2.39 | 1.36 | 0.73 | |
| 18 | 3BOS | QLuf | .242E | 0 | 1 | 73.00 | 197 | 3.07 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 0 | 96.69 | 225.61 | 0 | 6.38 | 0 | 0.81 | 0.39 | |
| 19 | 3PST | ZFh | .238E | 0 | 1 | 84.00 | 36.9 | 3.07 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 12.39 | 12.69 | 283.27 | 1.65 | 0.09 | 5.3 | 3.53 | 2.46 | |
| 20 | 3PST | ZLuc | .995E | 0 | 1 | 84.00 | 59.8 | 3.07 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 5.45 | 1.23 | 303.62 | 0.32 | 0.06 | 2.82 | 4.42 | 3.08 | |
| 21 | 3PST | ZUp | .505E | 0 | 1 | 84.00 | 8.8 | 3.07 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 31 | 4.5 | 1.6 | 105.24 | 190.11 | 2.37 | 0.06 | 2.01 | 0.77 | 0.54 | |
| 22 | 4BOS | QQv | .178E | 0 | 2 | 73.00 | 63 | 0.16 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 44 | 9 | 1.82 | 177.76 | 260.69 | 0.11 | 10.64 | 1.08 | 0.89 | 0.42 | |
| 23 | 4BOS | QLit | .133E | 0 | 2 | 79.00 | 30.4 | 0.16 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 44 | 9 | 8.55 | 204.31 | 232.76 | 0.2 | 15.46 | 0.95 | 0.83 | 0.44 | |
| 24 | 4BOS | QRend | .668E | 0 | 2 | 79.00 | 28 | 0.16 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 44 | 9 | 10.93 | 203.82 | 231.53 | 0.34 | 31.38 | 4.24 | 0.84 | 0.45 | |
| 25 | 4PST | ZLit | .239E | 0 | 2 | 84.00 | 30.4 | 0.16 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 44 | 9 | 16.45 | 195.65 | 233.79 | 0.24 | 10.74 | 1.17 | 2.68 | 1.88 | |
| 26 | 4PST | ZRend | .150E | 0 | 3 | 84.00 | 28 | 0.16 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 44 | 9 | 21.14 | 193.83 | 231.61 | 0.2 | 26.61 | 2.81 | 2.99 | 2.09 | |
| 27 | 5BOS | QAndoc | .521E | 0 | 2 | 79.00 | 100.8 | 2.59 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 67 | 6 | 36.48 | 162.32 | 436.76 | 107.03 | 0.45 | 53.13 | 0 | 0 | |
| 28 | 5BOS | QLit | .192E | 0 | 2 | 79.00 | 30.4 | 2.59 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 67 | 6 | 97.93 | 178.59 | 372.53 | 148.81 | 0.28 | 110.19 | 0 | 0 | |
| 29 | 5MA | ZAndoc | .166E | 0 | 2 | 87.00 | 100.8 | 2.59 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 67 | 6 | 78.17 | 90.99 | 468.7 | 59.21 | 0.31 | 48.96 | 7.04 | 2.71 | |
| 30 | 5MA | ZLuc | .484E | 0 | 1 | 87.00 | 59.8 | 2.59 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 67 | 6.00 | 1 | 47.12 | 56.34 | 451.44 | 35.23 | 0.43 | 145.28 | 7.21 | 2.78 |
| 31 | 5MA | ZLuv | .207E | 0 | 2 | 77.00 | 32.3 | 2.59 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 67 | 6 | 51.43 | 186.17 | 413.48 | 26.29 | 0.27 | 172.23 | 4.96 | 1.91 | |
| 32 | 5PST | ZAndoc | .765E | 0 | 1 | 84.00 | 100.8 | 2.59 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 67 | 6 | 28.56 | 64.91 | 576.78 | 0.53 | 0.22 | 1.44 | 7.74 | 0 | |
| 33 | 5PST | ZLuc | .496E | 0 | 1 | 84.00 | 59.8 | 2.59 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 67 | 6 | 88.63 | 42.83 | 541.87 | 4.94 | 0.26 | 29.39 | 6.36 | 0 | |
| 34 | 5PST | ZLuv | .575E | 0 | 1 | 69.00 | 32.3 | 2.59 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 67 | 6 | 13.49 | 169.41 | 475.72 | 1.15 | 0.15 | 12.59 | 5.49 | 0 | |
| 35 | 6CFM | GFh | .377E | 0 | 2 | 87.00 | 36.9 | 0.41 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 196 | 5.50 | 10 | 6.06 | 521.15 | 430.36 | 122.34 | 6 | 135.35 | 2.95 | 0.92 |
| 36 | 6CFM | GLit | .527E | 0 | 2 | 87.00 | 30.4 | 0.41 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 196 | 5.50 | 9 | 28.62 | 612.24 | 415.4 | 114.22 | 7.38 | 120.63 | 2.33 | 0.73 |
| 37 | 6CFM | GRend | .721E | 0 | 2 | 87.00 | 28 | 0.41 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 196 | 5.50 | 9 | 71.09 | 576.94 | 410.39 | 133.44 | 15.75 | 348.69 | 2.48 | 0.78 |
| 38 | 6BOS | QFh | .729E | 0 | 2 | 79.00 | 36.9 | 0.41 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 196 | 5.50 | 6 | 77.93 | 816.64 | 456.55 | 24.63 | 6.72 | 69.52 | 1.12 | 0.52 |
| 39 | 6BOS | QLit | .126E | 0 | 3 | 79.00 | 30.4 | 0.41 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 196 | 5.50 | 5 | 76.81 | 940.76 | 431.54 | 22.51 | 13.71 | 62.37 | 1.03 | 0.48 |
| 40 | 6BOS | QRend | .136E | 0 | 3 | 79.00 | 28 | 0.41 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 196 | 5.50 | 6 | 30.55 | 896.59 | 424.94 | 37.11 | 26.44 | 230.77 | 1 | 0.46 |
| 41 | 6MA | ZLit | .415E | 0 | 2 | 87.00 | 30.4 | 0.41 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 196 | 5.50 | 9 | 30.68 | 609.31 | 416.37 | 128.71 | 8.24 | 124.62 | 2.25 | 0.74 |
| 42 | 6MA | ZRend | .603E | 0 | 2 | 87.00 | 28 | 0.41 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 196 | 5.50 | 9 | 72.09 | 573.68 | 412.82 | 187.49 | 18.22 | 361.49 | 2.9 | 0.94 |
| 43 | 6SLV | AFh | .398E | 0 | 2 | 77.00 | 36.9 | 0.41 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 196 | 5.50 | 6 | 17.34 | 877.49 | 454.31 | 48.64 | 7.18 | 98.55 | 0.62 | 0.32 |
| 44 | 6SLV | ALit | .181E | 0 | 3 | 77.00 | 30.4 | 0.41 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 196 | 5.50 | 5 | 1270.1 | 5.69 | 429.22 | 42.96 | 15.15 | 87.05 | 0.56 | 0.28 |
| 45 | 6SLV | ARend | .991E | 0 | 2 | 77.00 | 28 | 0.41 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 196 | 5.50 | 5 | 66.55 | 961.17 | 422.86 | 119.53 | 26.85 | 327.19 | 0.54 | 0.26 |
| 46 | 7MTS | ULit | .284E | 0 | 2 | 83.00 | 30.4 | 0.39 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 44 | 9 | 18.06 | 199.75 | 227.7 | 1.37 | 16.34 | 4.64 | 0.45 | 0.02 | |
| 47 | 7MTS | URend | .181E | 0 | 2 | 83.00 | 28 | 0.39 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 44 | 9 | 23 | 197.59 | 225.61 | 2.03 | 31.92 | 18.13 | 0.48 | 0.02 | |
| 48 | 7BOS | QFh | .497E | 0 | 2 | 79.00 | 36.9 | 0.39 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 44 | 9 | 10.5 | 195.21 | 238.53 | 0.7 | 14.21 | 2.75 | 0.84 | 0.44 | |
| 49 | 7BOS | QLit | .121E | 0 | 3 | 79.00 | 30.4 | 0.39 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 44 | 9 | 8.74 | 204.63 | 232.03 | 0.58 | 15.43 | 2.15 | 0.84 | 0.45 | |
| 50 | 7BOS | QLuv | .777E | 0 | 2 | 60.00 | 32.3 | 0.39 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 44 | 9 | 0.3 | 179.26 | 265.4 | 0.01 | 13.36 | 0.2 | 0.96 | 0.52 | |
| 51 | 7BOS | QRe | .788E | 0 | 2 | 60.00 | 28.5 | 0.39 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 44 | 9 | 0.22 | 181.57 | 263.68 | 0.01 | 8.44 | 0.08 | 0.98 | 0.54 | |
| 52 | 7BOS | QRend | .116E | 0 | 3 | 79.00 | 28 | 0.39 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 44 | 9 | 11.16 | 204.41 | 230.5 | 1.02 | 31.49 | 9.73 | 0.86 | 0.46 | |
| 53 | 7MA | ZFh | .245E | 0 | 2 | 87.00 | 36.9 | 0.39 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 44 | 9 | 41.34 | 174.93 | 228.42 | 10.84 | 16.6 | 280.4 | 1.36 | 0.51 | |
| 54 | 7MA | ZLuv | .336E | 0 | 2 | 77.00 | 32.3 | 0.39 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 44 | 9 | 8.31 | 173.51 | 263.33 | 1.87 | 13.28 | 19.44 | 1.55 | 0.59 | |
| 55 | 7MA | ZRe | .442E | 0 | 2 | 77.00 | 28.5 | 0.39 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | .00 | 0 | 20 | 44 | 9 | 7.82 | 175.79 | | | | | | | |

| MON | RAIN (MM) | AVE MONTHLY | | BASIN VALUES | | | SED YIELD (T/HA) | PET (MM) |
|-----|--------------|--------------|----------------|--------------|-----------------------------|------------|------------------------|-------------|
| | | SNOW FALL | SURF Q (MM) | LAT Q | WATER YIELD (MM) (MM) | ET (MM) | | |
| 1 | 8.64 | 0 | 0.67 | 3.26 | 40.23 | 7.15 | 0.09 | 67.26 |
| 2 | 97 | 0 | 0.24 | 3.3 | 30.69 | 6.16 | 0.06 | 80.36 |
| 3 | 14.68 | 0 | 1.81 | 5.18 | 70.12 | 11.49 | 0.75 | 114.3 |
| 4 | 82.46 | 0 | 7.89 | 28.55 | 360.78 | 34.00 | 0.74 | 111.24 |
| 5 | 64.19 | 0 | 8.27 | 20.2 | 290.07 | 32.99 | 1.28 | 142.88 |
| 6 | 137.25 | 0 | 28.87 | 45.94 | 770.24 | 43.86 | 4.25 | 123.8 |
| 7 | 98.82 | 0 | 27.29 | 27.56 | 600.39 | 40.01 | 3.94 | 121.27 |
| 8 | 56.41 | 0 | 9.47 | 15.27 | 300.39 | 27.60 | 1.34 | 132.19 |
| 9 | 74.84 | 0 | 13.78 | 20.73 | 400.12 | 29.74 | 1.57 | 111.68 |
| 10 | 56.36 | 0 | 10.75 | 199 | 360.31 | 25.85 | 1.45 | 86.9 |
| 11 | 25.6 | 0 | 3.64 | 8.14 | 150.63 | 15.37 | 0.34 | 73.36 |
| 12 | 12.63 | 0 | 0.46 | 5.21 | 70.37 | 9.61 | 0.04 | 60.41 |

SWAT Feb .01 VERSION 2000
 General Input/Output section (file.cio):Sat No v 20 00 :06:26 2010 AVSW

AVE ANNUAL BASIN VALUES

NUTRIENTS

O R G A N I C N =37.286 (KG/HA)
 O R G A N I C P = 4.615
 N O 3 Y I E L D (S Q) = 0.368 (KG/HA)
 N O 3 Y I E L D (S S Q) = 13.821 (KG/HA)
 S O L P Y I E L D = 0.016 (KG/HA)
 N O 3 L E A C H E D = 1.583 (KG/HA)
 P L E A C H E D = 0.091 (KG/HA)
 N U P T A K E = 12.497 (KG/HA)
 P U P T A K E = 1.967 (KG/HA)
 A C T I V E T O S O L U T I O N P F L O W = 8.761
 A C T I V E T O S T A B L E P F L O W = 4.213 (KG/HA)
 N F E R T I L I Z E R A P P L I E D = 0.000 (KG/HA)
 P F E R T I L I Z E R A P P L I E D = 0.000 (KG/HA)
 N F I X A T I O N = 1.967 (KG/HA)
 D E N I T R I F I C A T I O N = 36.669 (KG/HA)
 H U M U S M I N O N A C T I V E O R G N = 7880 (KG/HA)
 A C T I V E T O S T A B L E O R G N = 13.204 (KG/HA)
 H U M U S M I N O N A C T I V E O R G N = 13.359 (KG/HA)
 M I N F R O M F R E S H O R G N = 3007 (KG/HA)
 M I N F R O M F R E S H O R G P = 0416 (KG/HA)
 N O 3 I N R A I N F A L L = 6.406 (KG/HA)
 I N I T I A L N O 3 I N S O I L = 27.797 (KG/HA)
 F I N A L N O 3 I N S O I L = 71901 (KG/HA)
 I N I T I A L N O 3 I N S O I L = 13773.735 (KG/HA)
 F I N A L O R N I N S O I L = 13546.271 (KG/HA)
 I N I T I A L M I N P I N S O I L = 264.266 (KG/HA)
 F I N A L M I N P I N S O I L = 286.491 (KG/HA)
 I N I T I A L O R G P I N S O I L = 1687.283 (KG/HA)
 F I N A L O R G P I N S O I L = 1651.926 (KG/HA)
 N O 3 I N F E R T = 0.000 (KG/HA)
 A M M O N I A I N F E R T = 0.000 (KG/HA)
 O R G N I N F E R T = 0.0000 (KG/HA)
 M I N E R A L P I N F E R T = 0.000 (KG/HA)
 O R G P I N F E R T = 0.000 (KG/HA)
 N R E M O V E D I N Y I E L D = 8.429 (KG/HA)
 P R E M O V E D I N Y I E L D = 1.330 (KG/HA)
 A M M O N I A V O L A T I L I Z A T I O N = 0.00 (KG/HA)
 A M M O N I A N I T R I F I C A T I O N = 0.000 (KG/HA)
 N O 3 E V A P - L A Y E R 2 T O 1 = 750.695
 D I E - G R O P Q = 0.0 (No/HA)
 D I E - G R O L P Q = 0.0 (No/HA)
 D I E - G R O P S E D = 0.0 (No/HA)
 D I E - G R O L P S E D = 0.0 (No/HA)
 B A C T P R U N O F F = 0.0 (No/HA)
 B A C T L P R U N O F F = 0.0 (No/HA)
 B A C T P S E D I M E T = 0.0 (No/HA)
 B A C T L P S E D I M E T = 0.0 (No/HA)
 B A C T P I N C O R P = 0.0 (No/HA)
 B A C T L P I N C O R P = 0.0 (No/HA)