



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

**MODELACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE AGUA Y SEDIMENTOS EN LA
SUBCUENCA DEL RÍO AHUEHUEPAN EN EL ESTADO DE GUERRERO**

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de

Maestro en Ciencias Forestales



**DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES**

PRESENTA:

LUIS MARIO GARCÍA CUEVAS

Julio de 2012

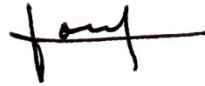
Chapingo, Texcoco, Estado de México.



Tesis realizada por **Luis Mario García Cuevas** bajo la dirección del Comité Asesor indicado y aprobada por el mismo para obtener el grado de Maestro en Ciencias Forestales.

CODIRECTOR.

Dr. José Luis Romo Lozano



CODIRECTOR:

M.C. Eduardo Vargas Pérez



ASESOR:

Dr. Isidro Villegas Romero



DEDICATORIAS

A mis padres Gerardo y Laura por haberme dado la oportunidad de existir, por que hicieron la persona que ahora soy gracias a la educación ejemplar que siempre me dieron.

A mis hermanos Gerardo y Eugenio por las momentos tan maravillosos que pasamos, por el apoyo siempre mostrado.

A Margarita por compartir esta maravillosa etapa conmigo, por sus consejos, su fuerza y por todo el amor y apoyo que siempre me ha brindado.

A todos mis amigos que en diferentes etapas de la vida han compartido momentos importantes.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo y a la División de Ciencias Forestales por darme la oportunidad de realizar mis estudios de Maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económicos brindado para la realización de mis estudios de Maestría.

Al M.C. Eduardo Vargas Pérez quien además de maestro ha sido un amigo, por el apoyo recibido para desarrollarme profesionalmente, por sus consejos y por el apoyo para la realización del presente trabajo.

Al Dr. Isidro Villegas Romero por su valioso apoyo durante mis estudios de Maestría, por brindarme siempre sus amplios conocimientos.

DATOS BIOGRÁFICOS

Luis Mario Garcia Cuevas nació en la Heroica Puebla de Zaragoza el 24 de noviembre de 1986. Sus padres Gerardo Garcia Cuaxico y Laura Cuevas, y hermano de Gerardo Abraham y Eugenio.

Luis Mario realizó sus estudios nivel básico (1990-1998) en la primaria “Fundadores de Puebla”, posteriormente la educación secundaria la cursó en la Escuela Secundaria Técnica No. 43 culminando esta en 2001, ambas escuelas ubicadas en la ciudad de Puebla. Los estudios nivel medio superior los realizó en la preparatoria Benito Juárez García (2001-2004) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). En julio de 2004 cursa un año de propedéutico en la Universidad Autónoma Chapingo, donde posteriormente en 2005 ingresa a la División de Ciencias Forestales donde concluye sus estudios de licenciatura y obtiene el título de Ingeniero Forestal el 17 de noviembre de 2009 con la defensa de la tesis titulada “Localización de áreas potenciales para reforestación de un área natural protegida en el estado de México”

En enero de 2010 ingresa a la Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales en la División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo.

RESUMEN

MODELACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE AGUA Y SEDIMENTOS EN LA SUBCUENCA DEL RÍO AHUEHUEPAN EN EL ESTADO DE GUERRERO

En la presente investigación se modelaron los valores de producción de agua y sedimentos así como el balance hídrico en el periodo 1978-1985 en la subcuenca del Río Ahuehuepan con el Modelo de simulación SWAT (Soil and Water Assessment Tool). El objetivo del estudio fue calibrar y validar los valores arrojados por el modelo en comparación con los datos reales de una estación de aforo. Los escenarios de simulación se construyeron utilizando el Sistema de Información Geográfica ArcGIS. Los datos para la calibración del modelo consistieron en 10 años de información climática e hidrométrica, 10 usos de suelo y 10 unidades de suelo. La calibración del

modelo se realizó haciendo modificaciones a las diferentes variables de la base de datos de SWAT, estas modificaciones no superaron el 15% de los valores originales. Los resultados de los valores medidos y simulados para escurrimientos y sedimentos se ajustaron con coeficientes de determinación de 0.78 y 0.80 respectivamente para el periodo simulado. Se puede concluir que el modelo simula con razonable precisión la producción de agua y sedimentos.

Palabras clave: SWAT, producción de agua, producción de sedimentos, balance hídrico.

ABSTRACT

MODELING OF WATER AND SEDIMENT PRODUCTION IN SUBWATERSHED AHUEHUEPAN RIVER IN GUERRERO, MEXICO

In this research some values of sediment yield and water balance in the period 1978-1985 in the basin of the Rio Ahuehuepan were modeled with the simulation model SWAT (Soil and Water Assessment Tool). The objective was to calibrate and validate the values produced by the model compared with real data from a gauging station. Simulation scenarios were constructed using the ArcGIS geographic information system. The data for model calibration consisted of 10 years of climate and hydrometric data, 10 land uses and 10 soil units.

Model calibration was performed by making adjustments to the different variables in the SWAT database, these changes did not exceed 15% of the original values. The results of measured and simulated values were adjusted with coefficients of determination of 0.78 and 0.80 respectively for the simulated period. We conclude that model simulates with rational accuracy the production of water and sediments.

Key words: SWAT, water yield, sediment yield, water balance

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT	v
CONTENIDO.....	vi
INDICE DE FIGURAS	ix
INDICE DE CUADROS	xi
1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	2
2.1. Sistemas de información geográfica y modelos hidrológicos	2
2.2. Modelos hidrológicos.....	2
2.2.1. Modelación en cuencas	4
2.2.2. Clasificación de los modelos hidrológicos	4
2.2.2.1. Modelos determinísticos.....	5
2.2.2.2. Modelos estocásticos	5
2.3. Etapas de la elaboración de un modelo hidrológico.....	6
2.3.1. Identificación.....	6
2.3.2. Calibración.....	6
2.3.3. Validación	7
2.3.4. Limites de aplicación	7
2.4. El modelo SWAT	7
2.4.1. Variables calculadas por el modelo SWAT	9
2.5. Trabajos realizados con el modelo SWAT	15
3. OBJETIVOS.....	17
3.1. General	17

3.2. Específicos.....	17
4. HIPÓTESIS.....	17
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
5.1. Caracterización de la subcuenca del Rio Ahuehuepan.....	18
5.1.1. Localización y límites.....	18
5.1.2. Fisiografía.....	19
5.1.3. Geología.....	19
5.1.4. Edafología.....	21
5.1.5. Clima.....	25
5.1.6. Hidrología.....	27
5.1.7. Uso de suelo y vegetación.....	28
5.2. Materiales utilizados.....	32
5.3. Metodología.....	33
5.3.1. Delimitación automática de la cuenca.....	33
5.3.2. Mapa digital de uso de suelo y vegetación.....	33
5.3.3. Mapa digital de tipos de suelos.....	34
5.3.4. Definición de unidades de respuesta hidrológica.....	40
5.3.5. Datos climáticos.....	40
5.3.6. Datos de escurrimientos y sedimentos.....	45
5.3.7. Calibración y Validación.....	45
6. RESULTADOS.....	46
6.1. Resultados de la primera simulación.....	46
6.2. Calibración.....	49
6.2.1. Escurrimientos.....	50

6.2.2. Sedimentos.....	52
6.3. Validación.....	54
6.3.1. Producción de agua.....	54
6.3.2. Producción de sedimentos	56
6.4. Balance hídrico	58
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	60
8. LITERATURA CITADA.....	63
9. ANEXOS	69

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Clasificación de los modelos hidrológicos (Chow, 1994).....	5
Figura 2.2 Esquema de procesamiento de información del modelo SWAT, DiLuzio et al., 2002	9
Figura 5.1 Localización de la subcuenca Ahuehuepan	18
Figura 5.2 Tipo de rocas en la subcuenca del Río Ahuehuepan	21
Figura 5.3 Grupos de suelos en la subcuenca del Río Ahuehuepan	23
Figura 5.4 Tipos de climas en la subcuenca del Río Ahuehuepan.....	26
Figura 5.5 Hidrología superficial de la subcuenca del Río Ahuehuepan.	28
Figura 5.6 Usos de suelo presentes en la subcuenca del Río Ahuehuepan	30
Figura 5.7 Interface del programa Soil Water Characteristics	39
Figura 5.8 Estaciones meteorológicas utilizadas.....	41
Figura 5.9 Interface del programa para cálculo de Radiación solar.	43
Figura 6.1 Dinámica y magnitud de los escurrimientos superficiales medidos y simulados por el modelo SWAT en la primera simulación.	47
Figura 6.2 Análisis de regresión lineal para los valores de escurrimiento medidos y simulados por el modelo SWAT en la primera simulación.	48
Figura 6.3 Dinámica y magnitud de producción de sedimentos medidos y simulados por el modelo SWAT en la primera simulación.	48
Figura 6.4 Análisis de regresión lineal para los valores de producción de sedimentos medidos y simulados por el modelo SWAT en la primera simulación.	49
Figura 6.5 Dinámica y magnitud de los escurrimientos superficiales medidos y simulados por el modelo SWAT en la etapa de calibración.	51
Figura 6.6 Análisis de regresión lineal para los valores de escurrimiento medidos y simulados por el modelo SWAT en la etapa de calibración.	52

Figura 6.7 Dinámica y magnitud de los sedimentos medidos y simulados por el modelo SWAT en la etapa de calibración.	53
Figura 6.8 Análisis de regresión lineal para los valores de escurrimiento medidos y simulados por el modelo SWAT en la etapa de calibración.	53
Figura 6.9 Dinámica de la producción de agua medida y simulada en la subcuenca del Río Ahuehuepan.....	55
Figura 6.10 Análisis de regresión para los sedimentos medidos y simulados en la subcuenca del Río Ahuehuepan.	56
Figura 6.11 Dinámica de la producción de agua medida y simulada en la subcuenca del Río Ahuehuepan	57
Figura 6.12 Análisis de regresión para los sedimentos medidos y simulados en la subcuenca del Río Ahuehuepan.	57
Figura 6.13 Balance hídrico mensual simulado en la subcuenca del Río Ahuehuepan (1978-1985).....	58

INDICE DE CUADROS

Cuadro 5.1 Tipos de rocas presentes en la subcuenca Rio Ahuehuepan.....	20
Cuadro 5.2 Grupos de suelos presentes en la subcuenca Rio Ahuehuepan.	22
Cuadro 5.3 Climas presentes en la subcuenca del Río Ahuehuepan.	26
Cuadro 5.4 Reclasificación de polígonos de uso de suelo y vegetación.....	34
Cuadro 5.5 Propiedades hidrológicas de suelos con base en su textura.	35
Cuadro 5.6 Formulas empleadas por Soil Water Characteristics.....	36
Cuadro 5.7 Definición de los símbolos.....	38
Cuadro 6.1 Parámetros más sensibles del modelo SWAT.....	50
Cuadro 6.2 Comparación de estadísticos sobre la producción de agua en diferentes cuencas y con diferentes modelos.....	55

1. INTRODUCCIÓN

La cantidad y calidad del agua están disminuyendo en muchas regiones del país debido a que los ecosistemas acuáticos y el ciclo del agua están siendo profundamente alterados, ya sea por los efectos directos que la actividad humana causa en los ecosistemas acuáticos asociados a la construcción de infraestructura hidráulica, la contaminación y la urbanización; o bien debido a los procesos de deterioro vinculados con la pérdida de los ecosistemas terrestres, principalmente por el cambio de uso del suelo, y por los patrones de explotación de los recursos acuáticos, los cuales con frecuencia exceden los límites de renovabilidad natural de los sistemas.

La gestión de agua es fundamental para la planeación y manejo de los recursos naturales con fines de sostenibilidad (Brooks *et al.*, 1991). El conocimiento de la hidrología es necesario para determinar reservas, demandas y suministros de agua y predecir fenómenos de frecuencia extrema (inundaciones, desbordes, sequías) y para proteger la calidad del agua (Baker *et al.*, 1995; Oropeza, 1993)

Se han realizado diversos trabajos para cuantificar la producción de agua en cuencas tanto en México como en otros países, Benavides (2008) estudio la oferta hídrica en la cuenca forestal Tapalpa, Jalisco con el modelo SWAT Obteniendo un ajuste de 0.85 de coeficiente de determinación para los datos medidos y simulados. Torres (2000) en la cuenca El Tejocote obtuvo resultados similares con R^2 de 0.71 y 0.85 para sedimentos y escurrimientos respectivamente.

A pesar de los diversos estudios que se han hecho para calcular la producción de agua y sedimentos es necesaria la realización de un estudio específico en las diferentes zonas de México que permita validar los datos simulados con datos reales y así poder generalizar la información para condiciones similares aledañas al área de estudio, por esta razón el objetivo del presente trabajo fue calibrar y validar el modelo SWAT para conocer la producción de agua y sedimentos que produce la subcuenca del Río Ahuehuepan, en el estado de Guerrero.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Sistemas de información geográfica y modelos hidrológicos

Los SIG son una sistema para el manejo, manipulación y análisis de datos espaciales; se emplean para generar información que es de utilidad en la toma de decisiones, históricamente en el área del manejo de los recursos naturales. Una característica clave de los sistemas de información geográfica es la relación entre las características geográficas representadas sobre un mapa y los datos de los atributos que describen esa característica; normalmente se distinguen de otros sistemas que manejan datos espaciales, por su capacidad para realizar operaciones y análisis espaciales complejos (Theobald, 2000).

Los SIG's y la Hidrología se basan en principios fundamentales muy diferentes; sin embargo, existe un vínculo entre los dos. Los SIG's describen el medio ambiente, mientras la Hidrología describe cómo el ambiente afecta el flujo de agua a través del ciclo hidrológico. Un objetivo fundamental en la Hidrología Espacial es el uso de los datos espaciales y funciones de los SIG's, a fin de ayudar a generar nuevas ideas y estrategias para solucionar problemas dentro de la Hidrología (Murillo, 2002).

2.2. Modelos hidrológicos

De acuerdo con Oropeza (1999) los modelos hidrológicos son presentaciones simplificadas de los sistemas hidrológicos reales, a partir de los cuales se estudia la relación causa efecto de una cuenca, a través de datos de entrada y de salida. Además permite simular y predecir el comportamiento hidrológico de los procesos físicos de la cuenca.

La historia de los modelos hidrológicos se remonta a la mitad del siglo XIX, cuando en el año 1856 se describe la Ley de Darcy (la ecuación fundamental para el flujo de aguas subterráneas), y en 1871 la Ecuación de St. Venant que describe el flujo no estable de canal abierto. Durante el siglo pasado (en la década de los 40's) se comenzó a hablar del transporte de constituyentes en aguas naturales. Los

modelos computacionales empezaron a aparecer a mediados de 1960, primero para aguas superficiales y transportes de sedimentos. El Modelo de Cuencas de Standford, de Crawford y Linsley (1966), es un ejemplo de los modelos que representan la respuesta de una cuenca en su totalidad y sin tomar en cuenta la caracterización de la variabilidad espacial del lugar; además utilizan parámetros que no se relacionan a características superficiales físicamente observables, y esto hace que la estimación de los parámetros consuma demasiado tiempo, y que se obtenga un resultado poco satisfactorio. La precipitación se representaba como el promedio espacial de las estaciones climatológicas (Storck, *et al.* 2000). Tales modelos todavía se utilizan en Estados Unidos; por ejemplo, en el Sistema de Predicción Ripario del Servicio Meteorológico Nacional, en el Modelo de Cuantificación de la Humedad del Suelo de Sacramento (Burnash *et al.*, 1973), que es un derivado del Modelo de Cuencas de Standford. Posteriormente, en los 70's, se desarrollaron modelos para calidad de aguas superficiales y subterráneas, y en 1980 para transporte de aguas subterráneas.

Los modelos de cuencas tienen cinco componentes básicos: procesos (hidrológicos) y características de la cuenca; datos de entrada; ecuaciones determinadas; condiciones iniciales y límites; y salidas (Singh, 1995). A pesar de su estructura general uniforme, varios tratamientos de los cinco componentes del modelo han resultado en un rango significativo de tipos de modelos disponibles. Lo que se distingue en estos diferentes tipos de modelos es un importante primer paso que es la selección del modelo apropiado al proyecto a manejar.

Los modelos de cuencas generalmente son clasificados según el método que usan para describir los procesos hidrológicos, las escalas espaciales y temporales para las cuales son diseñados, y cualquier condición específica o uso proyectado para el cual son diseñados. El conocimiento de estos componentes es altamente recomendado cuando se selecciona la combinación que mejor se adapta a una cuenca específica y la tarea a realizar (Semmens *et al.*, 2004).

Los modelos también varían en su capacidad para simular a través de escalas espaciales y temporales y se pueden clasificar como en dos, los modelos

distribuidos capaces de predecir la respuesta en varios puntos dentro o sobre una cuenca entera y los modelos agrupados que se centran en simulaciones de una región determinada, como una ladera o un solo punto en un curso de agua (Beven, 1985).

2.2.1. Modelación en cuencas

Los modelos de cuencas tienen cinco componentes básicos: procesos (hidrológicos) y características de la cuenca; datos de entrada; ecuaciones determinadas; condiciones iniciales y límites; y salidas (Singh, 1995). A pesar de su estructura general uniforme, varios tratamientos de los cinco componentes del modelo han resultado en un rango significativo de tipos de modelos disponibles. Lo que se distingue en estos diferentes tipos de modelos es un importante primer paso que es la selección del modelo apropiado al proyecto a manejar.

Los modelos de cuencas generalmente son clasificados según el método que usan para describir los procesos hidrológicos, las escalas espaciales y temporales para las cuales son diseñados, y cualquier condición específica o uso proyectado para el cual son diseñados. El conocimiento de estos componentes es altamente recomendado cuando se selecciona la combinación que mejor se adapta a una cuenca específica y la tarea a realizar (Semmens et al., 2004).

2.2.2. Clasificación de los modelos hidrológicos

Según Oropeza (1990) citado por Torres (2000), diferentes criterios han sido utilizados para desarrollar una clasificación precisa de los modelos matemáticos hidrológicos. En la mayoría de los casos, los criterios utilizados por algunos autores reflejan un interés o una necesidad particular.

En la Figura 2.1 se puede observar una clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo con la forma, aleatoriedad y variabilidad espacial y temporal de los procesos hidrológicos.

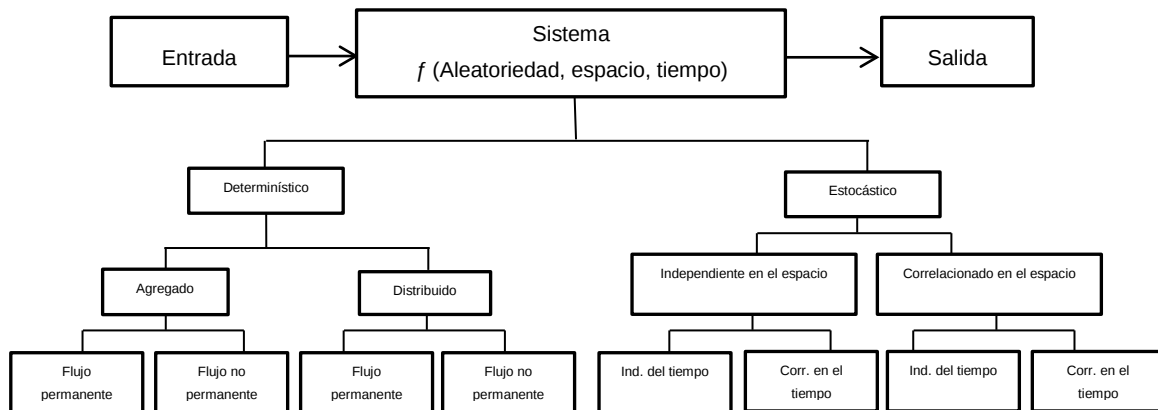


Figura 2.1 Clasificación de los modelos hidrológicos (Chow, 1994)

2.2.2.1. Modelos determinísticos

Son aquellos que tienden a establecer relaciones cuantitativas de causa-efecto entre las entradas y salidas, utilizando una relación directa para obtener una respuesta debida a un requerimiento, sea por medio de una ecuación empírica, o mediante el uso de los métodos de regresión simple.

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

Este tipo de modelos se utiliza cuando se dispone de poca información; caso frecuente de las obras de ingeniería rural e hidráulica, en los cuales se tiende a reconstruir indirectamente la evolución de los escurrimientos y flujos superficiales a partir del conocimiento de eventos de lluvia diaria, de los cuales se dispone a menudo de grandes series de datos (Oropeza, 1999).

2.2.2.2. Modelos estocásticos

En los Modelos Estocásticos el algoritmo de cálculo incluye una o varias componentes probabilísticas. Con los Modelos Estocásticos se generan series futuras de lluvias, de caudales, de niveles de embalses, o de eventos extremos.

Los Eventos Hidrológicos, tales como aguaceros, caudales, niveles de embalse, etc son Eventos Estocásticos. Se caracterizan porque, de un lado tienen un patrón

medio de comportamiento a largo plazo, y por el otro el pronóstico de sus magnitudes en un momento dado tiene un mayor o menor grado de incertidumbre. El patrón medio corresponde a lo que se denomina la Tendencia General o Componente Determinística y la incertidumbre constituye la Componente Aleatoria del evento (Silva, 2009).

2.3. Etapas de la elaboración de un modelo hidrológico

La construcción o desarrollo de un modelo hidrológico debe ser realizada respetando las etapas siguientes: a) identificación, b) calibración, c) validación y d) límites de aplicación (Oropeza, 1990).

2.3.1. Identificación

Se refiere a un análisis de la estructura de los modelos y de las relaciones internas que guardan entre sus elementos. En esta parte se definen el número de variables que van a participar y se establecen las hipótesis y supuestos que van a simplificar al modelo en función de sus objetivos y la precisión de sus resultados.

2.3.2. Calibración

La calibración es el proceso de ajuste de valores de parámetros para optimizar el funcionamiento de estos de acuerdo a un grupo de criterios predefinidos. Cada modelo usa un grupo de uno o más parámetros que son usados para determinar el comportamiento básico del sistema modelado. Los valores del parámetro pueden ser directamente especificados o pueden ser estimados usando técnicas de optimización manuales o automáticas (Soorooshian y Gupta, 1995).

Consiste en evaluar y estimar los parámetros del modelo mediante la ayuda de criterios deductivos y observaciones anteriores respecto a los requerimientos (entradas) y las respuestas (salidas). En general, existen dos maneras de estimar los parámetros a partir de una muestra: pasiva y activa.

2.3.3. Validación

La calidad de un modelo se mide por los resultados de su validación. Ésta consiste en comparar la respuesta teórica, obtenida por el paso de un dato experimental o información a través de la imagen (figura, símbolo, ecuación) del sistema modelado, obteniendo una respuesta de las informaciones directas. Es importante señalar que el valor de las entradas y las salidas utilizadas para la validación deben ser diferentes de aquellas que son utilizadas para la calibración del modelo.

La validación se puede hacer de manera puramente intuitiva, como la comparación visual de resultados hecha mediante un cuadro o una gráfica o de manera analítica como la comparación estadística de resultados por medio de pruebas o criterios apropiados.

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

2.4. El modelo SWAT

SWAT es un modelo hidrológico de simulación generado por el personal del ARS (Agricultural Research Service) en los Estados Unidos (Neitsch et al., 2002).

El modelo esta: a) basado físicamente, b) usa datos de entrada fácilmente disponibles, c) es computacionalmente eficiente para operar en grandes cuencas

en tiempo razonable, d) es de tiempo continuo y capaz de simular grandes periodos para computar los efectos en los cambios de manejo.

El SWAT, divide las cuencas hidrográficas en pequeñas subcuencas, al hacer esto es posible calcular con mayor precisión los caudales y los sedimentos presentes. Además para hacer más fáciles y exactos los cálculos, el SWAT trabaja por unidades de respuesta hidrológica (HRU), los cuales resultan del cruce de información de tipos de suelo con las diferentes coberturas o uso de suelo.

El modelo SWAT tiene una resolución en base diaria y por ser un modelo de tipo continuo permite simulaciones a largo plazo (años). Lo anterior le da la ventaja de comparar el efecto de diferentes sistemas de manejo de la producción de agua y sedimentos, así como en la carga de contaminantes a las fuentes de agua superficial.

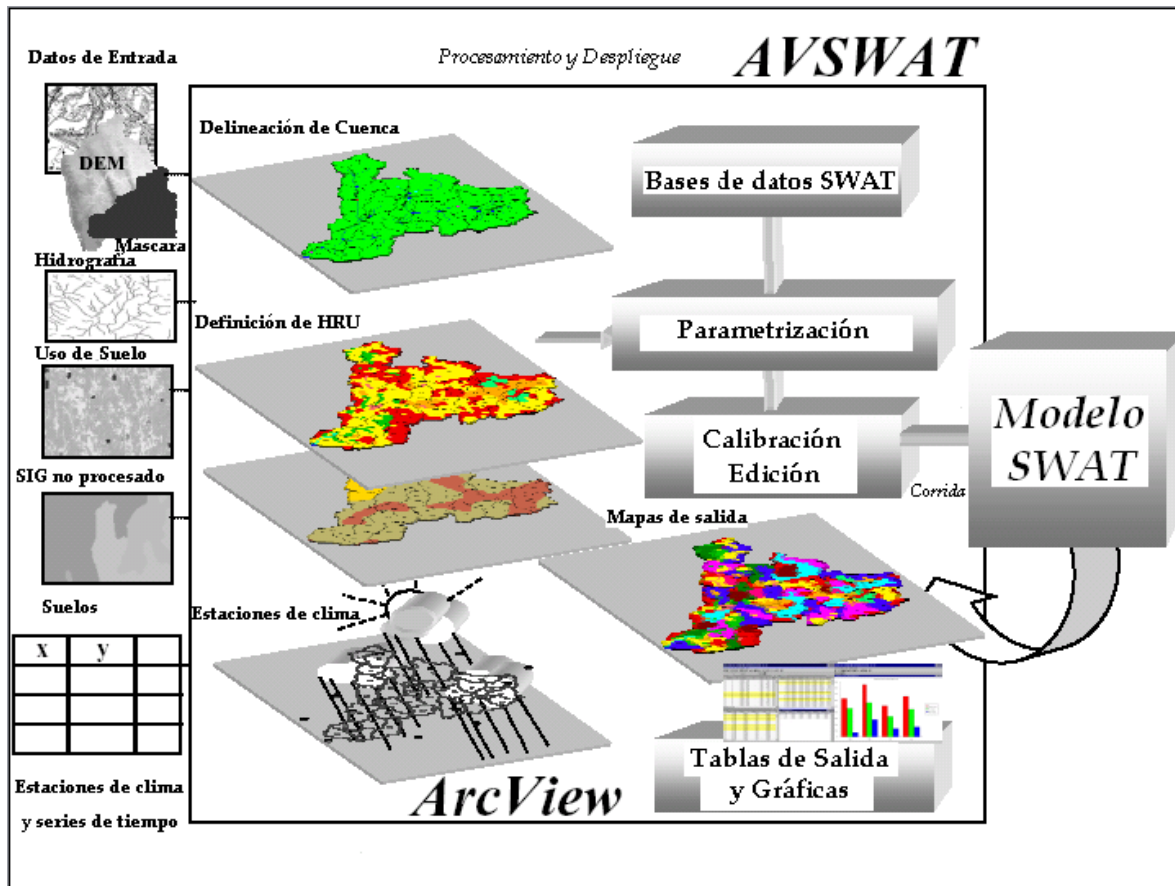


Figura 2.2 Esquema de procesamiento de información del modelo SWAT, DiLuzio et al., 2002

La información de entrada requerida por el programa para cada subcuenca es agrupada y organizada dentro de las siguientes categorías: topografía de la cuenca, suelos, uso de suelo, precipitación, clima (temperatura, viento, radiación solar), lagunas o reservorios y aguas subterráneas.

2.4.1. Variables calculadas por el modelo SWAT

2.6.1.1. Balance Hídrico

El programa se basa en un balance hídrico para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en la cuenca el cual se calcula con la siguiente ecuación:

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

Donde SW_t es el contenido de agua en el suelo en el día t , SW es el agua aprovechable por las plantas, t es el tiempo en días, R es la precipitación diaria, Q la cantidad de escorrentía diaria, ET la evapotranspiración diaria, P la percolación diaria y QR el flujo de retorno o flujo base; todas las unidades en mm.

2.6.1.2. Escurrimiento superficial

Es el agua superficial que fluye sobre la superficie terrestre y tiene relación directa con el almacenamiento de la humedad del suelo y el flujo subsuperficial (infiltración, flujo de aguas subterráneas) dentro del contexto de balance hídrico. Su cálculo afecta la cantidad de agua total expresada en el balance hídrico.

La cantidad de escorrentía (Q) es estimada por medio de la metodología del número de curva establecida por el Servicio de Conservación de Suelos de los E. U., con datos de lluvia diarios. Q es el escurrimiento diario, que esta determinado en el suelo, la cobertura del suelo y la práctica de manejo que en este se realice.

$$Q = \frac{(R - 0.2s)^2}{(R + 0.8s)} \quad R > 0.2s$$

$$Q = 0.0 \quad R \leq 0.2s$$

Donde Q es el escurrimiento diario, R es la lluvia diaria, y s es el parámetro de retención, este parámetro esta relacionado con el número de curva (CN).

$$s = 254 \left(\left(\frac{100}{CN} \right) - 1 \right)$$

La constante, 254 arroja s en mm. Así, R y Q también son expresados en mm. SWAT hace correcciones para CN por pendiente, debido a que este esta descrito para 7% de pendiente.

2.6.1.3. Infiltración

La infiltración es un proceso en el cual el agua penetra desde la superficie del suelo. Algunos de los factores que intervienen y afectan este fenómeno son la

cobertura vegetal, la porosidad y la conductividad hidráulica así como el contenido de humedad del suelo, de ahí su importancia en el balance hídrico, ya que la infiltración se puede considerar de esta forma como una de las pérdidas en dicho balance.

2.6.1.4. Flujo lateral o subsuperficial

El flujo lateral es el agua que se mueve por debajo de la superficie del suelo y sobre el nivel de los acuíferos, la cual fluye subsuperficialmente y alimenta los canales de drenaje, quebradas y ríos. El flujo subsuperficial es calculado simultáneamente con la percolación para el perfil del suelo entre 0 – 2 m mediante un modelo de almacenamiento cinético, que usa la ecuación de conservación de masa con el perfil entero del suelo como el volumen de control:

$$\frac{S_2 - S_1}{t_2 - t_1} = i * L - \left(\frac{q_{lat1} + q_{lat2}}{2} \right)$$

Donde S es el volumen drenable de agua almacenada en la zona de saturación en mm^{-1} (mayor de capacidad de campo), t es el tiempo en horas, q_{lat} es el flujo lateral en m^3h^{-1} , i es la tasa de agua que entra en la zona de saturación en m^2h^{-2} , L es la longitud de la pendiente de la cuesta en m y los sufijos 1 y 2 se refieren al comienzo y final del intervalo.

2.6.1.5. Percolación

El agua de percolación es la fracción del agua infiltrada que logra atravesar la zona radical, la cual SWAT considera entre 0 – 2 m. Esta agua de percolación puede llegar hasta los canales de drenaje (flujo de retorno) o percolarse hasta los acuíferos profundos a más de 25 m.

El componente percolación de SWAT usa una técnica de almacenamiento combinado para predecir el flujo medio de cada capa de suelo. Una vez que el agua es percolada al acuífero profundo, esta no puede alimentar el escurrimiento. La técnica de almacenamiento esta basada en la siguiente ecuación:

$$SW_t = SW_0 \exp(-\Delta t / TT_t)$$

$$TT_t = (SW_t - FC_t) / H_t$$

Donde SW_0 y SW_t son los componentes del agua del suelo en el comienzo y final del día en mm, Δt es el intervalo de tiempo en 24h y TT_t es el tiempo de viaje a través de la capa del suelo t en h, H_t es la conductividad hidráulica mm h^{-1} , FC_t es el contenido de agua a capacidad de campo para cada capa, en mm. Así, la percolación puede ser calculada por sustitución de SW_t desde SW_0 .

$$O_t = SW_0 * (1 - \exp(-\Delta t / TT_t))$$

Donde O_t es la tasa de percolación en mm d^{-1} .

2.6.1.6. Flujo de retorno

Es el agua que llega hasta el cauce de los canales naturales desde las aguas subterráneas, este flujo es el que mantiene agua en los ríos y quebradas en las épocas de baja precipitación.

$$q_t = q_{t-1} * e^{-\alpha \Delta t} + Rc * (1 - e^{-\alpha \Delta t})$$

Donde q_t es el flujo de retorno en el día t , α es la constante de proporcionalidad, Rc es la recarga del acuífero superficial. Esta ecuación esta sustentada en que la variación del flujo de retorno con el tiempo esta también relacionada linealmente con la recarga del acuífero.

2.6.1.7. Evapotranspiración

La evapotranspiración es el agua que sale del suelo hacia la atmósfera por transpiración de las plantas y por evaporación del suelo.

El modelo SWAT ofrece tres métodos para estimación de la evapotranspiración potencial: Monteith (1965), Hargreaves and Sammani (1985) y Priestley-Taylor (1972).

El método de Penman-Monteith: este método fue recientemente añadido al SWAT para suministrar un medio de estimación de efectos a cambios de CO₂. Las ecuaciones del método son:

$$E_0 = \frac{\delta(h_0 - G) + 86.7AD*(e_a - e_d)AR}{(HV)*(\delta + \gamma)}$$

y

$$E_p = \frac{\delta(h_0 - G) + 86.7AD*(e_a - e_d)AR}{HV*\left(\delta + \gamma*\left(1 + \left(\frac{CR}{AR}\right)\right)\right)}$$

Donde h_0 es la relación neta (MJ m⁻²), δ es la pendiente de la curva de presión de vapor saturado (kPa°C⁻¹), G es el calor del suelo (MJ m⁻²), e_a es la presión de vapor saturado en la temperatura media del aire (kPa), e_d es la presión de vapor en la temperatura media del aire (kPa), HV es el calor latente de vaporización y γ es una constante psicrométrica (kPa°C⁻¹), y AD es la densidad del aire en g m⁻³, AR es la resistencia aerodinámica para el calor y la transferencia de vapor en s m⁻¹, y CR es la resistencia dosel para la transferencia de vapor en s m⁻¹.

Método Hargreaves and Sammani: este método estima la evapotranspiración potencial como una función de la radiación y la temperatura del aire. El método de Hargreaves fue modificado para uso en SWAT por incremento en el exponente diferencial de la temperatura desde 0.5 a 0.6. También, la radiación terrestre es reemplazada por RAMX (radiación solar máxima posible en la superficie del suelo) y el coeficiente es ajustado desde 0.0023 a 0.0032 para propósitos de conversión. La ecuación modificada es:

$$E_0 = 0.0032 \left(\frac{RAMX}{HV} \right) (T + 17.8) (T_{mx} - T_{mn})^{0.6}$$

$$HV = 2.50 - 0.0022T$$

Donde T_{mx} y T_{mn} son las temperaturas del aire máximas y mínimas diarias en °C, HV es el calor latente de vaporización y T es la temperatura media del aire diaria.

El método de Priestley-Taylor: Calcula la ecuación:

$$\lambda E_0 = \alpha_{pet} * \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} * (H_{net} - G)$$

Donde λ es el calor latente de vaporización (MJ kg^{-1}), E_0 es el potencial de evapotranspiración (mm d^{-1}), α_{pet} es un coeficiente, Δ es la pendiente de la curva de saturación de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), γ es la constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), H_{net} es la radiación neta ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), y G es el flujo de densidad de calor en el suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$).

2.6.1.8. Sedimentos

Los sólidos perdidos o sedimentados son el suelo que se pierde por acción de la erosión hídrica, el suelo es desprendido por el golpe directo de las gotas de lluvia y por la fricción del agua de escorrentía. El suelo desprendido es transportado por los flujos superficiales hasta los canales de drenaje, por los cuales es sacado de la cuenca o depósitos del cauce.

La producción de sedimentos es calculada por cada HRU con la ecuación modificada de la pérdida universal de suelo. (MUSLE)

$$y = 11.8 (V * q_p)^{0.56} K * C * PE * LS$$

Donde y es la producción de sedimentos desde la subcuenca en t, V es el volumen de escurrimiento superficial para la subcuenca en m^3 , q_p es la tasa de flujo pico en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, K es el factor de erodabilidad del suelo, C es el factor de

manejo, PE es el factor de la práctica de control de erosión, y LS es el factor longitud y pendiente de inclinación.

A la ecuación anterior de la MUSLE, Williams (1995) le hace una pequeña variación para trabajar en el modelo, luego así la ecuación queda:

$$Sed = 11.8 * (Q_{surf} * q_{peak} * area_{hru})^{0.56} * K_{USLE} * C_{USLE} * P_{USLE} * LS_{USLE} * CFRG$$

Donde:

Sed = es el sedimento producido en un día dado en toneladas métricas

Q_{surf} = es el volumen de escorrentía superficial en mm ha⁻¹

q_{peak} = es la tasa de escorrentía pico en m³ s⁻¹

$area_{hru}$ = es el área de la HRU en ha

K_{USLE} = es el factor K USLE de erodabilidad

C_{USLE} = es el factor C USLE de manejo de cobertura

P_{USLE} = es el factor P USLE de prácticas de manejo

LS_{USLE} = es el factor LS USLE topográfico

$CFRG$ = factor de contenido rocoso del primer horizonte del suelo

Algunos de los factores pueden ser introducidos manualmente por el usuario y las bases de datos pueden ser modificadas y actualizadas con datos propios.

2.5. Trabajos realizados con el modelo SWAT

Torres (2004) realizó un trabajo de calibración del Modelo de simulación SWAT para el balance hídrico de la cuenca “El Tejocote”, en Atlacomulco Estado de México, y evaluar su capacidad predictiva para simular la producción de agua, sedimentos, gastos medios y producción de maíz. Los datos utilizados para la

calibración del modelo fueron de 5 años de información climática (1980 a 1984), 62 usos de suelo, 14 unidades de suelo. Los coeficientes de determinación para los datos simulados fueron de 0.94 y 0.874 para producción de agua y sedimentos respectivamente.

Benavides en 2006 realizó un estudio para determinar la factibilidad de crear un mercado de servicios ambientales hidrológicos en la cuenca forestal “Tapalpa” en el estado de Jalisco aplicando el modelo hidrológico SWAT. Después de la etapa de calibración obtuvo un coeficiente de determinación de 0.85 de los escurrimientos medidos con los simulados. Identificó que las subcuencas con mayores escurrimientos fueron aquellas con cobertura agrícola y de pastizales.

Oestreicher en 2008 calibró y validó el modelo SWAT en la cuenca hidrográfica del canal de Panamá para determinar la aplicabilidad de este en la planeación y manejo de cuencas. Aplico diversos escenarios de uso de suelo, entre ellos el cultivo de la piña, además de pastizal y bosque. Los coeficientes de determinación para la calibración y validación de la producción de sedimentos fueron de 0.47 y 0.83 respectivamente, mientras que para el caso de la producción de agua obtuvo valores de 0.78 y 0.82.

En Venezuela Silva (2010) Evaluó la producción de agua con el modelo SWAT en la cuenca media del Río Pao con una superficie de 1 552 km², la cual abastece de agua a varias ciudades de la parte central de Venezuela. La simulación se realizó en el periodo de 1967 a 1983, después del ajuste de parámetros obtuvo coeficiente de correlación de 0.86, error medio absoluto de 7.13 mm y pendiente de la curva e intercepción de 1.02 y 4.05 mm, respectivamente.

Sánchez (2010), realizó un balance hídrico y avaluó la cantidad de agua de la Cuenca Tres Valles con el modelo hidrológico SWAT, en los estados de San Luis Potosí y Tamaulipas. Realizó la calibración de los parámetros mas sensibles que afectan al modelo, posteriormente con una frecuencia de impresión anual obtuvo un coeficiente de determinación de 0.84, mientras que los valores de pendiente e intersección al origen fueron de 1.35 y 14.30 mm respectivamente.

3. OBJETIVOS

3.1. General

Modelar la producción de agua y sedimentos a nivel mensual que existe en la subcuenca del Río Ahuehuepan, Guerrero con el modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tools (SWAT).

3.2. Específicos

Elaborar las bases de datos climáticos y de tipos de suelo que alimentan el modelo SWAT.

Calibrar y validar el modelo SWAT para demostrar que es un instrumento útil para el cálculo de escurrimiento y producción de sedimentos.

4. HIPÓTESIS

La modificación de las variables Curva numérica a la capacidad de agua disponible en el suelo, el coeficiente de agua subterránea, valor de cobertura de USLE, pendiente y erosionabilidad del cauce generan mayor impacto en el modelo SWAT para el cálculo de la producción de agua y sedimentos en la cuenca.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Caracterización de la subcuenca del Río Ahuehuepan

5.1.1. Localización y límites

La Subcuenca del Río Ahuehuepan está ubicada al norte de la ciudad de Iguala, y dentro de la cuenca se encuentra la ciudad de Taxco, ambas ciudades del estado de Guerrero, entre las coordenadas $99^{\circ} 45' 21''$ a $99^{\circ} 30' 24''$ de longitud oeste y entre $18^{\circ} 20' 13''$ a $18^{\circ} 36' 31''$ de latitud norte.

La subcuenca tiene una extensión de 44469.63 ha comprendida casi en su totalidad en el municipio de Taxco de Alarcón con el 87.2% del total de la superficie, sin embargo 4 municipios más ocupan una pequeña porción de la subcuenca estos municipios son Ixcateopan de Cuauhtémoc, Tetipac, Teloloapan e Iguala de Independencia ocupando 8.6%, 1%, 2.7% y 0.5% de la superficie respectivamente (Figura 5.1).

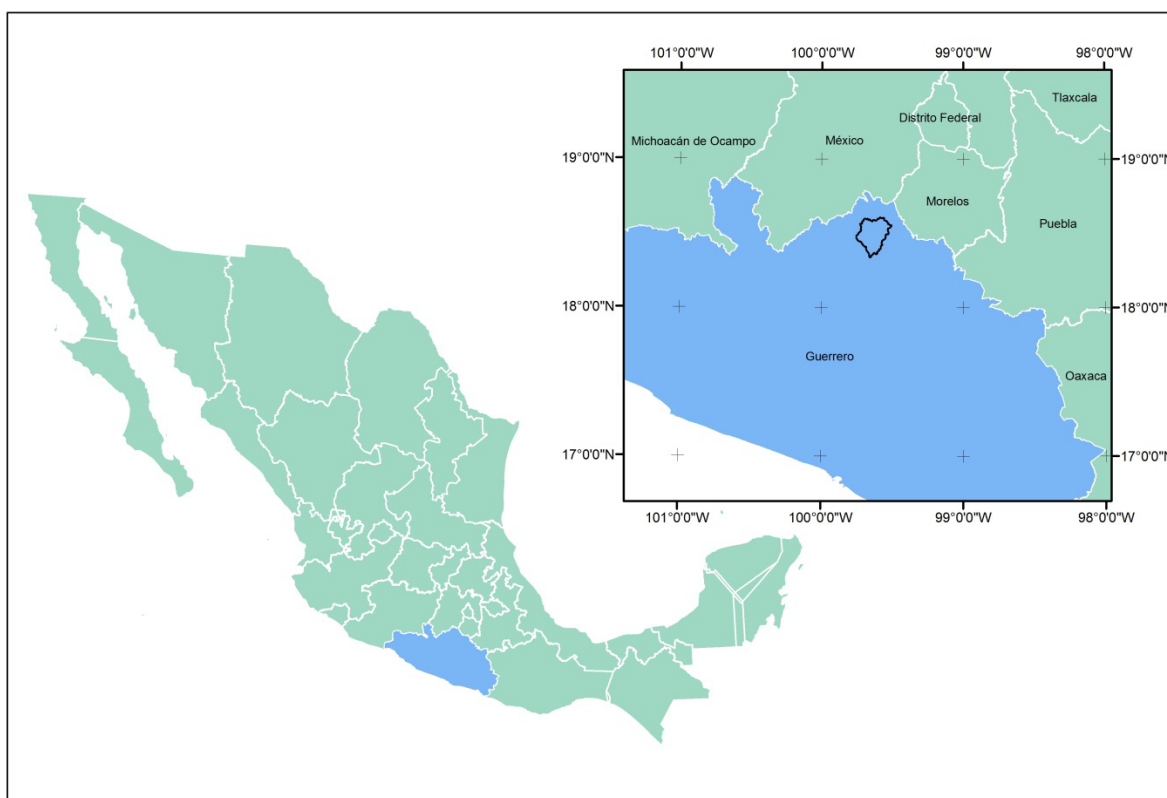


Figura 5.1 Localización de la subcuenca Ahuehuepan

5.1.2. Fisiografía

De acuerdo con INEGI (2001) La subcuenca del río Ahuehuepan queda comprendida en su totalidad en la provincia fisiográfica XII denominada Sierra Madre del Sur, a su vez está representada por 2 Subprovincias, la primera Depresión del Balsas y la segunda Sierras y Valles Guerrerenses.

La provincia de la Sierra Madre del Sur se caracteriza por estar conformada por una serie de montañas y sierras de desniveles considerables; asimismo, se tienen sectores que configuran barrancas y hondonadas más amplias, así como cimas que alcanzan altitudes de poco más de 2,000 msnm, algunas de ellas superan los 2,500 msnm.

La subprovincia Depresión del Balsas es surcada por los ríos Tacámbaro, Cutzamala y Sultepec, presenta una litología bastante compleja ya que comprende rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. El sistema de topoformas dominante corresponde al de sierra alta compleja con cañadas, cuya complejidad radica en la variedad de sus rocas: esquistos, basaltos y aluviones continentales.

La subprovincia de Sierras y Valles Guerrerenses presenta como suelos dominantes los vertisoles y luvisoles. Los sistemas de topoformas que se presentan en la subprovincia son los siguientes: sierras de cumbres tendidas constituido fundamentalmente por basaltos y valle de laderas tendidas con lomerío (constituido por caliza, caliza-lutita y basalto).

En lo que respecta a las zonas de menor relieve asociadas con lomeríos y valles, estos elementos de terreno presenta elevaciones máximas de 2 000 msnm con un drenaje dendrítico de alta densidad, en donde los cauces son estrechos y las pendientes de aproximadamente el 10%.

5.1.3. Geología

La geología general está representada por un conjunto de rocas de origen sedimentario, ígneo y metamórfico, se considera que las relaciones que guarda esta diversidad de rocas asociadas a cada terreno tectonoestratigráfico definen la

evolución de los mismos dentro de un régimen de deformación compresiva. En el Cuadro 5.1 se puede observar cada uno de los tipos de rocas en el cual se puede observar que la Caliza es la que ocupa la mayor superficie seguida por la Lutita-Arenisca y la Metasedimentaria respectivamente.

Cuadro 5.1 Tipos de rocas presentes en la subcuenca Rio Ahuehuepan.

CLAVE	CLASE	TIPO	ERA	SUPERFICIE (ha)	% con respecto al total
Js-Ki(Ms)	Metamórfica	Metasedimentaria	Mesozoico	7377.14	16.59
Js-Ki(Mv)	Metamórfica	Metavolcánica	Mesozoico	250.05	0.56
Ki(cz)	Sedimentaria	Caliza	Mesozoico	20124.35	45.25
Ks(lu-ar)	Sedimentaria	Lutita-Arenisca	Mesozoico	7408.86	16.66
Q(cg)	Sedimentaria	Conglomerado	Cenozoico	159.90	0.36
Ti(cg)	Sedimentaria	Conglomerado	Cenozoico	2732.30	6.14
Ti(Ta)	Ígnea extrusiva	Toba Ácida	Cenozoico	6407.21	14.41
Ts(B)	Ígnea extrusiva	Basalto	Cenozoico	9.84	0.02
TOTAL				44469.63	100

Fuente: INEGI, 2000

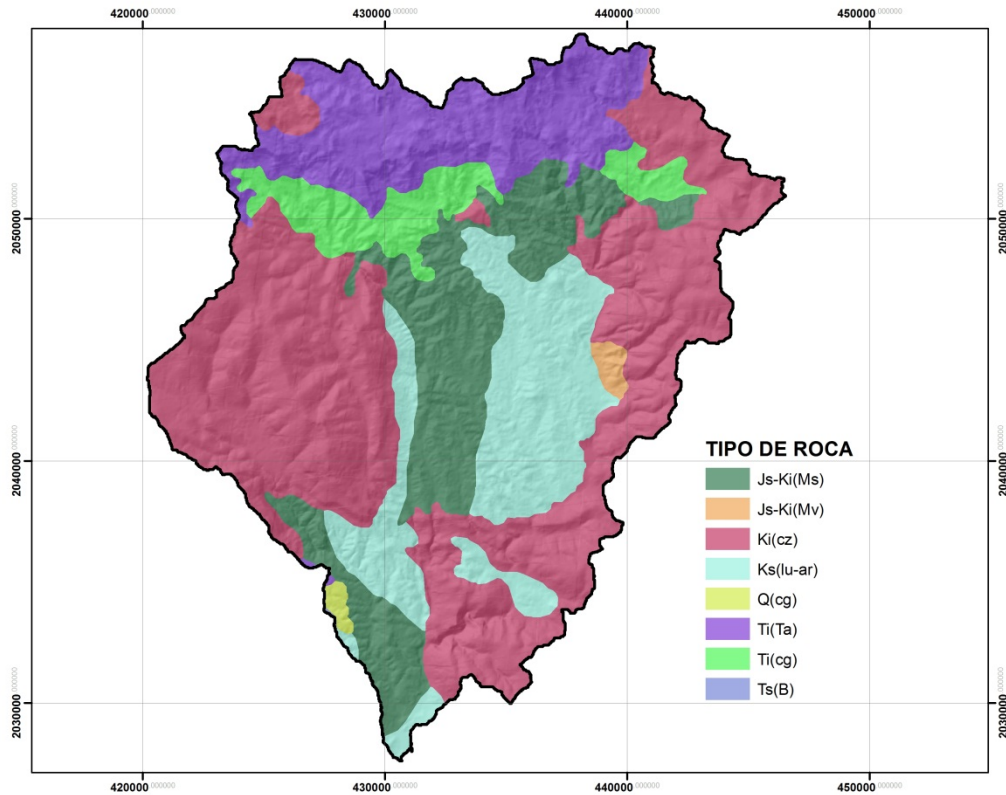


Figura 5.2 Tipo de rocas en la subcuenca del Río Ahuehuepan

A nivel regional se puede decir que las rocas metamórficas son las de mayor antigüedad y se considera que se encuentran conformando el basamento del Terreno Mixteco, sobre el cual se depositó una secuencia sedimentaria transgresiva (conglomerados, areniscas y lutitas) de Edad Paleozoica y posteriormente en el Mesozoico la sedimentación se tornó gradualmente calcárea hasta llegar a implantarse durante el Cretácico Inferior la vasta Plataforma Guerrero Morelos, sobre la cual se depositaron secuencias carbonatadas de subambientes de borde (arrecife), lagunares y restringida (evaporitas), posteriormente queda interrumpida por el depósito de una secuencia flysch durante el Cretácico tardío.

5.1.4. Edafología

La subcuenca presenta gran diversidad en los tipos de suelos, la descripción de las unidades edafológicas que la caracterizan corresponde a la presentada por

INEGI en su carta edafológica escala 1:250,000 del año 2007, la cual contiene la clasificación de la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB, 1999), elaborado por el Centro Internacional de Referencia e Información en Suelos (ISRIC) y la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO/UNESCO). En el siguiente cuadro se puede observar cuales son los grupos de suelos que dominan en la zona de estudio, siendo los Luvisoles, Leptosoles y Phaezoem los que abarcan mayor superficie.

Cuadro 5.2 Grupos de suelos presentes en la subcuenca Rio Ahuehuepan.

GRUPO PRINCIPAL	CLAVE	Superficie (ha)	Superficie por grupo de suelo (ha)	% Con respecto al total
ANDOSOL	ANdy+CMdy/2R	421.53	421.53	0.95
CALISOL	CLha+PHca/2	92.55	92.55	0.21
	CMeu+LVcr/2	6.62		
CAMBISOL	CMeucr+PHha+CLha/2R	1711.84	2899.19	6.52
	CMeule+CMeucr/2	1180.74		
KASTAÑOZEM	KScr+LPeuli/2	1033.06	1033.06	2.32
	LPcali+LPhurz/2	2360.14		
	LPeuli/2	861.73		
	LPeuli+LPrz/2	1111.48		
LEPTOSOL	LPeuli+LPrz/2	2491.22	13669.01	30.74
	LPeuli+LPrz+RGca/2	780.84		
	LPeuli+LVcr/2	1342.71		
	LPhum+LPcali+PHcale/2	4557.49		
	LPhurz+LPcali+LVcr/2	163.40		
	LPrz+LPcali+LVcr/2	510.21	510.21	1.15
	LVcr+LPrz+LPcali/2R	2318.39		
	LVcr+LPrz+LPeuli/2R	857.74		
	LVcr+LVha+LPeuli/2R	849.60		
LUVISOL	LVcr+PHlv/2R	3053.33	14252.15	32.05
	LVhule+CMcr+LPeuli/2	146.41		
	LVhule+CMcr+LPeuli/2	11.25		
	LVhule+LVcrvr+CMeucr/2	431.34		
	LVhule+LVcrvr+CMeucr/2	6584.08		

PHAEZEM	PHcale+CMeucr/2	10419.51	10929.26	24.58
	PHle+PHca/2	509.75		
ZU	ZONA URBANA	662.68	662.68	1.49
TOTAL=		44469.63		100

Fuente: INEGI, 2004.

ANDOSOL (AN)

Los Andosoles acomodan a los suelos que se desarrollan en eyecciones o vidrios volcánicos bajo casi cualquier clima (excepto bajo condiciones climáticas hiperáridas). Sin embargo, los Andosoles también pueden desarrollarse en otros materiales ricos en silicatos bajo meteorización ácida en climas húmedos y perhúmedo (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007).

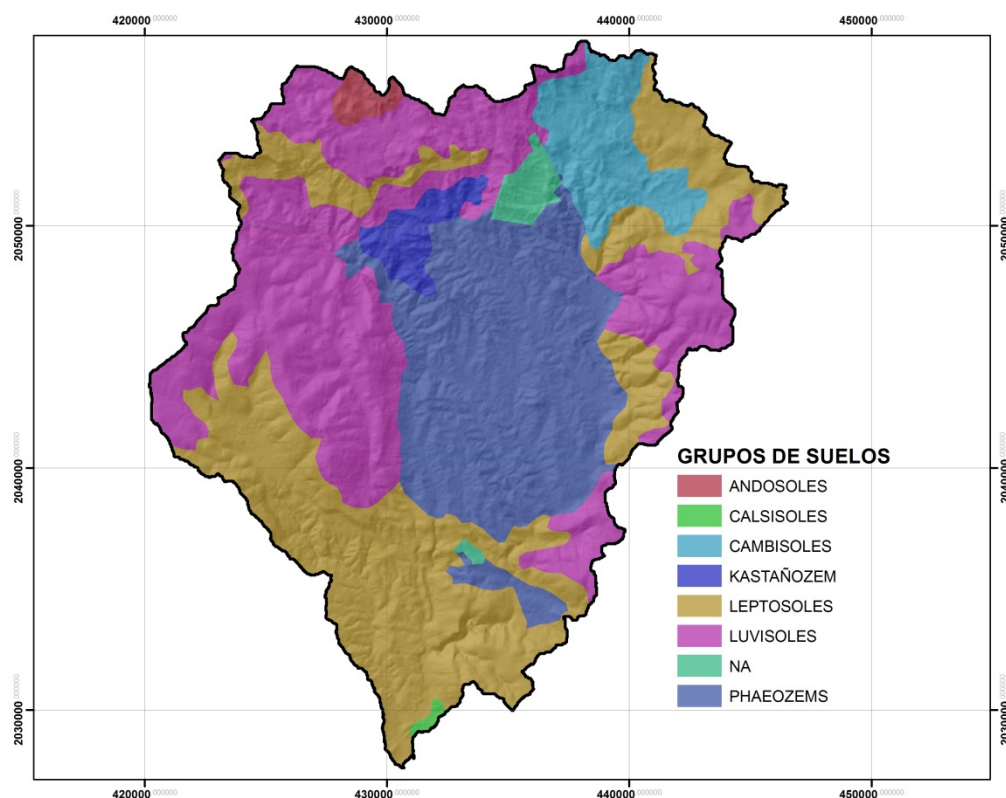


Figura 5.3 Grupos de suelos en la subcuenca del Río Ahuehuepan

CALCISOL (CL)

Los Calcisoles acomodan suelos en los cuales hay una acumulación secundaria sustancial de calcáreo. Los Calcisoles están muy extendidos en ambientes áridos y semiáridos, con frecuencia asociados con materiales parentales altamente calcáreos. Los Calcisoles típicos tienen un horizonte superficial pardo pálido; la acumulación sustancial de calcáreo secundario ocurre dentro de 100 cm de la superficie del suelo (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007).

CAMBISOL (CM)

Los Cambisoles combinan suelos con formación de por lo menos un horizonte subsuperficial incipiente. La transformación del material parental es evidente por la formación de estructura y decoloración principalmente parduzca, incremento en el porcentaje de arcilla, y/o remoción de carbonatos (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007).

KASTANOZEMS (KS)

Los Kastanozems acomodan suelos de pastizales secos, los Kastanozems tienen un perfil similar al de los Chernozems pero el horizonte superficial rico en humus es de menor espesor y no tan oscuro como el de los Chernozems y muestran acumulaciones de carbonatos secundarios más prominentes. El color castaño-pardo del suelo superficial se refleja en el nombre Kastanozem (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007).

LEPTOSOL (LP)

Los Leptosoles son suelos muy someros sobre roca continua y suelos extremadamente gravillosos y/o pedregosos. El material parental está constituido de materiales no consolidados con menos de 20% (en volumen) de tierra fina (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007). Estos se ubican principalmente en la parte sur y en pequeñas porciones en la parte norte de la subcuenca, abarcando un 30.74% de la superficie.

LUVISOL (LV)

Los Luvisoles son suelos que tienen mayor contenido de arcilla en el subsuelo que en el suelo superficial como resultado de procesos pedogenéticos (especialmente migración de arcilla) que lleva a un horizonte subsuperficial árgico. Los Luvisoles tienen arcillas de alta actividad en todo el horizonte árgico y alta saturación con bases a ciertas profundidades (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007). Este grupo de suelos se ubica principalmente en la zona norte y oeste de la subcuenca, abarcando una superficie de 32.05% del total de la subcuenca.

PHAEZOEM (PH)

Los Phaeozems acomodan suelos de pastizales relativamente húmedos y regiones forestales en clima moderadamente continental. Los Phaeozems son muy parecidos a Chernozems y Kastanozems pero están más intensamente lixiviados. Consecuentemente, tienen horizonte superficial oscuro, rico en humus que, en comparación con Chernozems y Kastanozems, son menos ricos en bases. Los Phaeozems pueden o no tener carbonatos secundarios pero tienen alta saturación con bases en el metro superior del suelo (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007). Se ubican en la parte central de la subcuenca abarcando un 24.58% del total de la superficie.

5.1.5. Clima

De acuerdo a la clasificación climática de Köppen modificada por García y al mapa elaborado por CONABIO en 2001, la subcuenca del río Ahuehuepan presenta una gran variación de climas a pesar de no ser una superficie muy extensa, estos climas van desde los climas cálidos hasta los templados (Figura 5.4).

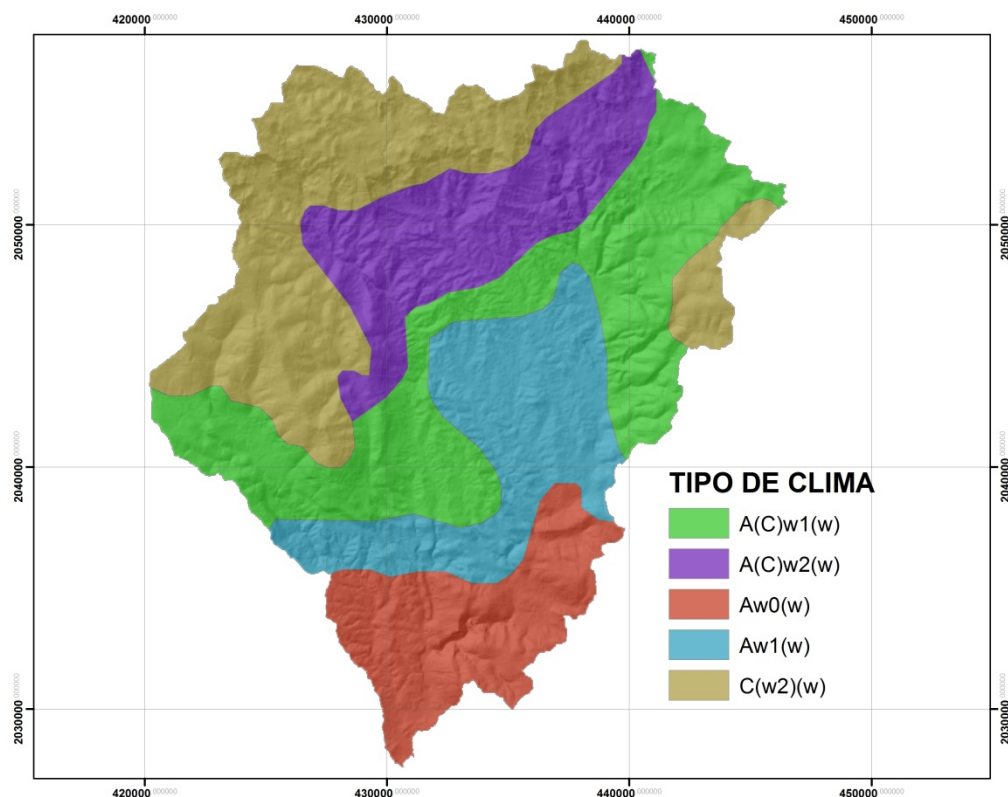


Figura 5.4 Tipos de climas en la subcuenca del Río Ahuehuepan.

A continuación en el Cuadro 5.3 se presenta la descripción de cada uno de los tipos de climas presentes en la subcuenca Ahuehuepan.

Cuadro 5.3 Climas presentes en la subcuenca del Río Ahuehuepan.

CLAVE CLIMATICA	DESCRIPCIÓN
Aw0	Cálido subhúmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C. Precipitación del mes más seco entre 0 y 60 mm; lluvias de verano con índice P/T menor de 43.2 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
(A)C(w2)	Semicálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. Precipitación del mes más seco menor a 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

(A)C(w1)	Semicálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. Precipitación del mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% anual.
C(w2)	Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual.
Aw1	Cálido subhúmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C. Precipitación del mes más seco entre 0 y 60 mm; lluvias de verano con índice P/T menor de 43.2 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total

5.1.6. Hidrología

La cuenca esta ubicada en la región hidrológica 18 balsas (R-18). A su vez la subcuenca del rio Ahuehuepan esta dividida en 5 microcuencas: Taxco de Alarcón, Cacalotenango, Paintla, Huixtac y San Juan Unión.

El drenaje de la Subcuenca es de tipo dendrítico subparalelo, conformado por corrientes perenes y colectores intermitentes de primero, segundo, tercer y cuarto orden, la dirección de los escurrimientos es de norte a sur. Además existe una red de canales y acueductos superficiales y subterráneos que se conectan con varios tramos del cause para dar salida a la red hidrológica de la cuenca. Además existen varios manantiales sobre todo en la parte alta, también existen dos acueductos subterráneos que provienen fuera de la cuenca, uno que entra en la parte norte de la cuenca proveniente del rio Chontacoatlan y el otro en la parte oeste (Figura 5.5).

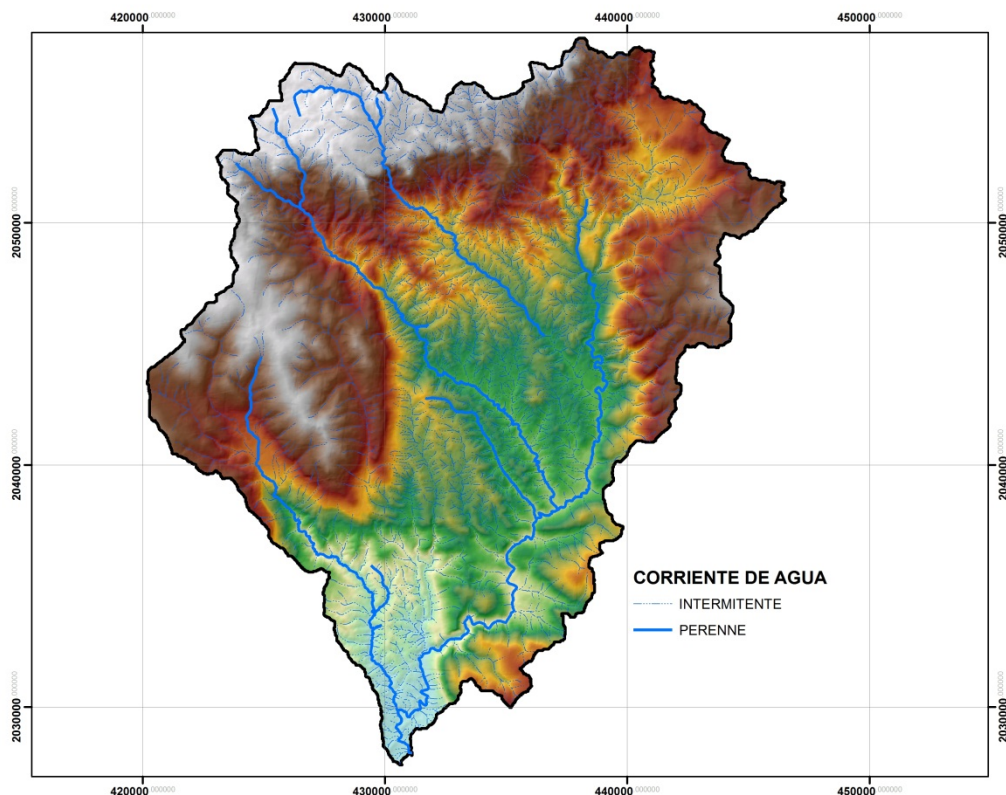


Figura 5.5 Hidrología superficial de la subcuenca del Río Ahuehuepan.

5.1.7. Uso de suelo y vegetación

La subcuenca del río Ahuehuepan presenta gran diversidad en cuanto a flora y fauna gracias a su ubicación geográfica, condiciones topográficas y climáticas. Dentro de la cuenca podemos encontrar desde bosque de pino hasta selvas bajas caducifolias pasando por ecosistemas como bosque de pino-encino, encino-pino, bosque mesófilo y bosque de táscate.

Bosque de Quercus

Esta comunidad vegetal formada por diferentes especies de encinos o robles del género *Quercus*; estos bosques generalmente se encuentran como una transición entre los bosques de coníferas y las selvas, pueden alcanzar desde los 4 hasta los 30 m de altura más o menos abiertos o muy densos (INEGI, 2005). Algunas poblaciones de encinos pueden medir 4 o 5 m, estos carecen de tronco único bien definido, mientras que otros solo miden de 2 a 2.5 m de alto los cuales

generalmente presentan una ramificación primaria bien definida. Las hojas y el tamaño depende de las condiciones climáticas presentes, pero en general donde existe menor humedad las hojas son más pequeñas (Rzedowski, 2006).

Los encinares pueden formar masas puras aunque también se presentan diferentes especies del mismo género, frecuentemente se encuentran pinos y algunos otros árboles. En las comunidades de encinos se encuentran epífitas que pueden ser fanerógamas de gran tamaño, líquenes y musgos. La presencia y variabilidad de epífitas depende en gran medida de la humedad atmosférica y sus oscilaciones durante el año. También se presenta orquídeas, bromeliáceas y otros grupos termófilos que a medida que disminuyen las temperaturas van desapareciendo (Rzedowski, 2006).

En los bosques de *Quercus*, es común encontrar especies de coníferas, principalmente *Juniperus* y *Pinus*, formando un bosque mixto. Estos bosques se localizan en zonas del parque "El Huixteco", Puerto Oscuro, La Cascada, al SO de Chichila, en Julianita, rumbo a Tlmacazapa y al S de Tetipac, primordialmente.

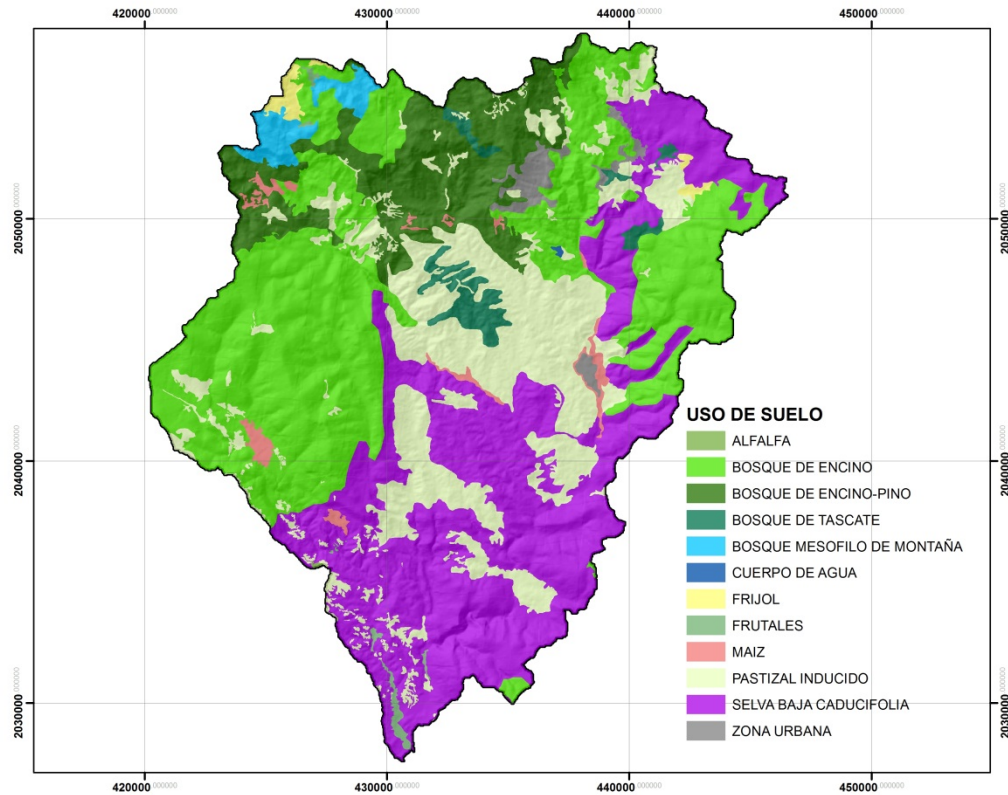


Figura 5.6 Usos de suelo presentes en la subcuenca del Río Ahuehuepan

Bosque de Coníferas

Los bosques de coníferas de la zona se localizan desde los 1250 hasta los 2500 msnm, principalmente Ixcateopan, El Ancón, Tenoxcotitlan y Noxtepec, al noreste y noroeste de Taxco. Son Bosques muy perturbados.

En este tipo de bosque el estrato arbóreo está dominado principalmente por Pinus, Juniperus o una mezcla de ambos, formado en el primer caso bosques más altos ubicados en las zonas más húmedas.

Bosque de Pino-Encino

Los bosques mezclados de pino-encino, con predominancia de una u otra especie, Se encuentran en las áreas de transición entre los bosques de encino y los de pino, predominando los primeros a menor altitud y los de pinos a mayor altitud.

Aun cuando los géneros de los árboles asociados a los bosques de coníferas y encinos son de afinidad netamente boreal, en este mismo nivel el sotobosque de estas comunidades está compuesto en proporciones similares (37%) por elementos de afinidad neártica y neotropical. También hay un componente endémico muy importante de 27% de los géneros (Rzedowski 1978).

Bosque Mesófilo de Montaña

Se desarrolla en las zonas más húmedas de la zona de estudio, en lugares protegidos como cañadas o laderas de poca exposición y zonas protegidas del parque Cerro Huixteco y San Miguel Huertas. Generalmente se encuentra formado un mosaico con bosques húmedos de *Quercus* o con pinos. Se localiza en altitudes que van de los 2200 a los 2400 msnm.

Se trata de un conjunto de comunidades de gran diversidad en su estructura y composición, que comparten ambientes templados muy húmedos (y pueden estar presentes en algunos sitios tropicales), tanto en términos de la precipitación media anual, como en términos de la persistencia de la humedad atmosférica muy alta, durante casi todo el año (Rzedowski 1978). Son comunidades muy densas y umbrías, con abundantes epífitas, que incluyen generalmente una abundante cubierta de musgos en los troncos y ramas de los árboles de la vegetación primaria. La mayoría de los árboles del bosque mesófilo según Rzedowski (1978) son perennifolios.

Pastizal

El pastizal se desarrolla en suelos de mediana profundidad, en mesetas, fondos de valles, y laderas poco inclinadas, generalmente de naturaleza ígnea, en altitudes de 1100 a 2500 m, las temperaturas medias anuales varían de 12 a 20°C, todos los años se presentan heladas, la precipitación media anual va de 300 a 600 mm, de 6 a 9 meses secos (Rzedowski, 2006).

La altura media de los zacatonales va de 20-70 cm, pero difiere de acuerdo a las presiones a las que está sometido en particular a la del ganado, solo se observa

verde en época de lluvias. La estructura de los zacatales se divide en estrato herbáceo y rasante, si llegan a presentarse plantas leñosas estas juegan un papel secundario, esto en general no ocurre (Rzedowski, 2006).

Bosque de Táscate

También conocido a veces como cedro, pero más comúnmente como táscate o enebro, el género *Juniperus* forma bosques de corta estatura y más bien abiertos, en los cuales es frecuente la intervención de árboles de otros géneros, sobre todo de *Pinus* y *Quercus* (INEGI, 2005); este tipo de bosque se desarrolla en zonas de menor humedad, dentro de las regiones de clima templado subhúmedo, por lo general en zonas de transición con vegetación de zonas áridas y tropicales subhúmedas.

Selva Baja Caducifolia

Se presentan en zonas con promedios de temperaturas anuales superiores a 20 °C y precipitaciones anuales de 1 200 mm como máximo, aunque usualmente son del orden de los 800 mm, con una temporada seca que puede durar hasta 7 u 8 meses. Las selvas de este tipo incluyen los llamados tintales (dominados por *Haematoxylon campechianum*), bucidales (dominados por *Bucida spinosa*) y pucteales (dominados por *Bucida buceras*), entre otras comunidades (INEGI 2006; Olmstead y García 1997). En algunos casos integran un número importante de formas de vida suculentas (entre las que destacan *Cephalocereus gaumeri*, *Stenocereus griseus* y *Pachycereus gaumeri* (Rzedowski, 2006). Esta comunidad vegetal está representada en sobre todo en las porciones sureste, suroeste y en la parte central de la subcuenca.

5.2. Materiales utilizados

En el presente trabajo se utilizaron diversos materiales e información. El modelo SWAT requiere de datos de dos tipos, los primeros que incluyen la información física del paisaje, tales como la topografía, la ubicación de cuerpos de agua, el uso de suelo y los tipos de suelos; y los relacionados con la información temporal que

incluyen datos climáticos usados para la simulación del modelo y los datos de escurrimientos y sedimentos necesarios para la calibración y validación del modelo.

Se utilizaron modelos digitales de elevación elaborados por INEGI escala 1:50,000 con tamaño de pixel de 30 metros, carta edafológica escala 1:250,000 elaborada por INEGI, para el caso de los usos de suelo presentes se utilizaron imágenes de Satélite LANDSAT TM.

Para la obtención de datos climáticos fue necesario el uso del software ERICC III así como la información de los observatorios del servicio meteorológico nacional.

5.3. Metodología

5.3.1. Delimitación automática de la cuenca

El primer paso que se tiene que hacer en el proceso de modelación hidrológica en SWAT es la delimitación de la cuenca. Con la ayuda del modelo digital de elevación (MDE) previamente georeferenciado el modelo SWAT genera las corrientes de agua y los puntos de descarga de agua que se pueden presentar en la zona que cubre el MDE. La interface del modelo SWAT permite agregar o quitar puntos de entrada y salida de agua, en este caso se agregó el punto correspondiente a la estación de aforo que posteriormente se utilizó para la calibración del modelo.

5.3.2. Mapa digital de uso de suelo y vegetación

Para la generación del mapa de uso de suelo y vegetación se utilizaron imágenes de satélite LANDSAT TM y el servidor de ortofotos de INEGI. Por medio de un proceso de fotointerpretación de las imágenes se digitalizaron los usos de suelo que se presentan en el área, posteriormente se realizaron recorridos de campo para verificar los usos de suelo así como los principales cultivos presentes en el área.

EL modelo SWAT contiene en su base de datos más de 100 coberturas, incluidos los cultivos tradicionales en México como maíz, frijol, papa, hortalizas entre otros.

En el presente estudio se realizó una homologación de las coberturas de uso de suelo de nuestra zona de estudio con la base de datos del modelo.

En el Cuadro 5.4 podemos observar los usos de suelo presentes en la subcuenca y el valor que se asignó en la homologación con la base de datos del modelo SWAT.

Cuadro 5.4 Reclasificación de polígonos de uso de suelo y vegetación

Clave del mapa generado	Clave SWAT
Alfalfa	Alfalfa
Bosque de encino	Oak
Bosque de encino-pino	Oak
Bosque de táscate	Pine
Bosque mesófilo de montaña	Forest-Evergreen
Frijol	Green Beans
Frutales (Mango)	Agricultural Land-Generic
Maíz	Corn
Pastizal inducido	Pasture
Selva baja caducifolia	Forest-Deciduous

5.3.3. Mapa digital de tipos de suelos

La capa de tipos de suelos se basó en la carta edafológica elaborada por INEGI escala 1:250,000 con clave E1405.

La interface ArcGIS® SWAT posee una base de datos con suelos de Estados Unidos de Norteamérica, por lo que hay que adecuar la base de datos de México para satisfacer los parámetros de entrada a la interface.

A continuación se enlistan los parámetros requeridos y la forma en que se obtuvieron estos. Algunos son de fácil acceso ya que son explícitos en los mapas de INEGI (escala 1:250,000) mientras que para otros fue necesaria la elaboración de perfiles en campo de cada unidad de suelo presente en la subcuenca.

A continuación se muestra una descripción de las variables en el archivo de entrada de suelo y se enlistan en el orden en que aparecen en el archivo.

SNAM: Se refiere al nombre del suelo y puede ser obtenido de las tablas contenidas en el anexo de unidades de respuesta hidrológica (Arnold *et al.*, 2002b), para el caso del presente trabajo se utilizaron las claves generadas por INEGI.

NLAYERS: Es el número de capas que contiene el perfil, el cual fue obtenido a partir de la información recopilada en campo mostrada en el Anexo 1.

HYDGRP: Es el grupo hidrológico de suelo. El Servicio de Conservación de los Recursos Naturales (NRCS, por sus siglas en ingles) clasifica a los suelos en cuatro grupos hidrológicos, basados en sus características de infiltración. Este parámetro se obtuvo del Cuadro 5.5.

Cuadro 5.5 Propiedades hidrológicas de suelos con base en su textura.

Clase textural	Capacidad de agua disponible (cm/cm)	Conductividad hidráulica saturada (mm/hr)	Grupo hidrológico de suelo
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	0.9	0.51	D

Fuente: Wanielista (1990)

SOL_ZMX: Es la profundidad máxima de enraizamiento, se refiere a la capa del fondo del perfil del suelo. En este caso se utilizó la profundidad de la última capa del perfil de suelo.

ANION_EXCL: Es una fracción de la porosidad (espacio vacío) donde los aniones son excluidos. En este caso no se cuenta con la información necesaria para calcular este parámetro, sin embargo el modelo toma el valor de 0.5.

SOL_CRK: Es el volumen potencial o volumen máximo de ruptura del perfil del suelo, se expresa como una fracción del volumen total. Este dato al igual que el anterior es opcional y en caso necesario el modelo le asigna el valor de 0.5.

TEXTURE: Nombre de la textura que presenta la capa. Esta variable es opcional ya que no afecta los cálculos realizados por el modelo y puede permanecer en blanco.

SOL_Z: Es la profundidad desde la superficie del suelo hasta la parte mas baja de cada capa del perfil. La información fue obtenida en campo.

SOL_BD: Es la densidad aparente, se calculó en laboratorio para cada capa mediante el método de la parafina.

SOL_AWC: Agua disponible por las plantas, también llamada capacidad de agua disponible.

SOL_K: Es la conductividad hidráulica saturada, relaciona la proporción del flujo de agua y el gradiente hidráulico.

Utilizando el software Soil and Water Characteristics (Figura 5.7), el cual pide como datos de entrada la textura y la material orgánica, se calcularon los parámetros de agua disponible y conductividad hidráulica saturada.

Las ecuaciones para el cálculo de estos parámetros se puede observar en el Cuadro 5.6 y 5.7.

Cuadro 5.6 Formulas empleadas por Soil Water Characteristics

Variable	Ecuación	R ² /S _e	Eq.
Regresiones de humedad			
Θ ₁₅₀₀	$\Theta_{1500} = \Theta_{1500t} + (0.14 * \Theta_{1500t} - 0.02)$ $\Theta_{1500t} = -0.024S + 0.487C + 0.006OM$ $+ 0.005(S * OM) - 0.013(C * OM)$ $+ 0.068(S * C) + 0.031$	0.86/0.02	1
Θ ₃₃	$\Theta_{33} = \Theta_{33t} + [1.283(\Theta_{33t})^2 - 0.374(\Theta_{33t}) - 0.015]$	0.63/0.05	2

	$\begin{aligned}\Theta_{33t} = & -0.251S + 0.195C + 0.011OM \\ & + 0.006(S * OM) - 0.027(C * OM) \\ & + 0.452(S * C) + 0.299\end{aligned}$		
$\Theta(S-33)$	$\begin{aligned}\Theta(S-33) = & \Theta(S-33)_t + (0.636u(\Theta(S-33))_t - 0.107) \\ & - 0.018(S * OM) - 0.027(C * OM) \\ & - 0.584(S * C) + 0.078\end{aligned}$	0.36/0.06	3
ψ_e	$\begin{aligned}\psi_e = & \psi_{et} + (0.02 \psi_{et}^2 - 0.113 \psi_{et} - 0.70) \\ \psi_{et} = & -21.67S - 27.93C - 81.97 \Theta(S-33) \\ & + 71.12(S * \Theta(S-33)) + 8.29(C * \Theta(S-33)) \\ & + 14.05(S * C) + 27.16\end{aligned}$	0.78/2.9	4
Θ_S	$\Theta_S = \Theta_{33} + \Theta(S-33) - 0.097S + 0.043$	0.29/0.04	5
ρ_N	$\rho_N = (1 - \Theta_S)^{2.65}$		6
ρ_{DF}	$\rho_{DF} = \rho_N * DF$		7
Θ_{S-DF}	$\Theta_{S-DF} = 1 - (\rho_{DF} / 2.65)$		8
Θ_{33-DF}	$\Theta_{33-DF} = \Theta_{33} - 0.2(\Theta_S - \Theta_{S-DF})$		9
$\Theta_{(S-33)DF}$	$\Theta_{(S-33)DF} = \Theta_{S-DF} - \Theta_{33-DF}$		10
	Tensión de humedad		12
$\psi_{(1500-33)}$	$\psi_{\Theta} = A(\Theta) - B$		13
$\psi_{(33-\psi_e)}$	$\psi_e = 33.0 - [(\Theta - \Theta_{33})(33.0 - \psi_{\Theta}) / (\Theta_S - \Theta_{33})]$		14
$\Theta_{(\psi_{\Theta}-0)}$	$\Theta = \Theta_S$		15
A	$A = \exp(\ln 33 + B \ln \Theta_{33})$		16
B	$B = [\ln(1500) - \ln(33)] / [\ln(\Theta_{33}) - \ln(\Theta_{1500})]$		
	Conductividad-Humedad		
K_s	$K_s = 1930(\Theta_S - u_{33})$		17
K_b	$K_b = K_s (\Theta / \Theta_S)^{[3 + (2-\lambda)]}$		18
λ	$\lambda = 1 / B$		19
	Efectos de la grava		
R_v	$R_v = (\alpha R_w) / [1 - R_w (1 - \alpha)]$		20
ρ_B	$\rho_B = \rho_N (1 - R_v) + (R_v * 25)$		21

PAW _B	$PAW_B = PAW(1 - R_v)$	22
K _b /K _s	$K_b / K_s = (1 - R_w / [1 - R_w (1 - 3 \alpha / 2)])$	22
Efectos de salinidad		
ψ_o	$\psi_o = 36EC$	23
ψ_{oe}	$\psi_{oe} = (\theta_s / \theta) (36EC)$	24

Fuente: Saxton, 2006.

Cuadro 5.7 Definición de los símbolos

Símbolo	Definición
A, B	Coefficientes de humedad-tensión, Ec. [11]
C	Arcilla, % w
DF	Factor de ajuste de densidad (0.9-1.3)
EC	Conductividad eléctrica de suelo saturado dS m ⁻¹ (dS/m = mili-mho cm ⁻¹)
FC	Humedad a capacidad de campo (33 kPa), %v
OM	Materia orgánica, %w
PAW	Humedad disponible en la planta (33–1500 kPa, matriz de suelo), %v
PAW _B	Humedad disponible en la planta (33–1500 kPa, volumen de suelo), %v
S	Arena, %w
SAT	Saturación de humedad (0 kPa), %v
WP	Punto de marchites permanente (1500 kPa), %v
$\theta\psi$	Tensión de humedad Y, %v
θ_{1500t}	1500 kPa humedad, primera solución, %v
θ_{1500}	1500 kPa humedad, %v
θ_{33t}	33 kPa humedad, primera solución, %v
θ_{33}	33 kPa humedad, densidad normal, %v
θ_{33-DF}	33 kPa humedad, densidad ajustada, %v
$\theta(S-33)t$	SAT-33 kPa humedad, primera solución, %v
$\theta(S-33)$	SAT-33 kPa humedad, densidad normal %v
$\theta(S-33)DF$	SAT-33 kPa humedad, densidad ajustada, %v
θ_s	Humedad saturada (0 kPa), densidad normal, %v
θ_s-DF	Humedad saturada (0 kPa), densidad ajustada, %v
ψ_θ	Tensión de humedad u, kPa
ψ_{et}	Tensión del aire que entra, primera solución, kPa
ψ_e	Tensión del aire que entra (presión de burbujas), kPa
K _s	Conductividad saturada (matriz de suelo), mm h ⁻¹
K _b	Conductividad saturada (volumen de suelo), mm h ⁻¹
K _θ	Conductividad no saturada u, mm h ⁻¹
ρ _N	Densidad normal, g cm ⁻³

ρ_B	Densidad aparente , g cm ⁻³
ρ_{DF}	Densidad ajustada, g cm ⁻³
λ	Pendiente de la curva logarítmica de tensión-humedad
α	Densidad matricial/densidad de grava (2.65) $5 r/2.65$
R_v	Volumen de fracción de gravas (decimal), g cm ²³
R_w	Peso de la grava en fracción (decimal), g g ²¹
ψ_O	Potencial osmótico $0 = O_s$, kPa
ψ_{O_e}	Potencial osmótico $0 < O_s$, kPa

Fuente: Saxton, 2006.

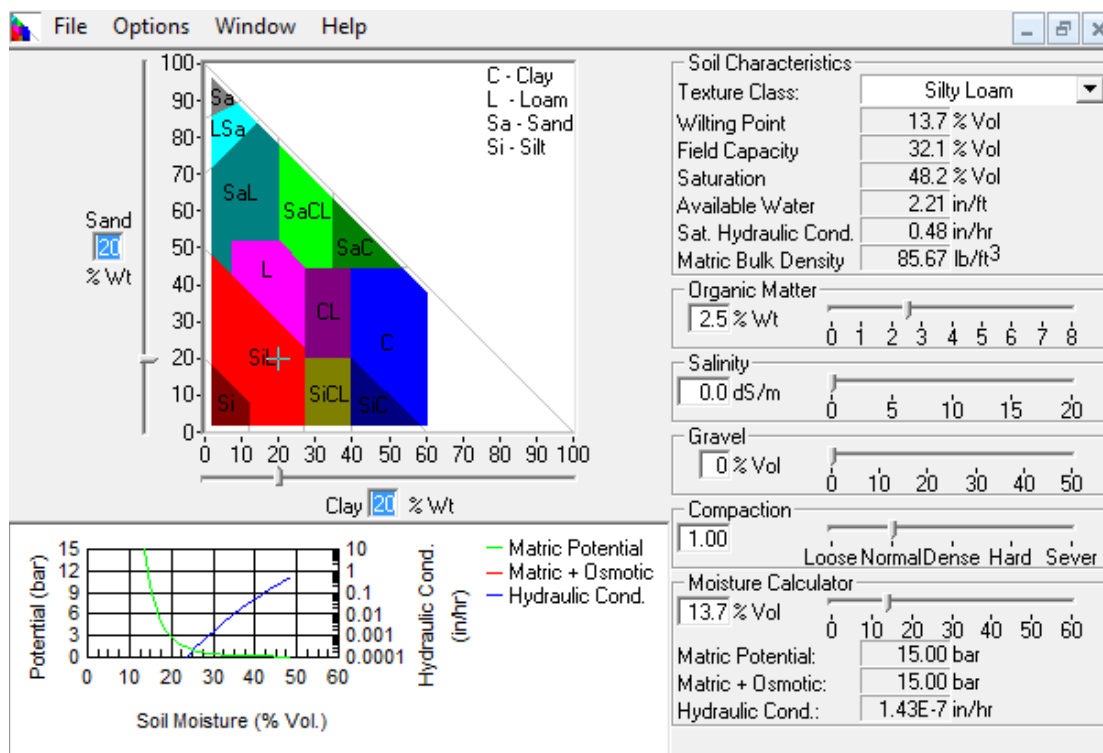


Figura 5.7 Interface del programa Soil Water Characteristics

SOL_CBN: Es el contenido de carbono orgánico en porcentaje, este parámetro se calculó en laboratorio asignando el valor de porcentaje de materia orgánica.

CLAY: Es el contenido de arcilla (% de peso del suelo).

SILT: Es el contenido de limo (% de peso del suelo).

SAND: Es el contenido de arena (% de peso del suelo)

Los valores de arena, limo y arcilla se obtuvieron en laboratorio con el método del hidrómetro de Bouyoucos (Anexo 1).

ROCK: Es el contenido de fragmentos de roca (% del peso total). Los valores se obtuvieron durante el proceso de tamizado utilizando el porcentaje de la muestra que superaba los 2 mm.

SOL_ALB: Albedo del suelo, es la cantidad de radiación solar que refleja por un cuerpo, expresado como una fracción. En este caso se utilizó el color del suelo con los valores reportados por Sellers (1974).

USLE_K: Se refiere al valor de K de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, este factor se determinó con base en la textura y el tipo de suelo de acuerdo con el Anexo 2.

5.3.4. Definición de unidades de respuesta hidrológica

Una vez creadas las capas de uso de suelo y tipos de suelo en formato shp, el siguiente paso es asignar a cada polígono de suelos su respectiva unidad en la base de datos de SWAT para sobreponer los valores de uso de suelo y de suelo y así dar lugar a uno de los elementos fundamentales de análisis del SWAT las Unidades de Respuesta Hidrológica (Hydrologic Response Unit, HRU).

5.3.5. Datos climáticos

Con la ayuda del Extractor Rápido de Información Climatológica se obtuvieron los valores diarios de precipitación y temperatura, en un inicio se tenían 10 estaciones dentro de la cuenca como a sus alrededores, sin embargo muchas de estas presentaban series de años incompletos por lo que se tuvieron que depurar quedando solamente 3 estaciones (Figura 5.8) con datos de 1962 a 2009.

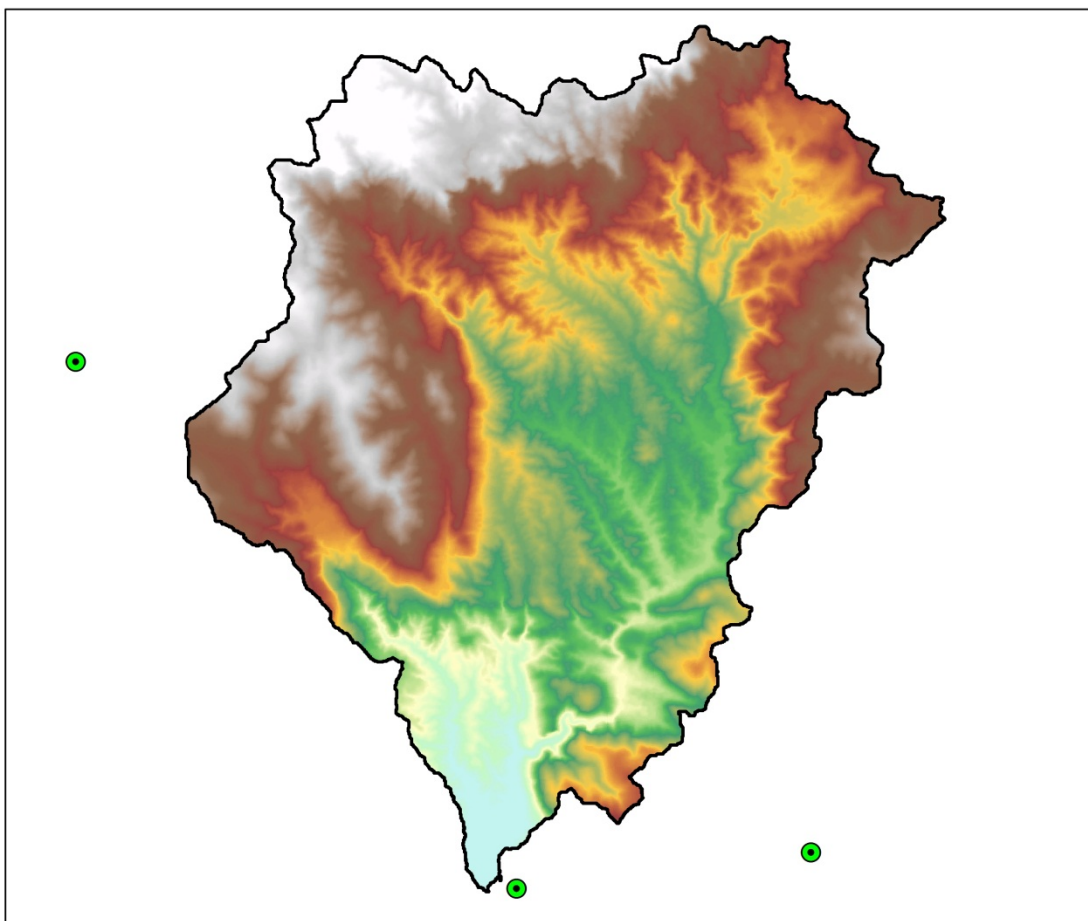


Figura 5.8 Estaciones meteorológicas utilizadas.

Además de los datos diarios de precipitación y temperatura el modelo SWAT requiere de los siguientes datos a nivel mensual:

LONGITUD Y LATITUD: Las coordenadas geográficas donde se encuentra la estación.

TMPMX: Se refiere a la temperatura máxima diaria promedio del mes en el periodo de observación.

TMPMN: Se refiere a la temperatura mínima diaria promedio del mes en el periodo de observación.

TMPSTDMX: Se refiere a la desviación estándar de la temperatura máxima diaria del mes en el periodo de observación.

TMPSTDMN: Se refiere a la desviación estándar de la temperatura mínima diaria del mes en el periodo de observación.

PCPMM: Se refiere a la precipitación promedio del mes en el periodo de observación.

PCPSTD: Se refiere a la desviación estándar de la precipitación diaria del mes en el periodo de observación.

PCPSKW: Es el coeficiente de asimetría para la precipitación diaria de cada mes.

PCPD: El promedio de días con lluvia en el mes.

Todos los datos anteriores se calcularon con la información diaria de las estaciones climatológicas, se muestran en el Anexo 3.

RAINHHMAX: Consiste en la lámina de lluvia mensual con una duración de 0.5 horas con una frecuencia de una vez cada 10 años. Los valores para esta variable se obtuvieron del observatorio de Chilpancingo, Guerrero publicado por la CONAGUA en 2010 para el periodo de 1981-2000.

SOLARAV: Promedio de la radiación solar para el mes.

Para el cálculo de la radiación se utilizó una plantilla de cálculo diseñada por FAO/UNESCO/WMO. La cual utiliza como datos de entrada la temperatura media, la humedad relativa, velocidad del viento y duración de las horas de insolación (Figura 5.9).

Debido a que las estaciones meteorológicas no cuentan con el valor de la duración de horas de insolación “n” esta variable se estimó empleando un observatorio, en este caso el de Chilpancingo, Guerrero fue el que se considero mas apto conforme a la ubicación y características climáticas de la cuenca, así con su valor de “n” se calcula la Radiación Global conforme a la formula modificada de Ångstrom (1924), citado por (Ortiz, 1987).

$$R_g/R_A = a + b (n/N)$$

Donde:

Rg = Radiación global.

RA = Radiación teórica.

n = Numero real de horas de insolación.

N = Duración astronómica de la insolación.

a y b = Coeficientes de regresión.

Month	Min Temp °C	Max Temp °C	Humidity %	Wind km/day	Sun hours	Rad MJ/m²/day	ETo mm/day
January							
February							
March							
April							
May							
June							
July							
August							
September							
October							
November							
December							
Average							

Figura 5.9 Interface del programa para cálculo de Radiación solar.

Con este valor de Radiación Global se obtiene un modelo de regresión lineal en donde la variable dependiente es la Radiación que esta en función de la nubosidad en octavos, la cual se obtiene de las estaciones meteorológicas del Extractor Rápido de Información Climática “ERIC” versión 3 (IMTA 2007) y se ocupa el modelo de la nubosidad media mensual en octavos (C8) sugerido por Ortiz (1987), esto se realizó para todas las estaciones meteorológicas consideradas. De esta manera se calcula la Radiación Global para todas las estaciones.

$C8 = (\text{No. de días despejados} \cdot 1 + \text{No. de días medio nublados} \cdot 3 + \text{No. De días nublados, cerrados} \cdot 7) / \text{No. total de días del mes.}$

El modelo de regresión lineal de Radiación que se genera a partir de la nubosidad en octavos es el siguiente:

$$R_g/R_A = f(C8)$$

Donde:

R_g/R_A = Radiación global

C8 = Nubosidad en octavos

El modelo de radiación que se utilizó obtuvo un coeficiente de correlación de 0.80 y quedo como sigue:

$$-0.3239x + 0.6529$$

La formula de Radiación también considera la duración astronómica de la insolación "N" y se obtiene de una tabla de acuerdo a la latitud de cada estación. Finalmente para obtener el numero total de horas de insolación "n" se despeja esta variable de la formula de Radiación Global modificada de Ångström (1924).

Para obtener los valores de Humedad relativa se realizó una correlación entre los valores de oscilación térmica y humedad relativa reportadas en el observatorio de Chilpancingo y se obtuvo el siguiente modelo con un R^2 de 0.93:

$$-2.4588x + 110.77$$

De esta manera se calculó la oscilación térmica de las estaciones utilizadas para el trabajo, (diferencia de t_{max} - t_{min}) y aplicando el modelo se calculo la humedad relativa.

La velocidad del viento se obtuvo de los datos Agro climatológicos para América Latina y el Caribe de FAO (1985), para el observatorio de Chilpancingo.

5.3.6. Datos de escurrimientos y sedimentos

Los datos hidrométricos necesarios para la calibración fueron obtenidos del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS), publicado por CONAGUA. La estación hidrométrica que se utilizó lleva por nombre Ahuehuepan con clave 18236.

La estación presenta registros diarios para la producción de agua (m^3/s), mientras que para el caso de sedimentos presenta datos a nivel mensual.

5.3.7. Calibración y Validación

Una vez lista toda la información que requiere el modelo se procedió a realizar la primera simulación utilizando el año 1963, con una frecuencia de impresión mensual. Una vez obtenidos los resultados se realizó una regresión lineal simple para evaluar la primera simulación teniendo como variables independientes los escurrimientos y sedimento medidos y como variables dependientes los escurrimientos y sedimentos simulados por SWAT.

La calibración es un paso de suma importancia después de haber corrido los datos en el modelo y antes de analizar los resultados generados por el mismo, refiriéndonos principalmente a balance hídrico y pérdida de suelo. Los datos que permiten esta calibración corresponden al gasto del escurrimiento en m^3/s en la salida de la cuenca o en su defecto en alguno de los subdrenajes para corroborar los datos de caudales generados por el modelo, y de esta manera poder ajustar los datos de entrada al modelo lo mas cercano a la realidad. Sabemos que un modelo trata de responder por medio de transformaciones de parámetros cuantificables lo que sucede en la realidad, por lo tanto no es probable llegar a un ajuste al 100%, pero si debemos tratar que éste represente de una manera confiable los procesos en la cuenca hidrográfica.

Los parámetros que se ajustaron en las diferentes calibraciones fueron curva numérica, grupo hidrológico y conductividad hidráulica.

Se realizaron varias simulaciones con diferentes ajustes de los parámetros antes mencionados hasta obtener una correlación entre los datos más alta que la presentada en la primera simulación, estos resultados se obtuvieron después de 5 simulaciones variando los parámetros en no más de 15% de sus valores originales.

El proceso de validación se realizó con un periodo de años mas largo, utilizando la serie de años de 1977 a 1985, esta vez ya no se realizó ajuste de parámetros, ya que precisamente esta etapa es para darle validez a los ajustes realizados con anterioridad, de la misma forma se realizaron regresiones lineales para los valores de producción de agua y de sedimentos.

6. RESULTADOS

6.1. Resultados de la primera simulación

Para llevar a cabo la primera simulación se considero un periodo de un año, es este caso el año 1963, con una frecuencia de impresión mensual, como lo sugiere la guía de usuario. SWAT genera 5 tablas de salida en una base de datos de ACCES y son las siguientes: **hru**, **rch**, **rsv**, **sed** y **sub**. En este caso para efectuar el análisis de los escurrimientos simulados contra los medidos se utilizó la tabla **rch** en la cual se muestran resultados por subcuenca de la cantidad de agua (m^3/s) que entra y que sale de cada una de ellas.

En la Figura 6.1 y 6.3 se puede apreciar el **comportamiento** de los escurrimientos y de los sedimentos respectivamente a lo largo del año, en el caso de los escurrimientos se puede apreciar que en el mes de agosto es donde se presentan la mayor cantidad de escurrimiento los valores son prácticamente iguales, sin embargo en los meses de septiembre a diciembre el modelo presenta sobrestimaciones. Esta sobrestimación se da en la época del año donde se presentan las últimas lluvias y el suelo esta saturado por las lluvias máximas que ocurren en los mese de julio y agosto. Para el caso se sedimentos se observa un punto máximo desplazado para los valores simulados con respecto a los medidos,

el punto máximo se presenta en el mes de julio para los valores medidos y en agosto para los simulados.

En la Figura 6.2 se puede observar el resultado del análisis de regresión lineal que se realizó a los escurrimientos medidos y simulados para la primera simulación (sin ajuste de parámetros). Como se puede observar el coeficiente de determinación (R^2) es de 0.8317 ,lo que indica que el modelo presenta un buen ajuste ya que los datos simulados explican el 83.17 % de los datos medidos. Por otra parte la pendiente de la recta es de 0.919 lo que es indicador de un buen ajuste ya que se acerca a la unidad.

La regresión lineal realizada para los sedimentos medidos y simulados se presenta en la Figura 6.4, donde se puede apreciar que el valor de R^2 es de 0.51 mientras que el valor de la pendiente es de 0.78.

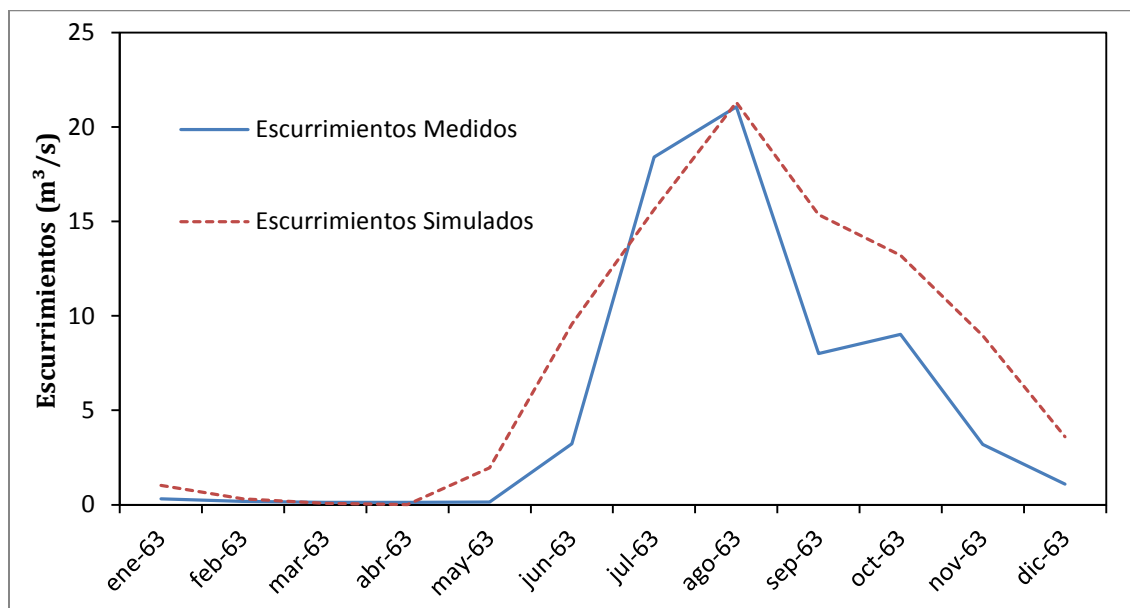


Figura 6.1 Dinámica y magnitud de los escurrimientos superficiales medidos y simulados por el modelo SWAT en la primera simulación.

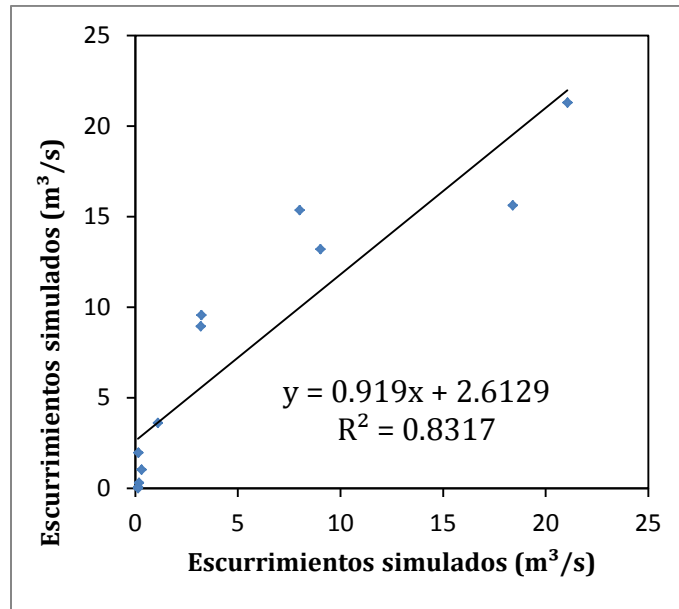


Figura 6.2 Análisis de regresión lineal para los valores de escurrimiento medidos y simulados por el modelo SWAT en la primera simulación.

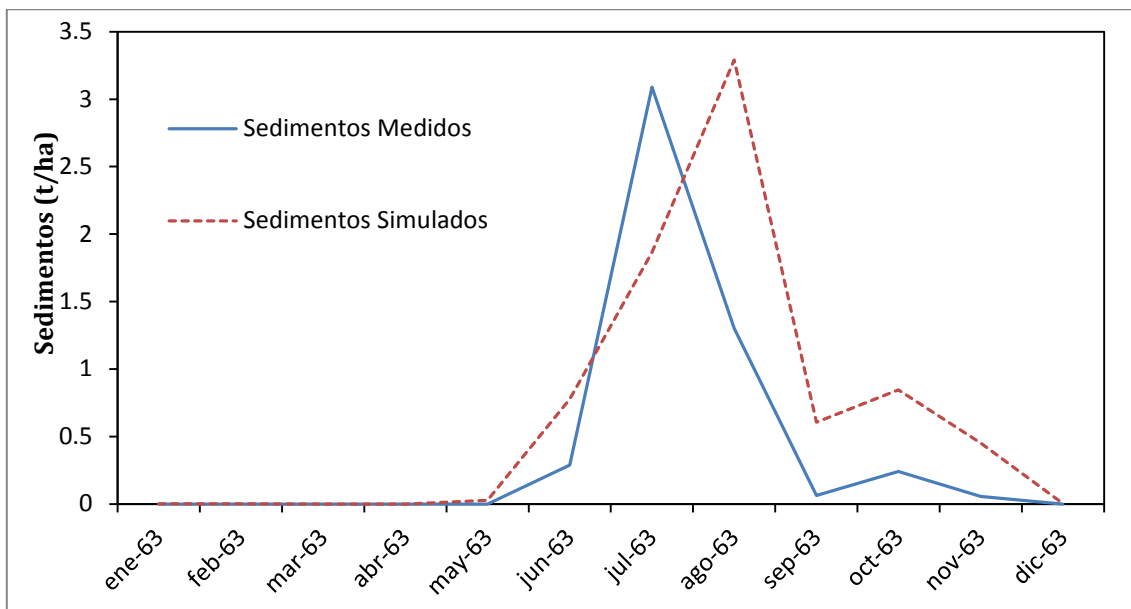


Figura 6.3 Dinámica y magnitud de producción de sedimentos medidos y simulados por el modelo SWAT en la primera simulación.

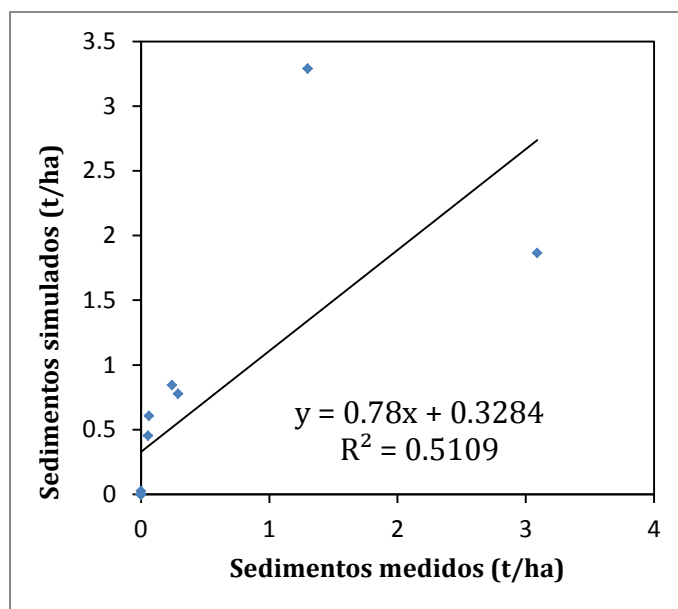


Figura 6.4 Análisis de regresión lineal para los valores de producción de sedimentos medidos y simulados por el modelo SWAT en la primera simulación.

A pesar de que el ajuste para la primera simulación presentó buenos resultados para escurrimientos fue necesario realizar un ajuste de parámetros, para buscar mejorar correlación entre los datos de producción de sedimentos medidos y simulados por el modelo.

6.2. Calibración

De acuerdo con el manual del usuario los parámetros de entrada que más afectan los resultados en orden de importancia son los que muestra el Cuadro 6.1, tomando esto como base se realizaron 5 corridas con el modelo variando estos parámetros. Los parámetros que en este caso presentaron variaciones significativas fueron en primer lugar la CN2 y el coeficiente de agua subterránea, el valor de C de la USLE y la pendiente de las URH, los demás parámetros presentaron variaciones poco significativas en los resultados. Cabe mencionar que los cambios en todas las variables no superaron el 15% del valor que tenían de inicio.

Cuadro 6.1 Parámetros más sensibles del modelo SWAT

Parámetro	Significado	Grado de sensibilidad	Parámetro de salida que modifica
CN2	Curva numérica en la subcuenca	Alto	Escurrimiento superficial Escurrimiento subsuperficial Flujo temporal
SOL_AWC	Capacidad de agua disponible		
ESCO	Factor de compensación de la evaporación del suelo	Alto	Escurrimiento superficial
GW_REVAP	Coeficiente del “revap” del agua subterránea	Medio	Flujo base
GWQMN	Profundidad umbral de agua en el acuífero somero		
USLE_P	Factor de practicas de labranza		
SLSUBBSN	Longitud de la pendiente	Medio	Producción de sedimentos
SLOPE	Pendiente de las URH		
USLE_C	Factor de manejo de cultivo	Alto	
CH_EROD	Erosionabilidad del cauce	Medio	Degradación y deposición en el cauce
CH_COV	Factor cobertura del cauce		

6.2.1. Escurrimientos

En la Figura 6.5 se puede observar el comportamiento de los escurrimientos simulados y aforados, esta vez en 1963 y 1964, como se puede apreciar el modelo simula de buena forma los escurrimientos presentando variaciones, sin embargo se puede identificar que en los meses con mas precipitación así como en los meses posteriores el modelo presenta una sobrestimación de la producción de agua.

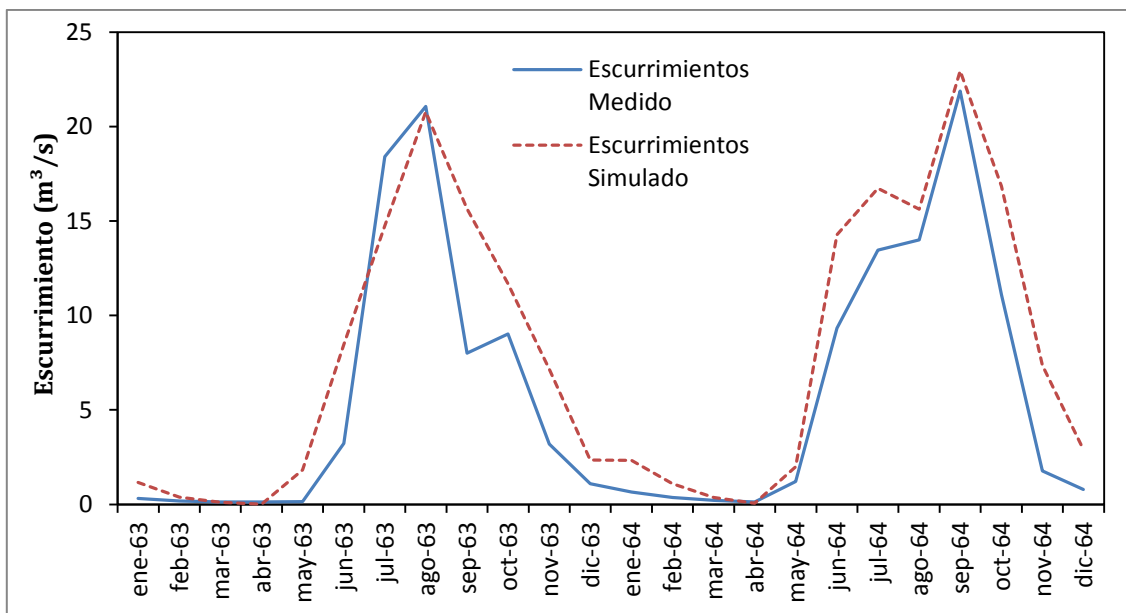


Figura 6.5 Dinámica y magnitud de los escurrimientos superficiales medidos y simulados por el modelo SWAT en la etapa de calibración.

En la Figura 6.6 se presenta el análisis de regresión lineal para los años 1963 y 1964 en la cual podemos ver que a diferencia de la primera simulación el coeficiente de determinación aumenta de 0.83 a 0.88, lo cual es indicador de que al modificar los parámetros mas sensibles el modelo mejoró el calculo de los escurrimientos.

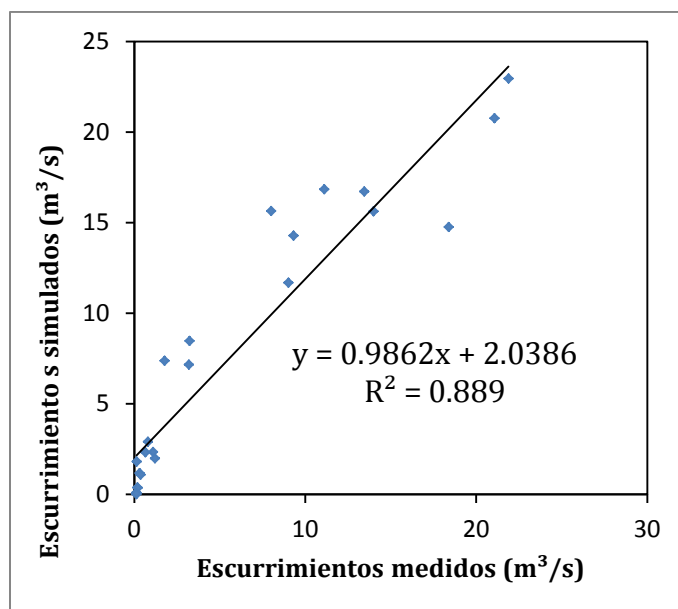


Figura 6.6 Análisis de regresión lineal para los valores de escurrimiento medidos y simulados por el modelo SWAT en la etapa de calibración.

6.2.2. Sedimentos

A diferencia de los escurrimientos de la primera simulación, la producción de sedimentos presento un valor de R^2 más bajo, sin embargo durante las corridas realizadas para calibrar el modelo presentó un aumento de la misma. En las Figuras 6.7 y 6.8 se presentan los resultados obtenidos en la etapa de calibración para la producción de sedimentos cabe mencionar que los factores que más afectaron este resultado fue el factor de manejo de cultivo, la longitud de la pendiente y la erosionabilidad del cauce.

En la Figura 6.7 se observa que las líneas de escurrimientos simulados y aforados presentan el mismo comportamiento. En los meses de la época de estiaje los valores en ambos casos son prácticamente nulos, mientras que en los meses más lluviosos se presentan cruces entre estas líneas presentando subestimaciones en los meses junio a agosto de 1963 y sobrestimaciones en los meses de agosto y septiembre de 1964. Los resultados de la regresión lineal que se realizó se muestran en la Figura 6. con un R^2 de 0.80 y una pendiente de 1.05 lo que indica que se comparan favorablemente la producción de sedimentos medidos y simulados.

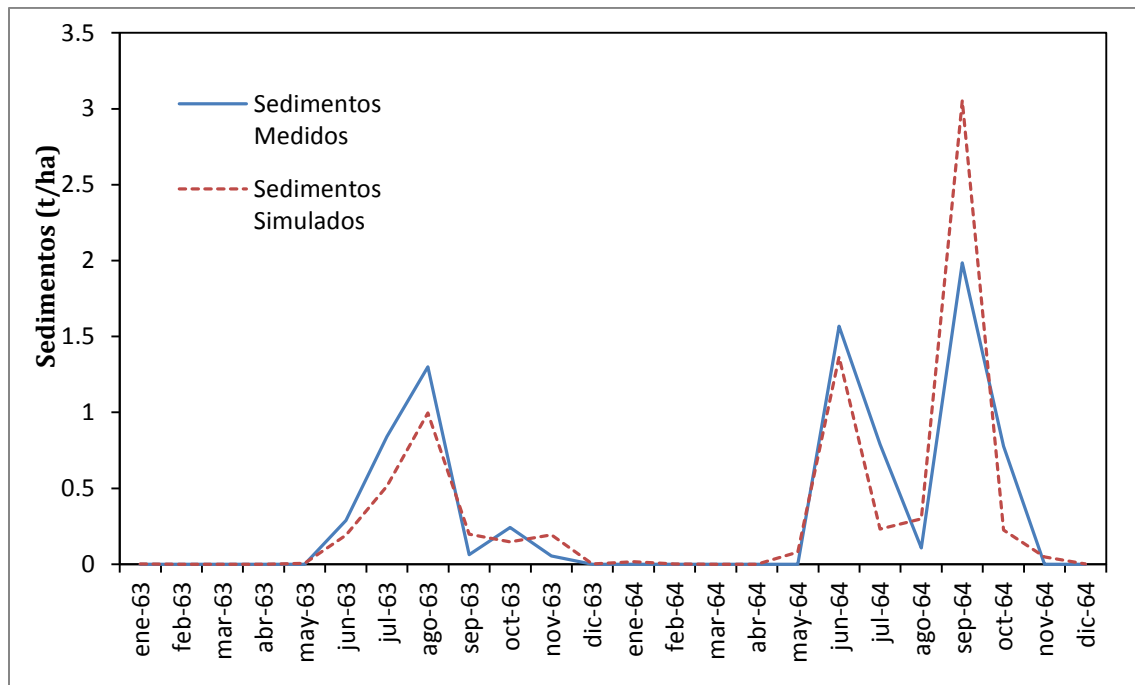


Figura 6.7 Dinámica y magnitud de los sedimentos medidos y simulados por el modelo SWAT en la etapa de calibración.

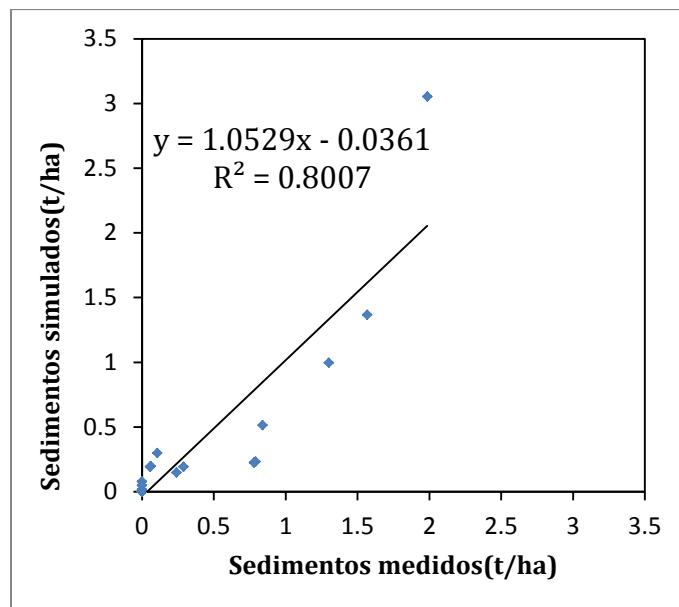


Figura 6.8 Análisis de regresión lineal para los valores de escurrimiento medidos y simulados por el modelo SWAT en la etapa de calibración.

6.3. Validación

Para validar la funcionalidad y aplicabilidad del modelo SWAT en la zona se utilizaron 8 años correspondientes a los años con la información más completa, tanto meteorológica como de la estación hidrométrica, este rango comprendió de 1978 a 1985 (Anexo 4). La frecuencia de impresión que se utilizó fue mensual ya que los datos tanto de sedimentos en la estación de aforo presentan solo datos mensuales.

6.3.1. Producción de agua

La producción de agua que reportan las salidas del modelo proviene de la suma de los escurrimientos superficiales (SURQ) y subsuperficiales (LATQ y GWQ), menos las pérdidas por transmisión (TLOSS) y las abstracciones de los almacenamientos.

$$WYLD = SURQ + LATQ + GWQ - TLOSS - IRR - SA_IRR - DA_IRR$$

En la Figura 6.9 se ve el comportamiento de la producción de agua en forma mensual en el periodo 1978-1985 donde se aprecia que los primeros 3 años el modelo presenta comparaciones favorables, sin embargo en 1980 y 1982 el modelo presenta sobrestimaciones en los meses de julio a octubre para 1980 y de junio a noviembre para 1982, los demás años presenta comportamientos aceptables.

El análisis de regresión se presenta en la Figura 6.10, debido a la mayor cantidad de datos el ajuste se reduce a 0.78 de coeficiente de determinación mientras que la pendiente queda prácticamente en uno, estos valores son indicadores de que la relación escurrimiento medido con simulado es aceptable.

De acuerdo a los trabajos que se han realizado tanto en México como en otros países (Cuadro 6.2), los resultados del presente trabajo presentan resultados similares.

Cuadro 6.2 Comparación de estadísticos sobre la producción de agua en diferentes cuencas y con diferentes modelos.

Cuenca	Pais	Área (km ²)	Modelo	R ²
Russian River	USA	939	Stanford IV	0.98
Marybirnong river	USA	865	Porter-MacMahon	0.85
Ramu River	Nueva Guinea	881	Ribeney-Brown	0.78
Wagga Research Catchment	Australia	0.081	Boughton	0.41
Brushy Creek	USA	109.8	USDAHL	0.81
El carrizal	México	7.89	SWRRB	0.92
El Tejocote	México	176.6	SWAT	0.93
Amajac	México	6826.5	SWAT	0.59

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

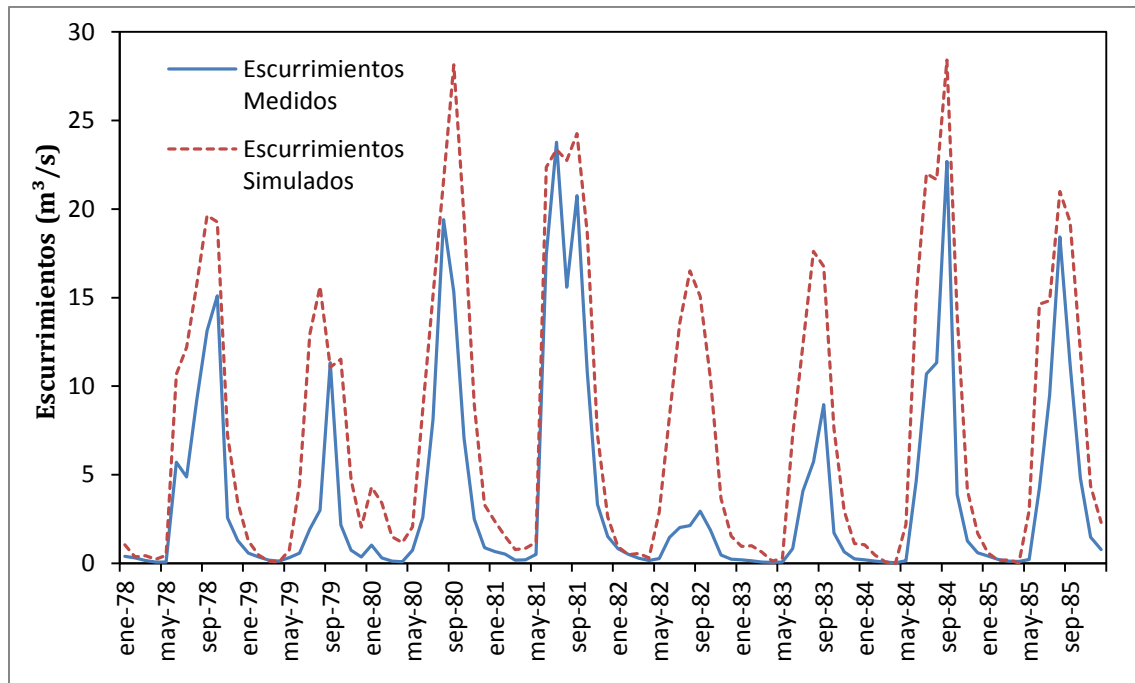


Figura 6.9 Dinámica de la producción de agua medida y simulada en la subcuenca del Río Ahuehuepan.

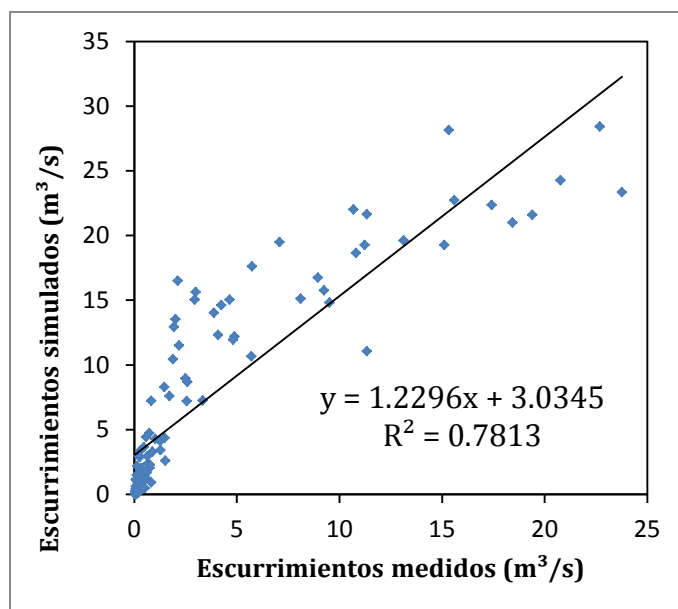


Figura 6.10 Análisis de regresión para los sedimentos medidos y simulados en la subcuenca del Río Ahuehuepan.

6.3.2. Producción de sedimentos

Para realizar la comparación de la producción de sedimentos medidos con los simulados se utilizó una frecuencia de impresión mensual ya que los datos de la estación de aforo se presentan a nivel mensual.

Los resultados de la producción de sedimentos en la subcuenca se aprecian en la Figura 6.11, donde podemos apreciar que los años donde se presenta mayor variación de los sedimentos medidos y simulados es en 1981 y 1984, para los demás años se aprecia un comportamiento muy similar. En general el modelo subestima la producción de sedimentos sin embargo se pueden considerar como no relevantes comparado con todo el periodo de simulación.

Estas variaciones pueden ser causadas fundamentalmente por 2 causas principales, la primera de ellas es la jerarquización de las URH de acuerdo a la interacción entre la cobertura vegetal y las diferentes unidades de suelo, la segunda es la generación de errores en el momento de cuantificar los sedimentos en la estación de aforo.

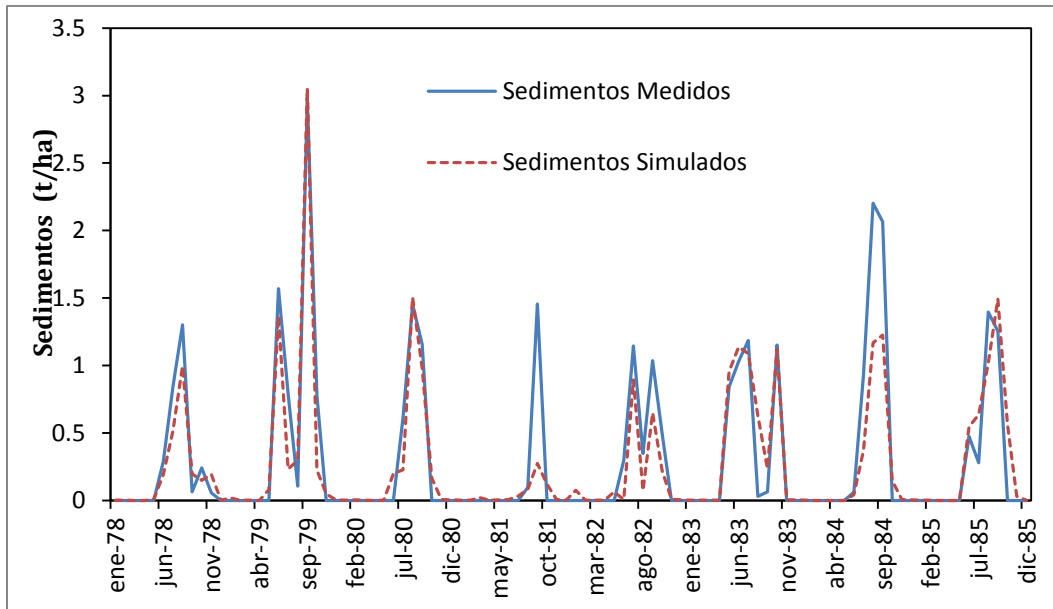


Figura 6.11 Dinámica de la producción de agua medida y simulada en la subcuenca del Río Ahuehuepan

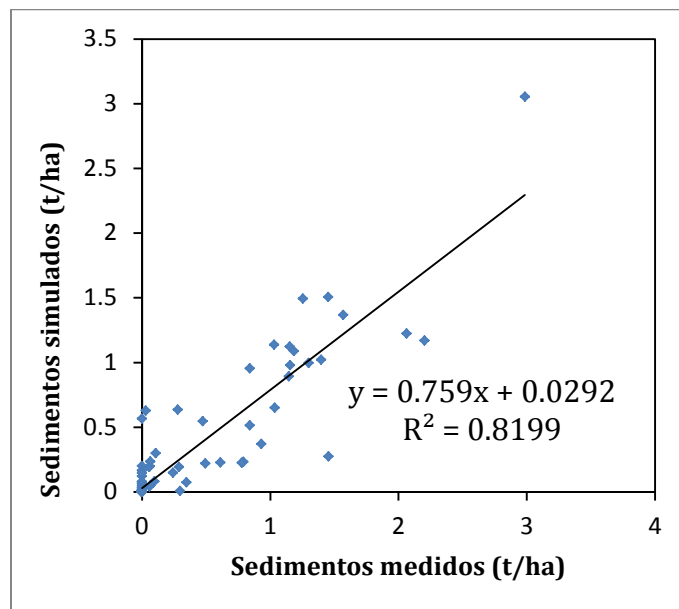


Figura 6.12 Análisis de regresión para los sedimentos medidos y simulados en la subcuenca del Río Ahuehuepan.

En la Figura 6.12 se observa que a diferencia de la etapa de calibración la R^2 disminuye, la pendiente de la recta también decrece, presentando valores de 0.81 y 0.75 respectivamente. El trabajo realizado por Oestreicher (2008) para la producción de sedimentos en la cuenca del canal de Panamá arrojó un valor de

0.83 en la etapa de validación. Mientras que el trabajo realizado por Torres (2000) dio como resultado de la validación del modelo para la producción de sedimentos un valor de 0.71. Los resultados se comparan favorablemente con lo que han obtenido los autores mencionados.

6.4. Balance hídrico

En la Figura 6.13 se puede observar el comportamiento de los componentes del balance hídrico promedio mensual para la serie de años 1978-1985, se puede apreciar que en los primeros meses del año la Evapotranspiración supera a la precipitación, es decir que se pierde más agua de la que precipita, esto se debe a que después de la temporada de lluvia el suelo queda húmedo permitiendo así que mas agua salga del sistema a través de la ET. A partir de mes de mayo donde la precipitación empieza a ser mayor los valores de ET están por debajo de la precipitación, esta condición esta presente hasta el mes de octubre.

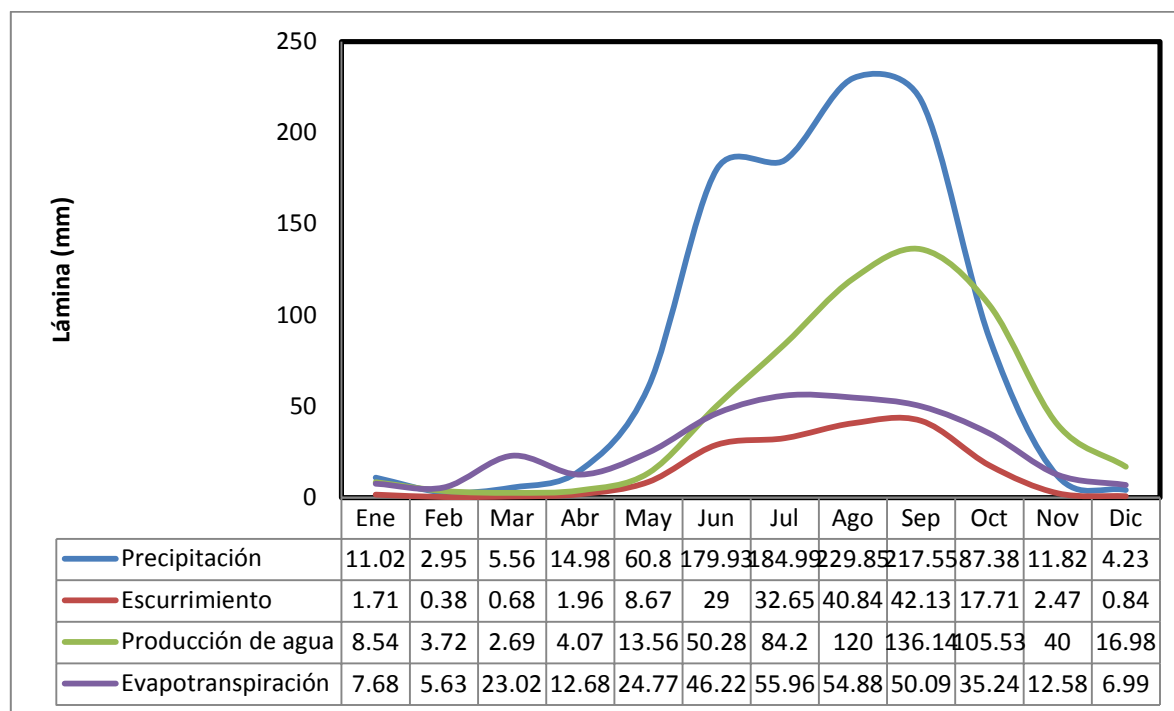


Figura 6.13 Balance hídrico mensual simulado en la subcuenca del Río Ahuehuepan (1978-1985).

También se puede apreciar que la producción de agua en la cuenca llega a su máximo nivel en el mes de septiembre, a pesar de que este mes no es el que presenta mayor precipitación. Esto se debe a que en los meses anteriores (junio-agosto) se presentó la mayor cantidad de lluvia provocando una saturación de agua en el suelo y dando como resultado mayor escurrimientos, tanto superficiales como subsuperficiales.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El modelo SWAT calibrado demostró un rendimiento aceptable para los escurrimientos mensuales. A diferencia de otros trabajos donde por lo general el ajuste de sedimento es menor al de los escurrimientos. En el presente trabajo se obtuvieron resultados de ajuste más altos para la producción de sedimentos.

El uso de modelos digitales de elevación a través de los sistemas de información geográfica representa una herramienta en el análisis de sistemas hidrológicos, específicamente en la delimitación de la cuenca y el trazo de la hidrología superficial de la misma.

El análisis realizado demuestra que el modelo SWAT presenta un alto grado de sensibilidad para el cálculo de la producción de agua a los valores de curva numérica (CN2), a la capacidad de agua disponible en el suelo (SOL_AWC) y el coeficiente de agua subterránea (GW_REVAP), mientras que los demás factores presentaron variaciones no apreciables. Por otro lado los factores que más afectaron la producción de sedimentos fueron el factor de cobertura de la USLE, la pendiente de la URH y la erosionabilidad del cauce.

Los resultados demuestran que SWAT podría ser una herramienta muy útil para la toma de decisiones no solo en la cuenca de estudio sino también algunas cuencas que se encuentren cerca y que presenten características similares.

El uso de un Sistema de Información Geográfica para el desarrollo de un modelo hidrológico es una herramienta que nos permite ver la información generada por esta última en una forma más sencilla a manera de mapas temáticos y de esta manera explicar gráficamente el comportamiento dentro de una cuenca y la información que ahí se genera.

Aunque, SWAT podría complementar la planificación del manejo de cuencas hidrográficas y la conservación de la actividad de toma de decisiones, hay varias mejoras en el modelo que deben ser abordadas antes de que su aplicación pueda utilizarse de manera fiable. Los puntos que hay que tomar en cuenta para la aplicación del modelo para predecir los procesos más detallados, como los efectos

de la labranza o de los patrones de cultivo en la producción de sedimentos son: a) las estimaciones detalladas de la erosión actual en microcuencas experimentales con diferentes escenarios de uso de suelo, b) la consideración de los efectos directos (pastoreo) y secundaria (pisoteo) los efectos de ganado en la generación de sedimentos.

Aunque como se mencionó con anterioridad el ajuste del modelo en la cuenca fue aceptable, sin embargo para obtener resultados más precisos es necesario no solo contar con datos de escurrimiento y sedimentos a la salida de la cuenca, sino también a lo largo de los cauces que componen la cuenca para así poder realizar calibraciones mas precisas que expliquen mas a detalle el comportamiento hidrológico de la cuenca y sus subcuencas.

La obtención de estimaciones precisas de los parámetros de la propiedad del suelo sigue siendo difícil ya que no existen datos experimentales debido a que la recolección de datos es generalmente financiera y logísticamente inviable en México, como en muchos otros países en desarrollo. Por esta razón es necesaria la generación de mecanismos que permitan conocer las características de los tipos de suelos presentes en México.

En trabajos realizados se ha identificado que el componente de aguas subterráneas de SWAT es un defecto del modelo. Los programadores y futuros investigadores deben centrar esfuerzos a la mejora de estas simulaciones, al permitir a los modeladores incorporar detalles explícitos sobre los sistemas de acuíferos y el flujo de las aguas subterráneas cuando esté disponible. Estas modificaciones serán de gran valor para la mejora del modelo SWAT para su uso.

Para el uso de modelos hidrológicos es necesario implementar un sistema de toma y captura de datos climáticos más efectivo en comparación con el que se usa actualmente, esto debido a que no se cuenta con una base da datos climática lo suficientemente completa para el adecuado procesamiento de los modelos antes mencionados.

Por encima y más allá de lo que ya se ha mencionado, la aplicación exitosa de este modelo, podría ser utilizada para desarrollar e implementar planes de conservación, tales como el análisis de pago por servicios ambientales, prevención de desastres o recomendaciones de mejores prácticas de manejo.

8. LITERATURA CITADA

Aparicio, M. F.J. 1997. Fundamentos de Hidrología de Superficie. LIMUSA. México, D.F.

Aparicio, M. F. J. 1999. Fundamentos de Hidrología de Superficies. Ed. LIMUSA. México. D.F.

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.

Baker Jr., M.B., J. de D. Benavides-Solorio y E. Talavera-Zuñiga. 1995. Relationship between precipitation and streamflow on El Carrizal watershed, Tapalpa, Jalisco. Partnerships for sustainable forest ecosystem management. General Technical Report RM-GTR-266. Rocky Mountain Forest and Range Experimental Station. Fort Collins, CO.

Beven, K. J. (1985) Distributed models. IN ANDERSON, M. G. & BURT, T. P. (Eds.) Hydrological Forecasting. New York, Wiley.

Brooks, K.N., P.F. Folliot, H.M. Gregersen y K.W. Easter. 1991. Watershed management and upland conservation: Policy framework for sustainable development. Daft policy brief. EPAT/MUCIA. College of Natural Resources, University of Minnesota. St. Paul, MN.

Burnash, R. J. C.; R. L. Ferral, and R. A. McGuire. 1973. A Generalized Streamflow Simulation System-Conceptual Modeling for Digital Computers. U. S. National Weather Service. Joint Federal State Forecast Center. Sacramento, C.A.

CONABIO, 1998. Climas (clasificación de Köppen, modificado por García). Conjunto de datos vectoriales escala 1:1,000,000.

Campos A., D. F. 1998. Procesos del ciclo hidrológico. Ed. Universidad Potosina. San Luis Potosí, México.

Chow, V. T., D. R. Maidment, and L. W. Mays, 1988. Applied Hydrology, McGraw Hill, New York , N.Y.

CONAGUA, 2010. Observatorios climatológicos.

http://smn.conagua.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=29&Itemid=93

DeBarry, P. A. 2004. Watersheds: Processes, Assessment, and Management. Ed. John Wiley. New Jersey EUA.

Di Luzio, M; Srinivasan, R.; J. G. Arnold; and Neitsch, S. L . 2002. Arc View Interface for SWAT2000. User's Guide. Grassland, Soil And Water Research Laboratory. Agricultural Research Service and Blackland Research Center. Texas Agricultural Experiment Station. East Blackland Road. Temple, Texas. Published 2002 by Texas Water Resources Institute, College Station, Texas.

Domingo, F., Villagarcía, L. y Were, A. 2002. ¿Cómo se puede medir y estimar la evapotranspiración?: estado actual y evolución. Ecosistemas 2003/1 <http://www.aeet.org/ecosistemas/031/informe1.htm>

FAO. 1985. Datos Agroclimáticos para América Latina y el Caribe. Serie Producción y Protección Vegetal. SAGRAF-Napoli. Roma.

Figuerola 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 pérdida de suelo por erosión. Colegio de Posgraduados. Montecillo, México. p. 83-89.

Gómez J. 2005. Estimación espacial de temperatura y precipitación media en áreas con escasa información meteorológica. Enviado a publicación, Agriculture and Forest Meteorology.

INEGI. 2000. Geología. Conjunto de datos vectoriales escala 1:250,000. Aguascalientes, México.

INEGI. 2000b. Edafología. Conjunto de datos vectoriales escala 1:250,000. Aguascalientes, México.

INEGI. 2001. Provincias fisiográficas. Conjunto de Datos Vectoriales escala 1:1,000,000. Aguascalientes, México.

INEGI. 2005. Guía para la interpretación de cartografía Uso de suelo y vegetación Aguascalientes, México. 87 p.

IUSS Grupo de Trabajo WRB. 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.

Llerena, C. A. 2003. Servicios ambientales de las cuencas y producción de agua, conceptos, valoración, experiencias y sus posibilidades de aplicación en el Perú. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

López C. F. 1998. Restauración Hidrológico Forestal de cuencas y control de la erosión. Ed. MUNDI-PRENSA. Madrid España.

Martínez M. M. R. 1991 Notas de clase. Conservación de suelo y agua. Semestre de Otoño de 1991. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.

Medar. A. J. 1994. Evaluación de la producción de sedimentos y del escurrimiento superficial en pequeñas cuencas agrícolas. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. México.135p

Molina, G. M. 1975. Hidrología. Universidad Nacional Agraria "La molina". Departamento de Recursos de Agua y Tierra. Publicación. No. 12. Perú.

Murillo S., M. E. 2002. Estudio del efecto del cambio de uso de suelo en el escurrimiento en la subcuenca 24bf "Monterrey", aplicando un sistema de información geográfica. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Campus Monterrey. División de Ingeniería y Arquitectura. Programa de Graduados en Ingeniería. Monterrey

Neitsch, S. L.; J. G. Arnold; J. R. Kiniry; J. R. Williams and K. W. King . 2002. Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation (Version 2000). Grassland, Soil And Water Research Laboratory . Agricultural Research Service and Blackland Research Center. Texas Agricultural Experiment Station. East Blackland Road. Temple, Texas. Published 2002 by Texas Water Resources Institute, College Station, Texas

Oestricher, J. 2008. Application of Soil Water Assessment Tool in a Tropical Agricultural Catchment of the Panama Canal Watershed: Implications for its use in watershed management activities. Department of Bioresource Engineering. McGill University. Montreal. 125 p.

Oropeza M., J. L. 1990. Simulation des écoulements des cours d'eau dans les petits bassins versants ruraux. Thèse de doctorat. Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux. Departement de Génie Rural. Belgique. 203 p.

Oropeza M., J. L. 1999. Modelos matemáticos y su aplicación al manejo de cuencas hidrográficas. Memorias del IX Congreso Nacional de Irrigación. Culiacan, Sinaloa.

Ortiz Solorio, C.A.. 1987. Elementos de Agrometeorología Cuantitativa con Aplicaciones en la Republica Mexicana. UACH. México.

Remeneiras, G. 1974 Tratado de hidrología aplicada. 2° edic. Editores asociados S.A. Barcelona. España 515p.

Rzedowski, J., 1978. Vegetación de México. Ed. Limusa. México. 432 pp.

Rzedowski, J., 2006. Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 504 pp.

Sánchez-Toribio, M.I. 1992. Métodos para el estudio de la evaporación y evapotranspiración. Geoforma Ediciones.

Saxton, K. E., W. J. Rawls. 2006. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. Soil Sci. Soc. Am. J. 70:1569–1578.

Semmens, D.J., S.N. Miller, M. Hernandez, I.S. Burns, W.P. Miller, D.C. Goodrich, W.G. Kepner, 2004, Automated Geospatial Watershed Assessment (AGWA) - A GIS-Based Hydrologic Modeling Tool: Documentation and User Manual; U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-1446. <http://www.tucson.ars.ag.gov/agwa/>

Silva, G. A. 2009. Hidrología Estocastica. Bogota, Colombia.

Silva, O. 2010. Evaluación del modelo hidrológico SWAT en la cuenca media del Río Pao en Venezuela. Rev. Fac. Agron. (UCV) 36 (03): 134-145.

<http://gsilvam.com/estocastica.htm>

Singh, V. P., 1995. Watershed modeling, In Computer Models of Watershed Hydrology (V. P. Singh, Ed.). Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado. p. 1-22.

Sellers, W. D., 1974. Physical climatology. The University of Chicago Press. Chicago. 271p.

Sorooshian, S. and V. K., Gupta. 1995: Model Calibration. Computer Models of Watershed Hydrology, ed. By V.P. Singh, Water Resources Publications, Colorado, USA. p 1130.

Storck, P.; L. Bowling; P. Wetherbee and D. Lettenmaier. 2000. Application of a GIS-Based Distributed Hydrology Model for Prediction of Forest Harvest Effects on Peaks Streamflow in the Pacific Northwest. <http://www.ce.washington.edu/~pxs/gis.html>

Theobald, M.D. 2000. GIS Concepts and Arc View methods. Colorado State University. USA.

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 Posgraduados. Instituto de Recursos Naturales. Especialidad en Edafología. Montecillo, México. 250p.

Torres-Benites, E., D. S. Fernández-Reynoso, J. L. Oropeza-Mota, E. Mejía-Saenz. 2004. Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca "El Tejocote", Atlacomulco, Estado de Mexico". TERRA 22: 437-444.

Wanielista, M. P. 1990. Hydrology and water models with especial reference to the phosphorus loading concept in limnology. Scheweiz. Z. Hydrol. 37: 53-83.

9. ANEXOS

Anexo 1. Datos de suelo ingresados a la base de datos de SWAT.

SUELO	CLAS. TEX.	DAP	AGUA DISPONIBLE	%MO	COND HID SAT	ARCILLA	LIMO	ARENA	SATURACIÓN	COND HID	HUMEDAD
Luvisol cromico+PH SWC	FRANCO ARCILLO ARENOSO	1.31	0.13	5.35	9.75	30.52	24	45.48	50.2	8.26 e-7	20.6
	FRANCO ARCILLO ARENOSO	1.5	0.11	1.65	14.43	20.52	26	53.48	42.5	4.74 e-7	13.7
	FRANCO ARCILLO ARENOSO	1.25	0.12	2.45	7.22	28.52	26	45.48	45.2	8.80 e-7	18.1
Andosol districo SWC	ARCILLA	1.16	0.12	1.18	1.07	42.52	18	39.48	45.3	3.69 e-6	25.8
	ARCILLA	1.19	0.12	1.11	1.26	44.52	20	35.48	47.3	2.72 e-6	26.8
	FRANCO	1.02	0.17	6.85	82.25	8.52	46	45.48	60.9	9.74 e-6	13.7
Cambisol eutrico SWC	FRANCO	1.13	0.16	3.93	18.76	20.52	50	29.48	51.2	2.11 e-6	14.5
	FRANCO ARCILLOSO	1.42	0.15	0.84	3.28	30.52	48	21.48	45	6.07 e-6	19.3
	FRANCO	1.28	0.13	3.4	8.16	28.52	34	37.48	48.2	1.48 e-6	19
Leptosol eutrico SWC	FRANCO ARENOSO	1.38	0.1	1.18	22.09	14.52	28	57.48	41.4	7.56 e-6	13.7
	FRANCO ARENOSO	1.42	0.09	0.57	32.57	10.52	26	63.48	39.9	9.02 e-5	13.8
Pheozem calcico SWC	FRANCO ARENOSO	1.45	0.12	7.3	36.64	18.52	18	63.48	54.3	9.27 e-8	16.8
Kasta±ozem cromico SWC	FRANCO	1.06	0.12	6.02	19.31	17.8	30.72	51.48	44.9	9.71 e-7	13.7
	FRANCO	1.17	0.16	5.75	21.36	23.8	42.72	33.48	54.9	1.52 e-6	17.5
Luvisol cromico SWC	ARCILLA	1.04	0.11	1.38	0.61	57.8	22.72	19.48	52.1	2.86 e-6	34
	ARCILLA	1.21	0.12	0.5	0.65	45.8	20.72	33.48	46.5	4.61 e-6	27.8
	FRANCO	1.01	0.15	10.59	53.82	15.8	32.72	51.48	60.1	3.95 e-7	15.6
Luvisol cromico + LP SWC	FRANCO ARENOSO	1.53	0.1	3.123	27.74	15.8	24.72	59.48	45.9	6.35 e-7	13.7
	FRANCO ARENOSO	1.36	0.08	1.04	27.51	13.8	20.72	65.48	40.7	6.2 e-6	13.8
Luvisol humico SWC	FRANCO ARENOSO	1.34	0.1	5.08	54.18	11.8	18.72	69.48	50.9	1.92 e-7	13.8
	FRANCO ARENOSO	1.63	0.08	0.5	27.01	13.8	18.72	67.48	39.5	7.66 e-6	13.8
Leptosol humico SWC	ARCILLA	1.08	0.11	5.41	0.73	49.8	14.72	35.48	48.6	2.36 e-6	30.5
	ARCILLO ARENOSO	1.47	0.11	1.11	1.8	37.8	10.72	51.48	44.2	1.44 e-6	23.8

Anexo 2. Valores de erosionabilidad (K) estimado en función de la unidad de suelo y su textura.

Orden	Textura			Orden	Textura			Unidades de suelo de la clasificación de la FAO	
	G	M	F		G	M	F	Nombre	Símbolo
A	0.026	0.040	0.010	Lo	0.026	0.040	0.013	Acrisoles	A
Af	0.013	0.020	0.007	Lp	0.053	0.079	0.026	Cambisoles	B
Ag	0.026	0.040	0.013	Lv	0.053	0.079	0.026	Chernozem	C
Ah	0.013	0.020	0.007	M(a,g)	0.026	0.040	0.013	Podzoluvisoles	D
Ao	0.026	0.040	0.013	N(d,e,x)	0.013	0.020	0.007	Rendzinas	E
Ap	0.053	0.079	0.026	O(d,e,x)	0.013	0.020	0.007	Ferrosoles	F
B	0.026	0.040	0.013	P	0.053	0.079	0.026	Gleysoles	G
Bc	0.026	0.040	0.013	Pf	0.053	0.079	0.026	Feozem	H
Bd	0.026	0.040	0.013	Pg	0.053	0.079	0.026	Litosoles	I
Be	0.026	0.040	0.013	Ph	0.026	0.040	0.013	Fluvisoles	J
Bf	0.013	0.020	0.007	Pl	0.026	0.040	0.013	Kastañozem	K
Bg	0.026	0.040	0.013	Po	0.053	0.079	0.026	Luvisoles	L
Bh	0.013	0.020	0.007	Pp	0.053	0.079	0.026	Gleysem	M
BK	0.026	0.040	0.013	Q(a,c,f,l)	0.013	0.020	0.007	Nitsoles	N
Bv	0.053	0.079	0.026	R	0.026	0.040	0.013	Histosoles	O
Bx	0.053	0.079	0.026	Re	0.026	0.040	0.013	Podzoles	P
C(g,h,k,l)	0.013	0.020	0.007	Rc	0.013	0.020	0.007	Arenosoles	Q
D(d,e,g)	0.053	0.079	0.026	Rd	0.026	0.040	0.013	Regosoles	R
E	0.013	0.020	0.007	Rx	0.053	0.079	0.026	Solonetz	S
F(a,h,o,o,r,x)	0.013	0.020	0.007	S	0.053	0.079	0.026	Andosoles	T
G	0.026	0.040	0.013	Sg	0.053	0.079	0.026	Rankers	U
Gc	0.013	0.020	0.007	Sm	0.026	0.040	0.013	Vertisoles	V

Gd	0.026	0.040	0.013	So	0.053	0.079	0.026	Planosoles	W
Ge	0.026	0.040	0.013	T	0.026	0.040	0.013	Xerosoles	X
Gh	0.013	0.020	0.007	Th	0.013	0.020	0.007	Yermosoles	Y
Gm	0.013	0.020	0.007	Tm	0.013	0.020	0.007	Solonchak	Z
Gp	0.053	0.079	0.026	To	0.026	0.040	0.013		
Gx	0.053	0.079	0.026	Tv	0.026	0.040	0.013		
Gv	0.053	0.079	0.026	U	0.013	0.020	0.007		
H(c,g,h,l)	0.013	0.020	0.007	V(c,p)	0.053	0.079	0.026		
I	0.013	0.020	0.007	W	0.053	0.079	0.026		
J	0.026	0.040	0.013	Wd	0.053	0.079	0.026		
Jc	0.013	0.020	0.007	We	0.053	0.079	0.026		
Jd	0.026	0.040	0.013	Wh	0.026	0.040	0.013		
Je	0.026	0.040	0.013	Wm	0.026	0.040	0.013		
Jt	0.053	0.079	0.026	Ws	0.053	0.079	0.026		
Jp	0.053	0.079	0.026	Wx	0.053	0.079	0.026		
K(h,K,l)	0.026	0.040	0.013	X(h,kl,y)	0.053	0.079	0.026		
L	0.026	0.040	0.013	Y(h,k,l,y,t)	0.053	0.079	0.026		
La	0.053	0.079	0.026	Z	0.026	0.040	0.013		
Lc	0.026	0.040	0.013	Zg	0.026	0.040	0.013		
Lf	0.013	0.020	0.007	Zm	0.013	0.020	0.007		
Lg	0.026	0.040	0.013	Zo	0.026	0.040	0.013		
Lk	0.026	0.040	0.013	Zt	0.053	0.079	0.026		

G = Gruesa; M = Media; F = Fina.
Tomado de Figueroa *et al.*, 1991.

Anexo 3. Datos climáticos ingresados a la base de datos de SWAT

Estación 12004 Ahuehuepan												
PARAMETRO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic

TMPMX	31.68	33.34	35.73	37.51	37.02	33.67	31.89	31.47	30.96	31.35	31.83	31.74
TMPMN	12.82	14.10	16.20	18.54	20.29	20.27	19.11	19.08	19.16	17.66	14.94	13.01
TMPSTDMX	2.36	2.53	2.42	2.45	2.91	3.31	2.34	1.73	1.68	1.93	2.01	1.70
TMPSTDMN	2.63	2.50	2.47	2.29	2.01	1.66	1.56	1.56	1.39	2.24	2.85	2.29
PCPMM	8.88	1.21	2.47	6.64	56.38	205.21	211.59	220.32	200.07	79.89	11.21	3.49
PCPSTD	2.64	0.50	0.95	1.56	5.76	11.62	11.77	12.70	11.95	7.31	2.38	1.52
PCPSKW	13.10	15.95	16.93	9.87	4.88	2.44	2.62	3.02	2.58	3.94	9.06	18.49
PR_W1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PR_W2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PCPD	0.69	0.42	0.60	1.23	6.13	15.60	16.60	16.02	14.92	6.69	1.50	0.48
RAINHHMX	4.55	2.1	1.6	8.5	6.2	15.2	13	25	23.65	14.5	0.9	0.75
SOLARAV	14.7	16.9	19.1	20.4	20	18.5	18.4	18.1	16.8	16.3	15.3	14.4
DEWPT	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
WNDVAV	1.80	2.30	2.60	2.50	2.50	2.50	2.40	2.70	3.00	2.30	1.90	1.60

Estación 12116 Iguala

PARAMETRO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
TMPMX	31.83	33.75	36.54	38.32	37.78	34.09	32.40	32.03	31.55	31.73	31.84	31.46
TMPMN	13.99	15.66	17.85	19.85	20.91	20.76	19.79	19.85	19.80	18.72	16.04	14.32
TMPSTDMX	2.67	2.43	2.19	2.07	2.51	3.15	2.31	2.07	2.05	1.98	2.14	2.18
TMPSTDMN	2.59	2.70	2.74	2.45	2.64	2.02	1.44	1.37	1.33	1.95	2.54	2.41
PCPMM	9.47	2.28	4.35	7.75	62.73	216.40	223.74	205.65	212.48	82.44	10.23	4.83
PCPSTD	2.64	0.86	1.49	1.89	5.81	12.26	12.21	11.00	12.12	8.02	2.08	1.90
PCPSKW	11.59	14.43	14.93	11.49	3.91	2.58	2.47	2.42	2.46	4.44	9.13	19.71
PR_W1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PR_W2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PCPD	0.83	0.52	0.83	1.52	7.21	16.50	16.92	16.96	17.17	7.17	1.69	0.79
RAINHHMX	4.55	2.10	1.60	8.50	6.20	15.20	13.00	25.00	23.65	14.50	0.90	0.75

SOLARAV	15.30	17.50	19.70	21.00	20.80	19.00	19.40	19.20	17.80	17.00	15.60	14.80
DEWPT	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
WNDVAV	1.80	2.30	2.60	2.50	2.50	2.50	2.40	2.70	3.00	2.30	1.90	1.60
Estación 12117 Ixcateopan de Cuauhtémoc												
PARAMETRO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
TMPMX	24.42	25.15	28.52	29.48	28.88	25.30	25.02	24.39	24.18	24.56	25.04	24.73
TMPMN	11.95	12.64	14.24	15.45	16.05	15.28	14.96	14.82	14.93	14.28	13.28	12.56
TMPSTDMX	1.61	1.59	2.55	2.82	2.65	1.95	1.65	1.39	1.52	1.46	1.52	1.62
TMPSTDMN	1.49	1.59	1.64	1.55	1.54	1.34	1.04	1.01	1.10	1.43	1.58	1.48
PCPMM	11.29	3.97	6.26	13.89	75.47	214.90	196.12	192.99	189.70	90.84	15.97	7.41
PCPSTD	2.79	1.11	1.68	2.72	6.94	11.37	10.19	9.35	9.68	7.28	2.91	1.95
PCPSKW	9.91	10.49	13.42	9.16	4.47	2.42	2.99	2.32	2.82	4.04	8.25	11.20
PR_W1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PR_W2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PCPD	1.02	0.71	1.00	1.79	7.19	17.31	17.98	18.17	18.33	9.81	2.13	0.90
RAINHHMX	4.55	2.10	1.60	8.50	6.20	15.20	13.00	25.00	23.65	14.50	0.90	0.75
SOLARAV	15.30	17.50	19.70	20.90	18.80	19.50	20.10	19.80	17.70	14.20	13.10	12.00
DEWPT	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
WNDVAV	1.80	2.30	2.60	2.50	2.50	2.50	2.40	2.70	3.00	2.30	1.90	1.60

Anexo 4. Salida general del modelo SWAT a nivel Mensual.

1

SWAT Aug 11 VER 2009/Rev. 445

0/ 0/ 0 0: 0: 0

General Input/Output section (file.cio):
21/06/2012 12:00:00 a.m. ARCGIS-SWAT interface AV

Number of years in run: 8
Area of watershed: 444.696 km2

1

SWAT Aug 11 VER 2009/Rev. 445

General Input/Output section (file.cio):

21/06/2012 12:00:00 a.m. ARCGIS-SWAT interface AV

Annual Summary for Watershed in year 1 of simulation

UNIT TIME	PREC (mm)	SURQ (mm)	LATQ (mm)	GWQ (mm)	PERCO LATE (mm)	TILE Q (mm)	SW (mm)	ET (mm)	PET (mm)	WATER YIELD (mm)	SED YIELD (t/ha)	N03 SURQ	N03 LATQ	N03 PERC	N03 CROP	N ORGANIC	P SOLUBLE	P ORGANIC
----- (kg nutrient/ha) -----																		
1	6.41	0.00	0.89	5.55	1.83	0.00	37.15	7.22	141.82	6.44	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00
2	2.58	0.00	0.13	2.12	0.11	0.00	34.04	5.44	151.42	2.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
3	13.61	0.00	1.76	1.42	3.18	0.00	17.87	24.84	202.02	3.18	0.00	0.00	0.02	0.27	2.73	0.00	0.00	0.00
4	2.32	0.00	0.33	1.61	1.02	0.00	4.68	14.11	213.46	1.94	0.00	0.00	0.00	0.01	0.97	0.00	0.00	0.00
5	17.96	0.00	1.79	1.56	4.29	0.00	6.10	10.14	210.08	3.34	0.00	0.00	0.02	0.05	0.03	0.00	0.00	0.00
6	228.67	5.42	43.38	12.81	90.12	0.00	34.50	59.93	134.29	61.54	0.02	0.00	0.13	1.65	0.06	0.19	0.00	0.02
7	158.88	4.81	29.23	20.35	62.06	0.00	48.60	47.57	153.02	54.31	0.11	0.01	0.08	0.95	0.44	1.20	0.00	0.15
8	183.86	3.74	36.53	22.08	76.39	0.00	59.62	56.43	171.64	62.29	0.05	0.00	0.10	1.01	0.52	0.59	0.00	0.07
9	222.11	5.15	42.49	26.25	108.09	0.00	70.90	50.11	109.11	73.73	0.10	0.00	0.21	3.51	0.00	1.08	0.00	0.13
10	99.44	3.14	28.44	35.39	55.08	0.00	53.15	37.49	146.58	66.91	0.15	0.00	0.14	1.84	0.00	1.62	0.00	0.20
11	7.81	0.00	1.63	24.90	3.82	0.00	45.85	9.94	135.82	26.53	0.00	0.00	0.02	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00
12	13.18	0.01	2.91	15.50	5.75	0.00	42.45	8.20	120.27	18.43	0.00	0.00	0.01	0.04	0.03	0.01	0.00	0.00
1978	956.84	22.28	189.51	169.53	411.75	0.00	42.45	331.42	1889.54	380.89	0.43	0.02	0.74	9.53	4.80	4.68	0.01	0.57

1

SWAT Aug 11 VER 2009/Rev. 445

General Input/Output section (file.cio):

21/06/2012 12:00:00 a.m. ARCGIS-SWAT interface AV

Annual Summary for Watershed in year 2 of simulation

UNIT TIME	PREC (mm)	SURQ (mm)	LATQ (mm)	GWQ (mm)	PERCO LATE (mm)	TILE Q (mm)	SW (mm)	ET (mm)	PET (mm)	WATER YIELD (mm)	SED YIELD (t/ha)	N03 SURQ	N03 LATQ	N03 PERC	N03 CROP	N ORGANIC	P SOLUBLE	P ORGANIC
----- (kg nutrient/ha) -----																		
1	0.00	0.00	0.07	7.49	0.00	0.00	37.50	4.95	142.52	7.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
2	2.26	0.00	0.20	2.64	0.24	0.00	34.48	4.86	162.56	2.84	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.04	1.25	0.00	0.00	14.84	19.64	201.98	1.29	0.00	0.00	0.00	0.00	2.44	0.00	0.00	0.00
4	4.63	0.00	0.43	0.57	0.74	0.00	4.59	13.71	213.59	1.00	0.00	0.00	0.01	0.16	0.71	0.00	0.00	0.00
5	41.00	0.00	4.26	1.10	11.71	0.00	10.01	18.21	202.79	5.37	0.00	0.00	0.03	0.20	0.08	0.00	0.00	0.00
6	128.45	0.32	19.75	7.27	45.91	0.00	30.36	38.85	175.77	27.32	0.01	0.00	0.09	0.50	0.11	0.11	0.00	0.01
7	209.12	12.66	37.67	17.68	78.27	0.00	48.98	61.03	144.66	67.93	1.43	0.01	0.15	2.06	0.55	7.86	0.00	0.96
8	188.28	4.90	37.46	22.04	78.10	0.00	59.37	58.00	156.49	64.35	0.50	0.00	0.18	1.73	0.38	2.29	0.00	0.28
9	198.05	5.55	45.24	26.82	98.01	0.00	59.07	51.90	137.47	77.50	0.46	0.00	0.20	2.52	0.00	2.76	0.00	0.34
10	46.44	0.27	7.78	26.01	16.91	0.00	58.33	22.21	160.21	34.04	0.01	0.00	0.04	0.43	0.00	0.09	0.00	0.01
11	0.62	0.00	2.45	20.49	0.23	0.00	45.54	13.16	133.70	22.94	0.00	0.00	0.01	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
12	5.23	0.00	0.65	11.12	0.95	0.00	40.93	8.34	122.83	11.77	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00

1979 824.08 23.69 156.00 144.49 331.07 0.00 40.93 314.86 1954.58 323.92 2.40 0.02 0.73 7.67 4.32 13.11 0.01 1.60
1

SWAT Aug 11 VER 2009/Rev. 445

General Input/Output section (file.cio):

21/06/2012 12:00:00 a.m. ARCGIS-SWAT interface AV

Annual Summary for Watershed in year 3 of simulation

UNIT TIME	PREC (mm)	SURQ (mm)	LATQ (mm)	GWQ (mm)	PERCO LATE (mm)	TILE Q (mm)	SW (mm)	ET (mm)	PET (mm)	WATER YIELD (mm)	SED YIELD (t/ha)	N03 SURQ	N03 LATQ	N03 PERC	N03 CROP	N ORGANIC	P SOLUBLE	P ORGANIC
1	95.01	3.80	17.58	5.81	39.58	0.00	59.17	13.79	127.81	26.95	1.07	0.00	0.12	0.54	0.02	5.93	0.00	0.72
2	3.43	0.00	2.19	15.13	0.94	0.00	46.26	14.99	169.07	17.32	0.00	0.00	0.01	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.31	8.62	0.00	0.00	17.87	28.39	222.09	8.93	0.00	0.00	0.00	0.00	2.96	0.00	0.00	0.00
4	21.12	0.00	2.65	4.65	5.13	0.00	5.21	25.98	195.67	7.30	0.00	0.00	0.01	0.03	0.90	0.00	0.00	0.00
5	57.14	0.00	8.31	4.97	18.35	0.00	6.14	29.04	192.25	13.28	0.00	0.00	0.01	0.32	0.12	0.00	0.00	0.00
6	201.90	4.17	33.48	13.69	79.99	0.00	41.29	43.62	155.39	51.22	0.01	0.00	0.08	1.41	0.07	0.13	0.00	0.02
7	209.97	2.81	44.77	21.36	88.65	0.00	53.65	63.64	136.07	68.86	0.02	0.00	0.11	1.14	0.41	0.22	0.00	0.03
8	237.55	9.93	47.28	24.68	108.49	0.00	64.99	59.20	155.82	81.79	0.24	0.01	0.18	2.77	0.21	2.14	0.00	0.26
9	242.60	19.90	50.98	32.74	119.26	0.00	67.86	49.82	126.74	103.46	0.74	0.02	0.28	3.67	0.00	5.66	0.01	0.69
10	117.60	4.78	25.36	30.52	55.89	0.00	64.23	36.49	149.27	60.56	0.26	0.01	0.12	1.39	0.00	1.94	0.00	0.24
11	13.05	0.00	4.92	26.89	4.98	0.00	49.28	21.31	132.67	31.81	0.00	0.00	0.03	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.20	18.76	0.20	0.00	43.37	5.70	118.44	18.95	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00

1980 1199.37 45.40 238.02 207.83 521.46 0.00 43.37 391.98 1881.29 490.45 2.35 0.04 0.95 11.68 4.74 16.01 0.01 1.95
1

SWAT Aug 11 VER 2009/Rev. 445

General Input/Output section (file.cio):

21/06/2012 12:00:00 a.m. ARCGIS-SWAT interface AV

Annual Summary for Watershed in year 4 of simulation

UNIT TIME	PREC (mm)	SURQ (mm)	LATQ (mm)	GWQ (mm)	PERCO LATE (mm)	TILE Q (mm)	SW (mm)	ET (mm)	PET (mm)	WATER YIELD (mm)	SED YIELD (t/ha)	N03 SURQ	N03 LATQ	N03 PERC	N03 CROP	N ORGANIC	P SOLUBLE	P ORGANIC
1	31.87	0.13	5.35	9.13	11.15	0.00	46.21	12.36	121.82	14.60	0.06	0.00	0.03	0.08	0.02	0.36	0.00	0.04
2	13.26	0.00	1.71	6.91	3.75	0.00	41.33	12.61	151.59	8.62	0.00	0.00	0.01	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00
3	1.52	0.00	0.31	4.80	0.00	0.00	18.31	24.49	214.65	5.10	0.00	0.00	0.00	0.00	2.59	0.00	0.00	0.00
4	20.88	0.00	3.00	2.64	6.75	0.00	4.87	24.51	208.53	5.64	0.00	0.00	0.01	0.28	1.10	0.00	0.00	0.00
5	39.42	0.00	3.95	3.89	9.39	0.00	15.75	13.72	192.58	7.84	0.00	0.00	0.01	0.05	0.06	0.00	0.00	0.00
6	378.26	26.07	75.99	20.29	165.51	0.00	62.97	60.60	108.10	122.07	0.40	0.01	0.20	2.87	0.11	4.07	0.01	0.50
7	233.55	6.65	51.55	33.43	120.14	0.00	60.55	58.73	119.30	91.53	0.05	0.00	0.20	2.90	0.31	0.64	0.00	0.08
8	181.57	5.40	37.33	34.60	84.09	0.00	68.67	46.06	141.54	77.25	0.12	0.00	0.14	1.77	0.52	1.13	0.00	0.14
9	206.34	9.35	39.52	35.53	102.84	0.00	68.39	51.60	135.79	84.32	0.65	0.01	0.15	2.23	0.01	5.28	0.00	0.64
10	102.34	1.74	25.41	31.83	48.83	0.00	60.38	39.50	140.45	58.91	0.08	0.00	0.09	0.99	0.00	0.68	0.00	0.08

11	1.99	0.00	2.11	24.62	1.21	0.00	46.61	14.27	143.47	26.73	0.00	0.00	0.01	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.08	0.00	0.14	15.14	0.07	0.00	41.77	4.85	120.30	15.28	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00

19811211.10	49.34	246.36	222.80	553.74	0.00	41.77	363.30	1798.11	517.90	1.37	0.03	0.86	11.32	4.77	12.16	0.01	1.48
-------------	-------	--------	--------	--------	------	-------	--------	---------	--------	------	------	------	-------	------	-------	------	------

1

SWAT Aug 11 VER 2009/Rev. 445

General Input/Output section (file.cio):

21/06/2012 12:00:00 a.m. ARCGIS-SWAT interface AV

Annual Summary for Watershed in year 5 of simulation

UNIT TIME	PREC (mm)	SURQ (mm)	LATQ (mm)	GWQ (mm)	PERCO LATE (mm)	TILE Q (mm)	SW (mm)	ET (mm)	PET (mm)	WATER YIELD (mm)	SED YIELD (t/ha)	N03 SURQ	N03 LATQ	N03 PERC	N03 CROP	N ORGANIC	P SOLUBLE	P ORGANIC
												----- (kg nutrient/ha) -----						
1	0.00	0.00	0.07	5.68	0.00	0.00	37.98	3.78	144.29	5.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
2	11.14	0.00	1.07	2.02	2.95	0.00	37.79	6.90	149.22	3.09	0.00	0.00	0.02	0.06	0.02	0.00	0.00	0.00
3	5.10	0.00	1.15	2.73	1.58	0.00	13.87	26.73	204.45	3.88	0.00	0.00	0.01	0.24	2.63	0.00	0.00	0.00
4	7.78	0.00	0.81	1.58	1.70	0.00	4.67	14.42	204.17	2.39	0.00	0.00	0.01	0.02	0.50	0.00	0.00	0.00
5	79.20	0.38	14.58	3.97	30.01	0.00	11.52	26.86	198.92	18.91	0.01	0.00	0.04	0.19	0.07	0.15	0.00	0.02
6	188.52	1.80	32.22	12.04	74.35	0.00	40.18	46.73	165.57	45.99	0.29	0.00	0.07	0.48	0.24	2.17	0.00	0.26
7	152.94	4.04	33.82	18.70	60.42	0.00	43.12	56.07	155.58	56.49	0.05	0.00	0.11	1.37	0.70	0.56	0.00	0.07
8	160.89	6.57	31.01	22.15	67.53	0.00	45.28	53.81	174.43	59.70	0.29	0.01	0.09	1.34	0.21	2.26	0.00	0.28
9	133.26	7.04	24.01	22.24	50.89	0.00	50.12	46.52	167.34	53.26	0.82	0.01	0.07	0.89	0.00	4.72	0.00	0.57
10	97.72	3.15	18.69	22.04	38.33	0.00	51.23	36.75	156.72	43.85	0.43	0.00	0.09	0.84	0.00	2.35	0.00	0.29
11	0.85	0.00	0.37	18.54	0.39	0.00	42.55	9.08	147.61	18.91	0.00	0.00	0.01	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.36	0.00	0.08	8.76	0.01	0.00	38.67	4.23	122.95	8.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00

1982	837.76	22.97	157.88	140.44	328.17	0.00	38.67	331.90	1991.26	321.04	1.89	0.02	0.52	5.49	4.44	12.20	0.01	1.49
------	--------	-------	--------	--------	--------	------	-------	--------	---------	--------	------	------	------	------	------	-------	------	------

1

SWAT Aug 11 VER 2009/Rev. 445

General Input/Output section (file.cio):

21/06/2012 12:00:00 a.m. ARCGIS-SWAT interface AV

Annual Summary for Watershed in year 6 of simulation

UNIT TIME	PREC (mm)	SURQ (mm)	LATQ (mm)	GWQ (mm)	PERCO LATE (mm)	TILE Q (mm)	SW (mm)	ET (mm)	PET (mm)	WATER YIELD (mm)	SED YIELD (t/ha)	N03 SURQ	N03 LATQ	N03 PERC	N03 CROP	N ORGANIC	P SOLUBLE	P ORGANIC
												----- (kg nutrient/ha) -----						
1	14.07	0.00	2.12	3.89	4.77	0.00	37.86	7.95	141.45	6.01	0.00	0.00	0.02	0.07	0.02	0.00	0.00	0.00
2	17.06	0.00	1.96	3.82	3.90	0.00	37.50	11.42	136.84	5.78	0.00	0.00	0.02	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00
3	4.38	0.00	0.71	3.51	0.85	0.00	19.95	20.60	201.85	4.21	0.00	0.00	0.01	0.20	2.23	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.01	1.30	0.00	0.00	4.66	15.29	223.12	1.31	0.00	0.00	0.00	0.00	1.18	0.00	0.00	0.00
5	12.86	0.00	1.68	0.65	4.27	0.00	4.66	6.66	221.07	2.32	0.00	0.00	0.01	0.08	0.02	0.00	0.00	0.00
6	185.61	1.84	33.09	8.64	72.55	0.00	35.51	44.47	158.22	43.51	0.07	0.00	0.10	0.70	0.05	0.65	0.00	0.08
7	149.57	2.07	31.60	20.70	60.60	0.00	44.15	48.39	133.88	54.34	0.13	0.00	0.10	1.18	0.27	0.95	0.00	0.12
8	201.65	8.50	39.86	22.51	87.39	0.00	54.47	55.40	152.42	70.81	0.41	0.01	0.13	2.14	0.23	2.86	0.00	0.35

9	146.95	6.51	27.89	24.31	59.68	0.00	57.94	49.86	125.65	58.66	0.94	0.00	0.11	1.71	0.00	4.67	0.00	0.57
10	21.47	0.00	3.58	22.99	6.99	0.00	46.92	22.64	177.28	26.57	0.00	0.00	0.03	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00
11	9.94	0.00	1.21	15.28	1.92	0.00	40.96	13.00	140.26	16.49	0.00	0.00	0.01	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.05	6.48	0.00	0.00	37.46	3.49	113.68	6.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00

1983	763.56	18.92	143.76	134.07	302.93	0.00	37.46	299.18	1925.71	296.56	1.55	0.01	0.54	6.56	4.05	9.12	0.00	1.11
------	--------	-------	--------	--------	--------	------	-------	--------	---------	--------	------	------	------	------	------	------	------	------

1

SWAT Aug 11 VER 2009/Rev. 445

General Input/Output section (file.cio):

21/06/2012 12:00:00 a.m. ARCGIS-SWAT interface AV

Annual Summary for Watershed in year 7 of simulation

UNIT	PREC	SURQ	LATQ	GWQ	PERCO	TILE	SW	ET	PET	WATER	SED	N03	N03	N03	N03	N	P	P
TIME	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	Q	(mm)	(mm)	(mm)	YIELD	YIELD	SURQ	LATQ	PERC	CROP	ORGANIC	SOLUBLE	ORGANIC
										(mm)	(t/ha)					----- (kg nutrient/ha) -----		
1	17.00	0.01	2.70	3.88	6.08	0.00	36.70	8.97	130.63	6.58	0.00	0.00	0.02	0.06	0.03	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.03	2.98	0.00	0.00	32.33	4.37	167.70	3.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.01	1.07	0.00	0.00	9.42	22.92	216.74	1.08	0.00	0.00	0.00	0.00	2.52	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.39	0.00	0.00	4.44	4.97	225.45	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.34	0.00	0.00	0.00
5	87.55	0.63	11.59	2.10	24.86	0.00	15.21	38.22	186.60	14.30	0.18	0.00	0.09	0.79	0.14	0.70	0.00	0.08
6	281.12	8.80	55.69	18.24	121.78	0.00	51.66	56.57	124.30	82.51	0.51	0.01	0.20	2.61	0.13	2.72	0.00	0.33
7	258.25	11.92	49.98	26.59	117.25	0.00	66.02	61.94	134.96	88.34	1.22	0.01	0.19	3.02	0.54	4.75	0.00	0.58
8	178.43	3.43	38.38	29.21	83.26	0.00	66.15	55.29	149.58	70.95	0.31	0.00	0.18	2.24	0.36	1.28	0.00	0.16
9	239.06	11.90	55.88	37.85	130.12	0.00	57.70	52.02	141.04	105.50	1.89	0.01	0.26	3.85	0.00	6.48	0.00	0.79
10	21.93	0.03	4.37	30.00	8.77	0.00	47.78	19.70	171.06	34.39	0.00	0.00	0.03	0.51	0.00	0.02	0.00	0.00
11	0.29	0.00	0.43	21.79	0.38	0.00	41.20	6.46	137.51	22.22	0.00	0.00	0.01	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.11	9.87	0.01	0.00	38.15	3.05	116.31	9.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00

1984	1083.64	36.72	219.19	183.97	492.50	0.00	38.15	334.47	1901.89	439.27	4.10	0.03	1.00	13.15	4.12	15.94	0.01	1.94
------	---------	-------	--------	--------	--------	------	-------	--------	---------	--------	------	------	------	-------	------	-------	------	------

1

SWAT Aug 11 VER 2009/Rev. 445

General Input/Output section (file.cio):

21/06/2012 12:00:00 a.m. ARCGIS-SWAT interface AV

Annual Summary for Watershed in year 8 of simulation

UNIT	PREC	SURQ	LATQ	GWQ	PERCO	TILE	SW	ET	PET	WATER	SED	N03	N03	N03	N03	N	P	P
TIME	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	Q	(mm)	(mm)	(mm)	YIELD	YIELD	SURQ	LATQ	PERC	CROP	ORGANIC	SOLUBLE	ORGANIC
										(mm)	(t/ha)					----- (kg nutrient/ha) -----		
1	0.92	0.00	0.08	3.63	0.00	0.00	35.53	3.51	120.60	3.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.03	1.26	0.00	0.00	32.77	2.76	160.46	1.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
3	10.05	0.00	1.15	0.76	1.13	0.00	14.41	26.13	221.80	1.91	0.00	0.00	0.01	0.01	2.81	0.00	0.00	0.00
4	1.42	0.00	0.04	0.57	0.01	0.00	5.13	10.65	214.23	0.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.63	0.00	0.00	0.00
5	81.16	0.00	13.10	6.17	28.34	0.00	6.02	38.52	189.76	19.27	0.00	0.00	0.05	0.41	0.15	0.00	0.00	0.00
6	295.31	14.45	50.62	16.39	117.39	0.00	54.65	56.87	111.74	81.29	0.03	0.01	0.13	1.63	0.15	0.35	0.00	0.04

7	142.41	1.81	29.39	22.57	55.63	0.00	54.66	59.41	145.99	53.72	0.00	0.00	0.09	0.84	0.59	0.04	0.00	0.01
8	241.74	4.89	51.84	25.98	116.48	0.00	61.80	61.40	140.99	82.60	0.05	0.01	0.20	2.60	0.45	0.62	0.00	0.08
9	159.48	4.53	30.89	26.79	68.04	0.00	66.12	52.41	140.41	62.18	0.15	0.00	0.12	1.58	0.00	1.45	0.00	0.18
10	52.30	0.79	10.78	26.84	18.02	0.00	55.71	35.54	147.14	38.39	0.04	0.00	0.05	0.56	0.00	0.35	0.00	0.04
11	18.15	0.23	2.71	20.30	5.43	0.00	51.84	13.55	135.02	23.24	0.03	0.00	0.02	0.12	0.00	0.33	0.00	0.04
12	5.54	0.00	1.13	12.16	0.45	0.00	43.59	12.88	121.60	13.29	0.00	0.00	0.01	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00
19851008.48	26.70	191.76	163.42	410.91	0.00	43.59	373.65	1849.74	381.49	0.32	0.02	0.68	7.76	4.86	3.14	0.01	0.38	

1

SWAT Aug 11 VER 2009/Rev. 445

General Input/Output section (file.cio):

21/06/2012 12:00:00 a.m. ARCGIS-SWAT interface AV

FINAL VALUES

1

SWAT Aug 11 VER 2009/Rev. 445

General Input/Output section (file.cio):

21/06/2012 12:00:00 a.m. ARCGIS-SWAT interface AV

Average Crop Values									
				Crop 1		Crop 2		Crop 3	
				Yld	Biomass	Yld	Biomass	Yld	Biomass
				(kg/ha)	(kg/ha)	(kg/ha)	(kg/ha)	(kg/ha)	(kg/ha)
FRSE	HRU	1 Rot	1	0.0	0.0	865.6	1750.6	0.0	0.0
FRSE	HRU	2 Rot	1	0.0	0.0	2379.5	4832.0	0.0	0.0
FRSE	HRU	3 Rot	1	0.0	0.0	24.0	49.8	0.0	0.0
PAST	HRU	4 Rot	1	0.0	100.9	123.9	175.1	0.0	0.0
OAK	HRU	5 Rot	1	0.0	0.0	819.5	5042.7	0.0	0.0
OAK	HRU	6 Rot	1	0.0	0.0	168.8	1131.1	0.0	0.0
OAK	HRU	7 Rot	1	0.0	0.0	495.9	2657.3	0.0	0.0
OAK	HRU	8 Rot	1	0.0	0.0	1.8	66.9	0.0	0.0
FRSD	HRU	9 Rot	1	0.0	0.0	862.3	5101.2	0.0	0.0
FRSD	HRU	10 Rot	1	0.0	0.0	171.2	1137.5	0.0	0.0
FRSD	HRU	11 Rot	1	0.0	0.0	495.2	2656.2	0.0	0.0
OAK	HRU	12 Rot	1	0.0	0.0	2342.2	4393.9	0.0	0.0
OAK	HRU	13 Rot	1	0.0	0.0	4415.1	7895.4	0.0	0.0
OAK	HRU	14 Rot	1	0.0	0.0	6272.4	11099.4	0.0	0.0
PAST	HRU	15 Rot	1	0.0	101.0	124.3	175.7	0.0	0.0
FRSD	HRU	16 Rot	1	0.0	0.0	5651.9	10178.3	0.0	0.0
FRSD	HRU	17 Rot	1	0.0	0.0	52.3	323.6	0.0	0.0
PAST	HRU	18 Rot	1	0.0	0.0	61.3	85.4	0.0	0.0
FRSD	HRU	19 Rot	1	0.0	0.0	0.9	44.7	0.0	0.0
FRSD	HRU	20 Rot	1	0.0	0.0	482.7	2644.6	0.0	0.0
FRSD	HRU	21 Rot	1	0.0	0.0	476.0	3224.4	0.0	0.0

FRSD	HRU	22	Rot	1	0.0	0.0	1.8	66.6	0.0	0.0
OAK	HRU	23	Rot	1	0.0	0.0	17.7	202.0	0.0	0.0
OAK	HRU	24	Rot	1	0.0	0.0	6385.1	11258.6	0.0	0.0
FRSD	HRU	25	Rot	1	0.0	0.0	17.7	202.0	0.0	0.0
OAK	HRU	26	Rot	1	0.0	0.0	540.5	3360.5	0.0	0.0
PAST	HRU	27	Rot	1	0.0	0.0	26.8	37.3	0.0	0.0
PAST	HRU	28	Rot	1	0.0	0.0	68.7	95.7	0.0	0.0
FRSD	HRU	29	Rot	1	0.0	0.0	0.7	39.5	0.0	0.0
FRSD	HRU	30	Rot	1	0.0	0.0	531.3	3344.5	0.0	0.0
FRSD	HRU	31	Rot	1	0.0	0.0	1.5	58.1	0.0	0.0
AGRL	HRU	32	Rot	1	0.0	0.0	11.5	57.2	0.0	0.0
FRSD	HRU	33	Rot	1	0.0	0.0	0.7	39.9	0.0	0.0

HRU STATISTICS

AVE ANNUAL VALUES

HRU	SUB	CPMN	SOIL	AREAk2	CN	AWCmm	USLE_LS	IRRmm	AUTONkh	AUTOPkh	MIXEF	PRECmm	SURQmm	GWQmm	ETmm	SEDth	N03kgh	ORGNkgh	BIOMth
YLDth																			
1	1	FRSE	Kasta±oz	.877E+01	46.75	149.90	4.57	0.00	0.00	0.00	0.20	997.16	9.08	335.38	510.74	1.89	2.77	10.37	1.75
0.87																			
2	1	FRSE	Luvisol	.251E+02	65.45	263.00	4.48	0.00	0.00	0.00	0.20	997.16	67.51	233.00	660.36	5.18	1.91	45.17	4.83
2.38																			
3	1	FRSE	Pheozem	.625E+01	46.75	3.00	4.43	0.00	0.00	0.00	0.20	997.16	0.32	540.93	178.16	0.07	0.29	0.99	0.05
0.02																			
4	1	PAST	Pheozem	.244E+02	58.65	3.00	3.01	0.00	0.00	0.00	0.20	997.16	3.62	401.50	176.93	0.35	0.10	5.12	0.14
0.06																			
5	2	OAK	Cambisol	.221E+02	56.10	190.00	5.13	0.00	0.00	0.00	0.20	1039.56	39.13	403.75	559.52	0.88	4.20	8.29	5.04
0.82																			
6	2	OAK	Leptosol	.886E+01	65.45	50.90	4.48	0.00	0.00	0.00	0.20	1039.56	97.38	306.56	438.28	28.08	1.03	79.60	1.13
0.17																			
7	2	OAK	Luvisol	.277E+02	70.55	71.50	3.58	0.00	0.00	0.00	0.20	1039.56	229.09	150.71	554.44	3.44	0.62	31.72	2.66
0.50																			
8	2	OAK	Pheozem	.113E+02	56.10	3.00	5.41	0.00	0.00	0.00	0.20	1039.56	3.90	584.59	161.17	1.55	0.35	15.80	0.07
0.00																			
9	2	FRSD	Cambisol	.434E+01	56.10	190.00	3.64	0.00	0.00	0.00	0.20	1039.56	41.74	378.34	566.29	0.54	3.69	5.76	5.10
0.86																			
10	2	FRSD	Leptosol	.256E+02	65.45	50.90	2.95	0.00	0.00	0.00	0.20	1039.56	97.65	284.27	439.39	20.52	0.84	73.10	1.14
0.17																			
11	2	FRSD	Luvisol	.770E+01	70.55	71.50	6.05	0.00	0.00	0.00	0.20	1039.56	228.12	155.93	553.89	5.10	0.76	39.33	2.66
0.50																			
12	3	OAK	Leptosol	.556E+01	65.45	50.90	5.85	0.00	0.00	0.00	0.20	997.16	56.45	328.17	445.80	1.56	0.79	16.48	4.39
2.34																			
13	3	OAK	Luvisol	.453E+01	65.45	134.60	5.22	0.00	0.00	0.00	0.20	997.16	87.04	236.35	545.63	0.10	0.36	0.81	7.90
4.42																			
14	3	OAK	Luvisol	.259E+02	56.10	126.10	4.57	0.00	0.00	0.00	0.20	997.16	10.42	397.14	571.26	0.03	0.93	0.77	11.10
6.27																			
15	3	PAST	Pheozem	.297E+02	58.65	3.00	3.20	0.00	0.00	0.00	0.20	997.16	3.63	405.63	176.85	0.38	0.10	5.46	0.14
0.06																			
16	3	FRSD	Luvisol	.330E+01	56.10	126.10	9.71	0.00	0.00	0.00	0.20	997.16	4.14	461.34	529.09	0.02	1.22	0.51	10.18
5.65																			
17	3	FRSD	Pheozem	.138E+02	56.10	3.00	3.83	0.00	0.00	0.00	0.20	997.16	2.09	418.48	178.53	0.27	0.15	4.12	0.32
0.05																			

0.06	18	4 PASTPheozem .610E+01	58.65	3.00	2.31	0.00	0.00	0.00	0.20	1039.56	6.51	345.96	161.94	1.18	0.06	14.68	0.09
0.00	19	4 FRSDLeptosol.320E+01	56.10	1.80	5.80	0.00	0.00	0.00	0.20	1039.56	3.15	413.93	114.62	1.72	0.09	11.86	0.04
0.48	20	4 FRSDLuvisol .107E+01	70.55	71.50	4.32	0.00	0.00	0.00	0.20	1039.56	228.20	151.74	556.36	2.90	0.66	28.68	2.64
0.48	21	4 FRSDLuvisol .173E+01	56.10	126.10	4.82	0.00	0.00	0.00	0.20	1039.56	36.37	445.38	519.41	0.94	1.80	13.43	3.22
0.00	22	4 FRSDPheozem .300E+01	56.10	3.00	3.13	0.00	0.00	0.00	0.20	1039.56	3.96	519.62	161.46	0.79	0.28	10.08	0.07
0.02	23	5 OAK Leptosol.249E+02	56.10	1.80	5.29	0.00	0.00	0.00	0.20	997.16	1.78	399.10	129.61	0.56	0.08	5.28	0.20
6.39	24	5 OAK Luvisol .196E+02	56.10	126.10	3.42	0.00	0.00	0.00	0.20	997.16	12.32	377.80	579.97	0.03	0.82	0.65	11.26
0.02	25	5 FRSDLeptosol.215E+02	56.10	1.80	4.91	0.00	0.00	0.00	0.20	997.16	1.78	394.89	129.61	0.52	0.07	4.98	0.20
0.54	26	6 OAK Luvisol .195E+02	56.10	126.10	4.32	0.00	0.00	0.00	0.20	981.14	25.50	411.51	511.50	0.52	1.68	9.55	3.36
0.03	27	6 PASTLeptosol.586E+01	58.65	1.80	3.99	0.00	0.00	0.00	0.20	981.14	4.31	322.90	109.42	1.93	0.03	13.54	0.04
0.07	28	6 PASTPheozem .142E+02	58.65	3.00	3.00	0.00	0.00	0.00	0.20	981.14	4.97	363.55	153.90	1.30	0.10	14.94	0.10
0.00	29	6 FRSDLeptosol.404E+02	56.10	1.80	6.17	0.00	0.00	0.00	0.20	981.14	2.71	393.17	109.41	2.04	0.09	12.86	0.04
0.53	30	6 FRSDLuvisol .115E+02	56.10	126.10	4.66	0.00	0.00	0.00	0.20	981.14	24.93	417.09	509.68	0.53	1.73	9.67	3.34
0.00	31	6 FRSDPheozem .152E+02	56.10	3.00	3.07	0.00	0.00	0.00	0.20	981.14	3.12	490.60	153.85	0.81	0.26	9.74	0.06
0.01	32	7 AGRLLeptosol.546E+00	65.45	1.80	1.23	0.00	201.54	0.00	0.20	981.14	11.90	276.30	109.29	1.36	0.21	13.36	0.06
0.00	33	7 FRSDLeptosol.135E+01	56.10	1.80	2.49	0.00	0.00	0.00	0.20	981.14	2.78	303.48	109.30	0.59	0.02	5.90	0.04

AVE MONTHLY BASIN VALUES								
MON	SNOW				WATER		SED	
	RAIN (MM)	FALL (MM)	SURF Q (MM)	LAT Q (MM)	YIELD (MM)	ET (MM)	YIELD (T/HA)	PET (MM)
1	10.52	0.00	0.18	1.82	8.05	6.92	0.05	136.00
2	3.83	0.00	0.00	0.55	3.97	6.18	0.00	165.17
3	4.83	0.00	0.00	0.68	2.80	24.25	0.00	212.03
4	10.28	0.00	0.00	1.35	2.93	14.32	0.00	214.40
5	63.77	0.00	0.45	9.12	12.81	24.02	0.11	200.70
6	214.06	0.00	6.95	39.58	59.81	51.31	0.27	147.72
7	202.29	0.00	8.82	40.30	71.72	58.24	0.53	149.57
8	196.44	0.00	7.42	38.74	70.91	55.78	0.46	157.08
9	204.89	0.00	12.16	42.27	82.92	50.95	1.24	144.11
10	76.57	0.00	2.64	17.29	48.48	33.06	0.27	153.39
11	11.12	0.00	0.11	2.46	24.72	13.03	0.02	137.72
12	6.44	0.00	0.12	1.41	15.10	7.15	0.02	120.90

AVE ANNUAL BASIN STRESS DAYS
 WATER STRESS DAYS = 95.56
 TEMPERATURE STRESS DAYS = 7.76
 NITROGEN STRESS DAYS = 29.52
 PHOSPHORUS STRESS DAYS = 2.93

1

SWAT Aug 11 VER 2009/Rev. 445

General Input/Output section (file.cio):
 21/06/2012 12:00:00 a.m. ARCGIS-SWAT interface AV

AVE ANNUAL BASIN VALUES

PRECIP = 1004.9 MM
 SNOW FALL = 0.00 MM
 SNOW MELT = 0.00 MM
 SUBLIMATION = 0.00 MM
 SURFACE RUNOFF Q = 38.87 MM
 LATERAL SOIL Q = 195.56 MM
 TILE Q = 0.00 MM
 GROUNDWATER (SHAL AQ) Q = 170.12 MM
 REVAP (SHAL AQ => SOIL/PLANTS) = 234.10 MM
 DEEP AQ RECHARGE = 21.27 MM
 TOTAL AQ RECHARGE = 425.48 MM
 TOTAL WATER YLD = 404.11 MM
 PERCOLATION OUT OF SOIL = 425.27 MM
 ET = 345.1 MM
 PET = 1934.6MM
 TRANSMISSION LOSSES = 0.44 MM
 TOTAL SEDIMENT LOADING = 2.961 T/HA
 POND BUDGET
 EVAPORATION = 0.000 MM
 SEEPAGE = 0.000 MM
 RAINFALL ON POOL = 0.000 MM
 INFLOW
 WATER = 0.000 MM
 SEDIMENT = 0.000 T/HA
 OUTFLOW
 WATER = 0.000 MM
 SEDIMENT = 0.000 T/HA
 RESERVOIR BUDGET
 EVAPORATION = 0.000 MM
 SEEPAGE = 0.000 MM
 RAINFALL ON RESERVOIR = 0.000 MM
 INFLOW
 WATER = 0.000 MM
 SEDIMENT = 0.000 T/HA
 OUTFLOW

WATER = 0.000 MM
 SEDIMENT = 0.000 T/HA
 YIELD LOSS FROM PONDS
 WATER = 0.000 MM
 SEDIMENT = 0.000 T/HA
 YIELD LOSS FROM RESERVOIRS
 WATER = 0.000 MM
 SEDIMENT = 0.000 T/HA

1

SWAT Aug 11 VER 2009/Rev. 445

General Input/Output section (file.cio):
 21/06/2012 12:00:00 a.m. ARCGIS-SWAT interface AV

AVE ANNUAL BASIN VALUES

NUTRIENTS

ORGANIC N = 17.030 (KG/HA)
 ORGANIC P = 2.080 (KG/HA)
 NO3 YIELD (SQ) = 0.031 (KG/HA)
 NO3 YIELD (SSQ) = 0.797 (KG/HA)
 SOL P YIELD = 0.008 (KG/HA)
 NO3 LEACHED = 10.029 (KG/HA)
 P LEACHED = 0.240 (KG/HA)
 N UPTAKE = 4.380 (KG/HA)
 P UPTAKE = 0.787 (KG/HA)
 NO3 YIELD (GWQ) = 4.380 (KG/HA)
 ACTIVE TO SOLUTION P FLOW = 1.458 (KG/HA)
 ACTIVE TO STABLE P FLOW = 1.154 (KG/HA)
 N FERTILIZER APPLIED = 0.248 (KG/HA)
 P FERTILIZER APPLIED = 0.000 (KG/HA)
 N FIXATION = 0.000 (KG/HA)
 DENITRIFICATION = 0.000 (KG/HA)
 HUMUS MIN ON ACTIVE ORG N = 12.557 (KG/HA)
 ACTIVE TO STABLE ORG N = -9.577 (KG/HA)
 HUMUS MIN ON ACTIVE ORG P = 2.142 (KG/HA)
 MIN FROM FRESH ORG N = 2.358 (KG/HA)
 MIN FROM FRESH ORG P = 0.374 (KG/HA)
 NO3 IN RAINFALL = 2.010 (KG/HA)
 INITIAL NO3 IN SOIL = 20.442 (KG/HA)
 FINAL NO3 IN SOIL = 15.027 (KG/HA)
 INITIAL ORG N IN SOIL = 13523.681 (KG/HA)
 FINAL ORG N IN SOIL = 12745.666 (KG/HA)
 INITIAL MIN P IN SOIL = 308.810 (KG/HA)
 FINAL MIN P IN SOIL = 349.553 (KG/HA)
 INITIAL ORG P IN SOIL = 1656.651 (KG/HA)
 FINAL ORG P IN SOIL = 1545.686 (KG/HA)

NO3 IN FERT = 0.248 (KG/HA)
 AMMONIA IN FERT = 0.000 (KG/HA)
 ORG N IN FERT = 0.000 (KG/HA)
 MINERAL P IN FERT = 0.000 (KG/HA)
 ORG P IN FERT = 0.000 (KG/HA)
 N REMOVED IN YIELD = 1.671 (KG/HA)
 P REMOVED IN YIELD = 0.342 (KG/HA)
 AMMONIA VOLATILIZATION = 0.000 (KG/HA)
 AMMONIA NITRIFICATION = 0.000 (KG/HA)
 NO3 EVAP-LAYER 2 TO 1 = 7.108

DIE-GRO P Q = 0.0 (No/HA)
 DIE-GRO LP Q = 0.0 (No/HA)
 DIE-GRO P SED = 0.0 (No/HA)
 DIE-GRO LP SED = 0.0 (No/HA)
 BACT P RUNOFF = 0.0 (No/HA)
 BACT LP RUNOFF = 0.0 (No/HA)
 BACT P SEDIMENT = 0.0 (No/HA)
 BACT LP SEDIMENT = 0.0 (No/HA)
 BACT P INCORP = 0.0 (No/HA)
 BACT LP INCORP = 0.0 (No/HA)