



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO  
FACULTAD DE QUÍMICA

“LA COBERTURA Y USO DEL SUELO EN LA PRODUCCIÓN  
DE SEDIMENTOS Y ESCURRIMIENTOS SUPERFICIALES EN  
LA CUENCA EL TEJOCOTE, MÉXICO, MEDIANTE EL  
MODELO HIDROLÓGICO SWAT”

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRA EN CIENCIAS AMBIENTALES

SUSTENTA:  
KARLA GABRIELA MOCIÑO VELÁZQUEZ

DIRIGIDA POR:  
DR. SALVADOR ADAME MARTÍNEZ  
DR. DEMETRIO S. FERNÁNDEZ REYNOSO



TOLUCA, MÉXICO, ENERO 2015.

## **AGRADECIMIENTOS**

Para el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado para la realización de los estudios de Maestría bajo el número de becario 273680.

Para el Dr. Demetrio Fernández y el Ing. Carlos Palacios, el más grande y especial agradecimiento por brindarme su tiempo, paciencia e invaluable apoyo para la realización del presente trabajo de investigación, sin ellos no hubiera sido posible.

Igualmente, agradezco a mi familia por su cariño y compañía, y a ti Mauricio por tu gran amor; ustedes me motivan a continuar preparándome profesional y personalmente.

## CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	ix
RESUMEN.....	xi
SUMMARY.....	xii
INTRODUCCIÓN.....	1
JUSTIFICACIÓN.....	4
OBJETIVO GENERAL, PARTICULARES E HIPÓTESIS.....	6
1. MARCO CONCEPTUAL SOBRE LA CUENCA HIDROGRÁFICA Y MODELOS HIDROLÓGICOS DE SILUMACIÓN.....	8
1.1 La cuenca hidrográfica.....	8
1.1.1 Definición de cuenca hidrográfica.....	9
1.1.2 Tipos de cuencas hidrográficas.....	10
1.1.3 Manejo de cuencas hidrográficas.....	11
1.1.4 Manejo de cuencas en México.....	12
1.2 Hidrología superficial.....	15
1.2.1 Precipitación.....	15
1.2.2 Escurrimientos.....	16
1.2.3 Evaporación y evapotranspiración.....	19
1.2.4 Infiltración.....	20
1.3 Modelos hidrológicos.....	21
1.3.1 Definición de modelo.....	21
1.3.2 Utilidad de los modelos.....	22

1.3.3 Modelos para el manejo de cuencas .....	23
1.3.4 Modelo SWAT .....	34
2. ANTECEDENTES.....	54
2.1 Estudios a nivel internacional.....	55
2.2 Estudios a nivel nacional.....	59
3. METODOLOGÍA .....	61
3.1 Caracterización geomorfológica de la cuenca hidrográfica.....	62
3.2 Bases de datos para alimentar el modelo SWAT (Archivos de entrada al Arc SWAT en texto y tablas).....	70
3.2.1 Datos generales de la cuenca (ARCHIVO BSN).....	73
3.2.2 Generadores climáticos (ARCHIVO WGN) .....	77
3.2.3 Datos generales de las URH (ARCHIVO SUB).....	83
3.2.4 Datos de suelos (ARCHIVO SOL) .....	85
3.2.5 Datos generales del manejo de los cultivos (ARCHIVO MGT).....	88
3.2.6 Datos de riego.....	89
3.2.7 Datos de plaguicidas .....	90
3.2.8 Datos de los fertilizantes.....	90
3.2.9 Datos del cauce principal (ARCHIVO RTE).....	91
3.2.10 Datos de los cuerpos de agua (ARCHIVO PND) .....	95
3.2.11 Datos de aguas subterráneas (ARCHIVO GW).....	97
3.3. Calibración y validación .....	99
4. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA EL TEJOCOTE .....	103
4.1 Localización de la cuenca El Tejocote .....	103
4.2. Caracterización física de la cuenca El Tejocote.....	105

4.2.1 Fisiografía .....	105
4.2.2 Hidrología .....	105
4.2.3 Geología .....	109
4.2.4 Climatología .....	111
4.2.5 Edafología .....	111
4.2.6 Uso de suelo y vegetación.....	114
4.3 Caracterización geomorfológica de la cuenca El Tejocote.....	116
4.3.1 Tipo de cuenca.....	116
4.3.2 Área y Perímetro de la cuenca .....	116
4.3.3 Pendiente media de la cuenca .....	117
4.3.4 Relación hipsométrica .....	117
4.3.5 Forma de la cuenca .....	117
4.3.6 Red de drenaje .....	118
4.4 Factores socioeconómicos de la cuenca El Tejocote.....	121
4.4.1 Condiciones ambientales de la cuenca .....	122
5. RESULTADOS.....	126
5.1 Calibración y validación del modelo SWAT .....	126
5.1.1 Ajuste de parámetros .....	126
5.1.2 Validación del modelo SWAT .....	128
5.2 Producción de escurrimientos superficiales .....	128
5.2.1 Coeficiente de escurrimiento .....	131
5.2.2 Gasto medio mensual por subcuenca .....	133
5.2.3 Condición hidrológica de la cuenca .....	133

5.3 Producción de sedimentos.....	135
5.4 Rendimiento de cultivos.....	141
5.5 Producción de Biomasa.....	142
5.6 Cálculo de daños económicos por la producción de sedimentos y escurrimientos superficiales.....	144
5.7 Alternativas de uso de suelo y manejo de los recursos naturales.....	149
5.8 Acuse de recibo de artículo en extenso.....	157
6 DISCUSIÓN GENERAL .....	158
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	159
BIBLIOGRAFÍA .....	161
ANEXOS.....	172

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Valores de coeficiente de escurrimiento para diferentes condiciones de terreno. ....	18
Cuadro 2. Clasificación de cuencas hidrográficas por su tamaño. ....	63
Cuadro 3. Datos estadísticos climáticos requeridos por el modelo SWAT. ....	80
Cuadro 4. Estaciones climatológicas seleccionadas para la cuenca El Tejocote. ....	81
Cuadro 5. Datos de propiedades físicas y químicas de los suelos requeridos por el modelo SWAT. ....	86
Cuadro 6. Valores de coeficiente del banco de vegetación ....	92
Cuadro 7. Valores del coeficiente de la cama de vegetación. ....	93
Cuadro 8. Vegetación y Usos del Suelo de la cuenca El Tejocote. ....	114
Cuadro 9. Parámetros de la cuenca El Tejocote. ....	116
Cuadro 10. Enfoque ecosistémico de la cuenca El Tejocote ....	125
Cuadro 11. Parámetros más sensibles que afectan los valores del modelo SWAT ....	127
Cuadro 12. Parámetros estadísticos anuales de las producciones de agua y sedimento en la cuenca El Tejocote. ....	141
Cuadro 13. Rendimientos agrícolas simulados y observados de agricultura en la cuenca El Tejocote. ....	142
Cuadro 14. Daños por erosión de suelos. ....	144
Cuadro 15. Cierre de producción municipal, 2013, 2012 y 2011. ....	146
Cuadro 16. Estimaciones analizadas de los costos de algunas prácticas adoptadas en los Estados Unidos para combatir la erosión. ....	153
Cuadro 17. Unidades de gestión ecológica de la cuenca El Tejocote ....	155

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de los modelos ....	24
Figura 2. Modelamiento hidrológico de un evento en una cuenca andina ....	27
Figura 3. Distribución del flujo modelado en PRMS en escorrentía superficial, interflujo y flujo base ....	28
Figura 4. Software QGIS. ....	29
Figura 5. Software SAGA GIS. ....	30
Figura 6. Modelo numérico de una cuenca andina tridimensional en MODFLOW ....	31

Figura 7. Modelamiento de pluma contaminante de un botadero minero .....	32
Figura 8. Esquema del sistema fluvial por HEC-RAS y secciones de análisis .....	33
Figura 9. Visualización de resultados de inundación de río modelado en iRIC .....	34
Figura 10. Esquema del desarrollo histórico del SWAT y modelos adoptados.....	36
Figura 11. Fase terrestre del ciclo hidrológico .....	37
Figura 12. Componentes del modelo SWAT .....	40
Figura 13. División del nitrógeno en SWAT .....	48
Figura 14. División del fósforo en SWAT.....	49
Figura 15. Destino del pesticida y transporte en SWAT .....	50
Figura 16. Metodología de trabajo .....	61
Figura 17. Modelos de drenaje.....	65
Figura 18. Forma de la cuenca .....	70
Figura 19. Esquema de trabajo del modelo SWAT .....	72
Figura 20. Estaciones climatológicas e hidrométrica para la cuenca El Tejocote. ....	82
Figura 21. Mapa Base .....	104
Figura 22. Mapa Hidrológico .....	107
Figura 23. Mapa Geológico.....	110
Figura 24. Mapa Edafológico .....	113
Figura 25. Mapa Uso del Suelo y Vegetación.....	115
Figura 26. Curva Hipsométrica de la cuenca El Tejocote. ....	117
Figura 27. Orden de corrientes de la cuenca El Tejocote. ....	119
Figura 28. Ciclo del agua en la cuenca El Tejocote en un período de siete años. ....	129
Figura 29. Dinámica y magnitud de la producción de escurrimientos medidos y simulados en la cuenca El Tejocote con el modelo SWAT en un período de siete años.....	130
Figura 30. Análisis de regresión para la producción de escurrimientos medidos y simulados en la cuenca El Tejocote con el modelo SWAT en un período de siete años. ....	131
Figura 31. Mapa Coeficiente de Escurrimiento .....	132
Figura 32. Escurrimiento promedio por subcuenca.....	133
Figura 33. Distribución mensual de la precipitación, escurrimientos y evapotranspiración en la cuenca El Tejocote. ....	134
Figura 34. Distribución mensual de la precipitación, producción de agua, percolación y agua en el suelo en la cuenca El Tejocote.....	135
Figura 35. Dinámica y magnitud de la producción de sedimentos medidos y simulados en la cuenca El Tejocote con el modelo SWAT en un período de siete años. ....	136
Figura 36. Mapa producción de sedimentos .....	138
Figura 37. Producción de sedimentos por núcleos agrarios.....	140
Figura 38. Mapa producción de biomasa .....	143

Figura 39. Mapa erosión de suelos .....	148
Figura 40. Surcado en contorno.....	150
Figura 41. Surcos o melgas rectas .....	152
Figura 42. Terraza de formación sucesiva .....	152
Figura 43. Unidades de Gestión Ambiental de la cuenca El Tejocote .....	156

## ÍNDICE DE ANEXOS

Tabla 1. Resultados ciclo hidrológico de la cuenca El Tejocote.....	173
Tabla 2. Resultados de salida del modelo SWAT .....	174
Tabla 3. Producción de escurrimientos superficiales por subcuenca (mm).....	181
Tabla 4. Estadísticas climatológicas de la estación 15001 Acambay.....	182
Tabla 5. Estadísticas climatológicas de la estación 15029 Atlacomulco .....	183
Tabla 6. Estadísticas climatológicas de la estación 15251 Atlacomulco (Prepa) .....	184
Tabla 7. Estadísticas climatológicas de la estación 15261 El Jasmin .....	185
Tabla 8. Temperatura máxima mensual promedio por subcuenca.....	186
Tabla 9. Temperatura mínima mensual promedio por subcuenca .....	187
Tabla 10. Valores de radiación solar por subcuenca .....	188
Tabla 11. Cantidad máxima de lluvia en 0.5 h por subcuenca.....	190
Tabla 12. Promedio mensual de un día de lluvia después de un día seco por subcuenca	191
Tabla 13. Probabilidad mensual de un día de lluvia después e otro día de lluvia por subcuenca .....	192
Tabla 14. Punto de rocío por subcuenca .....	194
Tabla 15. Textura, Grupo Hidrológico, Número de capas y Profundidad máximo de la última capa de cada suelo en la cuenca El Tejocote.....	196
Tabla 16. Contenido de arcilla del suelo.....	197
Tabla 17. Contenido de fragmentos de roca del suelo.....	197
Tabla 18. Contenido de arena del suelo .....	198
Tabla 19. Contenido de limo del suelo .....	199
Tabla 20. Albedo húmedo del suelo .....	200
Tabla 21. Capacidad disponible de agua en suelos .....	201
Tabla 22. Densidad húmeda aparente del suelo .....	201
Tabla 23. Contenido de carbonato de Calcio del suelo .....	202
Tabla 24. Contenido orgánico de carbón del suelo .....	203

Tabla 25. Conductividad eléctrica del suelo .....	204
Tabla 26. Conductividad hidráulica saturada del suelo .....	205
Tabla 27. pH del suelo .....	205
Tabla 28. Profundidad de cada capa del suelo .....	206
Tabla 29. Factor K de erosibilidad del suelo.....	207
Tabla 30. Ancho promedio, profundidad del cauce, pendiente media, longitud promedio y rugosidad del cauce.....	209
Tabla 31. Grupos hidrológicos usados por el SCS .....	210
Tabla 32. Curva numérica (CN) para estimar el escurrimeitno bajo diferentes complejos suelo – cobertura y manejo de condición (condición de humedad II, y $I_a = 0.2S$ ).....	210
Tabla 33. Fracción de cada subcuenca que drena hacia los cuerpos de agua, área total de la superficie del almacenamiento, volumen de agua necesaria.....	212
Tabla 34. Manejo de los cultivos.....	213
Tabla 35. Longitud, pendiente promedio, ancho promedio, conductividad hidráulica y rugosidad del cauce por subcuenca.....	214

## **RESUMEN**

En el presente trabajo de investigación se aplicó el modelo hidrológico SWAT en la cuenca El Tejocote ubicada en los municipios de Acambay, Atlacomulco y Temascalcingo, Estado de México, con la finalidad de simular la producción de escurrimientos superficiales y sedimentos en las diversas coberturas y/o usos de suelo en el periodo 2000-2006. Esto tiene un doble propósito, por un lado generar alternativas que manejo del suelo a fin de detener su degradación y, por otro validar el modelo empleado, para con ello aplicar dicho modelo a cualquier cuenca que no disponga de una estación de aforo.

La forma en la que el modelo arrojó los datos simulados fue a través de 29 subcuencas, dosificadas considerando sus características topográficas, edafológicas y de uso del suelo, de ésta manera se hizo más sencillo el análisis de las condiciones dentro de la cuenca, sus problemáticas y el planteamiento de alternativas propias de cada situación.

Como resultado se obtuvo que las subcuencas que más inciden en la producción de sedimentos y escurrimientos son aquellas ocupadas por agricultura de ladera, principalmente. Asimismo, debido a que los resultados de la simulación tanto para la producción de escurrimientos y sedimentos, como de producción de biomasa y rendimientos agrícolas, fueron muy cercanos a lo medido por la estación de aforo de la cuenca, se concluyó que el modelo es recomendable para su aplicación en cualquier cuenca de condiciones similares.

Un aspecto de igual importancia, fue el uso de los sistemas de información geográfica para la aplicación del modelo, la posibilidad de trabajar con diversas plataformas como ArcGis, facilita al usuario el manejo de grandes bases de datos requeridas por el mismo, así como el ajuste de parámetros.

## **SUMMARY**

In the present investigation the SWAT hydrological model was applied in the basin El Tejocote located in the municipalities of Acambay, Atlacamilco and Temascalcingo, Estado de México, in order to simulate the production of surface runoff and sediment in the various coverages and/or land uses in 2000-2006. This has a dual purpose, firstly to generate alternative land management in order to stop their degradation and, the other to validate the model used, to thereby apply this model to any basin that does not have a gauging station.

The way in which the model simulated data was flung across 29 sub-basins, dosed considering its topography, soil and land use, this way the analysis of conditions within the basin became more simple, its problems and approach of each alternative situation.

The obtained results showed that the sub-basins that most affect sediment production and runoff are those occupied hillside agriculture mainly. Also, due to the results of the simulation for both the production of runoff and sediment and biomass production and crop yields were very close to that measured by the gauge of the basin, it was concluded that the model is recommended for application in any basin similar conditions.

An equally important aspect was the use of geographic information systems for the application of the model, the ability to work on multiple platforms such as ArcGIS, helps users to manage large databases required for the same, and the adjustment parameter.

## **INTRODUCCIÓN**

El presente trabajo de investigación se desarrolló en la cuenca El Tejocote, ubicada sobre los municipios de Atlacomulco, Temascalcingo y Acambay, municipios cuya actividad económica principal es la agricultura. Dicha cuenca cuenta con las condiciones físicas para el desarrollo de tal actividad, como es la disponibilidad de agua, clima, los tipos de suelo, además de mano de obra e incluso una buena ubicación geográfica para la distribución de productos, con lo que representa una de las principales regiones en México, en producción de gramíneas.

Sin embargo, las presiones demográficas, económicas y la falta de infraestructura agrícola moderna han transformado y dañado los recursos naturales de la cuenca. Por ejemplo, no se tiene control alguno del cambio de uso de suelo, reconvirtiendo pastizales naturales y bosques a zonas agrícolas y con ello generando la erosión de suelos, el azolvamiento de cuerpos de agua e incluso inundaciones en las partes bajas de la cuenca.

La gestión del agua es también un aspecto fundamental en la planeación, uso y manejo de recursos naturales, así como en el desarrollo de actividades productivas. La disponibilidad del recurso agua, es un tema de relevancia para continuar con las producciones agrícolas de la cuenca; dicha cuenta con una estación hidrométrica “El Tejocote” donde se registra la cantidad de agua que escurre, sin embargo no se cuenta con una correcta gestión para el aprovechamiento de la misma.

Considerando el objetivo general del presente trabajo de investigación se retoman las consideraciones de Bonini (2003) en las cuales afirma que la mejor forma de abordar un estudio hidrológico de una región es a través de una cuenca, debido a que esta última constituye la unidad geográfica natural, donde la entrada es la precipitación y las salidas

son el escurrimiento y el sedimento, incluyendo el proceso la influencia de vegetación, suelo y topografía.

No obstante, en la mayoría de las ocasiones el problema de trabajar a escala de cuencas hidrográficas lo representa la manipulación de grandes volúmenes de información, su análisis y la posterior toma de decisiones. Ante esta circunstancia, una alternativa es el uso de los modelos hidrológicos de simulación, debido a su bajo costo y a la estimación razonable de sus resultados (Herrero y otros, 2010).

Los modelos de simulación basados en procesos de hidrología y erosión, son herramientas valiosas para evaluar el efecto de prácticas de manejo sobre el ambiente, escurrimiento, producción de sedimentos, erosión y productividad agrícola. Estos modelos utilizan como plataforma programas de cómputo de gran capacidad en almacenamiento de datos, como son los Sistemas de Información Geográfica (SIG) a través de varios softwares, entre los que destacan ArcGis, ArcView, Idrisi, entre otros (Torres y otros, 2004).

De entre este tipo de modelos de simulación hidrológica, se adoptó el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) que es un programa de modelamiento hidrológico diseñado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en conjunto con la Universidad de Texas. Este modelo se basa en un balance hídrico para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en la cuenca. Permite simular la producción de agua y sedimentos en cuencas hidrográficas, así como el efecto que en la calidad del agua tienen las prácticas agronómicas por el uso de pesticidas y fertilizantes (Proaño y otros, 2006).

De dicha forma la metodología utilizada para desarrollar el presente trabajo de investigación se basó en una primera parte de caracterización física y morfológica de la cuenca a fin de conocer su estado de conservación actual y el de los elementos naturales que

la componen y, una segunda parte correspondiente al esquema de trabajo propio del modelo.

Ello permitió dar respuesta a la pregunta de investigación planteada, en la cual se buscaba conocer cuál es la cobertura de mayor impacto en la producción de sedimentos y escurrimientos superficiales, teniendo como resultado que las agricultura sobre laderas es la que está provocando mayores afectaciones en la cuenca, ello debido a que no se cuentan con las correctas técnicas de cultivo, lo que demanda a su vez la necesidad de proponer prácticas de conservación de suelos, principalmente en la zonas con agricultura sobre laderas.

Al mismo tiempo que se logró afirmar la hipótesis planteada sobre la utilidad del modelo SWAT para determinar las condiciones hidrológicas de la cuenca así como también que permite elaborar una base de datos con la información hidrológica necesaria útil para cualquier proyecto al respecto y toma de decisiones.

Por tanto, se puede afirmar que el modelo SWAT es una buena herramienta para la simulación de los procesos hidrológicos de cualquier territorio donde se desee aplicar, sin embargo los usuarios deberán considerar que para lograr la mayor cercanía a la realidad es necesario contar con la máxima cantidad de información disponible en torno a climatología, características de los suelos, coberturas vegetales y la condiciones particulares de la zona, sobre todo en aquellas donde predominan las actividades agrícolas.

## **JUSTIFICACIÓN**

Diversas actividades antropogénicas como el cambio de cobertura y de usos de suelo, la agricultura intensiva, el sobrepastoreo, la deforestación y la creciente urbanización, en conjunto con la mala gestión del recurso agua, han provocado en la cuenca El Tejocote un incremento de producción de escurrimientos superficiales y sedimentos.

A pesar de que estos sedimentos son generados naturalmente y constituyen un aporte de suelo hacia las partes bajas de la cuenca y, los escurrimientos sirven para abastecer vegetación, recarga de cuerpos de agua, abastecimiento de la población y riego de cultivos; cuando se produce un importante volumen provoca impactos negativos.

Los riesgos de la producción de escurrimientos en exceso producen una mayor erosión de los suelos de la cuenca y con ello el abatimiento de los rendimientos agrícolas, asimismo el aumento de erosión produce mayor deslave y producción de sedimentos que llegan a las partes bajas de la cuenca provocando azolvamiento de drenes y cuerpos de agua.

Cuando dichos sedimentos llegan a las zonas urbanas transportados a la infraestructura hidráulica y sanitaria; los drenajes se tapan y provocan inundaciones, también se dañan caminos, carreteras, puentes, etc. Asimismo se considera que los escurrimientos en grandes cantidades crean fallas en los terrenos, taludes y zonas de deslizamiento, por tanto ponen en peligro grandes áreas de asentamientos humanos.

Ante esta problemática se ve la necesidad de tomar medidas tendientes a mejorar las condiciones ambientales, cobertura vegetal y las prácticas productivas, a fin de conservar el recurso hídrico y de suelo. Cabe destacar que un método de gran ayuda para la conservación del agua es la existencia de estaciones de aforo que midan la cantidad de agua producida dentro de la cuenca hidrográfica, no obstante, en el país son pocas las que cuentan

con una de éstas. Es por ello, que se presenta un análisis de la cuenca El Tejocote a través de una simulación hídrica, debido a que el conocimiento de los procesos hidrológicos y los cambios climáticos que ocurren sobre la cuenca, permitirán establecer su grado de afectación, su comportamiento y la predicción de escenarios tendenciales.

Cuantificando el nivel de escurrimientos y sedimentos producidos a causa de la alteración de la cobertura vegetal y uso de suelo, se puede plantear alternativas que reordenen el manejo de la cuenca El Tejocote e impulsen el aprovechamiento racional de los recursos naturales.

Como antecedente se puede justificar que la relación que guardan las diversas coberturas vegetales y usos del suelo con la producción de escurrimientos y sedimentos atiende a que un territorio ocupado por bosques, selvas, matorrales o cualquier tipo de vegetación produce una mayor retención de escurrimientos y suelo, caso contrario de aquellos suelos ocupados por agricultura sobre laderas principalmente, pastizales inducidos o suelos desnudos.

El análisis de la interacción entre todos los sectores económicos, sociales y naturales permitirá desarrollar procesos de planificación y toma de decisiones en el corto, mediano y largo plazo, sobre todo al incluir el uso de la simulación a través de modelos que en los últimos años, han sido cada vez más utilizados para comprender y gestionar las actividades naturales y humanas que afectan a los sistemas de cuencas hidrográficas.

## **OBJETIVO GENERAL, PARTICULARES E HIPÓTESIS**

### ***Objetivo General***

Aplicar, calibrar y validar el modelo SWAT para simular la producción de escurrimientos superficiales y sedimentos en la cuenca El Tejocote, a fin de generar alternativas de uso y manejo del suelo y agua.

### ***Objetivos Particulares***

- Caracterizar física y morfológicamente la cuenca hidrográfica El Tejocote para conocer sus condiciones actuales.
- Realizar un balance hídrico de la cuenca bajo estudio para utilizarlo como fundamento de las propuestas de manejo del recurso agua.
- Calibrar y validar el modelo SWAT para la cuenca hidrográfica El Tejocote.
- Proponer alternativas de uso de suelo y manejo del suelo y agua.
- Diagnosticar y recomendar el uso del modelo SWAT para cuencas hidrológicas que no cuentan con estaciones de aforo.

### ***Hipótesis***

La aplicación del modelo SWAT en la cuenca permitirá conocer cuál es la cobertura y/o uso de suelo que genera más producción de sedimentos y escurrimientos superficiales en la cuenca hidrográfica El Tejocote y con ello el mayor daño a los recursos naturales.

Asimismo se generará información hidrológica que pueda ser considerada para elaborar una planeación ambiental del recurso agua de una forma sustentable, además de implementar alternativas de uso y manejo del suelo y agua..

### ***Pregunta de investigación***

¿Cuál es la cobertura y/o uso de suelo de mayor impacto en la producción de sedimentos y escurrimientos superficiales en la cuenca hidrográfica El Tejocote, México?

# **1. MARCO CONCEPTUAL SOBRE LA CUENCA HIDROGRÁFICA Y MODELOS HIDROLÓGICOS DE SIMULACIÓN**

En el presente capítulo se pretende realizar un compendio sobre las generalidades de la cuenca hidrográfica, es decir, la conceptualización y tipología que diversos autores han presentado, así como también los principios que conlleva el manejo de cuencas y su desarrollo a través de la historia a nivel internacional y nacional.

También se retomarán los elementos con que la cuenca guarda una estrecha relación, como es el ciclo hidrológico y, algunas de las metodologías a través del uso de modelos ambientales que se han utilizado para el estudio de las cuencas hidrográficas. En especial, se tratará el marco teórico del modelo SWAT y los componentes en los cuales se basa la simulación que realiza.

## **1.1 La cuenca hidrográfica**

Las cuencas constituyen un complejo mosaico de ecosistemas, naturales y manejados, donde se otorgan bienes y servicios ambientales invaluable para nuestra existencia como son el suministro de agua dulce, la regulación del caudal de los ríos, el mantenimiento de los regímenes hidrológicos naturales. La regulación de la erosión o la respuesta a eventos naturales extremos, entre otros (Balvanera y Cotler, 2009).

Teniendo en mente estos antecedentes, el propósito de este apartado es ofrecer un panorama de las principales características físicas que componen una cuenca hidrográfica.

### **1.1.1 Definición de cuenca hidrográfica**

Stallings, (1982) citado por Loredo y otros, (2007) define a la cuenca hidrográfica como una unidad natural. Por su parte el Colegio de Postgraduados, (1977) la conceptualiza como un área limitada por un parteaguas y drenada por una corriente o por un sistema de corrientes, cuyas aguas concurren en un punto de salida. Sánchez y otros (2003) señalan también que es un concepto utilizado para designar un territorio, región o zona, cuya característica escurre hacia un cauce común que desemboca en un afluente más grande, en una laguna o en el mar.

Maas, (2005) describe a la cuenca como una especie de embudo natural, cuyos bordes son los vértices de las montañas y la boca es la salida del río o arroyo, en ella interrelacionan factores ecológicos, climatológicos, hidrológicos, sociales, económicos, culturales, etc., dando que cada cuenca tiene su propia dinámica.

En un sentido general algunas de las consideraciones para definir una cuenca hidrográfica, son las siguientes:

- a) Una cuenca es un área que es fuente de recursos hidráulicos, en la cual debe haber un manejo planificado de los recursos naturales y de la preservación del ecosistema (Helweg, 1992 y Nadal, 1993).
- b) Es también, un espacio ocupado por un grupo humano, que genera una demanda sobre la oferta de los recursos naturales renovables y realiza transformaciones del medio. Bajo esta perspectiva, las acciones que se ejecutan para la gestión y manejo de recursos naturales son las mismas acciones que se ejecutan en un programa de desarrollo regional aplicado al espacio de la cuenca hidrográfica (OEA, 1978; Varela, 1992 y Dourojeanni, 1993, 1994).

- c) Y, al mismo tiempo constituye un sistema organizado de relaciones complejas tanto internas como externas. Es un sistema contenido dentro de otro sistema (ambiente) constituido por las interacciones de otros subsistemas (biofísico, social, económico, etc.), cuyo fin principal es producir bienestar a la sociedad que la gobierna (cantidad y calidad de agua, energía, insumos, alimentos, recreación, etc.).

Hernández y otros, (2009) destacan también como las cuencas hidrográficas facilitan la percepción del efecto negativo de las acciones del hombre sobre su entorno, evidenciándolas en la contaminación y en la calidad del agua evacuada por la cuenca, quedando claro, por cierto, que el agua es el recurso integrador y el producto resultante de la cuenca.

### **1.1.2 Tipos de cuencas hidrográficas**

Desde el punto de vista de su salida, para Hernández y otros, (2009) existen fundamentalmente dos tipos de cuencas: a) endorreicas y b) exorreicas. En las primeras el punto de salida está dentro de los límites de la cuenca y generalmente es un lago; en las segundas, el punto de salida se encuentra en los límites de la cuenca y está en otra corriente o en el mar.

Parra, (2009) divide a la cuenca de varias formas, siendo común el uso del término subcuenca para denominar a las unidades de menor jerarquía, drenadas por un tributario del río principal. El término microcuenca se emplea para definir las unidades hidrográficas más pequeñas dentro de una cuenca principal. Esta subdivisión de las cuencas permite una mejor priorización de las unidades de intervención o tratamiento.

Loredo y otros, (2007) subdividen a la cuenca en microcuencas o unidades de planeación y programación de acciones donde se pueden desarrollar y coordinar los servicios integrados de la instituciones (CIAT, 1999).

### **1.1.3 Manejo de cuencas hidrográficas**

Se entiende por manejo de cuencas la aplicación de principios y métodos para el uso racional, integrado y participativo de los recursos naturales de la cuenca; fundamentalmente del agua, del suelo y de la vegetación, a fin de lograr una producción óptima y sostenida de estos recursos con el mínimo deterioro ambiental. En el manejo de la cuenca es importante la labor coordinada de las instituciones públicas y privadas pertinentes.

Así, es claro para varios autores como OEA, (1978), Arias y Duque, (1992), Varela, (1992), Nadal, (1993), CVC, (1995), Dourojeanni, (1993), (1994), Jouravlev, (2001), Dourojeanni y otros, (2002) que la cuenca es un espacio natural (un conjunto de sistemas entrelazados) idóneo para llevar a cabo la labor conjunta de la planeación de los recursos naturales. Según Parra, (2009) las cuencas como áreas geográficas son unidades óptimas de organización para conducir el manejo del agua y recursos estrechamente relacionados, sin embargo, debido a que los límites naturales de las cuencas raramente coinciden con jurisdicciones políticas y así ellas pueden no ser muy útiles para propósitos políticos, tanto la estructura de una organización de manejo de cuenca y la naturaleza de las actividades que deben enfrentarse deben ser acordes a la escala de la cuenca.

De igual forma, una importante necesidad para avanzar en el manejo de cuenca es desarrollar procedimientos prácticos para considerar el riesgo y la incertidumbre en la toma de decisiones. Los científicos y gestores deben enfatizar en que las expectativas de investigación y de toma de decisiones sean razonables, y que los planes de manejo de cuencas sean vistos como el punto de partida y no el producto final de un ciclo de manejo (Parra, 2009).

#### **1.1.4 Manejo de cuencas en México**

La historia del manejo de los recursos naturales se ha guiado por enfoques y propósitos diferentes utilizando distintas unidades de gestión. A nivel internacional organismos internacionales como la Comisión Económica para América Latina (CEPAL) ha formulado recomendaciones para reformas institucionales básicas para la instauración de organismo de cuenca. Del mismo modo, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo (OCDE) ha expresado en diferentes momentos su aprobación al uso del manejo integral de cuencas como uno de los instrumentos que deberían ser utilizados en la gestión del agua (Barrow, 1998).

Durante el IV Foro Mundial del Agua realizado en México en el 2006 se hizo explícita la necesidad de adoptar un enfoque a nivel de cuencas para el manejo integrado de los recursos hídricos (CONAGUA, 2006) y, finalmente la FAO en el mismo año, publicó los resultados de un trabajo colectivo mundial para sistematizar los resultados de la gestión de cuencas y analizar las tendencias hacia el futuro. Entre sus principales contribuciones está la conformación de un nuevo enfoque como el manejo “incorporado” o el manejo “conjunto” de cuencas que busca sustituir en el futuro al manejo integrado de cuencas. En este nuevo enfoque se enfatizan los objetivos de sustentabilidad para la conservación y manejo del capital natural como una base necesaria para alcanzar objetivos de desarrollo humano (las dimensiones social y económica de la sustentabilidad).

En el caso de México, la historia de la creación de organismos encargados del estudio de cuencas hidrográficas de acuerdo con Mollard y Vargas, (2005) ha pasado por las siguientes fases: la primera fase puede situarse a inicios del siglo X y estuvo caracterizada por un manejo completamente centralizado del agua a través de delegaciones o instancias regionales de las administraciones centrales. El interés principal consistía en la necesidad de controlar las crecidas y de extender el área agrícola irrigada. La segunda fase, ubicada

alrededor de los años 40's, consistió en crear organizaciones de grandes cuencas con el objetivo de establecer vastas políticas de desarrollo, siguiendo el ejemplo del valle de Tennessee en Estados Unidos, el cual se basó en el enfoque de gestión integral de recursos hídricos. La idea era impulsar y coordinar programas ambiciosos de desarrollo –incluido el industrial- en una gran región, mediante la gestión del agua.

A partir de ésta última etapa, los esfuerzos de México han sido constantes, los trabajos más recientes al respecto, fueron durante el sexenio 2001-2006, donde la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) plantearon que “para lograr el manejo integral de los recursos naturales en el territorio se adoptaría un enfoque integral de cuencas” para lo cual “se requería que el sector de medio ambiente a nivel federal se organizara de manera compatible con este concepto... mediante una estructura administrativa por cuencas hidrográficas”. Siguiendo con este precepto, a mediados del sexenio pasado, se instauró una coordinación, aquella correspondiente a la cuenca de México, la cual no consiguió un arraigo institucional que posibilitase sus funciones (Barrow, 1998).

En febrero del 2002 surgió a través del Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO) de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) el Programa Nacional de Microcuencas sustentado en la Ley de Desarrollo Rural Sustentable (Casillas, 2007). Para este programa, la unidad de gestión considerada son las microcuencas, donde se aplica un modelo de atención sobre tres ejes: el desarrollo del capital humano con enfoque de género, la conservación y rehabilitación de los recursos naturales y la diversificación productiva.

Hasta la fecha, la Comisión Nacional del Agua divide al país en 13 regiones hidrológicas donde actúan 25 Consejos de cuenca, los cuales funcionan como espacios de discusión y concertación para la toma de decisiones a nivel regional en los temas relacionados

principalmente con la distribución del agua. En este nivel existe un énfasis sobre la corrección de los problemas relacionados con el agua (tratamiento y distribución) y sobre estrategias del largo plazo relativas a un enfoque preventivo (protección de fuentes del recurso y prevención de su contaminación).

En este punto es necesario recalcar que toda gestión, y en particular aquella que involucra los recursos naturales de una cuenca, requiere por un lado, de un conocimiento sistémico de las condiciones biofísicas, sociales y económicas para entender las externalidades que se generan y por otro, de la participación activa de la sociedad organizada para llevar a cabo el seguimiento de las acciones y dar pie a la gobernanza de dichos recursos (GEA y otros, 2008).

En el país, sectores académicos también están sumando esfuerzos para consolidar el manejo de cuencas, buscando formar y consolidar equipos interdisciplinarios para el abordaje de problemas complejos y donde las cuencas, como territorios definidos naturalmente, representan unidades de trabajo adecuadas para el análisis ecosistémico, la planeación del desarrollo y la atención de grupos humanos vulnerables con un enfoque de desarrollo sustentable (Pineda y otros, 2007).

La experiencia en México es aún limitada y disímil, como ejemplo se pueden mencionar los casos de la cuenca del río Conchos y de la cuenca Lerma-Chapala. Ambas cuencas presentan superficies mayores a los 50000 km<sup>2</sup>, en la primera se tenía como objetivo principal la estabilización y/o reversión de las tendencias de deterioro de los ecosistemas dulceacuícolas para el año 2050 con un incremento sustancial de la calidad de vida de sus pobladores; en la segunda la premisa era la generación de consensos, acuerdos y negociación a nivel estatal y municipal.

## **1.2 Hidrología superficial**

La hidrología superficial describe la relación entre la lluvia y el escurrimiento lo cual es de importancia para los diversos usos del agua, ya sea para usos domésticos, agrícolas, control de inundaciones, drenaje urbano y rural. De igual manera, representa la dinámica de flujo del agua en sistemas superficiales como ríos, canales, corrientes, lagos, etc. (Aparicio, 1989).

### **1.2.1 Precipitación**

De acuerdo a SRH, (1974) en hidrología, la precipitación es el término general para toda el agua que proviene de las nubes y cae a la tierra en cualquiera de sus estados físicos. Existen varias formas de precipitación dependiendo las condiciones metereológicas existentes, en latitudes medias se pueden distinguir las siguientes: llovizna, lluvia, granizo, nieve, rocío y escarcha (Linsley y otros, 1990).

Según la SRH, (1974) el tipo y la cantidad de precipitación dependen enormemente del tipo y cantidad de enfriamiento y de la humedad existente en el aire, pudiendo encontrar precipitaciones de tipo ciclónica, convectiva, orográfica, por choques de masas de aire y por radiación.

Sin embargo, independientemente de la forma y tipo de precipitación, una vez que el agua de lluvia llega al suelo, la altura de precipitación, ocurrida en un tiempo, se distribuye, dependiendo la forma de distribución de las condiciones imperantes en el momento y en el sitio en que ocurre la precipitación.

Una parte es interceptada por las plantas, otra se deposita en almacenamientos superficiales, una más se infiltra incrementando las corrientes subterráneas, saturando primero el suelo y

la restante escurre superficialmente hacia los cauces naturales de drenaje, formando así las corrientes.

### **1.2.2 Escurrimientos**

Maderey, (1977) define a los escurrimientos desde el punto de vista hidrológico como la parte de la precipitación que aparece en las corrientes fluviales superficiales, perennes, intermitentes o efímeras, y que regresa al mar o a los cuerpos de agua interiores. Dicho de otra manera es el deslizamiento virgen del agua que no ha sido afectado por obras artificiales hechas por el hombre. Campos, (1992) detalla que el escurrimiento es la parte de la precipitación que fluye por gravedad por la superficie del terreno, o en el interior del mismo.

De acuerdo con la SARH, (1988) existen cuatro tipos de escurrimiento, de canales, el superficial, el subsuperficial y el subterráneo, de ellos el que presenta un mayor poder erosivo es el superficial, que se define como la porción de la precipitación que no se infiltra y se mueve sobre la superficie del suelo hacia la red de drenaje o cuerpos de agua de la cuenca.

Campos, (1992) coincide con los anteriores tipos de escurrimientos sintetizando cada uno de ellos, de la siguiente manera:

- *El escurrimiento superficial*, es la parte del escurrimiento que viaja sobre el suelo y después hacia los cauces. La parte del escurrimiento superficial que fluye sobre el terreno hacia los cauces se llama flujo sobre el terreno.
- *El escurrimiento subsuperficial*, también conocido como flujo subsuperficial o interflujo, es el escurrimiento debido a la porción de la precipitación que se infiltra en el terreno y se mueve lateralmente en los horizontes superiores del suelo hacia las

corrientes y otra se percola hasta alcanzar el agua subterránea, cuya descarga producirá el escurrimiento subterráneo.

Para estimar los escurrimientos según la SARH, (1988), es necesario considerar la porción de la precipitación que es interceptada en diferentes formas y posteriormente estimar la cantidad de lluvia que forma parte del escurrimiento. Ésta porción de la precipitación interceptada es fácil de conocer considerando la relación entre el volumen escurrido y el volumen llovido.

Cuando no se cuenta con datos de aforo a la salida de las corrientes de una cuenca, la estimación de los escurrimientos medio y máximo debe realizarse utilizando fórmulas empíricas que puedan predecir los escurrimientos con base en datos de precipitación y características del área. Para estimar los escurrimientos en forma indirecta, se determina previamente el coeficiente de escurrimiento, el que se define como la relación que existe entre el volumen escurrido y el volumen llovido.

Cuando no se cuenta con datos de escurrimiento, el valor del coeficiente se puede estimar por medio del Cuadro 1, propuesto por la SARH, (1988), de acuerdo con las características de la cuenca y al uso de suelo.

Cuando la cuenca o área de drenaje presenta diferentes tipos de suelo, vegetación y pendiente media, el coeficiente de escurrimiento se obtendrá para cada área parcial y posteriormente se calcula el promedio ponderado para conocer el valor medio del mismo por aplicar a la cuenca.

**Cuadro 1. Valores de coeficiente de escurrimiento para diferentes condiciones de terreno.**

Vegetación	Textura del suelo		
	Topografía	Gruesa	Media
Bosque			
Plano (0 a 5% pendiente)	0.10	0.30	0.40
Ondulado (6 a 10% pendiente)	0.25	0.35	0.50
Escarpado (11 a 30% pendiente)	0.30	0.50	0.60
Pastizales			
Plano (0 a 5% pendiente)	0.10	0.30	0.40
Ondulado (6 a 10% pendiente)	0.16	0.36	0.55
Escarpado (11 a 30% pendiente)	0.22	0.42	0.60
Terrenos cultivados			
Plano (0 a 5% pendiente)	0.30	0.50	0.60
Ondulado (6 a 10% pendiente)	0.40	0.60	0.70
Escarpado (11 a 30% pendiente)	0.52	0.72	0.82

Fuente: SARH, 1988.

La SRH, (1974) también determina el coeficiente de escurrimiento, por medio de la comparación de la cuenca con otra u otras de características climatológicas, de extensión, pendiente, vegetación, geología, forma de concentración, otros, semejantes y en las cuales se cuente con datos de aforo que hayan permitido deducir previamente el coeficiente de escurrimiento.

Considerando que el coeficiente de escurrimiento depende de otros factores, además de la intensidad de la lluvia, su variación en el transcurso del año no es lineal, de ahí que inicialmente se calcule el coeficiente medio anual y la precipitación media anual.

### **1.2.3 Evaporación y evapotranspiración**

Aparicio, (1989) lo define como el proceso por el cual el agua pasa del estado líquido en que se encuentra en los almacenamientos, conducciones y en el suelo, en las capas cercanas a su superficie, al estado gaseoso y se transfiere a la atmósfera.

La evaporación se produce básicamente por el aumento de energía cinética que experimentan las moléculas de agua cercanas a la superficie de un suelo húmedo o una masa de agua, producido por la radiación solar, el viento y las diferencias en presión de vapor. Este aumento de energía cinética provoca que algunas moléculas de agua “brinquen” de manera continua a la atmósfera. Al mismo tiempo, algunas de las moléculas que ya se encuentran en la atmósfera se condensan y regresan al cuerpo de agua SARH, (1988).

Linsley y otros, (1990) señalan que a pesar de que continuamente existe un intercambio de moléculas de agua hacia y desde la atmósfera, la definición hidrológica de evaporación está restringida a la tasa neta de transporte de vapor hacia la atmósfera. Según Aparicio, (1989) primeramente la transpiración es el agua que se despiden en forma de vapor de las hojas de las plantas. Esta agua es tomada por las plantas, naturalmente del suelo. Así resulta la evapotranspiración que es la combinación de evaporación y transpiración.

Del agua absorbida por el sistema de raíces de una planta, sólo una porción minúscula permanece en los tejidos de la misma; virtualmente, toda el agua retorna a la atmósfera en forma de vapor, debido a la transpiración. Este proceso constituye una fase importante del ciclo hidrológico debido a que es el mecanismo principal por medio del cual el agua precipitada sobre la superficie de la tierra regresa a la atmósfera (Linsley y otros, 1990).

De acuerdo con la SRH, (1974) en México se usan fundamentalmente dos métodos para el cálculo del uso consuntivo: el de Thornthwaite y el de Blaney-Criddle. El primero por tomar

en cuenta sólo la temperatura media mensual, arroja resultados estimativos que pueden usarse únicamente en estudios preliminares o de gran visión, mientras que el segundo es aplicable a casos más específicos.

#### **1.2.4 Infiltración**

De acuerdo con Aparicio, (1989) la infiltración se define como el movimiento del agua, a través de la superficie del suelo y hacia adentro del mismo, producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares.

Campos, (1992) denota la importancia del estudio de la infiltración para la comprensión y cuantificación de la relación precipitación-escorrimento, además, el agua infiltrada representa la mayor fuente de abastecimiento de plantas y cultivos.

Por tanto dicho autor afirma, que el fenómeno de la infiltración guarda una estrecha relación con las pérdidas producidas en el ciclo hidrológico, estas se resultan de la diferencia entre el volumen de agua que llueve en una cuenca y el que escurre por su salida; están constituidas por la intercepción en el follaje de las plantas y en los techos de las construcciones, la retención en depresiones o charcos que posteriormente se evapora o se infiltra, la evaporación y la infiltración. Además de que en la práctica es difícil separar estos cuatro componentes, la porción más considerable de las pérdidas está dada por la infiltración, por lo que es costumbre calcularlas conjuntamente bajo este nombre.

Los factores que afectan la capacidad de infiltración según Aparicio, (1989) son principalmente:

- Textura del suelo
- Contenido de humedad inicial

- Contenido de humedad de saturación
- Cobertura vegetal
- Uso del suelo
- Aire atrapado
- Lavado de material fino
- Compactación
- Temperatura, sus cambios y diferencias

Para concluir con el presente apartado sobre temas hidrológicos, se puede señalar que la importancia del estudio de la hidrología radica en ser el primer paso fundamental en la planeación, diseño y operación de proyectos hidráulicos. Así también la hidrología juega un papel importante en la operación efectiva de estructuras hidráulicas, especialmente aquellas que se destinan a la generación de energía y control de avenidas, donde se requiera con frecuencia el pronóstico de avenidas y sequías (Aparicio, 1989).

### **1.3 Modelos hidrológicos**

Debido a que en muchas ocasiones es complicado llevar a cabo experimentos en campo que respondan a las necesidades prácticas de la investigación sobre sistemas ambientales, se ha propuesto una amplia gama de modos de trabajo que relajan las estrictas condiciones que debe cumplir un experimento. Una de estas líneas es el estudio de los sistemas ambientales mediante modelos.

#### **1.3.1 Definición de modelo**

Acorde con Estrela, (1996) un *modelo* es una representación simplificada de una realidad compleja de forma que resulte adecuada para los propósitos de la modelización. Esta

simplificación se basa en una serie de asunciones acerca de cómo funciona un sistema que no son totalmente válidas pero permiten representar el sistema de forma más sencilla.

### **1.3.2 Utilidad de los modelos**

El estudio de cuencas mediante el uso de modelo cuenta con diversas ventajas entre las que destacan las siguientes (Fohrer y otros, 2001):

- Se pueden comprender mejor los procesos que ocurren en un sistema en un momento decisivo.
- Se tiene la posibilidad de estudiar varios escenarios diferentes y de manera rápida, ya que muchos de ellos no tienen operación en experimentos reales o en campo.
- La simulación de escenarios se asocia a su bajo costo. En la mayoría de las aplicaciones, el costo de la realización de un programa de ordenador es muchos órdenes de magnitud menor que el costo correspondiente en la investigación experimental.

Este factor adquiere una mayor importancia a medida que el problema verdadero de estudio es más grande y presenta complejidad (tal como una cuenca), y mayores costos de operación relacionados con las investigaciones de campo (Pessoa y otros, 1997).

- Es posible la simulación y predicción de los fenómenos físicos a corto, mediano y largo plazo. Asimismo a través de los modelos se pueden obtener relaciones causa-efecto, sin haber realizado cambios en los sistemas reales y las capacidades de simulación varían en términos de tiempo y espacio.
- Se utilizan para estudiar situaciones extremas, difícilmente observables en la realidad, como por ejemplo los efectos de precipitaciones muy intensas y prolongadas en cuencas hidrográficas, en su estado natural, o en las que se ha intervenido con obras como canales, represas, diques de contención, puentes, etc.

Fernández y otros, (s/f) mencionan como en las áreas de conocimiento relacionadas con el medio natural, al ser tan grande el número de factores que determinan el comportamiento de cada sistema, este proceso de selección de las variables a las que es más sensible el sistema y de eliminación del resto es una tarea imprescindible.

Por ello, la forma habitual de enfrentar los problemas en las ciencias de la Tierra es la utilización de modelos. Los modelos también pueden contribuir al medio ambiente, ubicando las áreas críticas, dando indicaciones para las operaciones de emergencia y contención (Aparecida y Calijuri, 2010).

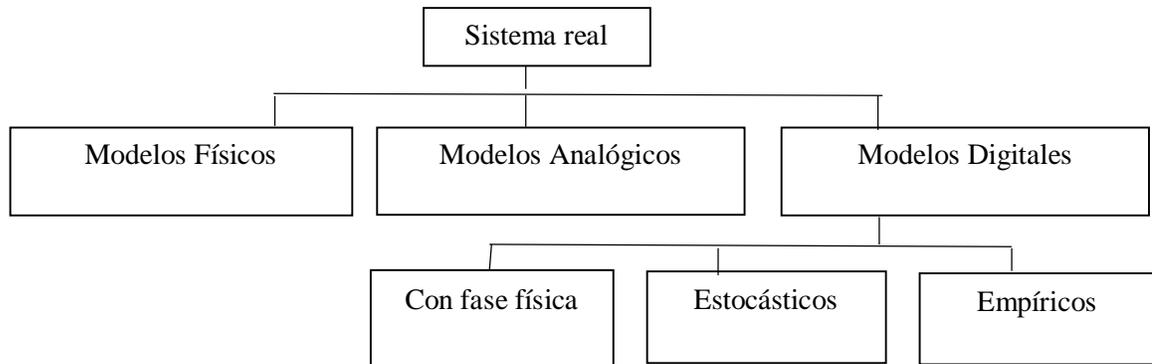
Pese a las cualidades que contienen los modelos, la principal limitación es la dificultad para trabajar gran cantidad de datos que describen la heterogeneidad de los sistemas naturales. Por estas razones, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se utilizan en la creación de la base de datos de estos modelos; la unión de estas dos tecnologías es un paso importante para la gestión de cuencas. Con esta combinación, no sólo se pueden construir escenarios actuales sino también simular escenarios futuros con un bajo costo y por lo tanto rápidos (Grigg, 1996).

### **1.3.3 Modelos para el manejo de cuencas**

El objetivo del presente apartado es mostrar algunos antecedentes de modelos que se han ocupado en estudios para determinar la erosión de suelos y procesos hidrológicos en cuencas, algunos de ellos incluyen el uso de los SIG como plataforma de trabajo.

#### **1.3.3.1. Modelación de la erosión de suelos**

Argota, (2011) clasifica a los modelos de acuerdo a los datos que utiliza y la forma de generarlos, esto se esquematiza en la Figura 1 siguiente.



Fuente: Argota, (2011)

**Figura 1. Clasificación de los modelos.**

Dentro de los digitales sobresalen aquellos con fase física que incorporan las leyes de conservación de la masa y la energía. La mayoría de ellos utilizan una ecuación diferencial particular denominada ecuación de continuidad, que representa un estado de la conservación de la materia y su transformación en el espacio y en el tiempo. Entre los cuales se describen los siguientes:

**a) Meyer y Wischmeier**

Casi todos los modelos con base física deben su origen al esquema, relativamente simple, desarrollado por Meyer y Wischmeier (1969) para comprobar si era factible una aproximación matemática que simulara la erosión. Este modelo utiliza cuatro ecuaciones para describir independientemente los procesos de desprendimiento de las partículas por la lluvia, el desprendimiento del suelo por la escorrentía, la capacidad de transporte de la lluvia y la capacidad de transporte de la escorrentía.

**b) ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Situation), Beasley, Huggins y Monke (1980)**

Es una ampliación del esquema de Meyer y otros, (1969), desarrollado para simular el comportamiento hidrológico y erosivo de pequeñas cuencas agrícolas durante las lluvias e inmediatamente después de ellas.

**c) CREAMS: Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management**

Es un modelo de campo, desarrollado en USA para evaluar la contaminación difusa y para investigar cuantitativamente las consecuencias ambientales de distintas prácticas agrícolas. El modelo tiene en cuenta tres componentes: hidrología, erosión y química.

**d) WEPP: Water Erosion Prediction Project**

Es un modelo basado en procesos que se apoya en los conocimientos modernos sobre hidrología y erosión, diseñado para reemplazar a la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo en las valoraciones rutinarias de erosión del suelo por organizaciones comprometidas en la conservación del suelo y del agua, y en la planificación y evaluación medioambiental. Los datos que proporciona este modelo es una potente herramienta para la planificación y conservación del suelo.

**e) GUESS: Griffith University Erosion Sedimentation System**

Es un modelo matemático que simula los procesos de erosión y deposición a lo largo de una ladera. El modelo difiere del CREAMS y del WEPP en que divide la superficie del suelo en dos partes: la que está en el suelo original y posee un cierto grado de cohesión y la comprendida en el material recientemente desprendido y sin cohesión.

**f) EUROSEM: European Soil Erosion Model**

Es un modelo basado en sucesos y desarrollado para computar el transporte de sedimentos, la erosión y la deposición sobre la superficie del suelo como consecuencia de una tormenta.

Puede aplicarse a parcelas o a pequeñas cuencas. Se utiliza para simular los efectos de la vegetación o el cultivo, teniendo en cuenta el drenaje foliar.

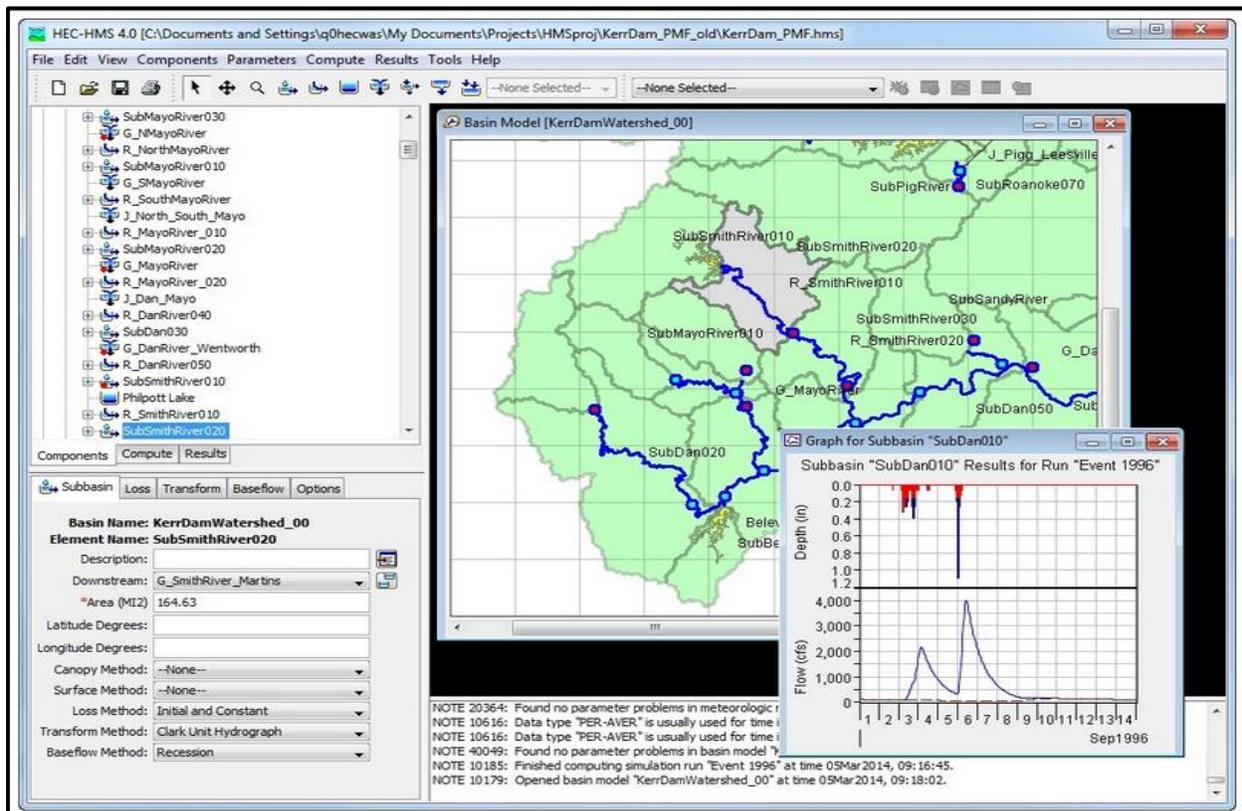
### **1.3.3.2 Modelación para estudios hidrológicos**

Debido a la complejidad de manipulación de datos en tiempo y espacio que requieren los estudios hidrológicos, varias instituciones a nivel mundial han trabajado en el desarrollo de modelos bajo plataforma de los SIG para facilitar a los investigadores en el estudio de cuencas y toma de decisiones.

Algunos de los programas que realizan simulaciones hidrológicas son los siguientes:

#### **a) Modelo HEC-HMS**

El Sistema de Modelación Hidrológica (HEC-HMS) está diseñado para simular los procesos hidrológicos de cuencas. El software incluye procedimientos de análisis hidrológicos tradicionales, como eventos de infiltración, hidrogramas unitarios, y enrutamiento hidrológico. HEC-HMS también incluye los módulos para la evapotranspiración, derretimiento de nieve y cálculo de la humedad del suelo. La Figura 2 muestra un ejemplo de la plataforma de trabajo del software.

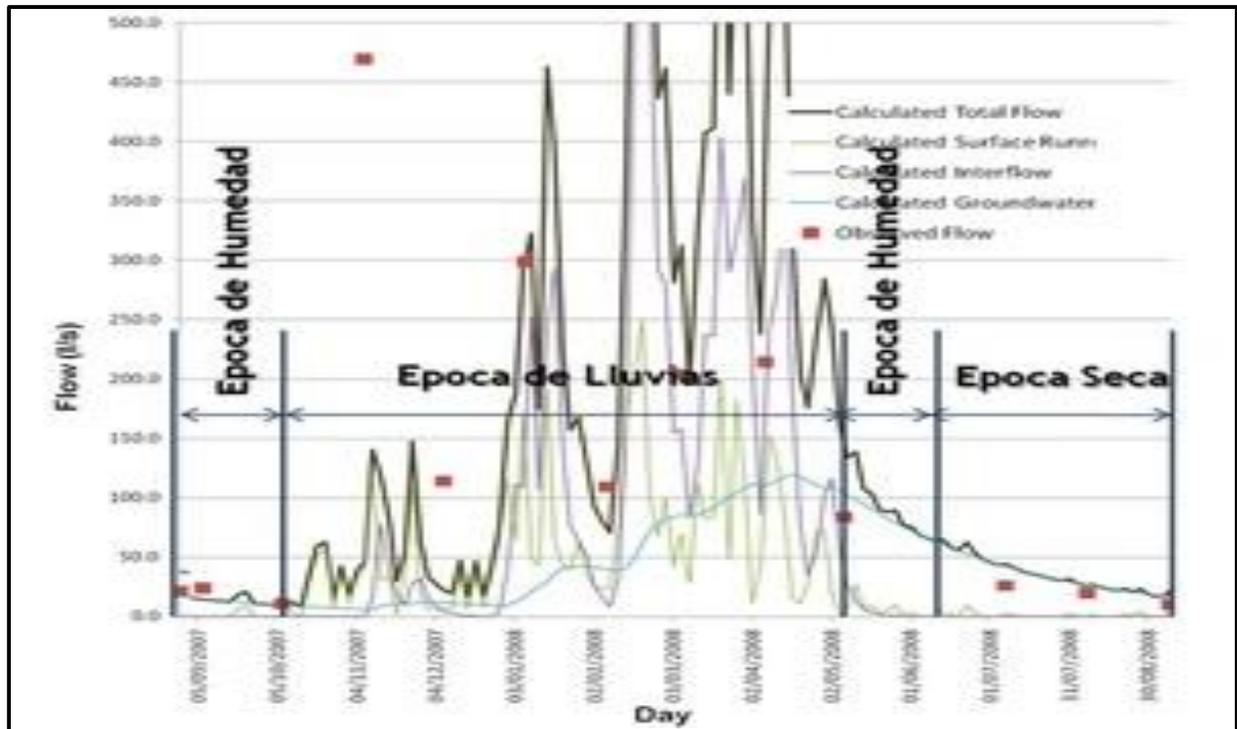


Fuente: Gidahatari, (2014)

**Figura 2. Modelamiento hidrológico de un evento en una cuenca andina.**

### b) Modelo PRMS

El código de modelamiento PRMS (Sistema de Modelamiento de Precipitación-Escorrentía) es un sistema modular, de parámetros espacialmente distribuidos, que representa los procesos físicos de una cuenca hidrográfica. Fue desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) para evaluar los efectos de varias combinaciones de geomorfología, tipo y uso de suelo, vegetación y parámetros climáticos sobre la respuesta hidrológica de la cuenca. La Figura 3 muestra un ejemplo de la simulación de modelado de flujos hidrológicos por el software PRMS.

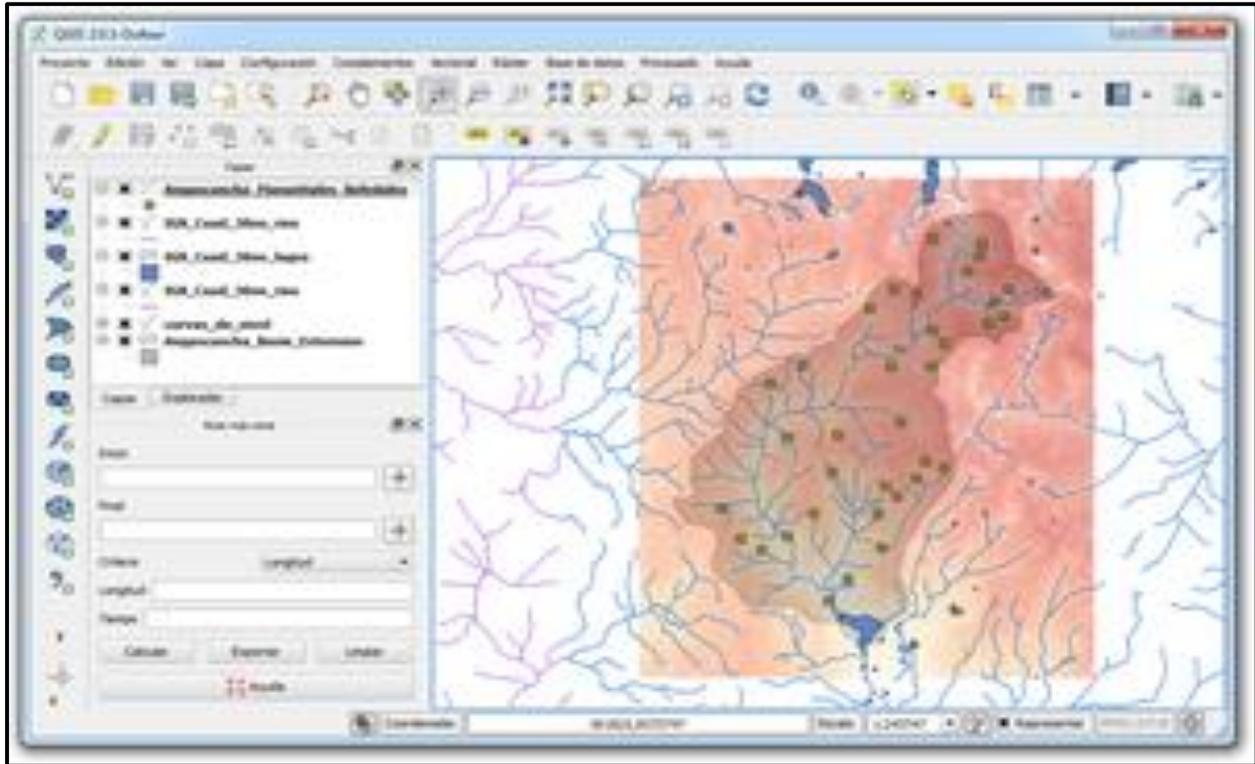


Fuente: Fuente: Gidahatari, (2014)

**Figura 3. Distribución del flujo modelado en PRMS en escorrentía superficial, interflujo y flujo base.**

### c) Modelo QGIS

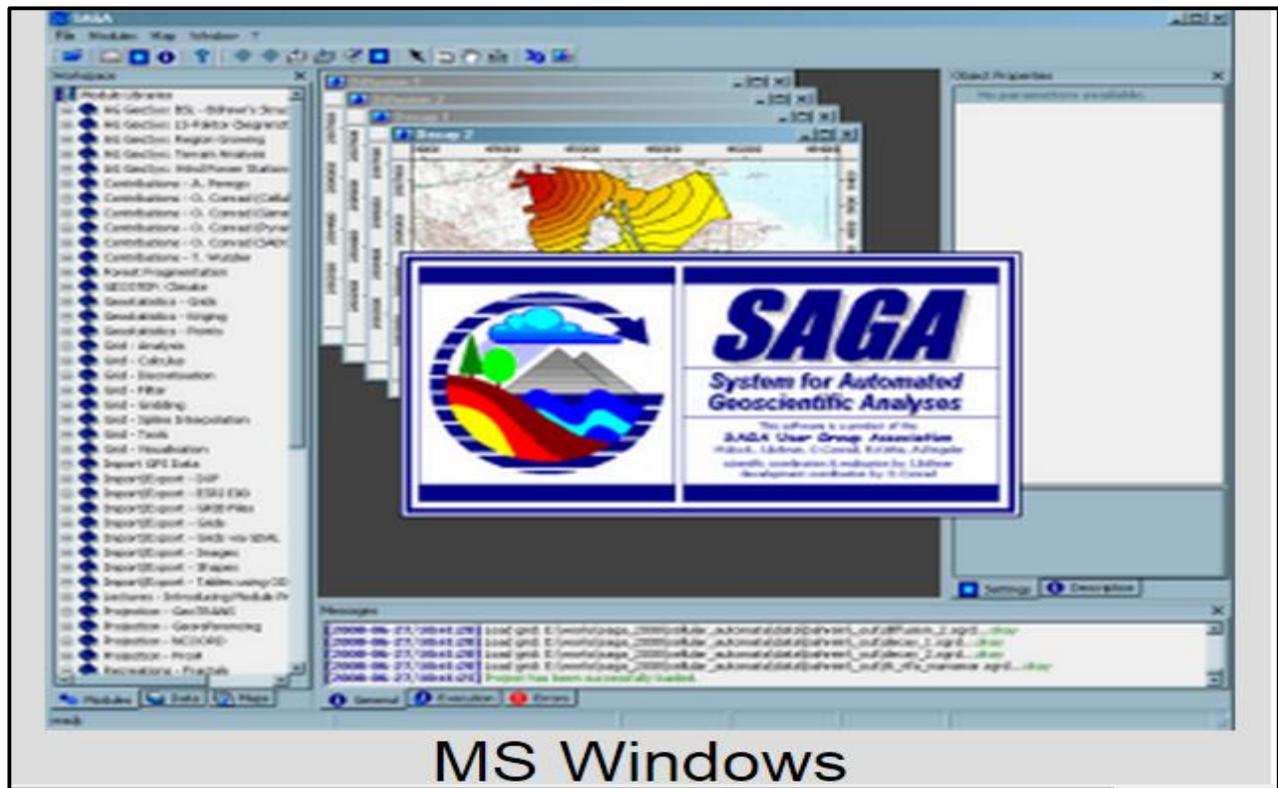
QGIS es una herramienta SIG de código abierto con particular ecosistema de complementos "plugins". QGIS ofrece una alternativa abierta que reduce las barreras de entrada y de costo, no tiene derechos de licencia, y se ejecuta en el sistema operativo de su elección. La Figura 4 muestra la plataforma electrónica donde se descarga el software de forma gratuita.



Fuente: Gidahatari, (2014)  
**Figura 4. Software QGIS.**

#### **d) Modelo SAGA GIS**

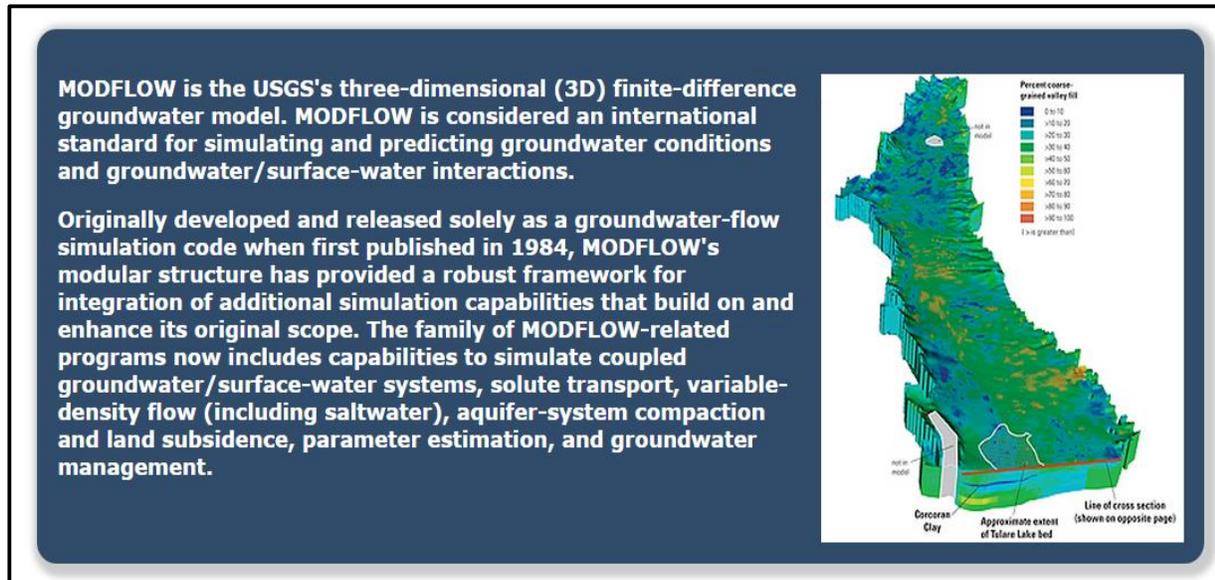
SAGA GIS, es una plataforma GIS orientada al análisis espacial y la caracterización de cuencas. Las opciones de interpolación en SAGA GIS están mejor implementadas que en otros softwares libres y comerciales. La Figura 5 muestra la plataforma de trabajo del software.



Fuente: Gidahatari, (2014)  
**Figura 5. Software SAGA GIS.**

**e) Modelo MODFLOW**

Modelo de agua subterránea por diferencias finitas desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). El modelamiento numérico es capaz de simular el flujo de agua subterránea en dos o tres dimensiones y simula los principales procesos físicos relacionados con el régimen de agua subterránea como recarga, evapotranspiración, bombeo, drenaje, etc. La Figura 6 muestra la plataforma electrónica donde se puede descargar el programa de manera gratuita.

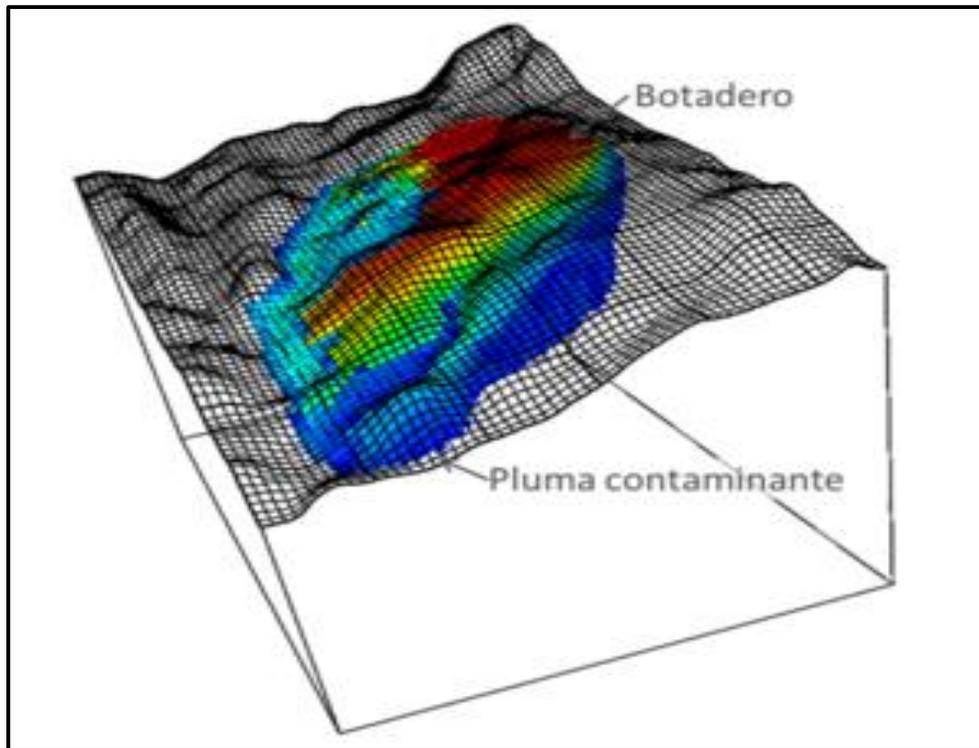


Fuente: Gidahatari, (2014)

**Figura 6. Modelo numérico de una cuenca andina tridimensional en MODFLOW.**

**f) Modelo MT3DMS**

El paquete MT3DMS es un modelo de transporte de masa acoplado a un modelo de flujo en MODFLOW. El código MT3DMS simula la advección, dispersión/difusión y las reacciones químicas de adsorción/absorción de los contaminantes en agua subterránea. La Figura 7 muestra un ejemplo de la simulación que realiza el software MT3DMS para una pluma contaminante de un botanero minero.

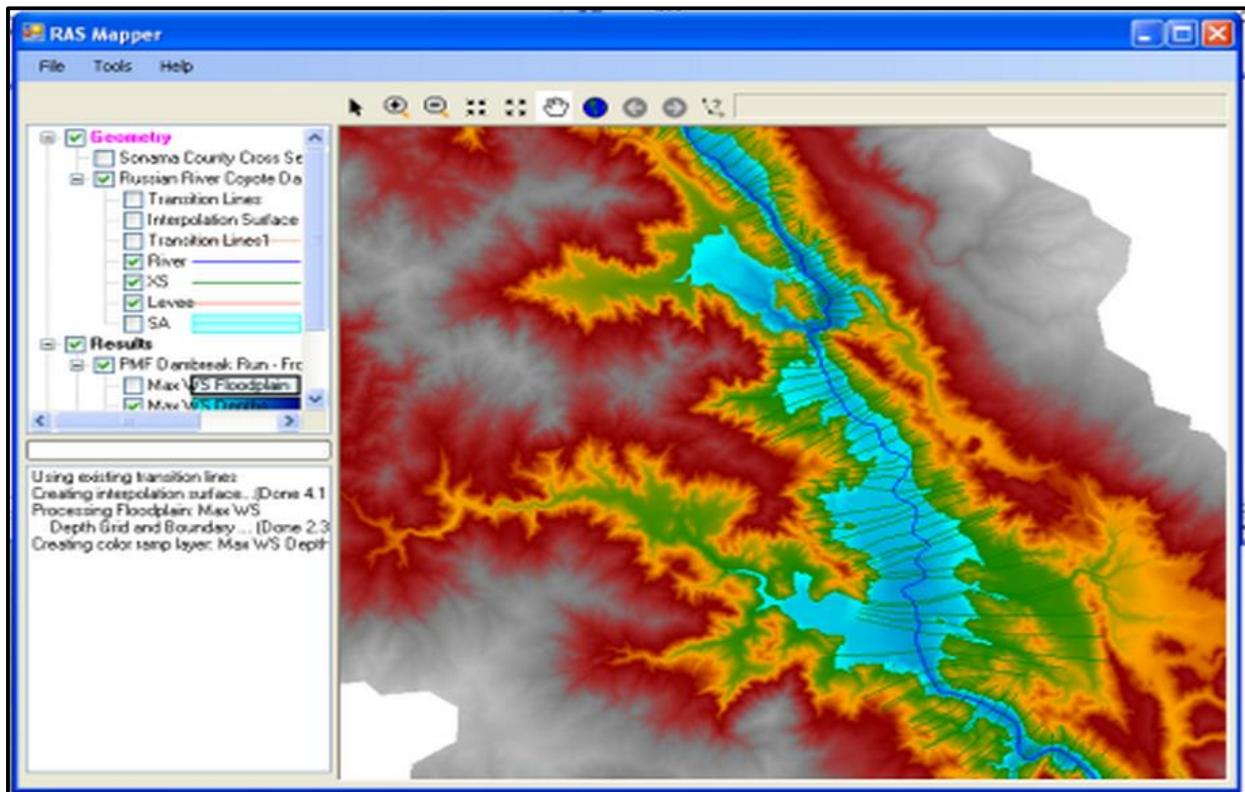


Fuente: Gidahatari, (2014)

**Figura 7. Modelamiento de pluma contaminante de un botadero minero.**

### **g) Modelo HEC-RAS**

El modelo numérico HEC-RAS fue desarrollado por un Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos. Los modelos hidráulicos de río utilizan la gradiente y la topografía para evaluar el tirante, las velocidades y las zonas inundadas. También sirve para calcular el transporte de sedimentos y la temperatura del agua. La Figura 8 muestra un ejemplo de simulación de un sistema pluvial realizado por el software HEC-RAS.

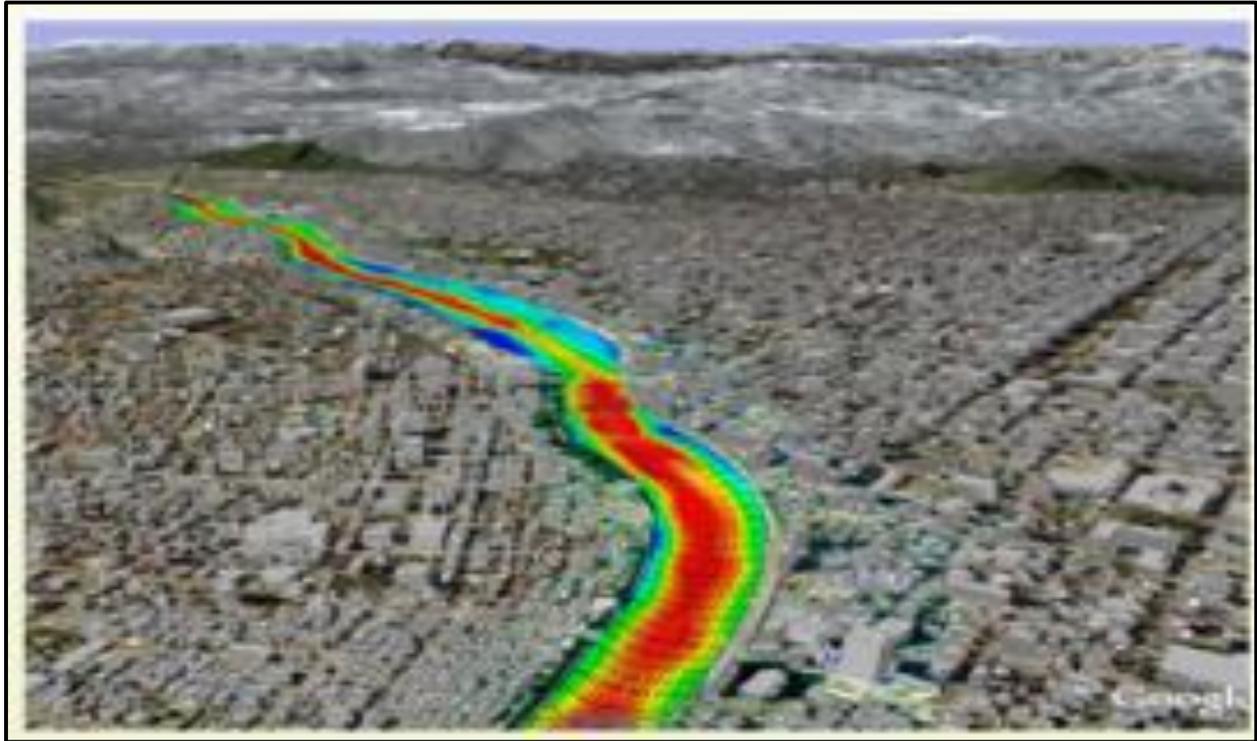


Fuente: Gidahatari, (2014)

**Figura 8. Esquema del sistema fluvial por HEC-RAS y secciones de análisis.**

### **h) Modelo iRIC**

iRIC (International River Interface Cooperative) es un software desarrollado con la finalidad de proporcionar un entorno completo de simulación del cauce del río, cuyos resultados pueden ser importados y utilizados por los usuarios con fines de análisis, mitigación y prevención de desastres, mediante la visualización de los resultados de la simulación del río. La Figura 9 muestra un ejemplo de simulación de inundación de un río realizada por el software.



Fuente: Gidahatari, (2014)

**Figura 9. Visualización de resultados de inundación de río modelado en Iric.**

#### **1.3.4 Modelo SWAT**

El Colegio de Postgraduados, (2005) menciona que el modelo Soil Water Assessment Tool (SWAT) fue desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en conjunto con la Universidad de Texas para predecir el impacto en el manejo del suelo y la vegetación en la producción de agua, sedimentos y químicos agrícolas en grandes y complejas cuencas con variación en suelos, uso de suelo y condiciones de manejo en largos periodos de tiempo. El modelo tiene como principal objetivo el predecir el efecto en la toma de decisiones en el manejo de la producción de agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas con razonable precisión en cuencas que no cuentan con estaciones de aforo (Arnold y otros, 1987).

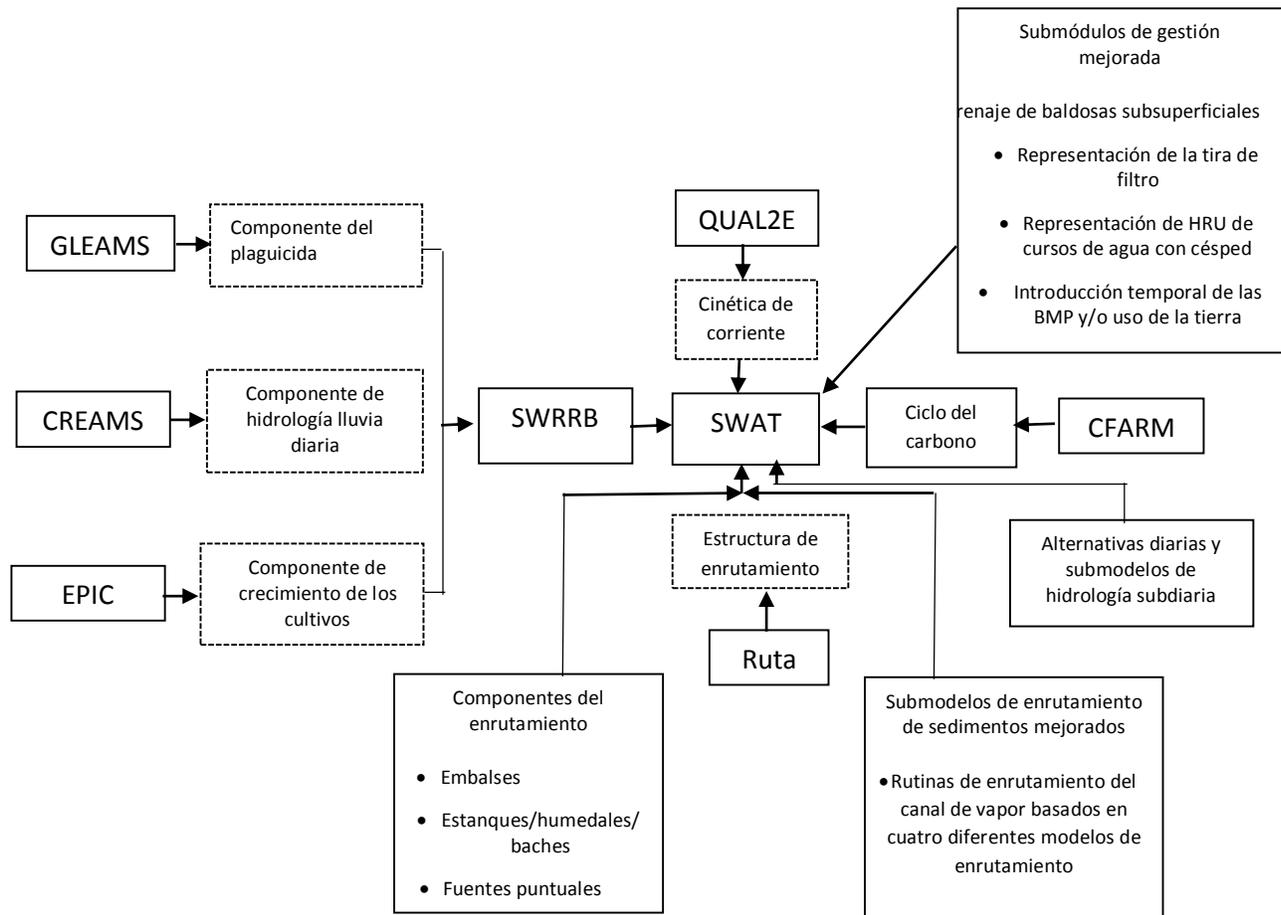
Arnold y otros, (2012), mencionan que desde su creación el modelo ha incluido componentes de los modelos de las USDA-ARS, además de algunos otros sobre transporte de plaguicidas, hidrología y crecimiento de los cultivos. Entre ellos se encuentra el modelo GLEAMS sobre los efectos de las aguas subterráneas a los sistemas de gestión agrícola, el modelo CREAMS sobre químicos, la escorrentía y la erosión de los sistemas de gestión agrícola y, el modelo integrado de Política Ambiental Climático; estos componentes fueron incorporados por primera vez en el Simulador de Recursos Hídricos en Cuencas Rurales (SWRRB).

En la actualidad se ha sumado el enrutamiento ampliado y el transporte de contaminantes incluyendo depósitos, estanques, humedales, fuentes puntuales, y efectos de tanques sépticos, así como las rutinas de enrutamiento de sedimentos y rutinas de transmisión cinéticas del modelo QUAL2E. Las modificaciones adicionales que se han incorporado en SWAT incluyen una mejor rutina del ciclo del carbono basado en el modelo CFARM, las rutinas diarias de hidrología incluyendo el método de infiltración de Green- Ampt, las acciones temporales de las prácticas de gestión y cambio de uso del suelo y, las mejoras en el drenaje en el subsuelo, franjas filtrantes, vías fluviales con césped, riego, y otras representaciones mejoradas de las prácticas de conservación y de gestión; todo ello se aprecia en la Figura 10.

Con la agrupación de dichos modelos, el SWAT permite simular la producción de agua y sedimentos en cuencas hidrográficas, así como el efecto que en la calidad del agua tienen las prácticas agronómicas por el uso de pesticidas y fertilizantes (Oñate y Aguilar, 2003).

El SWAT se basa en un balance hídrico para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en la cuenca. Para el modelamiento, la cuenca hidrográfica se divide en pequeñas subcuencas con el fin de mejorar la exactitud de los cálculos. Adicionalmente el SWAT

trabaja por unidades de respuesta hidrológica (HRU) obtenidas del cruce de los diferentes tipos de suelo con las coberturas presentes.



Fuente: Uribe, (2010)

**Figura 10. Esquema del desarrollo histórico del SWAT y modelos adoptados.**

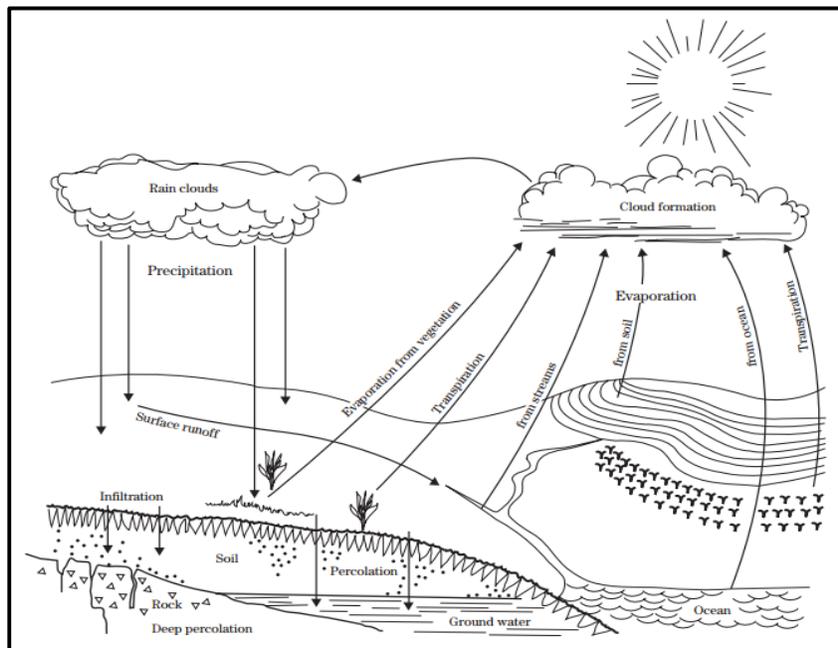
La simulación de la hidrología de la cuenca puede separarse en dos grandes divisiones: la primera división es la fase terrestre del ciclo hidrológico, que controla la cantidad de agua, sedimento y pesticidas transportados al canal principal por cada subcuenca y, la segunda es la del agua o la fase de tránsito, la cual puede definirse como el movimiento del agua, sedimentos, etc, a través de la red del canal hasta el sitio de descarga de la cuenca (Bonini y otros, 2003).

Las rutinas hidrológicas dentro de SWAT permiten simular los procesos de flujo superficial y del subsuelo, la infiltración, la evaporación y evapotranspiración de las plantas, el flujo lateral, percolación y producción de sedimentos. Estas rutinas se aplican a todas las subcuencas generadas por el modelo, permitiendo que las diferencias en sus características hidrológicas sean consideradas de forma independiente (Minoti, 2006).

### 1.3.4.1 Fase terrestre del ciclo hidrológico

Uno de los componentes del modelo SWAT corresponde a la simulación de todos los procesos que constituyen el ciclo hidrológico, lo cual permite realizar un balance hídrico en toda la cuenca; este ciclo controla la cantidad de agua y sedimentos que fluyen a través de las microcuencas hacia las redes de drenaje, dicho proceso se observa en la Figura 11.

Oñate y Aguilar (2003) afirman que el éxito de la simulación radica en la representación de los fenómenos involucrados en el ciclo hidrológico, de la manera más detallada y precisa posible, por lo que el SWAT para los cálculos considera los siguientes aspectos:



Fuente: Neitsch y otros, 2005

**Figura 11. Fase terrestre del ciclo hidrológico.**

### a) Balance hídrico

La hidrología del modelo se basa en el criterio de que el agua entra, sale y se almacena como lo describe la ecuación 1:

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

Donde:

$SW_t$  = Contenido de agua en el suelo el día  $t$ ,

$SW$  = Agua aprovechable por las plantas o el contenido de agua en el suelo menos el contenido de agua a 15 bar,

$t$  = Es el tiempo (días),

$R$  = Es la precipitación diaria (mm),

$Q$  = Es la cantidad de esorrentía diaria (mm),

$ET$  = Evapotranspiración diaria (mm),

$P$  = Percolación diaria (mm) y,

$QR$  = Flujo de retorno o flujo base (mm).

La cantidad de esorrentía es estimada aplicando la metodología del número de la curva del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS) (USDA-SCS, 1972), con datos de lluvia diarios. Esta ecuación se fundamenta en que la esorrentía está determinada por el suelo, la cobertura de suelo y la práctica de manejo que en éste se realice.

El agua que penetra en el suelo o infiltración puede tomar varios caminos: incrementar la humedad del suelo en la zona radical, moverse subsuperficialmente como flujo lateral hacia los canales de drenaje, recargar acuíferos poco profundos, donde ésta agua también llegara hasta los canales de drenaje y recargar acuíferos profundos. El SWAT considera flujo lateral, percolación y flujo de retorno.

El modelo SWAT ofrece tres métodos para la estimación de la evapotranspiración potencial: Penman-Monteith, Hargreaves and Sammami y Priestley – Taylor.

Las variables climáticas utilizadas por el SWAT son la precipitación, la temperatura del aire, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Si la precipitación y la temperatura diaria están disponibles deben ser ingresadas directamente al modelo, sino, el generador de variables climáticas puede simular la temperatura y precipitación diaria. Para aplicaciones prácticas, se recomienda utilizar las simulaciones del simulador de clima como última opción.

La producción de sedimentos se calcula para cada unidad de respuesta hidrológica con la ecuación modificada de la pérdida universal del suelo (MUSLE), la cual se desarrolla en la siguiente ecuación 2:

$$Y = 11.8(V \cdot q_p)^{0.56}(K)(C)(PE)(LS) \dots\dots\dots(2)$$

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 ( $m^3/s$ ),

$K$  = Es el factor de erodabilidad del suelo,

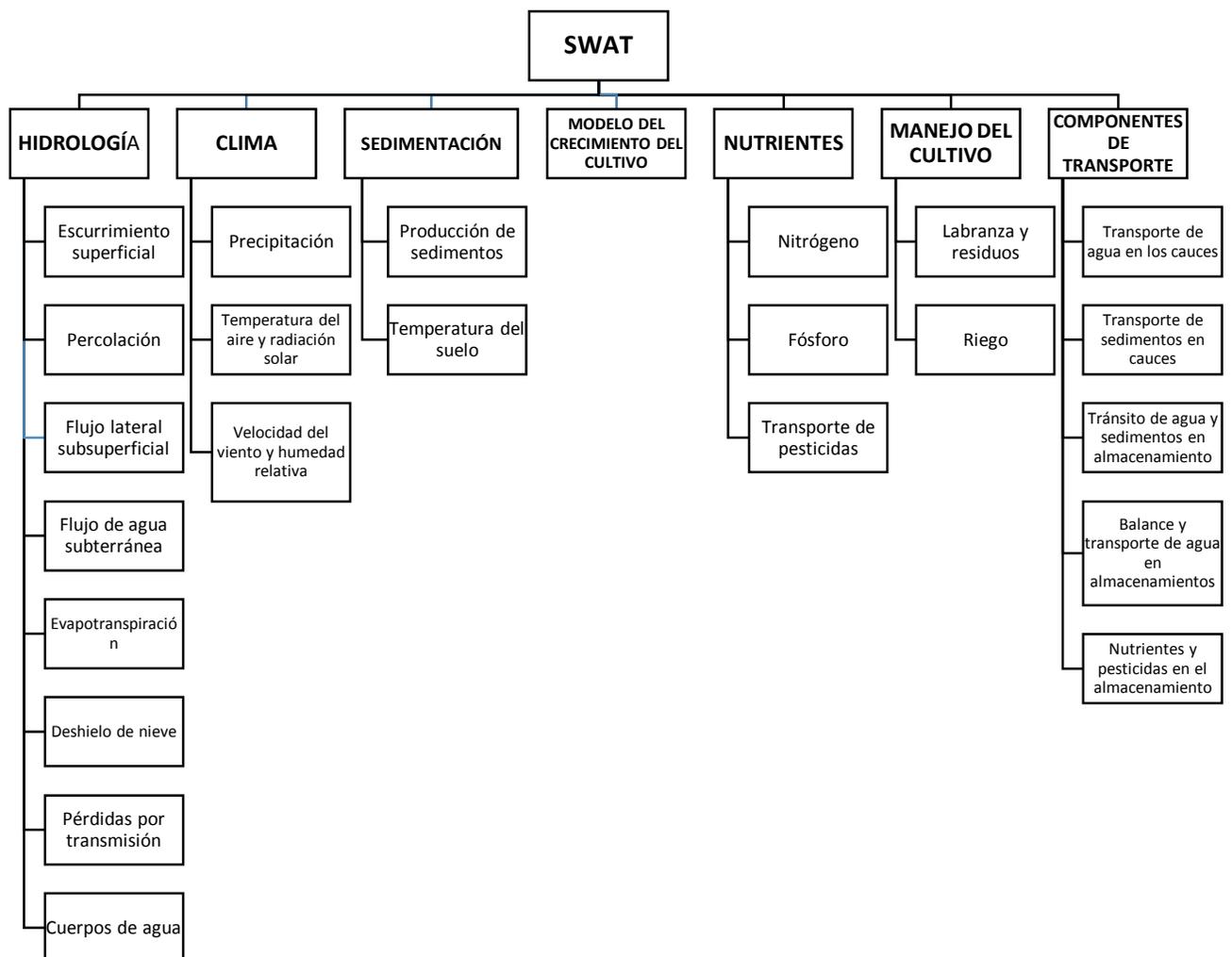
$C$  = Es el factor de manejo,

$PE$  = Es el factor de práctica del control de la erosión y

$LS$  = Es el factor de longitud de inclinación.

### 1.3.4.2 Componentes del modelo SWAT

Los componentes que integran el modelo SWAT son todos aquellos elementos y procesos que se desarrollan dentro de la cuenca de manera natural y a causa de las actividades antropogénicas, entre los cuales se encuentran: el componente hidrológico, el clima, la sedimentación, los nutrientes, el manejo de los cultivos, los componentes del transporte y el tránsito de agua y sedimentos en el almacenamiento. Dichos componentes se pueden apreciar en la Figura 12 y posteriormente se analizan de manera individual como lo describe Uribe, (2010).



Fuente: Uribe, (2010)

**Figura 12. Componentes del modelo SWAT.**

### a) Hidrología

El presente componente contempla los tipos de producción de agua por medio de escurrimientos, percolación, evapotranspiración o pérdidas por transmisión que son simulados por el modelo SWAT y que representan el aporte de agua hacia los mantos acuíferos, cuerpos de agua o que alimentan a los cultivos, dichos se señalan a continuación:

- **Escurrencimiento superficial.** El modelo simula los escurrimientos superficiales y los gastos máximos, que se producen por la lluvia diaria. El volumen de escurrimiento se estima con la técnica modificada de las curvas numéricas, propuesta por el Servicio de Conservación del Suelo (SCS) (USDA-SCS, 1972) representada en la ecuación 3, 3.1 y 4.

$$Q = \frac{(P-0.2S)^2}{P+(0.8S)} \dots\dots\dots(3)$$

$$Q > 0 \text{ Sí } 0.2S \leq P \dots\dots\dots(3.1)$$

Donde:

$Q$  = Escurrencimiento medio (mm)

$P$  = Precipitación por evento (mm)

$S$  = Retención máxima potencial (mm)

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \dots\dots\dots(4)$$

Donde:

$S$  = Potencial máximo de retención (mm)

$CN$  = Curvas numéricas (adimensional)

El uso de datos de precipitación diarios es particularmente importante para la técnica de las curvas numéricas debido a que en muchas localidades, los datos de precipitación con incremento en tiempo de menos de un día no existen. También, el manejo de los datos de precipitación y los cálculos de escurrimiento superficial son más eficientes para datos diarios que en intervalos más cortos.

El modelo cuenta con dos opciones para estimar el gasto máximo, la fórmula racional modificada y el método TR-55 del SCS (USDA-SCS, 1986). La ecuación racional cuenta con un elemento de tipo estocástico que permite la simulación real del gasto máximo, con base en la lluvia diaria y la intensidad de la lluvia mensual.

- **Percolación.** El componente de percolación del SWAT usa una técnica de almacenamiento que predice el flujo a través de cada capa de suelo en la zona de raíces. El flujo hacia abajo se presenta cuando se excede la capacidad de campo (CC) de una capa de suelo y si la capa inferior no está saturada. La tasa de flujo hacia abajo está gobernada por la conductividad a saturación en la capa del suelo. El flujo hacia arriba puede ocurrir cuando una capa inferior excede la CC. El movimiento de agua de una capa inferior hacia una capa inferior adyacente es regulado por el coeficiente de agua del suelo CC de las dos capas.
- **Flujo lateral subsuperficial.** El flujo lateral subsuperficial en el perfil del suelo (0-2 m) se calcula simultáneamente con la percolación. Se emplea un modelo cinemático de almacenamiento para predecir el flujo lateral en cada capa del suelo. El modelo considera variación en la conductividad, pendiente y contenido de agua en el suelo. También considera para el flujo hacia arriba a una capa adyacente o de la superficie.
- **Flujo de agua subterránea.** La contribución del flujo subterráneo al flujo total se simula creando un acuífero de almacenamiento poco profundo, la percolación a partir de la parte baja de la zona de raíces es una recarga para ese acuífero delgado.

Una constante de recesión derivada a partir de datos diarios de flujo se usa para retardar el flujo del acuífero a la corriente de agua.

- **Evapotranspiración.** El modelo ofrece tres opciones para su estimación: Hargreaves (Hargreaves and Samani, 1985), Priestley Taylor (Priestley and Taylor, 1972), y Penman-Monteinth (Monteinth, 1965). El método de Penman requiere datos de radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento. Si alguno de éstos datos no están disponibles (valores diarios) se pueden generar a partir de valores promedio mensuales. Los métodos Hargreaves y de Priestley Taylor dan opciones con resultados reales en la mayoría de los casos, éste método calcula la evapotranspiración de suelos y plantas separadamente mediante la ecuación 5.

$$E = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (Rn - G) \dots \dots \dots (5)$$

Donde:

$\alpha$  = parámetro adimensional de Priestley and Taylor

- La evapotranspiración potencial del agua en el suelo se estima como función de evapotranspiración y el índice de área foliar (el área de las hojas de una planta en relación al área del suelo  $m^2/m^2$ ).
- La evapotranspiración del suelo real se estima usando ecuaciones exponenciales de la profundidad del suelo.
- La evapotranspiración del agua en la planta se simula como una función lineal de la evapotranspiración potencial y el índice de área foliar.

- **Deshielo de nieve.** El componente de derretimiento de hielo del modelo SWAT es similar al del modelo CREAMS, si hay nieve esta se derrite en días cuando la temperatura máxima excede los 0°C usando una función lineal de la temperatura, la nieve derretida es transferida en la misma forma que la lluvia para estimar el

escurrimiento y la precipitación. Sin embargo, la energía de la lluvia es considerada como cero y la tasa del escurrimiento pico se estima asumiendo una distribución uniforme de la lluvia para una duración de 24 horas.

- **Pérdidas por transmisión.** Muchas cuencas de climas semiáridos tienen canales aluviales que sustraen grandes volúmenes de agua de la corriente (Lane, 1983). Las pérdidas por transmisión reducen los volúmenes de escurrimiento a medida que el agua escurre corriente abajo. El modelo SWAT utiliza el modelo de Lane descrito en el Manual de Hidrología del SCS (USDA, 1986) para estimar las pérdidas por transmisión. Las pérdidas en los canales son función del ancho del canal, de la longitud y duración del flujo, tanto el volumen de escurrimiento y la tasa pico se ajusta cuando ocurren pérdidas por transmisión.
- **Cuerpos de agua.** El almacenamiento en los cuerpos de agua se simula en función de la capacidad del cuerpo de agua, de las entradas y salidas diarias de agua, y de la transmisión y evaporación. Se asume que en los almacenamientos se tienen solamente vertedores de emergencia. Los datos requeridos son la capacidad y área de la superficie del almacenamiento. El área superficial debajo de la capacidad del almacenamiento se estima a partir de una función no lineal del almacenamiento.

## b) Clima

Las variables climáticas necesarias para correr el modelo SWAT son: precipitación, temperatura del aire, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Sí la precipitación diaria y las temperaturas máximas y mínimas no están disponibles pueden ser introducidas directamente al modelo, el generador climático puede simular tanto temperatura como la lluvia diaria. La radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa son siempre simuladas.

- **Precipitación.** El modelo de precipitación del SWAT desarrollado por Nicks (1974) es un modelo de cadena de Markov de primer orden, por lo tanto las entradas al

modelo deben incluir las probabilidades mensuales de recibir precipitación si el día anterior fue seco o húmedo. Dada la relación húmedo-seco el modelo determina estocásticamente si ocurre o no precipitación. Cuando un evento de precipitación ocurre, la lámina se calcula a partir de la generación de una distribución de la precipitación diaria. La cantidad de la precipitación diaria se reparte entre la lluvia y la nieve usando la temperatura diaria promedio del aire

- **Temperatura del aire y radiación solar.** La temperatura del aire, máxima y mínima, así como la radiación solar se genera a partir de una distribución normal corregida por las probabilidades húmedo-seco. El factor de corrección se usa para dar mayor desviación en la temperatura y radiación cuando el clima cambia y para días lluviosos. De esta manera las desviaciones son menores en días secos. Los factores de corrección se calculan para asegurar que las desviaciones estándar a largo plazo de variables diaria se mantengan.
- **Velocidad del viento y humedad relativa.** La velocidad del viento diaria se simula usando una ecuación especial, ya que la velocidad mensual media del viento es un factor de entrada. El modelo de humedad relativa simula promedios diarios a partir de promedios mensuales, esto lo hace utilizando una distribución triangular igual que con la temperatura y la radiación, la humedad relativa media diaria se ajusta para tomar en cuenta los efectos de días húmedos y secos utilizando la ecuación 6.

$$Rh = \frac{e}{e0} \dots\dots\dots(6)$$

Donde:

$Rh$  = Humedad relativa en un día dado (mm)

$E$  = presión de vapor actual en un día dado (kPa)

$e0$  = saturación de presión de vapor en un día dado (kPa)

y

por el modelo exponencial modificado por Richardson y Wright, (1984) para generar la velocidad diaria y la dirección dada la media mensual de velocidad del viento mediante la ecuación 7:

$$\mu_{10m} = \mu wnd_{mon} (\ln(rnd_1))^{0.3} \dots\dots\dots(7)$$

Donde:

$\mu_{10m}$  = velocidad media del viento para el día analizado (m/s)

$wnd_{mon}$  = velocidad media del viento para el mes analizado (m/s)

$rnd_1$  = número aleatorio entre 0.0 y 1.0

### c) Sedimentación

Dicho componente presenta totalmente la producción de sedimentos que simula el modelo y el elemento de temperatura del suelo que considera para dicho proceso.

- **Producción de sedimentos.** La producción de sedimentos se estima para cada subcuenca con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada. El modelo hidrológico provee la estimación del volumen de escurrimiento y la tasa de escurrimiento pico. El factor de manejo de los cultivos se evalúa como la biomasa aérea, el residuo de cosecha en la superficie y el valor mínimo del factor C para el cultivo. Otros factores de la ecuación de erosión se evalúan como los describe Wischmeier y Smith (1978).
- **Temperatura del suelo.** Los promedios diarios de la temperatura del suelo se simulan para el centro de cada capa de suelo para usarse en la hidrología y la degradación del residuo. La temperatura de la superficie del suelo se estima usando la temperatura diaria del aire máxima y mínima y la cantidad de nieve, planta y las coberturas de residuos para el día de interés más los cuatro días inmediatos

anteriores. La temperatura del suelo se simula para cada capa usando una función de la profundidad, temperatura superficial y la temperatura media anual del aire. La profundidad depende de la densidad aparente y del agua del suelo.

#### **d) Modelo de crecimiento del cultivo**

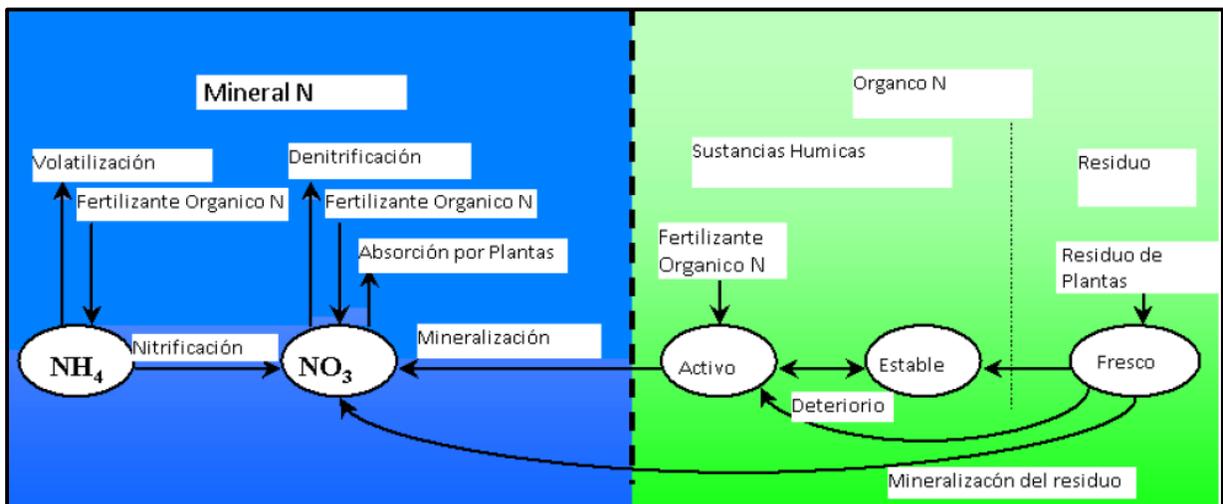
Dentro del modelo un solo cultivo se usa para simular todos los cultivos. La intercepción de la energía se estima como función de la radiación y el índice de área foliar del cultivo. El incremento potencial en la biomasa para un día dado se estima como el producto de la energía interceptada y un parámetro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

#### **e) Nutrientes**

Con la finalidad de introducir las particularidades de los cultivos existentes dentro de la cuenca y la forma en que éstos se aprovechan o dispersan sobre los recursos naturales, el modelo permite la entrada de datos respecto a los nutrientes de fósforo, nitrógeno y pesticidas aplicados.

- **Nitrógeno.** Las cantidades de  $\text{NO}_3\text{-N}$  contenidas en el escurrimiento lateral y percolación se estiman como productos del volumen de agua y la concentración promedio de los nutrimentos, la lixiviación y el flujo lateral subsuperficial, las capas bajas son tratadas con la misma estrategia que se usa en las capas superiores excepto que el escurrimiento superficial no se considera una función de concentración para aplicarla a eventos individuales de escurrimiento, sino para estimar pérdidas de

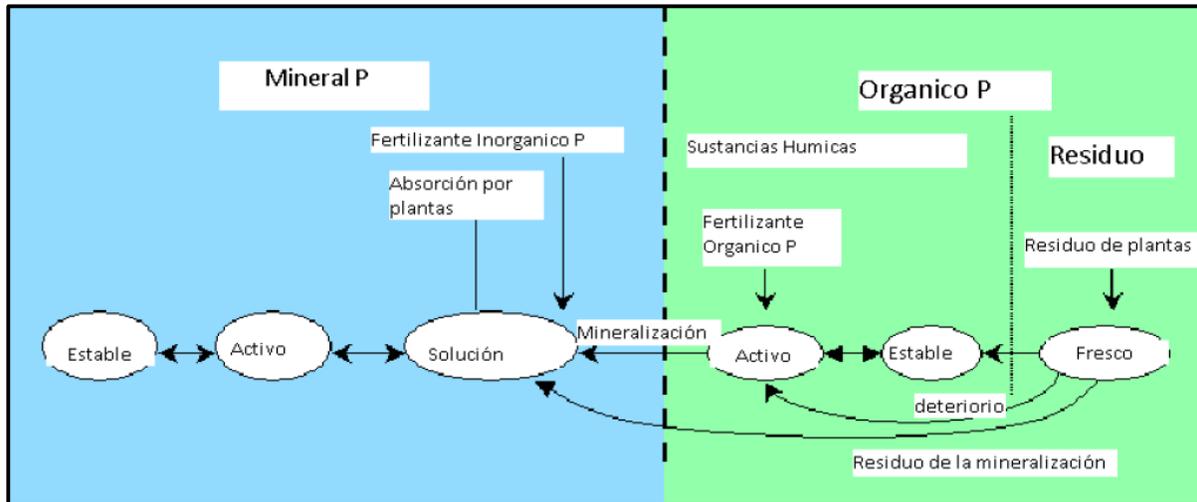
nitrógeno orgánico. La función de concentración estima la pérdida de N orgánico diaria en el escurrimiento basada en la concentración de nitrógeno orgánico en la capa más superficial del suelo. La producción de sedimentos, el coeficiente de crecimiento y el uso de nitrógeno por el cultivo se estiman usando un modelo de suministro y demanda, representado en la Figura 13.



Fuente: Neitsch y otros, 2005

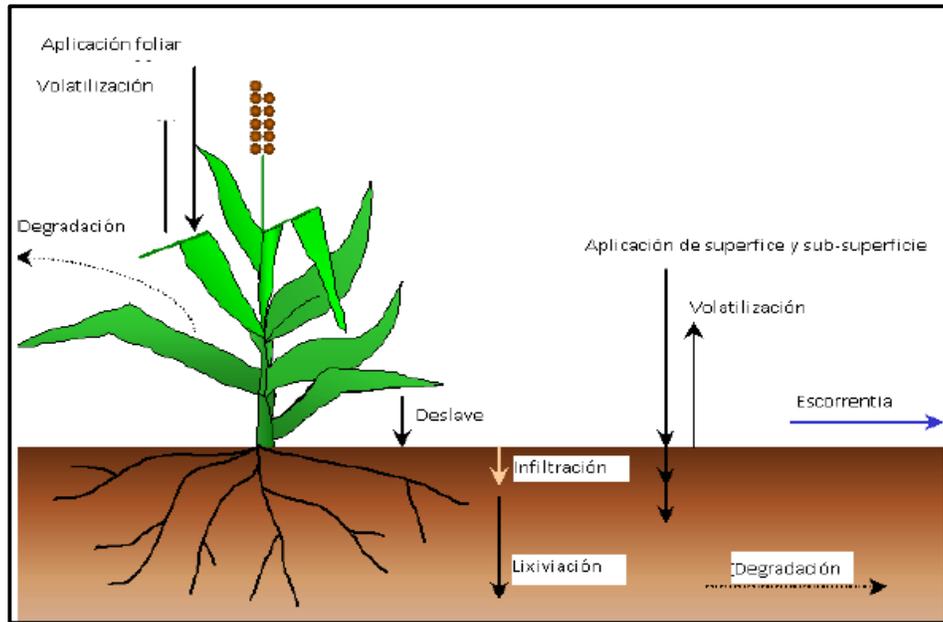
**Figura 13. División del nitrógeno en SWAT.**

- **Fósforo.** La estrategia del SWAT para estimar la pérdida del fósforo soluble en el escurrimiento superficial se basa en el concepto de repartir los pesticidas en las fases de solución y sedimentación, debido a que el fósforo está más asociado con la fase de sedimentos. El fósforo soluble en el escurrimiento se predice usando las concentraciones de fósforo en la capa superior del suelo, el volumen de escurrimiento y un factor de repartición. El transporte de fósforo en sedimentos se simula como una función de concentración. El uso del fósforo por el cultivo se estima también con la estrategia de suministro y demanda mostrado en la Figura 14.



Fuente: Neitsch y otros, 2005  
**Figura 14. División del fósforo en SWAT.**

- Transporte de pesticidas.** El transporte de pesticidas por el escurrimiento, la percolación, la evapotranspiración del suelo y el sedimento utiliza la técnica del GLEAMS. Los pesticidas se pueden aplicar en cualquier tiempo y dosis, al follaje de la planta o al suelo a cualquier profundidad. El índice de área foliar de la planta determina que fracción del pesticida aplicado al follaje alcanza la superficie del suelo; también una fracción de la dosis de aplicación (llamada eficiencia de aplicación) se pierde en la atmósfera. Cada pesticida tiene un conjunto único de parámetros que incluyen: solubilidad media de su vida en el suelo y en el follaje, fracción de lavado, un coeficiente de adsorción en el carbono orgánico y costo. El pesticida transportado por el agua y sedimento se calcula para cada evento de escurrimiento y su lixiviación se calcula para cada capa de suelo cuando ocurre la percolación, ello se puede apreciar en la Figura 15.



Fuente: Neitsch y otros, 2005

**Figura 15. Destino del pesticida y transporte en SWAT.**

#### f) Manejo del cultivo

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

- **Labranza y residuos.** El componente de labranza se designó para repartir la biomasa aérea al momento de la cosecha, una parte de la biomasa es removida como rendimiento, parte es incorporada al suelo y la restante es dejada en la superficie del suelo como residuo.
- **Riego.** Se tiene la opción de simular agricultura de temporal o bajo riego, cuando se selecciona la irrigación se debe especificar el coeficiente de escurrimiento (volumen de agua que sale/volumen aplicado) y un nivel de estrés hídrico de la planta para accionar el riego. El factor de estrés hídrico de la planta varía entre 0-1 (1 significa sin estrés y 0 no hay crecimiento).

### **g) Componentes de transporte**

El modelo permite distinguir las rutas que siguen los escurrimientos, los sedimentos, nutrientes y los pesticidas dentro de la cuenca, con el objetivo de evaluar la afectación hacia los sitios donde se están acumulando dichos.

- **Transporte de agua en los cauces.** El transporte en cauces usa el método de coeficiente variable de almacenamiento, los parámetros del cauce incluyen: longitud del cauce, pendiente del cauce, ancho y profundidad del banco del cauce, la inclinación de taludes de los cauces, la pendiente del lecho del cauce y la rugosidad del cauce. El gasto y la velocidad media se calculan usando la ecuación de Manning y el tiempo de transporte se calcula dividiendo la longitud del canal por la velocidad. El flujo de salida del cauce se ajusta de acuerdo a las pérdidas de transmisión, evaporación, desviaciones y el flujo de retorno.
- **Transporte de sedimentos en cauces.** El modelo de transporte de sedimentos consiste en dos componentes que operan simultáneamente (deposición y degradación). El componente de deposición se basa en la velocidad de caída y el componente de degradación en el concepto del poder de la corriente. La deposición en el cauce y en el lecho y el piso de la subcuenca hacia la salida de la cuenca se basa en la velocidad de caída de las partículas de sedimentos.
- **Tránsito de agua y sedimentos en almacenamiento.** Los almacenamientos existentes dentro de la cuenca también influyen en la forma en la que se distribuye el agua y los pesticidas. SWAT realiza un balance y simulación del transporte del agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas dentro de los almacenamientos registrados, donde se consideran los siguientes aspectos:
- **Balance y transporte de agua en almacenamiento.** El balance de agua en almacenamientos incluye flujos de entrada, flujos de salida, lluvia en la superficie del almacenamiento, evaporación, transmisión en el lecho del almacenamiento, desviaciones y flujo de retorno. Actualmente existen tres métodos para estimar el

flujo de salida: el primer método simplemente considera el flujo de salida medido y permite al modelo simular los otros componentes del balance hídrico; el segundo método es para pequeños almacenamientos incontrolados y el flujo de salida ocurre a una tasa de salida especificada cuando el volumen excede la capacidad de almacenamiento y; el tercer método es para grandes almacenamientos con manejo y se utiliza una estrategia de un volumen mensual especificado.

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

- a) Un almacenamiento completamente mezclado
- b) El fósforo es limitado
- c) El fósforo total puede ser medido en un estado trófico

La ecuación de balance del fósforo incluye la concentración de fósforo en el almacenamiento, en el flujo de entrada y salida y una tasa de pérdida general. El modelo del balance de toxicidad en el almacenamiento se toma de Chapra (1989) y asume condiciones de mezclas de fósforo sobre una capa de sedimentos. Los tóxicos se diferencian en disueltos y adsorbidos por partículas, tanto en el agua como en las capas de sedimento. Los procesos más importantes simulados por el modelo son la carga de flujo de salida, las reacciones, volatilización, asentamientos, difusión, resuspensión y entierro de los pesticidas.

### **1.3.4.3 Limitantes para la aplicación del modelo SWAT**

De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada sobre casos de aplicación del modelo SWAT es importante señalar que el modelo cuenta con algunas consideraciones que deben tomarse en cuenta antes de comenzar a utilizarlo, principalmente atendiendo a los intereses particulares.

Pese a los buenos resultados que arroja el modelo, este no realiza simulaciones por evento de lluvia. Asimismo no simula satisfactoriamente a nivel diario, su fortaleza es a nivel mensual y anual, por eso está recomendado para la toma de decisiones.

Y, quizás uno de los aspectos más importantes para considerar utilizar el modelo, es la gran cantidad de información requerida con un nivel de detalle muy fino para datos de suelos, usos de suelo y cobertura vegetal y sus particularidades que ha ido sufriendo a través del tiempo; para el caso de la información climatológica e hidrológica el modelo exige información por periodo de tiempo muy largos ya que puede subestimar o sobreestimar resultados.

Asimismo, si el objetivo fuese simular producciones agrícolas o procesos de contaminantes, se deberá contar con la información específica respecto a la actividad propia de la zona así como de los compuestos químicos utilizados.

El usuario deberá por tanto, conocer a detalles las condiciones de la zona de estudio donde desee aplicar el modelo. Al mismo tiempo se puede afirmar que si bien el modelo es utilizado para obtener datos en cuencas que no cuentan con estaciones de aforo, todas las consideraciones antes mencionadas ayudarán para dar certeza a los resultados que se obtengan de la simulación realizada.

## 2. ANTECEDENTES

La aplicación del modelo de simulación hidrológica SWAT pretende hacer un análisis hidrológico a través de un balance hídrico para identificar las zonas que contribuyen con más agua al caudal que llega a la parte baja de la cuenca, así como las coberturas vegetales y usos de suelo que producen escurrimientos y sedimentos.

Esto exige relacionar factores como: uso del suelo, pendiente, precipitación y el tipo de suelos, con la generación de caudales y sedimentos, elementos fundamentales para priorizar áreas por su importancia actual o potencial, para producir agua y retener sedimentos.

Asimismo, es necesario un análisis de los posibles impactos de cambios en el uso del suelo y coberturas vegetales a partir de una modelación hidrológica, calibrada y validada, de tal forma que cualquier cambio posterior a las variables de uso o manejo produzcan una simulación de confianza del efecto en el caudal de la cuenca.

En este sentido el presente estudio sobre la cuenca El Tejocote, corresponde a la modelación de la cuenca bajo las condiciones de uso de suelo más recientes, para priorizar las áreas que están contribuyendo de manera importante con la generación de escurrimientos superficiales y producción de sedimentos de las partes bajas de la cuenca.

La importancia de realizar los cálculos de la cuenca El Tejocote, se basa en que dicha zona es de gran importancia en la producción agrícola. De seguir explotando el recurso hídrico sin control alguno, así como erosionando el suelo puede ser un factor que detenga el crecimiento económico de la población, además de provocar serios problemas de escasez de agua y afectación a los recursos naturales del territorio.

## 2.1 Estudios a nivel internacional

Con el fin de tomar como referencia algunas experiencias descritas en el estudio de cuencas hidrográficas, se procede a citar algunas investigaciones realizadas en varios países del mundo bajo la misma metodología de aplicación del modelo SWAT.

Oñate y Aguilar, (2003) aplicaron el modelo SWAT para la estimación de caudales y sedimentos en la cuenca alta del río Catamayo, Perú; con el objetivo de determinar la respuesta de la cuenca a la aplicación de una cobertura según el uso potencial del suelo, que permitieran disminuir la producción de sedimentos, afectando lo menos posible la disponibilidad del agua.

La metodología que ellos desarrollaron incluyó la recolección de la información topográfica, de tipos de suelos y uso actual. Con la información de suelos recopilada, el SWAT definió las Unidades de Respuesta Hidrológica. Con información meteorológica se procedió a calibrar el modelo y de esta manera se pudo simular un registro histórico.

Luego de la calibración, se realizó el modelamiento, utilizando la cobertura propuesta, que se basó en el uso potencial del suelo, a fin de obtener los hidrogramas de caudal y los volúmenes de sedimentos que ella produciría.

Al final del estudio pudieron observar la necesidad de ampliar la red y de ser posible automatizar la recolección y transmisión de información meteorológica, además se requiere también realizar estudios de tipo y uso de suelo a mayor detalle, a fin de definir varias alternativas de manejo, ya que una cobertura según el uso potencial, reduce la producción de sedimentos, pero afecta notablemente la producción del agua. Y por último, continuar con la investigación en el área de modelamiento hidrológico ya que a pesar de las limitaciones es posible lograr resultados.

También Bonini y otros, (2003) presentaron una herramienta de apoyo que ayudaría a determinar caudales y sedimentos en una cuenca hidrográfica de Ecuador, los cuales son de mucha importancia en un proyecto hidráulico.

La metodología desarrollada conllevó:

- Recolección de la información topográfica, de tipos y uso actual de suelos
- Procesamiento posterior usando el SIG
- Para fines de calibración se recolectó la información de caudales medios mensuales en dos estaciones hidrométricas localizadas en el interior de la cuenca, los registros databan desde enero de 1978 hasta marzo de 1982.
- Con la información de suelos recopilada, el SWAT definió las Unidades de Respuesta Hidrológica.
- Con los datos de las estaciones anteriormente mencionadas, se generaron todos los datos necesarios que requiere el modelo matemático como datos de entrada y registros mensuales de caudales que deben ser comparados con los valores reales del caudal medidos en la estación de aforo. Las diferencias entre lo simulado y lo observado sirven para proceder a calibrar el modelo y de esta manera poder simular un registro histórico.

Los autores concluyeron que, a pesar de la carencia de información, el modelo SWAT reproduce de una buena manera los registros históricos tanto de precipitaciones como la de los caudales.

Otro referente al tema, es el trabajo de investigación Aplicación del Modelo SWAT en la subcuenca del río Ambato, Ecuador (Proaño y otros, 2006); cuyo objetivo fue emplear el modelo de simulación hídrica SWAT en la subcuenca del río Ambato, para analizar los

efectos de las diversas prácticas de uso de suelo sobre la generación de caudales y producción de sedimentos.

La información mínima que se utilizó fue para elaborar el proyecto fue la topografía (curvas de nivel, ríos, entre otros), suelo, uso del suelo y cobertura vegetal e información climática diaria en un periodo mínimo de 10 años, principalmente temperatura mínima, máxima y precipitación. Teniendo como resultado que la modelación hidrológica puede convertirse en una herramienta para los tomadores de decisiones sobre el manejo y planificación de cuencas.

Oestreicher, (2010) elaboró un estudio denominado Prospectivas y aplicaciones del modelo hidrológico SWAT en la cuenca del Canal de Panamá. Con el procesamiento de información topográfica, de suelo, cobertura vegetal y uso de suelo y datos climáticos, el autor obtuvo que el modelo genera muchas posibilidades y prospectivas; predicciones con diferentes escenarios; brinda apoyo para la toma de decisiones y es una herramienta con múltiples aplicaciones.

Durante el mismo año 2010, Aparecida y Calijuri, (2010) realizaron un modelaje de cuencas hidrográficas en el sureste de Brasil utilizando SWAT, bajo la postura de que el uso inadecuado de la tierra agrícola está causando una pérdida gradual de la capacidad de producción y la contaminación del agua por sedimentos y contaminantes que los difusa, resultante del proceso de erosión a la que estos suelos están sujetos. La acción humana mediante el uso de prácticas que destruyen las condiciones de equilibrio natural, acelera estos procesos en una forma intensa, con lo que, se provocan daños en el sector agrícola y el medio ambiente con consecuencias económicas y sociales (Tucci, 1998 y Amorim, 2000).

Dichos autores, afirmaron que el uso de los modelos matemáticos para estimar la pérdida de suelo por la erosión, han tenido eficacia tanto en la planificación de la conservación (Preventivo) y en la evaluación y el control de la erosión de las cuencas hidrográficas (Christofolletti, 1999 y Machado, 2002).

Asimismo Uribe y Quintero, (2011) realizaron una investigación titulada aplicación del Modelo Hidrológico SWAT a la cuenca del río Cañete, Colombia; con el objetivo de cuantificar todas las variables del balance hídrico del flujo del agua en el suelo (Producción de agua, agua en el suelo y recarga de acuífero profundo) y agua en la vegetación (Evapotranspiración potencial y actual) para un periodo diario de 19 años (1991-2009).

El modelo fue calibrado y validado comparando con datos existente de caudal, ésta metodología básicamente consistió en: a) Calibración del modelo, para lograr un ajuste satisfactorio entre los datos medidos y los simulados, mediante un análisis de sensibilidad en los parámetros del modelo, con un periodo de calibración de 8 años de observación (1993-2000), b) Validación del modelo, para evaluar la capacidad predictiva mediante la comparación de los datos medidos y simulados para un periodo de 9 años de observación (2001-2009).

Al finalizar su estudio, concluyeron que el modelo SWAT es una herramienta valiosa para la simulación del impacto del manejo del suelo y la vegetación en la producción de agua y sedimentos en la cuenca del Rio Cañete, la cual experimenta una alta variación en suelos, uso de suelo, pendientes y condiciones climáticas. El estudio provee una fuerte base para futuros estudios concernientes al agua, alimentación, seguridad y administración de estrategias para el recurso del agua en las provincias de Cañete y Yauyos.

## **2.2 Estudios a nivel nacional**

Cabe mencionar que en México han sido pocos los estudios realizados sobre cuencas hidrográficas aplicando el modelo SWAT, sin embargo, a continuación se procede a enunciar algunos de los artículos relacionados.

Torres y otros, (2004) calibraron el Modelo de simulación SWAT para el balance hídrico en la cuenca “El Tejocote”, Atacomulco, y evaluaron su capacidad predictiva para simular la producción de agua, sedimentos, gastos medios y producción de maíz en la cuenca.

Construyendo escenarios de simulación y utilizando el Sistema de Información Geográfica ArcView, los datos utilizados para calibrar el modelo consistieron en cinco años de información climática (1980 a 1984), 62 usos de suelo y 14 unidades de suelo, lo cual resultó en 116 unidades de respuesta hidrológica.

Al final del estudio, el modelo permitió la simulación del balance hidrológico diario, mensual y anual. La calibración se basó en datos diarios, sin embargo, se reportaron los resultados mensuales y anuales, debido a la facilidad de manipulación de la información que los autores pudieron observar.

Posteriormente, el Colegio de Postgraduados, (2005) desarrolló un estudio empleando el modelo SWAT para generar alternativas de manejo en la cuenca del río Laja, Guanajuato, México. Ellos desarrollaron una metodología en dos etapas, las cuales consistieron en: a) Calibración del modelo, para lograr un ajuste satisfactorio entre los escurrimientos medidos y los simulados, mediante un análisis de sensibilidad en los parámetros más sensibles del modelo; el periodo de calibración consistió de cinco años de observación (1993 a 1997) y b) Validación del modelo, para evaluar su capacidad predictiva mediante la comparación

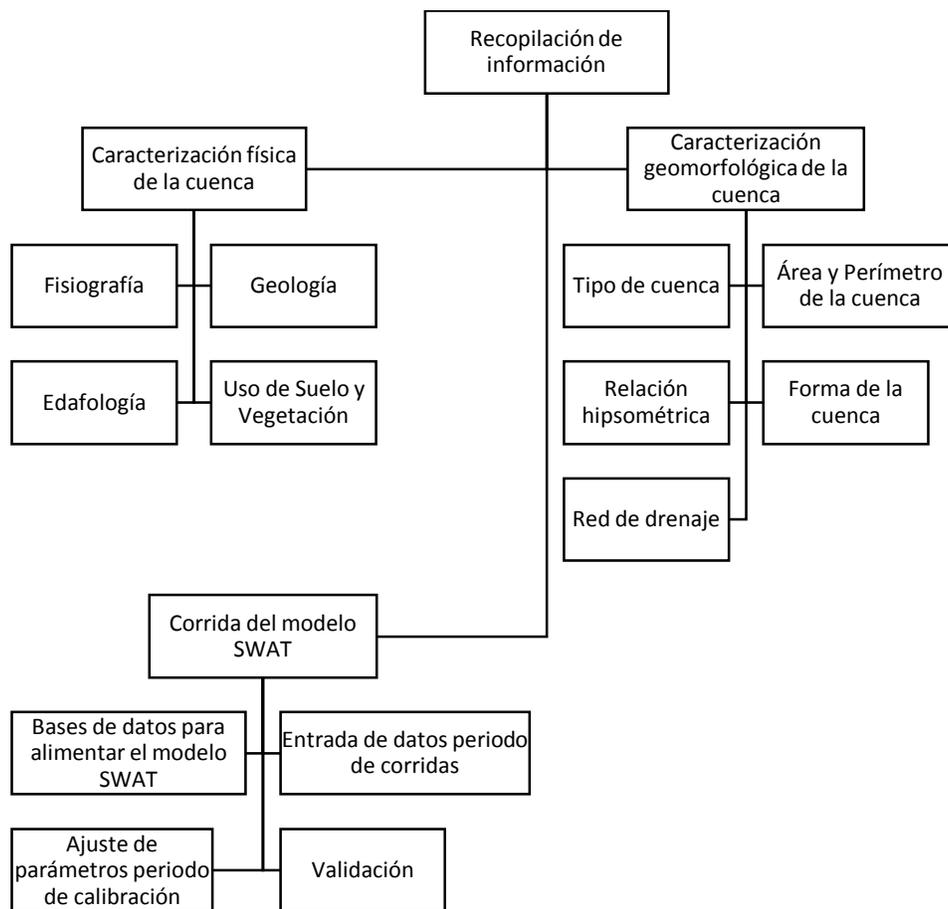
de los escurrimientos medidos y los simulados para un periodo de cinco años de observación (1998 a 2002).

Al final del estudio concluyeron que el uso de los modelos hidrológicos sin previa calibración y validación conduce a la sobreestimación o subestimación considerable de las variables estudiadas. Mediante la calibración es posible lograr un ajuste aceptable entre los datos observados y los medidos, sin embargo, la verdadera capacidad predictiva del modelo, es mayor que un modelo sin previa calibración, tal como lo muestra la etapa de validación. Aun cuando la naturaleza de este tipo de modelos los hace aplicables a cuencas que no cuentan con estaciones de aforo, los resultados muestran la conveniencia de ser calibrados y validos con el mayor número de datos de escurrimiento de calidad confiable; pero bajo las condiciones de la naturaleza de la mayoría de las cuencas en nuestro país, es recomendable realizar estos procesos con los datos disponibles.

Al término de la revisión de los resultados de los anteriores autores, la propuesta que se plantea para la cuenca del río El Tejocote, es la implementación del modelo SWAT, calibrándolo y validándolo, con el fin de observar la influencia que tiene el cambio de uso de suelo y pérdidas de coberturas vegetales que se están presentando en la zona, además de la producción de escurrimientos y sedimentos acumulados en las partes bajas de la cuenca, y los daños que estos provocan a la población y su entorno.

### 3. METODOLOGÍA

Para cumplir el objetivo general y con la hipótesis de trabajo, el presente trabajo de investigación hace uso de los aportes de Uribe, (2010), Fernández, (1996) y Torres, (2000). Estas contemplan a grandes rasgos una caracterización de la cuenca hidrográfica para posteriormente contar con los elementos y datos necesarios para utilizar el modelo SWAT. A continuación la Figura 16 esquematiza la metodología que se siguió para desarrollar el presente trabajo de investigación:



Fuente: Elaboración propia, 2014

**Figura 16. Metodología de trabajo.**

### **3.1 Caracterización geomorfológica de la cuenca hidrográfica**

Para realizar la caracterización geomorfológica de la cuenca se retomaron los conceptos que desarrollan instituciones como la SRH, (1974), SARH, (1988) y algunos autores como Aparicio, (1989); cada uno de ellos se conceptualiza a continuación para ser retomados posteriormente y obtener el dato respectivo de la cuenca El Tejocote durante la caracterización de la misma.

- **Área de la cuenca**

Aparicio, (1989) define a la cuenca como una zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida. La definición anterior se refiere a una cuenca superficial; asociada a cada una de éstas existe también una cuenca subterránea, cuya forma en planta es semejante a la superficial.

La SARH, (1988) realizó un diagnóstico para estudio de un manejo de cuencas, donde a su vez describe dentro del componente ambiente las características físicas propias de la cuenca, considerando como características físicas aquellas cualidades del medio, independientes a la actividad humana o donde la cuenca influye únicamente en forma indirecta, dentro de esta se describe:

El área de la cuenca como la unidad de superficie en estudio, geográficamente limitada por medio de líneas divisorias topográficas llamadas “parteaguas”, este se puede obtener de cartas topográficas de fotografías aéreas utilizando un planímetro u otro método, o bien calcularse en campo.

La SRH, (1974) expresa que al medirla, realmente se mide su proyección sobre un plano horizontal, en donde se expresan los resultados en kilómetros cuadrados, aunque también se acostumbra expresarla en hectáreas, sobre todo tratándose de cuencas pequeñas; el tamaño de la cuenca se puede clasificar a través del siguiente Cuadro 2 realizado por la SARH, (1988).

**Cuadro 2. Clasificación de cuencas hidrográficas por su tamaño.**

<b>Clasificación</b>	<b>Tamaño (km<sup>2</sup>)</b>
Muy chicas	< 500
Chicas	500-1,000
	1,000-2,000
Medianas	2,000-5,000
	5,000-10,000
Medianamente grandes	10,000-20,000
Grandes	20,000-100,000
Muy grandes	>100,000

Fuente: SARH, 1988.

- **Perímetro de la cuenca**

De igual manera, se suma el concepto de perímetro, el cual es el contorno de la superficie de la cuenca, y su longitud es equivalente a la longitud del parteaguas de la cuenca. El perímetro se obtiene de cartas topográficas o de fotografías aéreas utilizando un curvímetro o midiéndolo directamente en campo (SARH, 1988), así como a través de un SIG.

- **Pendiente de la cuenca**

Para Díaz y otros, (2006) la relevancia de la pendiente de una cuenca es su relación estrecha con los fenómenos de infiltración, el escurrimiento superficial, la humedad del suelo y la contribución del agua subterránea al flujo de cauces.

De igual forma, las SRH, (1974) concuerda con que la pendiente es una característica de la cuenca, que tiene gran influencia en los escurrimientos de la corriente. Existen varios métodos de cálculo, dependiendo la selección de ellos del uso que se le vaya a dar al resultado, entre ellos se mencionan los siguientes:

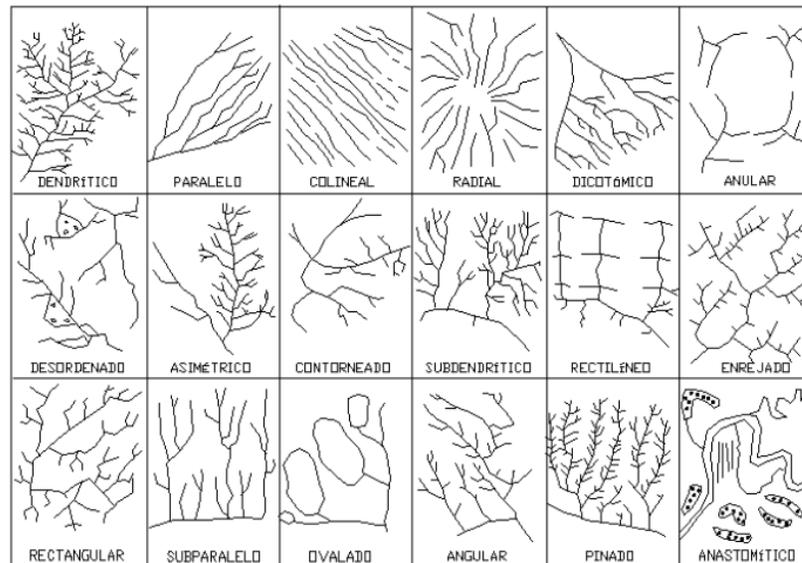
- *Método de Alvord*, es el más simple de los procedimientos y se basa en la pendiente existente entre las líneas intermedias entre las curvas de nivel, que es equivalente al desnivel entre dichas curvas, obteniendo la pendiente de la cuenca al sacar el promedio de la pendiente década faja en relación con su área de influencia.
- *Método de Horton*, este método consiste esencialmente en determinar la pendiente de la cuenca en dos direcciones, para posteriormente determinar la pendiente general de la cuenca, tomando en consideración la inclinación de las curvas de nivel.
- *Método de Nash*, este procedimiento de cálculo de la pendiente de una cuenca es análogo al empleado por Horton, ya que también requiere trazar una cuadrícula sobre el plano topográfico de la cuenca, de manera tal que se obtenga aproximadamente 100 intersecciones, en cada una de las cuales se mide la distancia mínima entre las curvas de nivel y la pendiente en ese punto se considera como la relación entre la diferencia de nivel entre curvas y la mínima distancia medida, la pendiente así obtenida es la correspondiente a cada intersección y la media aritmética de ellas se considera la pendiente de la cuenca.

- **Red de drenaje**

Una característica importante de cualquier cuenca y que interviene enormemente en la magnitud de escurrimientos es la red de drenaje, consiste en el número y trayectoria de los escurrimientos y su importancia radica en la eficiencia del drenaje de la cuenca, además la

forma de drenaje es un indicador de las condiciones del suelo y la superficie de la cuenca. De acuerdo a la SRH, (1974) las características de una red de drenaje se describen considerando los siguientes temas

- *Clase de corrientes*, todas las corrientes se clasifican en tres clases dependiendo del tipo de escurrimiento, el cual involucra las características físicas y condiciones climáticas de la cuenca, así las corrientes pueden ser: efímeras, intermitentes o perennes.
- *Orden de corrientes*, la red de drenaje se compone de una corriente o cauce principal y una serie de afluentes y para ordenar las corrientes, se efectúa una clasificación, la cual considera como corriente de primer orden, aquellas que no tienen tributarios; de segundo orden a los que tienen tributarios de primer orden; de tercer orden aquellas corrientes que tienen dos o más tributarios de segundo orden, etc. El orden de corriente da lugar a diversos tipos de drenaje como se muestran en la Figura 17.



Fuente: Aparicio, 1989.

**Figura 17. Modelos de drenaje.**

- *Longitud de tributarios*, la topografía de una cuenca define en sí la longitud de los tributarios, ya que estos son indicadores de la pendiente. Generalmente las áreas

escarpadas y con buen drenaje tienen numerosas corrientes pequeñas y efímeras, por lo contrario las áreas planas con suelos profundos y permeables tienen corrientes largas generalmente perennes.

- *Longitud del cauce principal*, es la distancia que presenta la corriente principal, desde su origen a la desembocadura o salida del área de estudio (SARH, 1988).
- ✓ *Densidad de drenaje*, esta característica es más real y confiable que la densidad de corrientes, ya que expresa la longitud de las corrientes por unidad de área.
- ✓ *Pendiente del cauce*, es la relación existente entre la diferencia de elevaciones de los extremos de la corriente, es decir el desnivel existente entre esos dos puntos y la longitud horizontal de dicho tramo.

La SARH, (1988) también la define como la relación que existe entre el desnivel en dos puntos del mismo y la longitud entre los mismos puntos. La pendiente del cauce influye sobre la velocidad de flujo y juega un papel importante en la forma del escurrimiento. Esta se puede obtener en tramos parciales de acuerdo a la ecuación 8:

$$P_{pc} = \frac{hi}{Lci} \times 100 \dots\dots\dots(8)$$

Donde:

$P_{pc}$  = Pendiente parcial del cauce entre dos puntos considerados (%)

$hi$  = Desnivel entre los puntos considerados (m)

$Lci$  = Longitud del cauce entre los puntos considerados (m)

De igual forma se puede obtener la pendiente media del cauce principal, de acuerdo a la ecuación 9.

$$P_c = \frac{hc}{L} \times 100 \dots\dots\dots(9)$$

Donde:

$P_c$  = Pendiente media del cauce principal (%)

$hc$  = Desnivel entre el punto más alejado del cauce principal y el punto a la salida de la cuenca (m)

$L$  = Longitud del cauce principal (m)

- **Forma de la cuenca**

Las relaciones de forma son parámetros que a través de comparaciones con figuras geométricas, permiten definir la forma del hidrograma y el tiempo que tarda en salir el escurrimiento superficial desde su punto más lejano. La forma de la cuenca, por lo tanto, está relacionada con los hidrogramas de escurrimiento y las tasas de flujo máximo, por lo que se han realizado numerosos intentos para predecir el efecto de la forma con un solo valor numérico. Los indicadores de la forma de la cuenca son los siguientes (SRH, 1974):

- *Índice de forma*, es la relación que existe entre el área de la cuenca y la longitud del cauce principal, esta relación permite determinar si la cuenca presenta una forma circular o alargada, para ello se calcula el inverso del valor obtenido y si es menor de 5 se considera como circular y si el valor es mayor de 6 se considera alargada. Este índice se determina a través de la siguiente ecuación 10:

$$I_f = \frac{A}{L^2} \dots\dots\dots(10)$$

Donde:

$I_f$  = Índice de forma (adimensional)

$A$  = Área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

$L$  = Longitud del cauce principal (km)

➤ *Relación de forma o relación de circularidad*, esta relación nos permite conocer la similitud existente entre el área de la cuenca y un círculo que tenga el mismo perímetro que la cuenca, de tal forma que mientras el resultado de esta relación se aproxime más a la unidad, la cuenca tenderá a presentar una forma circular. Aplicando esta relación se muestran las siguientes ecuaciones 11, 11.1 y 11.2.

$$Rc = \frac{A}{Ac} \dots\dots\dots(11)$$

Donde:

$Rc$  = Relación de circularidad (adimensional)

$A$  = Área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

$Ac$  = Área de un círculo del mismo perímetro de la cuenca (km<sup>2</sup>)

Como:

$$Ac = \frac{P^2}{4\pi} \dots\dots\dots(11.1)$$

Donde:

$P$  = Perímetro de la cuenca (km)

Sustituyendo:

$$Rc = \frac{A}{P^2 / 4\pi} \dots\dots\dots(11.2)$$

➤ *Coefficiente de compacidad o índice de graveluis*, este coeficiente relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo de la misma área que la cuenca buscando la relación de semejanza entre la primera y el segundo. Este coeficiente indica si una cuenca es alargada o no, para ello, cuando el coeficiente toma valores mayores a 1 es alargada y cuando es menor la cuenca tiende a ser redonda (Figura 18), y se expresa mediante las siguientes ecuaciones 12, 12.1, 12.2, 12.3, 12.4 y 12.5.

$$Cc = \frac{P}{Pc} \dots\dots\dots(12)$$

Donde:

$Cc$  = Coeficiente de compacidad (adimensional)

$P$  = Perímetro de la cuenca (km)

$Pc$  = Perímetro de un círculo de la misma área que la cuenca (km)

Como:

$$A = \pi r^2, \text{ y } P = 2\pi r, Cc = \frac{P}{2\pi r} \dots\dots\dots(12.1)$$

Sí:

$$r^2 = \frac{A}{\pi}, r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \dots\dots\dots(12.2)$$

Entonces:

$$Cc = \frac{P}{2\pi \sqrt{\frac{A}{\pi}}}; Cc = \frac{P}{\frac{2\pi}{\sqrt{\pi}} \sqrt{A}} \dots\dots\dots(12.3)$$

$$Cc = \frac{\sqrt{\pi}}{2\pi} \frac{P}{\sqrt{A}} \dots\dots\dots(12.4)$$

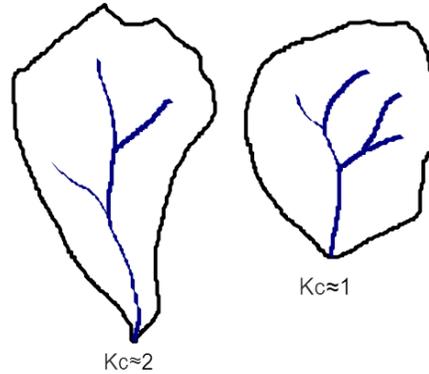
Por lo tanto:

$$Cc = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \dots\dots\dots(12.5)$$

Donde:

$A$  = Área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

$P$  y  $Cc$  = Fueron previamente definidos



Fuente: SARH, 1988.

**Figura 18. Forma de la cuenca.**

### **3.2 Bases de datos para alimentar el modelo SWAT (Archivos de entrada al Arc SWAT en texto y tablas)**

La extensión ArcSWAT ArcGis es la interfaz de usuario para el modelo SWAT2010 (Arnold y otros, 1998), este es un paquete de análisis de datos geográficos diseñados para ayudar a generar archivos de entrada SWAT y analizar específicamente información resultante de simulaciones usando las características principales de ArcGIS. Los datos de entrada necesarios deberán estar listos para correr la interface, es decir se debe disponer de la información que especifican los siguientes grupos de archivos, estos se esquematizan en la Figura 19 y posteriormente se describen de manera individual:

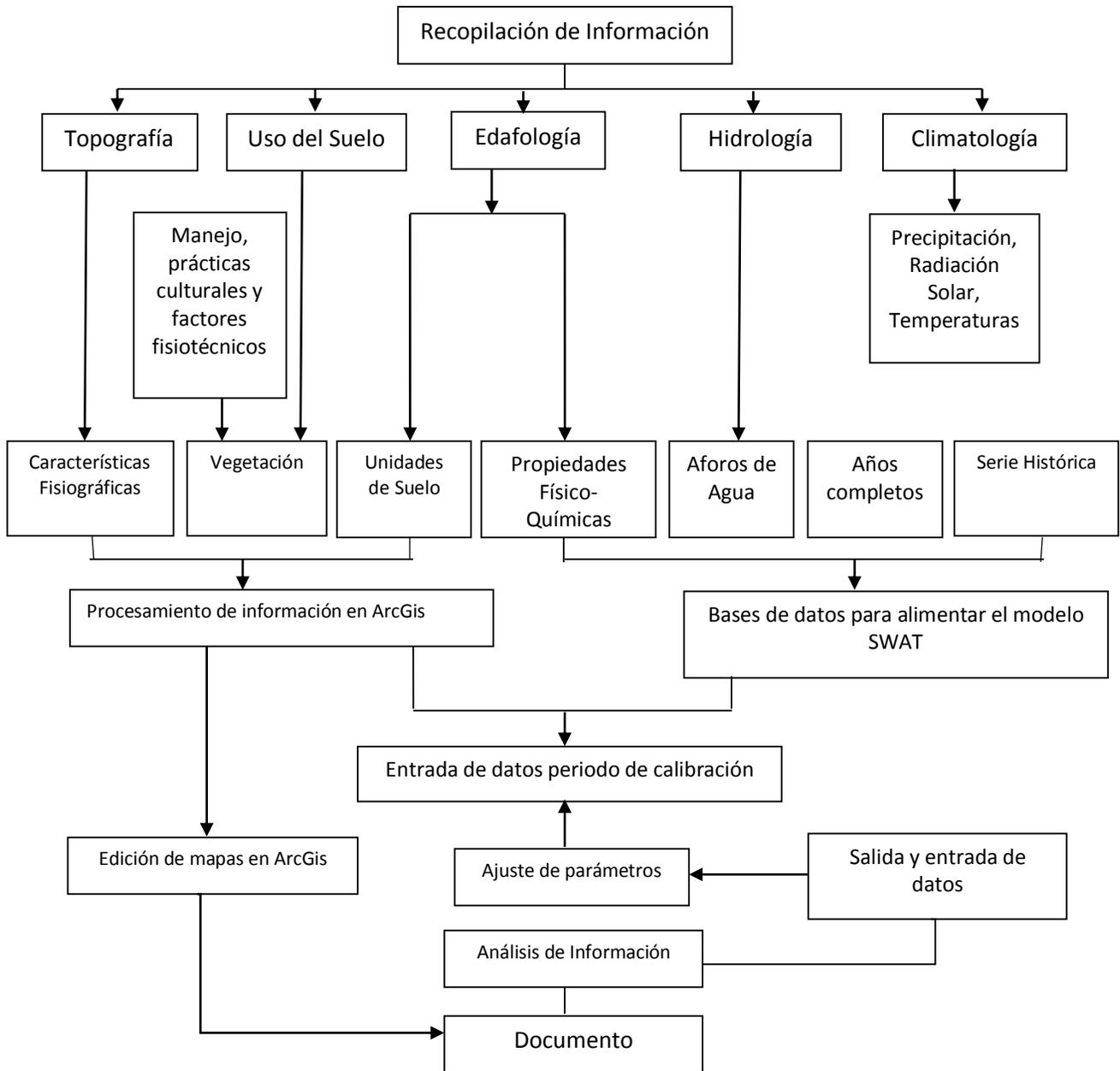
- Archivos WGN (Generadores climáticos)
- Archivos SUB (Datos generales de las URH)
- Archivos SOL (Datos de suelos)
- Archivos MGT (Datos del manejo de cultivos)
- Archivo RTE (Datos del cauce)
- Archivo PND (Datos de cuerpos de agua)
- Archivo GW (Datos de aguas subterráneas)

Información cartográfica requerida por Arc SWAT para delimitar la zona de estudio antes de comenzar a llenar los archivos antes mencionados:

GRID- Modelo Digital de Elevación (DEM). La interface permite valores enteros o reales para las elevaciones DEM. La resolución del mapa se definió por unidades métricas de 15x15m.

GRID-Cobertura y Uso del suelo. Se clasificaron a través de 11 categorías definiendo códigos de cuatro letras.

GRID-Suelos. Las categorías especificadas en el mapa debieron estar asociadas a la base de datos de suelos, obteniendo un total de 22 categorías.



Fuente: Torres, 2000.

**Figura 19. Esquema de trabajo del modelo SWAT.**

Como se mencionó anteriormente, en los siguientes apartados se describen los datos necesarios dentro de cada grupo de archivo del Arc SWAT para realizar la simulación hidrológica, asimismo se mencionan las cifras que se consideraron para el caso de la cuenca

El Tejocote obtenidas de información bibliográfica, de campo y de estudios realizados de la misma zona por Torres, (2000) y Fernández (1996).

### 3.2.1 Datos generales de la cuenca (ARCHIVO BSN)

- *Título*. La primera línea es reservada para una descripción. La descripción puede tomar hasta 80 espacios (opcional).
- *Área de la cuenca en km<sup>2</sup> (DA\_KM)*. Se incluye el área de la cuenca en kilómetros cuadrados, el modelo no está limitado por el área de drenaje. El dato para la superficie drenable de la cuenca, cuyo límite fue la salida de la misma es de 177.31 km<sup>2</sup>, obtenido mediante el cálculo de la interface.
- *Número del pesticida que va a ser direccionado a través de la red de canales de la cuenca (IRTPEST)*. Aunque más de un tipo de pesticidas puede ser aplicado a una URH, el modelo monitorea el movimiento de sólo un pesticida a través de la red de canales. Este valor fue de 32 correspondiente al Furadán, ya que es el pesticida que se utiliza en la cuenca en mayor cantidad.
- *Almacenamiento inicial de agua en el suelo como fracción del contenido de agua a capacidad de campo (FFCB)*. Todos los suelos en la misma cuenca inician con la misma fracción. Si no se da un valor de FFCB, el modelo lo calculará en función de la precipitación promedio anual. FFCB deberá estar entre 0.0 y 1.0. El método de default es permitir al modelo calcular FFCB (FFCB=0.0). El valor fue de 0.2, obtenido de las diferencias entre PMP y CC de los suelos de la cuenca.
- *Parámetro lineal para calcular la máxima cantidad de sedimento que puede ser adicionado durante el transito del sedimento en el canal (SPCON)*. ( $DEG_r = SPCON$

$\times (V_c)^{SPEXP}$  donde  $DEG_r$ , es la cantidad de sedimento adicionado y  $V_c$  es la velocidad del flujo en el canal.  $SPCON$  debería variar entre 0.0001 y 0.01. El valor incluido para este parámetro fue de 0.0001 valor que toma el modelo por default cuando éste no es introducido.

- *Parámetro en forma de exponente para calcular el sedimento adicionado en el transito del sedimento en el canal (SPEXP).* ( $DEG_r = SPCON \times (V_c)^{SPEXP}$  donde  $DEG_r$  es la cantidad de sedimento adicionado y  $V_c$  es la velocidad del flujo en el canal.  $SPEXP$  debería variar entre 1.0 y 1.5. El modelo aplicó un 1 por default.
- *Factor de ajuste del gasto máximo para el tránsito del sedimento en el canal (PRF).* El direccionamiento del sedimento es función del gasto máximo y el escurrimiento diario promedio. Debido a que SWAT no puede directamente calcular la hidrografía subdiaria, esta variable fue incorporada para permitir el ajuste por el efecto del gasto máximo en el direccionamiento del sedimento. Esta variable impacta la degradación del canal. Si no se da un valor para PRF, el modelo usa PRF= 1.0, valor que fue introducido.
- *Coefficiente de percolación de pesticidas (PERCOP).* PERCOP controla la cantidad de pesticida removida de la capa superficial por el escurrimiento, relativa a la cantidad removida vía percolación. El valor de PERCOP puede variar de 0.0 a 1.0. Cuando PERCOP= 0.0 la concentración de pesticida en el escurrimiento es 0, cuando PERCOP= 1.0 el escurrimiento superficial tiene la misma concentración de pesticida que en el percolado. Dado que no se cuenta con este valor, el modelo asigna un valor de 0.50.
- *Coefficiente de percolación del nitrógeno (NPERCO).* NPERCO controla la cantidad de N mineral removido de la capa superficial por el escurrimiento relativo a la

cantidad removida vía percolación. El valor de NPERCO puede variar de 0.0 a 1.0. Cuando NPERCO=0, la concentración de N mineral en el escurrimiento es 0. Cuando NPERCO=1.0, el escurrimiento superficial tiene la misma concentración de N mineral que el percolado. Debido a que no se le asignó valor a NPERCO, el modelo usó un valor de NPERCO=0.20.

- *Coefficiente de percolación de fósforo (PPERCO)*. PPERCO es la relación de la cantidad de P soluble removido de la capa superficial por el escurrimiento, relativo a la cantidad de P soluble removido vía percolación. El valor de PPERCO puede variar de 10.0 a 17.5. Dado que no se le asignó un valor a PPERCO, el modelo asignó PPERCO=10.0.
- *Coefficiente de descomposición del residuo (RSDCO)*. La fracción del residuo que se descompone en un día, asumiendo humedad, temperatura, relaciones C:N y C:P óptimas, dado que no se proporcionó un valor de RSDCO, el modelo asignó RSDCO=0.05.
- *Coefficiente de partición del fósforo en el suelo (PHOSKD)*. La relación del fósforo adherido al sedimento con el fósforo disuelto en el agua del suelo. Este valor fue asignado por el modelo PHOSKC= 175.0.
- *Temperatura de la nieve (°C) (SFTMP)*. Temperatura promedio del aire a la cual la precipitación es igualmente probable a ser lluvia *en* forma de nieve o granizo. Si no se asigna valor a SFTMP, el modelo usa SFTMP=1.0.
- *Temperatura base para el deshielo de la nieve (°C) (SMTMP)*. Temperatura promedio del aire a la cual ocurre el deshielo de la nieve. Parámetro no utilizado

debido a que en la cuenca no hay presencia de nevadas, sin embargo el modelo aplica por default un valor de 0.5.

- *Máxima tasa de deshielo de la nieve durante el año (SMFMX)*. Ocurre en el solsticio de verano ( $\text{mm H}_2\text{O}/^\circ\text{C}/\text{día}$ ) donde  $^\circ\text{C}$  se refiere a la temperatura del aire. SMFMX Y SMFMN permiten que la tasa de deshielo varíe a través del año. Las variables consideran el impacto de la temperatura del suelo en el deshielo de la nieve. Parámetro no utilizado debido a la ausencia de nieve en la cuenca, el modelo aplica un valor de 4.5.
- *Mínima tasa de deshielo de la nieve durante el año (SMFMN)*. Ocurre en el solsticio de invierno ( $\text{mm H}_2\text{O}/^\circ\text{C}/\text{día}$ ) donde  $^\circ\text{C}$  se refiere a la temperatura del aire. El modelo evalúa un valor de 4.5 por default. No considerado.
- *Factor para el período de reducción de la temperatura de la nieve (TIMP)*. Este parámetro controla el impacto de la temperatura actual del aire en la temperatura de la nieve. TIMP puede variar de 0.0 a 1.0. Cuando TIMP=1.0 no hay periodo de reducción, es decir la temperatura de la nieve es la misma que la temperatura actual del aire. A medida que TIMP va hacia el 0, la temperatura de la nieve será menos influenciada por la temperatura actual del aire. Aunque ésta variable no se considera para la cuenca, el modelo aplica por default un valor de 1.
- *Máximo contenido de agua en la nieve que corresponde a un 100% de cobertura por la nieve ( $\text{mm H}_2\text{O}$ ) (SNOCOVMX)*. Si el contenido de agua de la nieve es menor que SNOCOVMX, entonces cierto porcentaje del suelo estará descubierto. El modelo aplica un valor de 1.

- *Contenido equivalente de agua en la nieve que corresponde a un 50% de cobertura (mm H<sub>2</sub>O) (SNO50COV)*. El modelo SWAT establece una correlación no lineal entre el agua de nieve y la cobertura de la nieve y aplica un valor de 0.5. No considerado.
- *Concentración de N en la lluvia (mg N/L) (RCN)*. El modelo usa RCN= 1.0 cuando este no es proporcionado. En el caso de la cuenca el valor aplicado fue de 0.
- *Tiempo de retraso (días) del escurrimiento subsuperficial (SURLAG)*. Se define como el tiempo (en días) que tarda el escurrimiento superficial en contribuir al escurrimiento del canal, después de un evento de lluvia. El rango aceptable para éste parámetro varía entre 0.0 y 120.0 días. Si se incluye el valor de 0.0, todo el escurrimiento subsuperficial alcanza la salida de la subcuenca en el mismo día que ocurre la lluvia. Con base en la información obtenida por Fernández (1996), se asignó un valor de 15 días, en que el escurrimiento significativo se presentó constante.

### 3.2.2 Generadores climáticos (ARCHIVO WGN)

- *Lluvia máxima en 0.5 h con período de retorno de 10 años (RAIN\_HH) y 6 h (RAIN\_6H) y número de años de información pluviográfica disponibles (RAIN\_YRS)*. Corresponden a la lámina máxima para un evento de duración de 0.5 y 6 h. Respectivamente y que ocurre con una frecuencia de una vez cada 10 años. El rango de estos parámetros está entre 5 - 150 para 0.5 h y 25 - 200 para 6 h.
- *Latitud de la cuenca (LAT)*. La cuenca se encuentra ubicada sobre las coordenadas geográficas 19°54'57.6" (19.916°) norte.

- *Temperatura máxima mensual promedio (TMP\_MX) y mínima (TMP\_MN)*. Se refiere a la temperatura máxima y mínima mensual promedio en el período de observación, de enero a diciembre. El rango de valores se encuentra entre 19 a 24°C para la temperatura máxima y -3 a 9°C para temperatura mínima. Los valores para cada subcuenca se presentan el Anexo C en la Tabla 9 y 10.
- *Radiación solar media mensual (SOLAR\_AV)*. Los valores para este factor, se resumen en el Anexo C en la Tabla 11.
- *Cantidad máxima de lluvia en 0.5 h. A nivel mensual (RAIN\_HHMX)*. Consiste en la máxima lámina de lluvia mensual con una duración de 0.5 horas con una frecuencia de una vez en 10 años. Los valores utilizados para esta opción se resumen en el Anexo C en la Tabla 12.
- *Probabilidad mensual de un día de lluvia después de un día seco (PRW\_1)*. Consiste en la probabilidad de tener lluvia un día, después de un día seco.
- *Probabilidad mensual de un día de lluvia después de otro día de lluvia (PRW\_2)*. Consiste en la probabilidad de tener lluvia un día, después de un día de lluvia.
- Los valores introducidos para estos parámetros se presentan en el Anexo C en las Tablas 13 y 14.
- *Días de lluvia mensual promedio (PCPD)*. Se incluyen los días promedio de precipitación que se tuvieron en el mes.
- *Precipitación media mensual por evento (PCPMON)*. Número promedio de precipitaciones mensuales entre el número de días con lluvia.

- *Desviación estándar mensual de la precipitación (PCP STAT)*. El rango de este valor se encuentra entre 0.5 y 200 mm.
- *Coefficiente de sesgo o asimetría mensual (PCP\_STAT3)*. Se incluye el coeficiente de asimetría mensual de la precipitación diaria.
- *Factor de compensación de la evaporación del suelo (ESCO)*. Se asignó un valor de ESCO=0.8 ya que fue el que tuvo un mejor ajuste en la producción de agua y sedimentos para el período de simulación de la cuenca.
- *Factor de compensación de extracción de agua del suelo por las plantas (EPCO)*. Se asignó un valor de EPCO=0.5 ya que fue el que tuvo un mejor ajuste en la producción de agua y sedimentos para el período de simulación de la cuenca.

El Cuadro 3 resume la información requerida dentro del archivo WGN:

**Cuadro 3. Datos estadísticos climáticos requeridos por el modelo SWAT.**

<b>Variable</b>	<b>Clave</b>
Estación climática	STATION
Latitud	WLATITUD
Longitud	WLONGITUDE
Elevación	WELEV
Número de años de información pluviográfica disponibles	RAIN_YRS
Promedio de temperatura máxima	TMPMX
Promedio de temperatura mínima	TMPMN
Desviación estándar de promedio de temperatura máxima	TMPSTDMX
Desviación estándar de promedio de temperatura mínima	TMPSTDMN
Precipitación media	PCPMM
Desviación estándar de precipitación media	PCPSTD
Probabilidad de un día de lluvia después de un día seco	PR_W1
Probabilidad de un día de lluvia después de otro día de lluvia	PR_W2
Días de lluvia mensual promedio	PCPD
Cantidad máxima de lluvia en 0.5 Hr	RAINHHMX
Radiación solar	SOLARAV
Punto de rocío	DEWPT
Velocidad del viento	WNDV

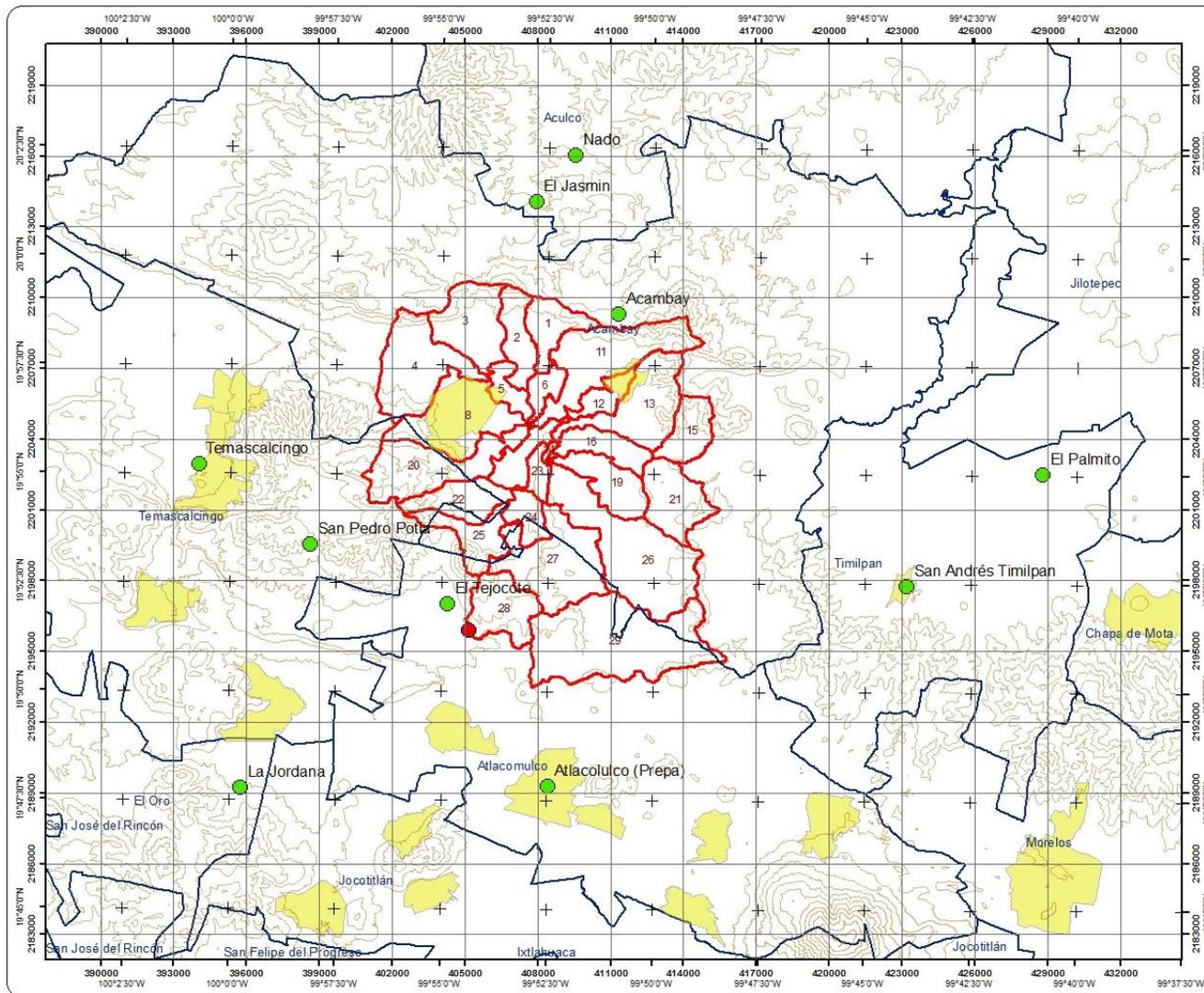
Fuente: Fernández, 1996

Para la aplicación del modelo en la cuenca El Tejocote se utilizaron un total de 11 estaciones climatológicas de la red del Sistema Meteorológico Nacional (SMN), las cuales se enlistan en Cuadro 4, éstas están ubicadas dentro y en los límites fuera de la cuenca como se observa en la Figura 20, con registros de 7 años correspondientes a 2000-2006, sobre precipitación diaria, temperatura máxima y mínima diarias, entre otras.

**Cuadro 4. Estaciones climatológicas seleccionadas para la cuenca El Tejocote.**

<b>Estación</b>	<b>Municipio</b>	<b>Latitud (Norte)</b>	<b>Longitud (Este)</b>	<b>Altitud (msnm)</b>
El Tejocote	Atacomulco	2197039	404314	2487
San Pedro Potla	Acambay	2195734	398665	2475
Acambay	Acambay	2209697	411361	2388
San Andrés Timilpan	Timilpan	2197704	423190	2680
Temascalcingo	Temascalcingo	2202920	394061	2379
Observatorio U.A.E.M.	Toluca	2132515	431405	2671
La Jordana	El Oro	2189236	395777	2643
Atacomulco (Prepa)	Atacomulco	2189320	408407	2579
El Jasmin	Aculco	2214028	407954	2693
Nado	Aculco	2216005	409592	2582
El Palmito	Timilpan	2202473	428835	2656

Fuente: SMN, 2012.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO  
FACULTAD DE QUÍMICA  
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

TESIS

"LA COBERTURA Y USO DEL SUELO EN LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS Y ESCURRIMIENTOS SUPERFICIALES EN LA CUENCA EL TEJOCOTE, MÉXICO, MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT"

### SIMBOLOGÍA

- Estaciones Climatológicas
- Estación Hidrométrica
- curvasnivel
- Zona urbana
- N° de subcuenca

**UBICACIÓN**

ELABORÓ: Lic. Karla Gabriela Mociño Velázquez  
FUENTE: Inegi 2013 Carta topográfica E14A17  
E: 1:50 000

Fuente: Elaboración propia con base en base de datos del SMN, 2012.  
**Figura 20. Estaciones climatológicas e hidrométrica para la cuenca El Tejocote.**

### 3.2.3 Datos generales de las URH (ARCHIVO SUB)

Los siguientes son datos para cada una de las 698 Unidades de Respuesta Hidrológica generadas dentro de las 29 subcuencas ubicadas en la cuenca delimitadas por el SWAT.

- *Fracción de la URH con respecto al área de la cuenca en  $\text{km}^2/\text{km}^2$  (HRU\_FR).* Estos valores fueron calculados por la interface al realizar combinaciones múltiples entre los mapas de suelo y uso del suelo y generar las URH que de ellas se derivan al especificarle la sensibilidad de generación de URH a la interface.
- *Número de curva de escurrimiento ( $\text{CN}_2$ ).* Es el número de curva de la humedad antecedente media (2). Para el cálculo de este parámetro, el modelo extrae el valor de  $\text{CN}_2$  para cada URH mediante la tabulación de los valores de las bases de datos de  $\text{CN}_2$ , grupos hidrológicos de suelos del archivo *.sol* y de la base de datos de uso de suelo del archivo *.crop.*, asignando así un valor de  $\text{CN}_2$  a cada URH, como se muestra en el Anexo B en la Tabla 6.
- *Concentración de bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).* Para la cuenca se asignó el valor de 330 ppm, que es la concentración ambiente de  $\text{CO}_2$ . Este valor es el mismo para todas las URH dentro de la subcuenca (opcional).
- *Longitud del cauce principal de la subcuenca (CH\_L1).* Este valor fue considerado como la distancia comprendida entre la salida y el punto más distante de la subcuenca. Esta variable tiene el mismo valor para todas la URH dentro de la subcuenca (ver Anexo B en la Tabla 6).

- *Pendiente promedio del cauce (CH\_S)*. Este valor es calculado como la relación que guarda la longitud del cauce principal y la diferencia de elevaciones en sus extremos. Esta variable tiene el mismo valor para todas las URH dentro de la subcuenca.
- *Conductividad hidráulica efectiva del cauce aluvial (CH\_K1)*. Su determinación se basó en observaciones y mediciones de campo, en 40 tramos de cauce representativos de la cuenca al igual que CH\_W1. Esta variable tiene el mismo valor para todas la URH dentro de la subcuenca.
- *Ancho promedio del cauce (CH\_W1)*. Este parámetro se midió a la altura de las huellas máximas medias observadas. Esta variable tiene el mismo valor para todas las URH dentro de la subcuenca.
- *Rugosidad del cauce (CH\_N)*. Es un valor de rugosidad del cauce principal, el *rango* aceptable para este valor está entre 0.01 y 0.30. Los valores obtenidos para la cuenca se encuentran en un *rango* de 0.014 a 0.042. Esta variable tiene el mismo valor para todas la URH dentro de la subcuenca.
- *Valor de "N" de Manning para el flujo sobre el suelo (OV\_N)*. Este valor es calculado por el SWAT de acuerdo a los parámetros para los diferentes tipos y manejos de cobertura vegetal introducidos al modelo. Estos valores se encuentran en un rango de 0.023 a 0.7.
- *Tiempo de recorrido del flujo lateral (LAT\_TIME)*. Como no se conoce este valor y con la finalidad de que el SWAT lo calcule, se le asignó el valor de cero. El modelo calcula LAT\_TIME a partir de las propiedades hidráulicas del modelo.

- *Factor de práctica mecánica de la USLE para el control de la erosión (USLE\_P).* Dentro de la cuenca sobresale la práctica de surcado al contorno en las áreas agrícolas ubicadas en las laderas principalmente. En las URH donde no se realizan prácticas de control de la erosión se les asignó el valor de USLE\_P= 1.
- *Índice de ajuste para la temperatura (TLAP) y la precipitación (PLAP).* Se refiere al cambio de la temperatura afectado por el cambio de elevación. Este valor se obtuvo mediante la correlación lineal de las temperaturas medias anuales y las precipitaciones anuales, respectivamente para todas las estaciones climatológicas consideradas en la cuenca, los valores resultantes fueron los de las pendientes de las rectas resultado de las regresiones lineales para cada parámetro 3.5°C para la temperatura y 218 mm para la precipitación.

### **3.2.4 Datos de suelos (ARCHIVO SOL)**

La información que requiere el modelo respecto a suelo incluye sus propiedades físicas y químicas, con el fin de analizar las condiciones que intervienen en la capacidad del suelo para alterar el ciclo del agua dentro de la cuenca, así como también en los rendimientos agrícolas presentados en la actualidad. La información de suelos fue obtenida de la base de datos realizada por Fernández (1996) para el área de estudio, la cual proveniente de las cartas edafológicas del INEGI y del análisis de muestras de suelos realizados por el INIFAP, dentro de las unidades y las fases de la cuenca. El listado de información requerida se muestra en el Cuadro 5.

**Cuadro 5. Datos de propiedades físicas y químicas de los suelos requeridos por el modelo SWAT.**

Variable	Clave
Nombre del suelo	SNAM
Numero de capas en el suelo	NLAYERS
Grupo hidrológico del suelo	HYDGRP
Profundidad de enraizamiento máximo del suelo	SOL_ZMX
Textura de la capa del suelo	TEXTURE
Profundidad de la superficie del suelo a la parte inferior de la capa	SOL_Z1
Densidad húmeda aparente	SOL_BD1
Capacidad disponible de agua de la capa del suelo	SOL_AWC1
Conductividad hidráulica saturada	SOL_K1
Contenido orgánico de carbón	SOL_CBN1
Contenido de arcilla	CLAY1
Contenido de limo	SILT1
Contenido de arena	SAND1
Contenido de fragmentos de roca	ROCK1
Albedo húmedo del suelo	SOL_ALB1
Ecuación USLE Factor (K) de erosividad del suelo	USLE_K1
Conductividad eléctrica	SOL_EC1

Fuente: Fernández, 1996.

- *Nombre del suelo (SNAM)*. Los datos pueden obtenerse automáticamente de la base de datos del modelo para suelos de los Estados Unidos con solamente identificar el nombre del suelo. En caso contrario, los suelos son accedidos a la base de datos del usuario mediante el editor de bases de datos de la interface SWAT-Arc Gis. Los suelos identificados en el área corresponden a los Andosoles Ócricos, Litosoles, Vertisoles, Feozem Háptico, Planosol Mólico y Luvisol Crómico para las fases dúrica, dúrica profunda, lítica, lítica profunda y pedregosa, según la carta edafológica escala 1:50,000 del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2010).
- *Grupo hidrológico de suelo (HYDGRO)*. De acuerdo a los criterios tomados de la Tabla 16 del anexo B, los grupos hidrológicos se dividen en A, B o C, según sus

características hidrológicas para producir escurrimiento. Estos valores se obtuvieron de la base de datos de suelos para el área de estudio realizada por Fernández (1996).

- *Profundidad máxima de enraizamiento (SOL\_ZMX)*. La profundidad máxima de enraizamiento se refiere a la profundidad de la capa del fondo del perfil del suelo. Para este parámetro se asumió a SOL\_ZMX igual a la profundidad de la última capa del perfil del suelo.
- *Número de capas en el perfil del suelo y profundidad del fondo de la capa (SOL\_Z)*. El modelo acepta hasta un máximo de 10 capas y una profundidad máxima de capas hasta de 3500 mm, la cual es acumulativa.
- *Densidad aparente del suelo (SOL\_BD) y capacidad de agua disponible (SOL\_AWC)*. Estos valores fueron determinados por Fernández (1996) a partir de la textura del suelo, según los valores medios que reporta el Anexo D en las Tablas 22 y 23. Estos valores se encuentran en un rango de 1.5 a 1.6 para SOL\_BD y 0.10 a 0.20 para SOL\_AWC.
- *Conductividad saturada (SOL\_K)*. Los valores fueron generados por medio de la textura de cada una de las capas de los suelos y basándose en el Anexo D en la Tabla 27 del.
- *Porcentaje de carbono orgánico (SOL\_CBN)*. El valor se obtuvo a partir de la materia orgánica (MO), mediante la relación  $CBN = \%MO1.724^{-1}$ , de los perfiles del suelo. Estos valores se reportan en el Anexo D en la Tabla 25.
- *Contenido de arcilla (CLAY), contenido de limo (SIL T) y contenido de arena (SAND)*. Los datos para estos tres parámetros fueron retomados de los estudios de

Fernández (1996), de los perfiles de suelos y de los muestreos realizados en el área de estudio. Estos valores se reportan en el Anexo D en las Tablas 17, 19 y 20.

- *Albedo del suelo (SOL\_ALB)*. Los valores promedio del albedo del suelo están entre un rango de 0.10 para suelos oscuro y 0.15 para colores claros. Debido a que existe poca variación, el albedo del suelo puede ser estimado con un conocimiento general del suelo o puede utilizarse un valor de 0.125 sin afectar significativamente la evaporación. El rango aceptable de valores en el modelo va de 0.0 a 1.0. Los valores obtenidos se reportan en el Anexo D en la Tabla 21.
- *Factor K del suelo de la USLE (USLE\_K)*. Este factor se determinó con base en la textura y la materia orgánica para la primer capa del suelo, según el Anexo D en la Tabla 25.

### **3.2.5 Datos generales del manejo de los cultivos (ARCHIVO MGT)**

Esta información está relacionada entre la afectación que están sufriendo los recursos suelo y agua por la aplicación de fertilizantes y agroquímicos, de las actividades de labranza y la productividad agrícola que está teniendo la cuenca. La información utilizada fue retomada de Fernández (1996), respecto a fechas de plantación y cosecha de los cultivos; número de riegos, cantidades y fechas; número de aplicaciones de fertilizantes y plaguicidas, cantidades y fechas; y número de operaciones de labranza. Para el caso de coberturas vegetales se ocupan Unidades Potenciales de Calor que el modelo calcula automáticamente

- *Número de años de rotación (NROT)*. Sobre esta variable se presenta la información que implica la rotación de cultivos en el año. El modelo puede considerar hasta tres cultivos anuales, pero debido al efecto de las heladas, en la cuenca solo se siembra un cultivo al año.

- *Fechas de plantación: mes/día, fechas de cosecha: mes/día.* Para los cultivos perennes; estas fechas fueron fijadas a partir de la acumulación de unidades calor (calculadas por el SWAT). En las subcuencas agrícolas según su condición de humedad, se accesoron las fechas de siembra y cosecha para maíz.
- *Número de identificación del cultivo.* Con este parámetro se indica al modelo si el cultivo o cobertura es anual o perenne.
- *Valor de  $CN_2$  al momento de la siembra y operaciones de labranza (CNOP).* Los valores se muestran en el Anexo E en la Tabla 33.
- *Unidades potenciales de calor (HUSC).* Este valor se calculó como la suma de las diferencias entre la temperatura media diaria  $((t_{max}+t_{mín})/2)-10$  y la básica igual a  $10^{\circ}c$  (temperatura en que deja de crecer el cultivo, Ortiz-Solorio, 1987), desde la germinación hasta la madurez fisiológica (cultivos anuales) o dentro del periodo libre de crecimiento (coberturas perennes).
- *Eficiencia del mezclado biológico (BIOMIX).* Mezclado del suelo debido a la actividad de lombrices y otra biota del suelo. El mezclado es llevado a cabo al final de cada año calendario. Si no se asigna valor a BIOMIX, debido a que no se cuenta con este tipo de información, el modelo asignó un valor a  $BIOMIX=0.20$ .

### **3.2.6 Datos de riego**

En las áreas de riego de la cuenca, este se aplica por gravedad, con una primer lámina antes de la siembra y un segundo riego de auxilio cuando el periodo de lluvias se atrasa.

- *Código de aplicación del riego (IRR)*. Ofrece las opciones de la profundidad del acuífero del que será tomada el agua de riego, así como la fecha y lámina de aplicación.

### 3.2.7 Datos de plaguicidas

Aun cuando el objetivo del presente trabajo no es el de la simulación de los plaguicidas, estos fueron alimentados al modelo para los cultivos del maíz, dicho se retomaron de Torres, (2000).

- *Número de los plaguicidas simulados (NPTOT)*. Se accesoron dos herbicidas, un insecticida para el suelo y uno para el follaje, en el Anexo G en la Tabla 35 se muestran los plaguicidas y cantidades introducidas al modelo.
- *Código de identificación del plaguicida (PEST\_ID)*. Se incluyeron dos herbicidas, así como el furadan y paratión metílico, como insecticidas del suelo y follaje respectivamente.
- *Mes de aplicación del plaguicida (MONTH), día de la aplicación (DAY), cantidad de plaguicida aplicado (PST\_KG)*. Las fechas, dosis y claves se muestran en el Anexo G en la Tabla 35

### 3.2.8 Datos de los fertilizantes

- *Mes de aplicación de nitrógeno y fósforo (MONTH), día de aplicación de fósforo y nitrógeno (DAY), cantidad de nitrógeno y cantidad de fósforo aplicada (FERT\_KG)*. El Anexo G en la Tabla 35 se muestran estos datos.

### 3.2.9 Datos del cauce principal (ARCHIVO RTE)

Con el objetivo de integrar los procesos físicos del cauce principal que afectan el transporte del escurrimiento y sedimentos en la ruta del canal de la cuenca, se incluyeron los siguientes parámetros a las corridas del modelo:

- *Ancho promedio (CH\_W) y profundidad del cauce (CH\_D)*. Valor necesario para determinar las pérdidas por transmisión. Estos dos valores fueron obtenidos directamente en campo a partir de las hullas máximas observadas en 40 sitios.
- *Pendiente media del cauce (CH\_S)*. Se calcula dividiendo la diferencia de elevaciones entre las salidas de las subcuencas y la cuenca, con la longitud del cauce.
- *Longitud promedio del cauce (CH\_L)*. Se considera como el promedio de las distancias, de los diferentes tramos analizados en cada subcuenca.
- *Valor de "N" de Manning para el cauce (CH\_N)*. Es un valor de rugosidad del cauce principal.

Estos valores se resumen en el Anexo E de la Tabla 31.

- *Conductividad hidráulica efectiva del aluvión en el fondo del cauce (CH\_K)*. Se considera del material base del cauce.
- *Valor de K del suelo en el cauce (CH\_EROD) y de cobertura (CH\_COV)*. Se refiere al factor de erosibilidad y cobertura del suelo de la USLE, son necesarios para calcular el movimiento de los sedimentos.

- *Factor canal de erosibilidad de banco (CH\_COV1) y de cama (CH\_COV2).* Para la cuenca se retomaron los datos de Fernández (1996); los Cuadros 6 y 7 se utilizan para determinar los valores:

Sí CH\_EQ es 0

Entonces:

CH\_COV1:

0 = canal no erosivo

1 = no resistente a la erosión

El canal de factor de erosibilidad es conceptualmente similar al factor de erosibilidad del suelo usado en la ecuación USLE. Para la cuenca se retomaron los datos de Fernández (1996).

Sí CH\_EQN = / 0

Se toman los valores del coeficiente del banco de vegetación para el esfuerzo crítico de corte.

**Cuadro 6. Valores de coeficiente del banco de vegetación.**

Banco de vegetación	CH_COV1
Ninguno	1.00
Cubierta de hierba	1.97
Árboles dispersos	5.40
Árboles densos	19.20

Fuente: Fernández (1996).

Entonces:

CH\_COV2:

Sí CH\_EQ es 0 el factor de canal de cubierta:

0 = canal está completamente protegido de erosión por cubierta

1 = no hay cubierta vegetal en el canal

Sí CH\_EQN  $\neq$  0

Canal de cama de vegetación por esfuerzo crítico de corte

**Cuadro 7. Valores del coeficiente de la cama de vegetación.**

Cama de vegetación	CH_COV2
Ninguno	1.00
Cubierta de hierba	1.97
Árboles dispersos	5.40
Árboles densos	19.20

Fuente: Fernández (1996).

- *Factor alfa o flujo de base para el almacenamiento de banco (días) (ALPHA\_BNK).*  
El almacenamiento del banco contribuye al flujo del canal principal o alcance dentro de la subcuenca. El banco de flujo simula una curva de recesiones similar a la utilizada para las aguas subterráneas. El factor alfa o flujo de base, o recesión constante, caracteriza la curva de recesión del banco de almacenamiento. Esta constante puede ser un número cercano a 1 para las recesiones planas y pequeñas y; aproximado a cero para las recesiones empinadas. Para la simulación se estableció un valor de 1 para las subcuencas asentadas sobre el valle y agricultura de riego y, de 0.03 para el resto.

Si no se introduce ningún valor para ALPHA\_BNK, la variable será el mismo valor que ALPHA\_BF desde el archivo de las aguas subterráneas (.gw).

- *Código de canal de riego (ICANAL)*. Para la cuenca ésta valor no fue contemplado, sin embargo, un valor de 0 es para un canal no irrigado y, un valor de 1 es para los irrigados.
- *Cambio en distancia horizontal por unidad de distancia vertical (0 – 5) (CH\_SIDE)*. El modelo asigna un valor de 0 para banco de canal vertical y de 1 para banco de canal con pendiente lateral suave.
- *Densidad del banco de canal de sedimentos (CH\_BNK\_BD)*. El rango contempla de 1.1-1.9 g/cc. Si no se da la densidad aparente, el modelo asume un valor por defecto de 1.4 g / cc para los sedimentos asumiendo material de tipo limo.
- *Densidad de cama del canal de sedimentos (CH\_BED\_BD)*. El rango contempla de 1.1-1.9 g/cc. Si no se da la densidad aparente, el modelo asume un valor por defecto de 1.5 g/cc para los sedimentos asumiendo material de tipo arena.

#### CH\_BNK\_KD:

El modelo asume un rango entre 0.001 y 3.75 cm<sup>3</sup>/N-s, para suelos de baja a alta erosibilidad.

#### CH\_BED\_KD:

Similar a CH\_BNK\_KD pero calculado para la cama del canal (0.001 y 3.75 cm<sup>3</sup>/N-s).

- *Tamaño medio del diámetro de las partículas del banco de canal de sedimento (µm) (CH\_BNK\_D50)*. Sí el valor no es dado, el modelo asume un valor por default de 50 µm (sedimentos con tamaño de limo) para el banco. (1 a 10,000 µm)

- *Tamaño medio del diámetro las partículas de la cama del canal de sedimento ( $\mu\text{m}$ ) ( $CH\_BED\_D50$ ). El modelo asumió un valor por default de 500  $\mu\text{m}$  (sedimentos con tamaño de arena) para la cama. (1 a 10,000  $\mu\text{m}$ )*
- *$CH\_ERODMO$ : Está ajustado a un valor entre 0 y 1. Un valor de 0 indica no erosión en el canal, mientras que un valor de 1 indica que no hay resistencia a la erosión. El modelo aplicó un valor por default de 0.*

### **3.2.10 Datos de los cuerpos de agua (ARCHIVO PND)**

Dentro de la cuenca se ubican 309 cuerpos de agua y en promedio cada uno de ellos capta 24.5 miles de  $\text{m}^3$ .

- *Fracción de cada subcuenca que drena hacia los cuerpos de agua ( $PND\_RF$ ). Los valores se obtuvieron al sobreponer (con el módulo UNION TWO THEMES de ArcGis) la imagen de las áreas de escurrimiento de los depósitos, con la de las subcuencas generadas en la delimitación de la zona de estudio.*
- *Área total de la superficie (espejo de agua) del almacenamiento ( $PND\_PSA$ ). Estos valores se reportan en el Anexo F en la Tabla 34.*
- *Volumen de agua necesario para llenar los depósitos ( $PND\_PVOL$ ). En el Anexo F de la Tabla 34 se presentan los valores empleados.*
- *Volumen de agua inicial en el cuerpo de agua ( $PND\_VOL$ ). Se asignó un valor de  $PND\_VOL = PND\_PVOL (0.75)$*

- *Concentración inicial de sedimentos (PND\_SED)*. Este valor fue obtenido del análisis de los datos de sedimentos, de los meses de diciembre y enero, con registro en la estación de aforo, el cual es de 63 ppm.
- *Concentración normal de sedimentos (PND\_NSED)*. Se estimó a partir de la concentración media (del período de simulación) en la estación hidrométrica, el cual fue de 100 ppm.
- *Conductividad hidráulica del fondo de los depósitos (PND\_K)*. Para este parámetro se asignó un valor de 0.08 mm.h<sup>-1</sup>.
- *Mes de comienzo de la temporada de no inundación (IFLOD1)*. El flujo de salida del estanque se calcula como una función de almacenamiento de destino. El almacenamiento de destino varía dependiendo de la temporada de inundaciones y el contenido de agua del suelo. Para la cuenca se estableció un valor de 5 correspondiente al mes de Junio.
- *Mes de término de la temporada de no inundación (IFLOD2)*. Se estableció un valor de 10 correspondiente al mes de Octubre.
- *Número de días necesarios para alcanzar el almacenamiento del estanque actual (NDTARG)*. El valor establecido para la cuenca fue de 60 días.
- *El valor se aplica de acuerdo con el diámetro medio de la partícula de sedimento (PND\_D50)*. Cuando el valor no es definido el modelo aplica por default 10 µm.
- *Mes de comienzo de la sedimentación de nutrientes a mitad de año o "temporada" (IPND1)*. Se estableció un valor de 5 correspondiente al mes de Junio.

- *Mes de término de la sedimentación de nutrientes a mitad de año "temporada" (IPND2).* Se estableció un valor de 12 correspondientes al mes de Diciembre.

### **3.2.11 Datos de aguas subterráneas (ARCHIVO GW)**

- *Profundidad inicial de agua en los acuíferos poco profundos (mm H<sub>2</sub>O) (SHALLST).* Se recomienda el uso de datos de 1 año antes del periodo de interés, ya que esto permitirá que el modelo simule el ciclo del agua adecuadamente antes de realizar cualquier comparación entre los datos medidos y simulados. Cuando se incorpora un periodo de equilibrio, el valor de SHALLST no es tan importante, no obstante para el modelo se estableció un valor de 5,000 mm.
- *Profundidad inicial de agua en el acuífero profundo (mm H<sub>2</sub>O) (DEEPST).* También se recomienda el uso de datos de 1 año antes del período de interés. Cuando se incorpora un período de equilibrio, el valor para DEEPST no es tan importante. En cuencas donde no hay riego con agua del acuífero profundo, esta variable no tiene ningún impacto en absoluto. Para la cuenca se introdujo un valor de 60,000 mm.
- *Temporizadores de retardo subterráneo (días) (GW\_DELAY).* El agua que se mueve más allá de la profundidad más baja del perfil del suelo por percolación o flujo de derivación entra y fluye a través de la zona no saturada antes de convertirse en la recarga del acuífero superficial. El desfase entre el tiempo que pasa del agua del perfil del suelo a los acuíferos poco profundos dependerá de la profundidad y de las propiedades hidráulicas de las formaciones geológicas en las zonas no saturadas y las subterráneas. Se aplicó un valor de 20 días.
- *Factor de flujo base (1/día) (ALPHA\_BF).* La constante de recesión del flujo de base, es un índice directo de la respuesta de flujo de agua subterránea a los cambios

en la recarga. Los valores varían de 0.1 a 0.3 para tierras con la lenta respuesta de recarga y de 0.9 a 1.0 para tierras con una respuesta rápida. Aunque se puede calcular la constante de recesión del flujo de base, las mejores estimaciones se obtuvieron mediante el análisis de los caudales medidos durante periodos sin recarga en la cuenca. Para la cuenca se retomó un valor de 1 para las subcuencas ocupadas por agricultura en valle y riego y, de 0.03 para el resto de ellas.

- *Umbral de profundidad de agua en el acuífero superficial para producir el flujo de retorno (mmH<sub>2</sub>O) (GWQMN)*. Los flujos de agua subterránea sólo se permiten si la profundidad del agua en el acuífero superficial es igual o mayor que GWQMN. Para obtener los mejores resultados para la cuenca se estableció un valor de 5,000 mm.
- *Coeficiente "REVAP" para aguas subterráneas (GW\_REVAP)*. Este proceso es importante en cuencas donde la zona saturada no está muy lejos de la superficie o donde las raíces profundas de las plantas están creciendo. Debido a que el tipo de cubierta vegetal afecta el REVAP, éste puede variar por el uso del suelo.

Cuando GW\_REVAP se aproxima a 0, el movimiento de agua desde el acuífero superficial a la raíz está restringido; cuando GW\_REVAP se acerca a 1, la tasa de transferencia del acuífero superficial a la zona de la raíz se aproxima a la tasa de evapotranspiración potencial. Esta variable, junto con REVAPMN, es la razón por la que se crea un archivo de aguas subterráneas diferente para cada HRU en lugar de cada subcuenca.

El valor para GW\_REVAP debe estar entre 0.02 y 0.20, para la cuenca se estableció un valor de 0.

- *Umbral de profundidad del agua en el acuífero superficial para ocurrir el "REVAP" o percolación en el acuífero profundo (mm H<sub>2</sub>O) (REVAPMN)*. El movimiento del

agua del acuífero superficial a la zona no saturada sólo se permite si el volumen de agua en el acuífero superficial es igual o mayor que REVAPMN. Esta variable, junto con GW\_REVAP, es la razón de se cree un archivo de aguas subterráneas diferente para cada HRU en lugar de cada subcuenca. Para el modelo se aplicó un valor de 5,000 mm.

- *Fracción de percolación del acuífero profundo (RCHRG\_DP)*. Es la fracción de percolación desde la zona de la raíz que se recarga el acuífero profundo. El valor para RCHRG\_DP debe estar entre 0 y 1. Debido a que dicha variable influye de forma considerable en los resultados de recarga se estableció un valor de 1 para equilibrar el ciclo.

### **3.3. Calibración y validación**

De acuerdo con el manual para el uso, calibración y validación del modelo SWAT de Arnold y otros, (2012) la calibración y validación del modelo se dividen en los tres pasos siguientes:

- El primer paso en el proceso de calibración y validación de SWAT es la determinación de los parámetros más sensibles para una determinada cuenca o subcuenca. El usuario debe determinar qué variables ajustar con base en la opinión de expertos o en la sensibilidad de análisis.

El análisis de sensibilidad es el proceso de determinar la tasa de cambio en la salida del modelo con respecto a los cambios en las entradas del mismo (parámetros), para ello es necesario identificar los parámetros clave y el parámetro de precisión requerido para la calibración (Ma y otros, 2000). En un sentido práctico, este primer paso ayuda a determinar los procesos predominantes para el componente de interés.

Existen dos tipos de análisis de sensibilidad: a) local, mediante el cambio de los valores de uno en uno, y b) global, permitiendo que todos los valores de los parámetros cambien. Los dos análisis, sin embargo, pueden dar resultados diferentes debido a que ambos presentan algunas desventajas ya que la sensibilidad de un parámetro a menudo depende del valor de otro parámetro relacionado, por lo tanto, el problema con el análisis de uno en uno es que los valores correctos nunca se saben y la desventaja de la sensibilidad global es que necesita un gran número de simulaciones; por tanto de acuerdo a los objetivos del análisis se deberán considerar ambas situaciones.

- El segundo paso es el proceso de calibración en sí mismo. La calibración es un esfuerzo para parametrizar mejor el modelo para un determinado conjunto de condiciones locales, reduciendo así la incertidumbre de predicción.

La calibración del modelo se realiza mediante la cuidadosa selección de valores para los parámetros de entrada del modelo (en sus respectivos rangos de incertidumbre) mediante la comparación de las predicciones del modelo (salida) para un conjunto dado de condiciones asumidas con los datos observados para las mismas condiciones.

La calibración se puede realizar de forma manual o utilizando herramientas de autocalibración en SWAT (Van Griensven y Bauwens, (2003); Van Liew y otros, (2005) o SWAT -CUP (Abbaspour y otros, (2007). Idealmente, los procesos de calibración y validación deben tener una base espacial, teniendo en cuenta las aportaciones, el modelo y los parámetros de incertidumbre. Un buen ejemplo de proceso de calibración implica el análisis de caudal de la cuenca. Los procesos de caudal están compuestos por el equilibrio de agua en la fase terrestre de la hidrología, incluyendo evapotranspiración, flujo lateral, escorrentía superficial, flujo de retorno, el flujo de la baldosa (si está presente) las pérdidas

de transmisión de canal, y recarga del acuífero profundo. Si se dispone de datos para cada uno de estos procesos, deberán ser calibrados individualmente.

Para la calibración de sedimentos, deben ser considerados los nutrientes, pesticidas y bacterias, las fuentes y sumideros. Si un periodo de tiempo más largo está disponible para el componente hidrológico, es importante utilizar todos lo que esté disponible con el fin de capturar las tendencias a largo plazo.

Sin embargo, generalmente hay insuficientes datos observados para permitir una completa calibración y validación a escala de cuencas. Por ello los métodos utilizados para comparar los datos observados y predicciones del modelo son también importantes, los métodos estadísticos que suelen ser utilizados son series de tiempo de parcelas, la eficiencia de Nash-Sutcliffe (Nash y Sutcliffe, 1970), y el porcentaje de sesgo.

- El paso final de la ejecución del modelo es la validación, y se realiza para cada componente de interés (caudal, producción de sedimentos, etc.). La validación del modelo es el proceso de demostrar que un determinado modelo de sitio específico es capaz de hacer lo suficientemente precisa la simulación, aunque "suficientemente precisa" en ocasiones puede variar en función de las metas del proyecto (Refsgaard, 1997).

La validación implica la ejecución de un modelo usando parámetros que se determinaron durante el proceso de calibración, y comparando las predicciones a los datos observados que no se utilizaron en el mismo.

Para ayudar con el proceso de calibración y validación del modelo SWAT recomendado, White y otros, (2012) desarrolló un programa que advierte a los usuarios si los resultados

del modelo seleccionados varían en rangos típicos para asegurar que los procesos simulados son realistas.

A éste programa se ha sumado una extensa gama de estadísticas técnicas que se pueden utilizar para evaluar el modelo hidrológico SWAT y las predicciones de contaminantes; por ejemplo, Coffey y otros, (2004) describen cerca de 20 posibles pruebas estadísticas que se pueden utilizar para juzgar predicciones SWAT, incluyendo coeficiente de determinación ( $r^2$ ), NSE, error cuadrático medio (RMSE), pruebas no paramétricas, t-test, funciones objetivo, autocorrelación, y correlación cruzada.

Por el momento, el más utilizado según lo reportado en estudios de aplicación del SWAT son  $r^2$  y NSE. El estadístico  $r^2$  puede variar de 0 a 1, donde 0 indica que no hay correlación y 1 representa una correlación perfecta, y proporciona una estimación de lo bien que la varianza de los valores observados se replican por las predicciones del modelo (Krause et al., 2005). Un ajuste perfecto también requiere que la pendiente de la regresión y la intersección sean iguales a 1 y 0, respectivamente; sin embargo, la pendiente y la intersección típicamente no han sido reportadas en estudios SWAT publicados. Si  $r^2$  es la principal estadística medida, se debe utilizar siempre con pendiente y la intersección para asegurar que los medios son razonables (pendiente = 1) y el sesgo es bajo.

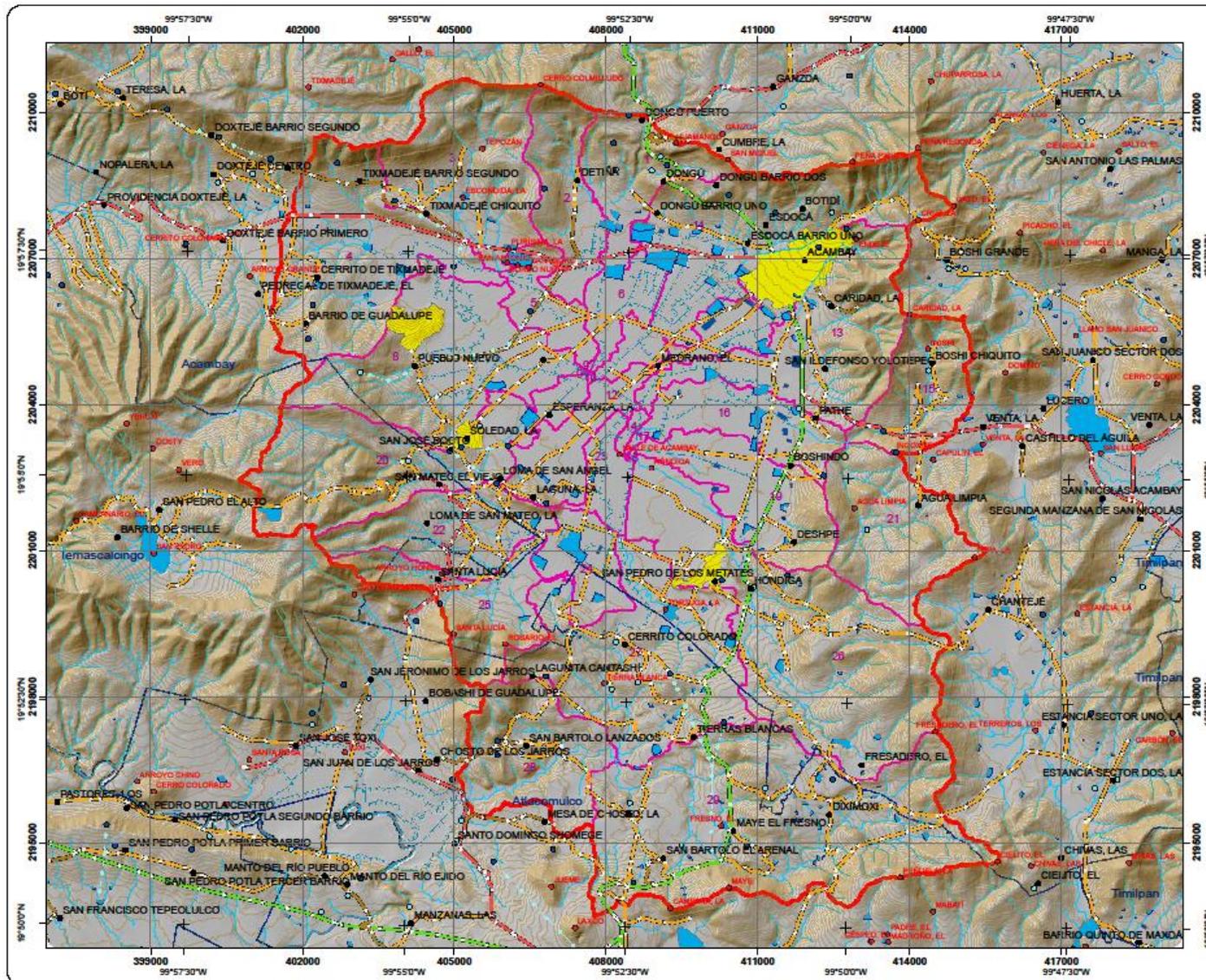
Valores de NSE pueden variar entre  $-\infty$  a 1 y transmitir qué tan bien coincide la salida simulada con la observada, los datos a lo largo de un 1: (1 línea de regresión recta con pendiente igual a 1). Un ajuste perfecto entre el simulado y observado se indica mediante un valor de 1. Los valores de  $NSE \leq 0$  indican que los datos requieren más precisión.

#### **4. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA EL TEJOCOTE**

Con la finalidad de conocer las condiciones en la que se encuentra la cuenca El Tejocote, a continuación se presentan las características geográficas en cuando a hidrología, edafología, geología, usos de suelos y vegetación, éstas permitirán comprender de mejor manera las aptitudes que tienen el suelo y los demás recursos naturales para sustentar las actividades económicas que desarrolla la población. Asimismo la caracterización morfológica ayuda a crear escenarios de tendencias futuras sobre el comportamiento que tendrán los recursos como consecuencia de la alteración de sus condiciones naturales.

##### **4.1 Localización de la cuenca El Tejocote**

La cuenca se localiza en el Estado de México a  $99^{\circ}54'37''$  E y  $19^{\circ}51'22''$  N, en los municipios de Acambay, Atlacomulco y Temascalcingo, sobre el río Chiquito. Está aforada por la estación hidrométrica “El Tejocote” en el municipio de Atlacomulco (ver Figura 21).



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO  
FACULTAD DE QUÍMICA  
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

TESIS

"LA COBERTURA Y USO DEL SUELO EN LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS Y ESCURRIMIENTOS SUPERFICIALES EN LA CUENCA EL TEJOCOTE, MÉXICO, MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT"

**SIMBOLOGÍA**

○	Manantial	■	Cuerpo de agua
●	Pozo	■	Estanque
■	Tanque de agua	■	Tanque de agua
■	Toponimo	□	Municipios
—	Acueducto	□	Nº de subcuenca
—	Bordo		
—	Canal		
—	Curva de nivel		
—	Corriente de agua		

**Vías de comunicación**

- E estatal
- F federal
- N/A
- O otro

Límite cuenca El Tejocote  
 Área urbana

**UBICACIÓN**

**FIGURA 21. MAPA BASE**

ELABORÓ: Lic. Karla Gabriela Mociño Velázquez  
FUENTE: INEGI 2013 Carta topográfica E14A17  
E: 1:50 000

**Figura 21. Mapa Base.**

## **4.2. Caracterización física de la cuenca El Tejocote**

### **4.2.1 Fisiografía**

La cuenca abarca una superficie de 17,731 ha, con una altitud promedio de 2,615.81 msnm, forma parte del altiplano central y se ubica en las cercanías del parteaguas continental, la parte central de la cuenca es considerada como un llano aislado que en algún tiempo fue una laguna natural (Valle de Acambay) (Torres, 2000).

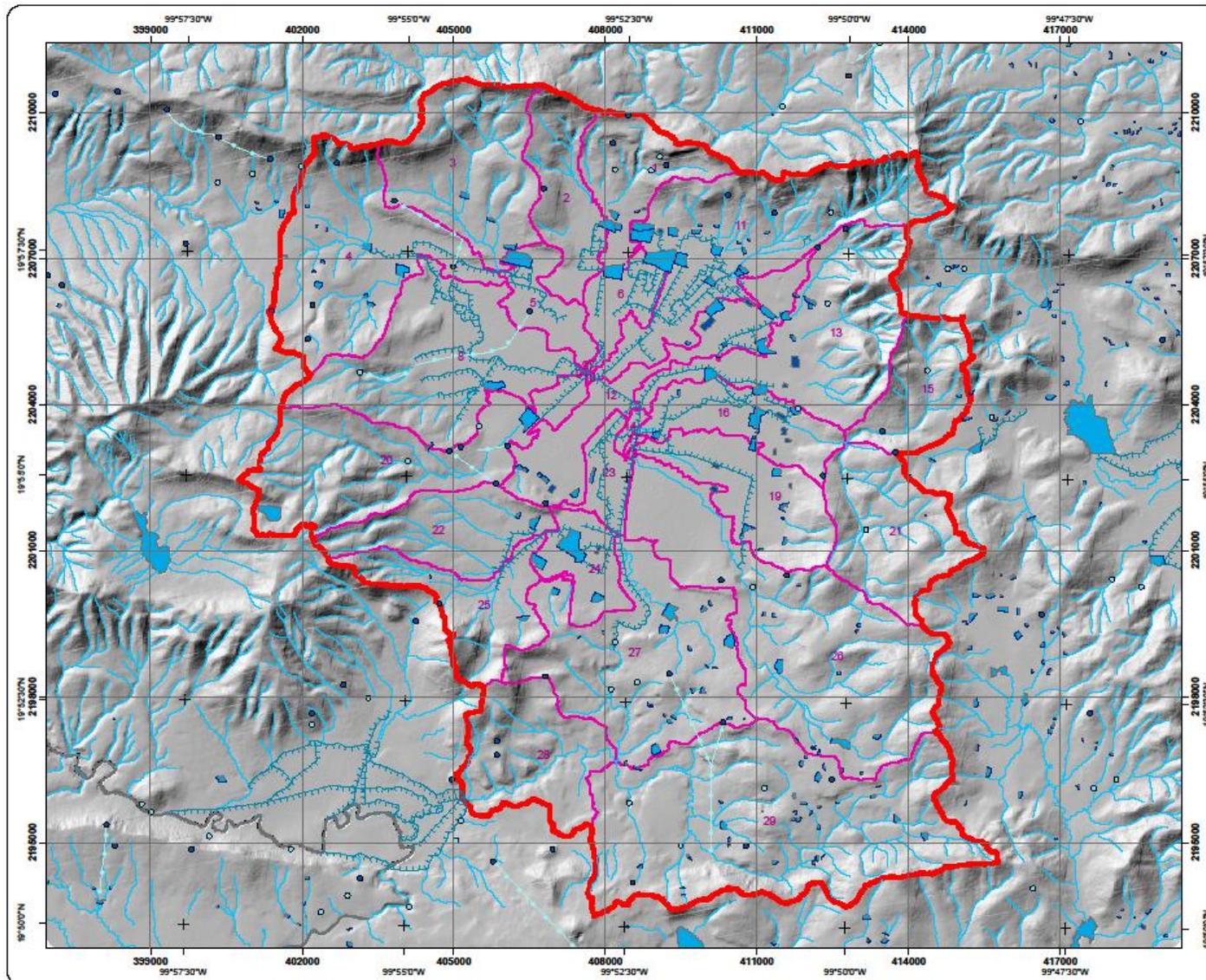
### **4.2.2 Hidrología**

El INEGI, (2010) reporta información en la carta topográfica E14A17 donde se ubica la cuenca, acerca de un total de 17 manantiales, 31 tanques de agua, 6 acueductos subterráneos en operación, 148 bordos que cubren casi en su totalidad a los 152 cuerpos de agua existentes, 56 canales y 523 corrientes de agua de varios ordenes de tipo intermitente. En conjunto ofrecen una capacidad aproximada de 7.56 millones de m<sup>3</sup>, que se usan para riego agrícola y de agostadero.

Los escurrimientos en la parte alta, se concentran en forma radial al centro del valle y los producidos en la parte baja arriban directamente en la salida de la cuenca, para alcanzar finalmente su descarga al río Lerma.

El Municipio de Acambay forma parte de dos Regiones Hidrológicas, al suroeste la Cuenca del Río Lerma-Toluca (con las subcuencas Río Oztolotepec-Atlacomulco y Atlacomulco-Paso de Ovejas); al noreste la Cuenca del Río Moctezuma (subcuencas Río Prieto y Arroyo Zarco). Las principales corrientes permanentes del Municipio son los ríos Las Juntas, San Francisco Shaxní, El Agostadero, San Juan y el Juandó. En la porción suroeste se localiza el Río La Laguna, ahora con características de canal, así como pequeños arroyos: San

Francisco Shaxní, Puenteillas, Tixmadejé, Camposanto, Pathé, los cuales se unen para alimentar el caudal del Río Lerma (ver Figura 22).






UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO  
FACULTAD DE QUÍMICA  
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

TESIS

"LA COBERTURA Y USO DEL SUELO EN LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS Y ESCURRIMIENTOS SUPERFICIALES EN LA CUENCA EL TEJOCOTE, MÉXICO, MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT"

**SIMBOLOGÍA**

- Manantial
- Pozo
- ★ Tanque de agua
- Acueducto
- Bordo
- Canal
- ~ Corriente de agua
- Cuerpo de agua
- Estanque
- Tanque de agua
- ▭ Límite cuenca El Tejocote
- ▭ N° de subcuenca

**UBICACIÓN**



**FIGURA 22. MAPA HIDROLÓGICO**

ELABORÓ: Lic. Karla Gabriela Mociño Velázquez  
FUENTE: INEGI 2013 Carta topográfica E14A17  
E: 1:50 000

Figura 22. Mapa Hidrológico.

Para realizar el presente estudio, se retomarán datos de la estación hidrométrica “El Tejocote”, la cual comenzó a operar el 15 de julio de 1962, la corriente que pasa por ella se denomina río Chiquito, el cual nace al noreste en el valle de Acambay y es un afluente del río Lerma. De acuerdo con Torres, (2000) la estación presenta las siguientes características:

Condiciones de tramo. La estación se encuentra situada en un tramo recto rectificado, de unos 100 m de longitud, sus márgenes y fondos están formados por arcilla, arena limosa y grava.

Estructura para aforos. Para efectuar los aforos se utiliza el puente de la carretera, el cual tiene un claro total de 8.66 m y está formado por una loza de concreto reforzado, con los estribos de mampostería. La selección de aforos forma parte del puente y es perpendicular a la corriente, con ambas márgenes en mampostería y fondo de concreto. Un banco de nivel de concreto se encuentra en el extremo derecho del pasamanos del puente, (cabeza de la escalera), con una altitud de 2485.9 msnm.

Escala limnimétrica. La escala se lee diariamente a las 6, 12 y 18 horas, durante el estiaje y cada hora en el periodo de avenidas. Una se encuentra situada a 8.30 m, aguas abajo, sobre la margen izquierda y la otra sobre la misma margen, pero aguas arriba. El primer tramo es de 3 m de largo, vertical y de concreto y el segundo de 1.50 m de longitud, inclinado y también de concreto. La capacidad total es de 4.50 m.

Aforos. Generalmente se efectúan dos aforos diarios, por el procedimiento de sección y velocidad con molinete hidráulico. Las mediciones comenzaron a hacerse el 15 de julio de 1962. En aguas bajas, se afora vadeando, en una sección situada 80 m aguas arriba de la principal.

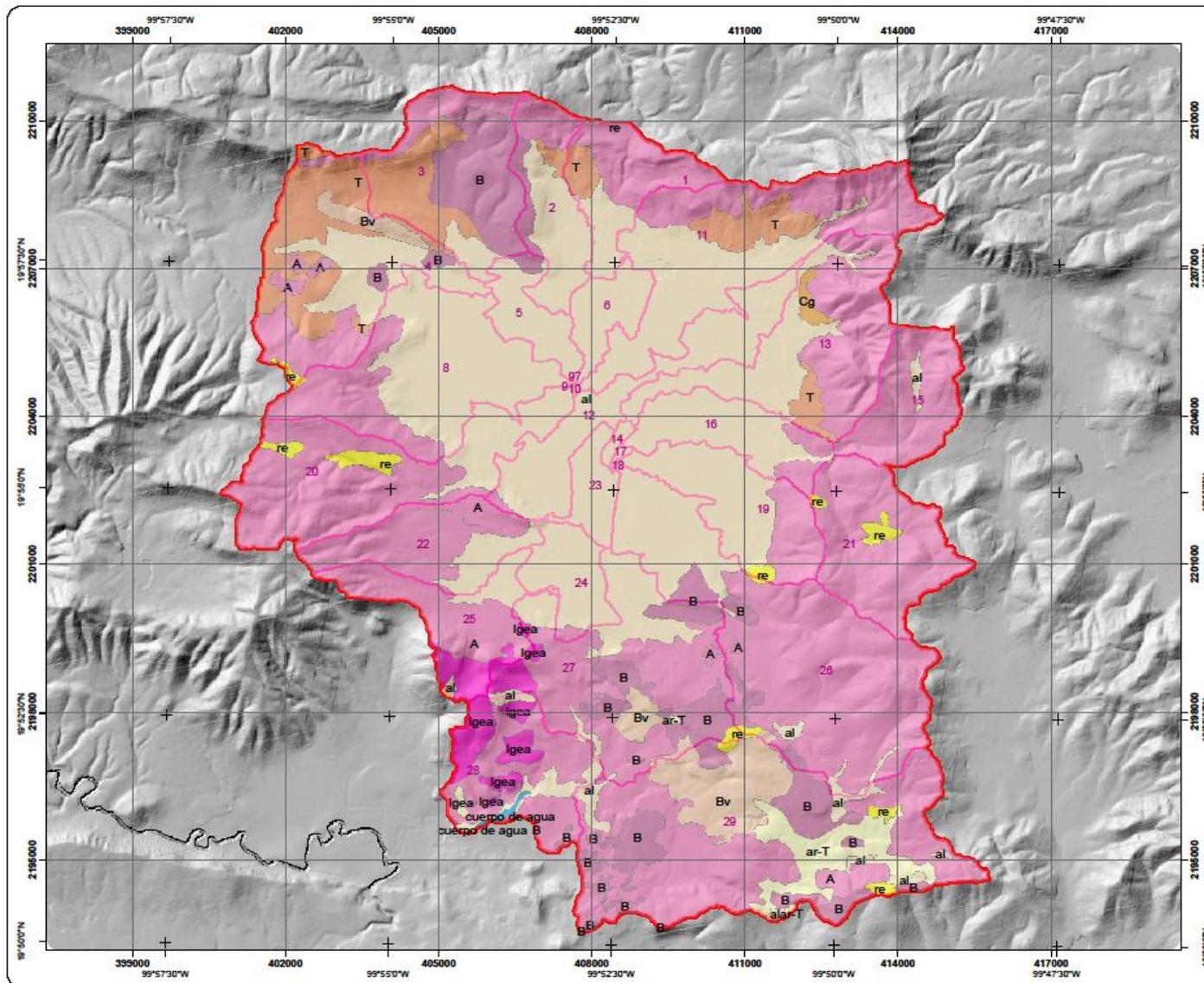
Registro gráfico de niveles. Para esto se tiene instalado un limnógrafo en la margen izquierda, 3.50 m aguas arriba de la sección de aforos. La torre es de tubo ARMCO de 6.5 m de altura y 0.61 m de diámetro, con comunicación directa a la corriente. Este comenzó a operar el 1 de septiembre de 1969.

Sólidos en suspensión. Las observaciones se realizaron del 15 de julio de 1962 hasta finales de 1985, en cada aforo se tomaron muestras superficiales que fueron procesadas en la misma estación.

#### **4.2.3 Geología**

La cuenca se caracteriza por estar asentada sobre formaciones Ígneas de tipo basáltico y andesítico, con depósitos piroclásticos representados por aglomerados, brechas y tobas (tepetates); observados principalmente en las serranías que se localizan al norte (Torres, 2000).

En la zona norte de la cuenca se observan también afloramientos de basalto, con textura afanítica de color gris oscuro, sobreyaciendo se presenta una toba del mismo tipo de arena arcillosa de grano, depositada en un medio acuoso (ver Figura 23).



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO  
FACULTAD DE QUÍMICA  
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

---

TESIS

"LA COBERTURA Y USO DEL SUELO EN LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS Y ESCURRIMIENTOS SUPERFICIALES EN LA CUENCA EL TEJOCOTE, MÉXICO, MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT"

---

SIMBOLOGÍA

**Roca**

- al Aluvial
- A Andesita
- B Basalto
- lgea Extrusiva ácida
- Bv Brecha Volcánica
- T Toba
- ar-T Arenisca-Toba
- Cg Conglomerado
- re Residual
- cuerpo de agua
- Límite cuenca El Tejocote
- N° de subcuenca

---

UBICACIÓN

---

FIGURA 23. MAPA GEOLÓGICO

0 500 1000 Metros

ELABORÓ: Lic. Karla Gabriela Mociño Velázquez  
FUENTE: INEGI 2013 Carta topográfica E14A17  
E: 1:50 000

**Figura 23. Mapa Geológico.**

Sus principales riesgos de tipo geológico están originados por la falla de carácter continental que atraviesa al municipio de Acambay en dirección este – oeste, denominada fracturamiento Zapopan – Acambay – Ochochitlán, la cual inicia en las Islas Marías, para atravesar el continente e ir más allá, hasta el Golfo de México, esta falla en su trayectoria por el territorio municipal, según el Atlas de Riesgos del Estado de México (DGPC), se ubica próxima a localidades como son: Botí, Doxteje (Barrio II), Santa María Tixmadejé, Dongú, Esdocá, Botidí y La Manga; que conjuntamente con el alto grado de sismicidad que se presenta en la zona, representa un alto riesgo a los asentamientos humanos que pudieran desarrollarse en ella; a la vez que se genera una zona de media vulnerabilidad en las poblaciones antes mencionadas.

#### **4.2.4 Climatología**

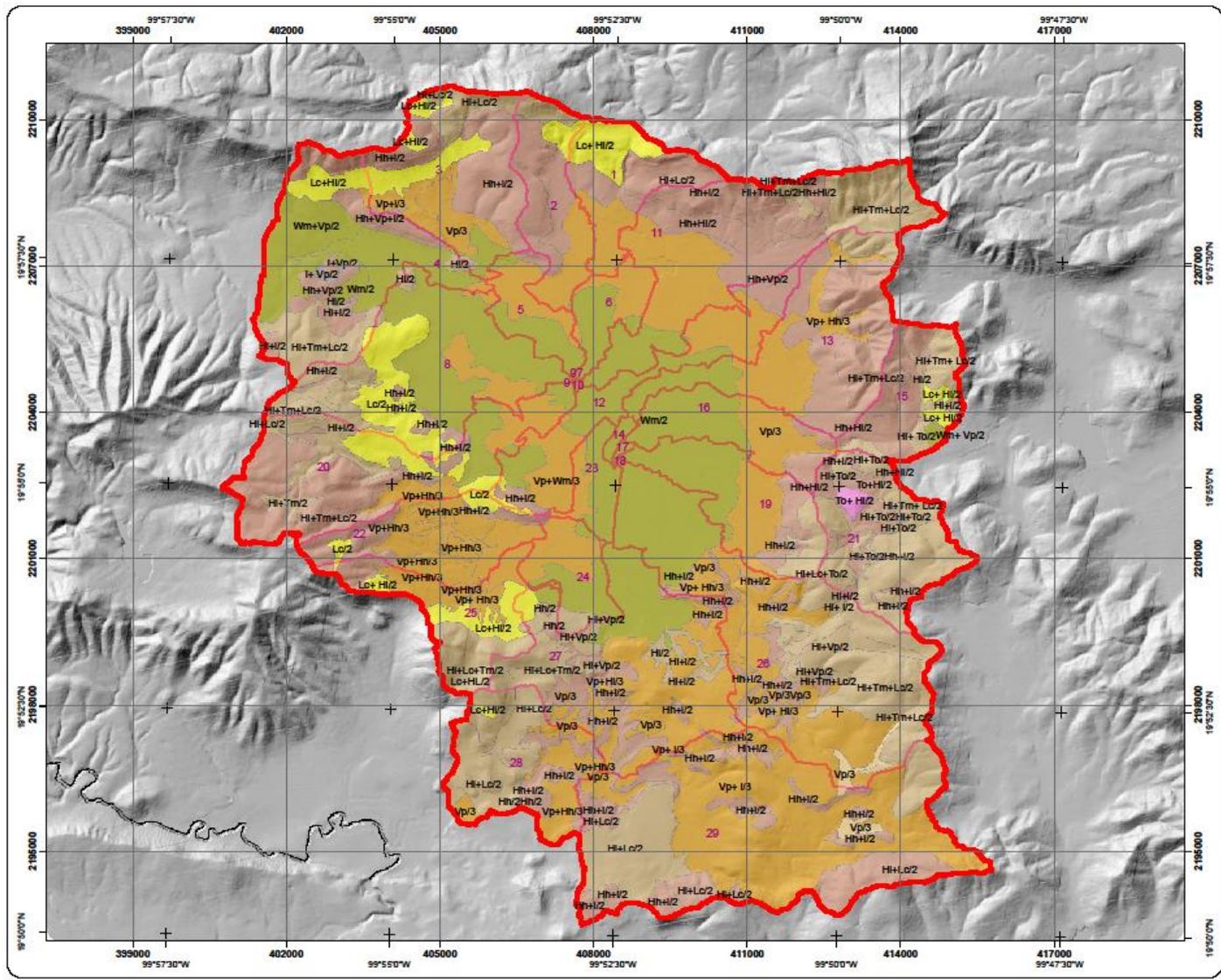
Según el sistema Köpen modificado por García (1973), el clima se clasifica como un C(W1)(W)b(i) y se describe como templado subhúmedo, con lluvias en verano e invierno bien definido, con temperatura media anual de 13.4°C.

La precipitación media anual es de 838.5 mm, con una distribución uniforme que va desde principios de junio hasta fines de septiembre, con un 70% de probabilidad de ocurrencia durante este lapso. El periodo libre de heladas abarca del mes de febrero al mes de octubre, con una probabilidad de ocurrencia de lluvia de 80% (Torres, 2000).

#### **4.2.5 Edafología**

Las unidades y subunidades de suelo conforme el sistema de clasificación de suelos FAO/UNESCO (1970), modificado por INEGI, que están presentes en la cuenca son Andosol y Litosol en menor medida, Feozem en las orillas de la cuenca donde existen manchones de bosques, Vertisol y Planosol en la zona centro y Luvisol en áreas al norte y

oeste de la cuenca; según la carta edafológica de INEGI, (2010) escala 1:50 000 (ver Figura 24).






UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO  
FACULTAD DE QUÍMICA  
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

TESIS

"LA COBERTURA Y USO DEL SUELO EN LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS Y ESCURRIMIENTOS SUPERFICIALES EN LA CUENCA EL TEJOCOTE, MÉXICO, MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT"

### SIMBOLOGÍA

**Edafología**

- To Andosol ócrico
- Hh Feozem háplico
- Hi Feozem lúvico
- I Litosol
- Lc Luvisol crómico
- Wm Planosol mólico
- Vh Vertisol háplico
- Vp Vertisol pélico
- Límite cuenca El Tejocote
- N° de subcuenca

**UBICACIÓN**



**FIGURA 24. MAPA EDAFOLÓGICO**

ELABORÓ: Lic. Karla Gabriela Mocoño Velázquez  
FUENTE: INEGI 2013 Carta topográfica E14A17  
E: 1:50 000

**Figura 24. Mapa Edafológico.**

#### 4.2.6 Uso de suelo y vegetación

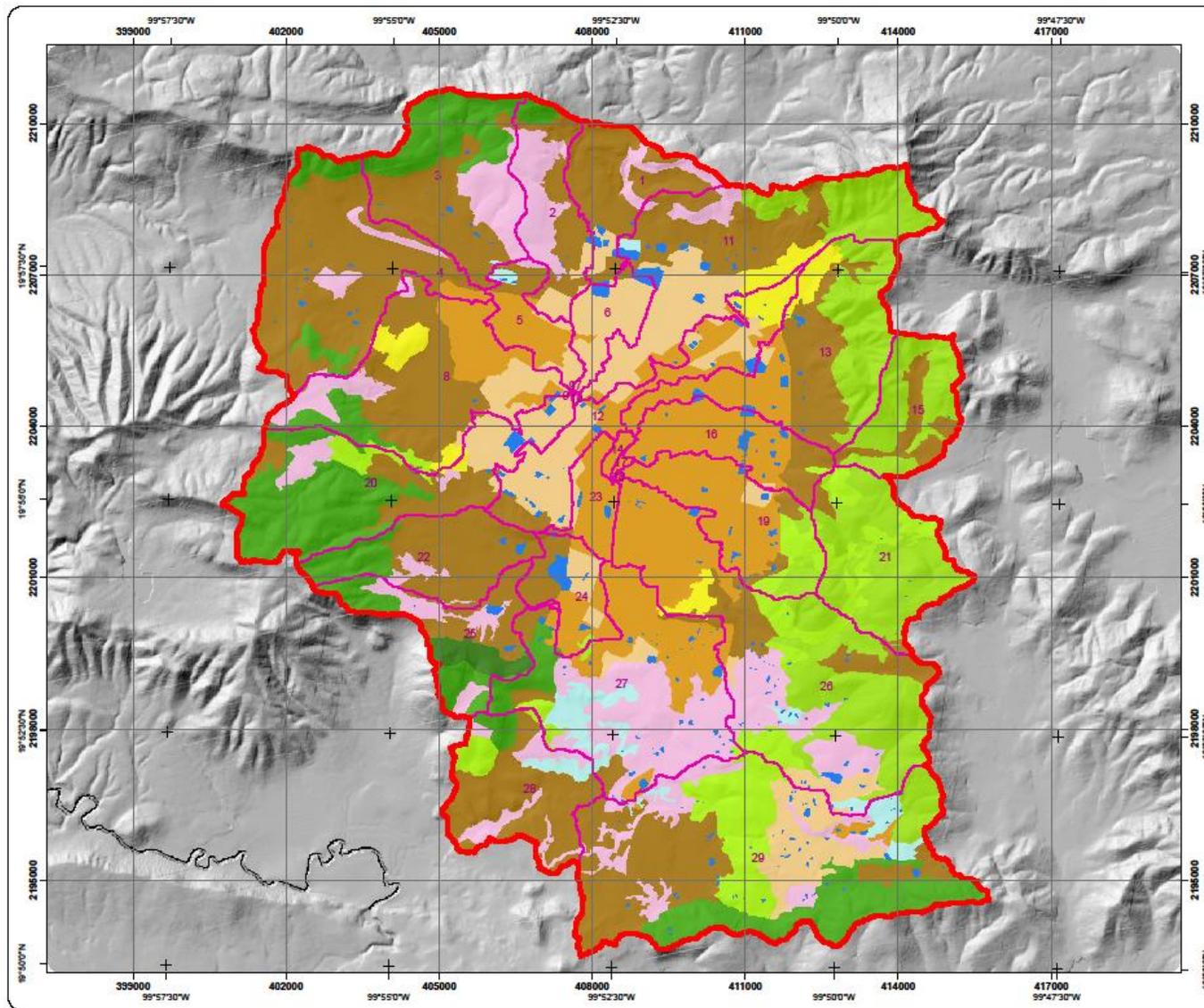
De acuerdo con la clasificación que se hizo mediante la imagen satelital SPOT 2010 el tipo de suelo que predomina en la cuenca es el agrícola, ocupando el 71.71% del territorio, en segundo lugar se encuentra la vegetación inducida o pastizales con 19.20% (ver Figura 25).

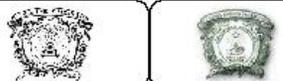
Este tipo de vegetación está conformado por gramíneas herbáceas, no mayores de un metro de altura. Los géneros Bonteloud, Andropogon, Aristida, Cynodon, Eragrostis y Stipa son los más predominantes. También existen bosques de encino (5.13% de la superficie total) localizados en las zonas montañosas, observándose sobre todo tipo de rocas, así como en suelos profundos de terrenos aluviales planos y, en menor medida se desarrollan bosques de coníferas (2.97% de la superficie) (Torres, 2000). Las zonas urbanas ocupan el 0.54% del territorio, el restante 0.45%, cuerpos de agua como se puede apreciar en el Cuadro 8.

**Cuadro 8. Vegetación y Usos del Suelo de la cuenca El Tejocote.**

<b>Vegetación y Uso del Suelo</b>	<b>Superficie (ha)</b>
Agricultura laderas	5,358.51
Agricultura valle	2,548.11
Agricultura riego	1,724.45
Urbano	328.43
Bosque de Coníferas	92.32
Bosque de Encino	1,935.53
Bosque de Pino	904.1
Bosque de Encino-Pino	2,197.26
Pastizales Inducidos	1,999.33
Suelo desnudo	260.74
Cuerpos de Agua	271.83

Fuente: Elaboración propia con base en imagen satelital SPOT, 2010.





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO  
FACULTAD DE QUÍMICA  
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

TESIS

"LA COBERTURA Y USO DEL SUELO EN LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS Y ESCURRIMIENTOS SUPERFICIALES EN LA CUENCA EL TEJOCOTE, MÉXICO, MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT"

**SIMBOLOGÍA**

**Uso del Suelo y Vegetación**

- Agricultura Laderas
- Agricultura Riego
- Agricultura Valle
- Bosque de Coníferas
- Bosque de Encino
- Bosque de Encino-Pino
- Bosque de Pino
- Pastizal inducido
- Suelo desnudo
- Área Urbana
- Cuerpo de agua
- Límite cuenca El Tejocote
- N° de subcuenca

**UBICACIÓN**



**FIGURA 25. MAPA USO DEL SUELO Y VEGETACIÓN**

  
 ELABORÓ: Lic. Karla Gabriela Mocoño Velázquez  
 FUENTE: INEGI 2013 Carta topográfica E14A17  
 E: 1:50 000

Figura 25. Mapa Uso del Suelo y Vegetación.

### 4.3 Caracterización geomorfológica de la cuenca El Tejocote

La realización de la caracterización física de la cuenca tuvo el objetivo de conocer los parámetros propios de la cuenca que determinan el comportamiento del transporte y deposición de sedimentos, así como producción de caudales y escurrimientos. Los resultados obtenidos se agrupan en el Cuadro 9.

**Cuadro 9. Parámetros de la cuenca El Tejocote.**

Superficie de la cuenca	$A_{\text{km}^2} = 177.31$ $P_{\text{km}} = 83.4$
Elevación media de la cuenca	$E_{m\_m} = 2615.81$ msnm
Pendiente media de la cuenca	$P_{m\_g} = 7.75^\circ$
Pendiente media de la cuenca	$P_{m\_p} = 13.95\%$
Coefficiente de compacidad	$K_c = 1.77$
Relación de circularidad	$R_{ci} = 0.32$
Relación hipsométrica	$R_h = 3.65$
Longitud del eje del río principal	$L_{c\_km} = 29.91$ km
Longitud directa del río principal	$L_{a\_km} = 9.56$ km
Coefficiente de sinuosidad hidráulico	$Sh = 3.13$
Elevación Máxima del río principal	$E_{m_x\_m} = 2788$ msnm
Elevación Mínima del río principal	$E_{m_n\_m} = 2464$ msnm
Pendiente promedio del río principal	$Sc\_p = 2.66\%$
Tiempo de concentración de Kirpich	$T_{c\_Kirpich\_h} = 5.16$ hr
Tiempo de concentración de California Highways and Public Works	$T_{c\_CHPW\_h} = 5.19$ hr

Fuente: Determinación de datos propios utilizando programa IDRISI con base en INEGI, 2010.

#### 4.3.1 Tipo de cuenca

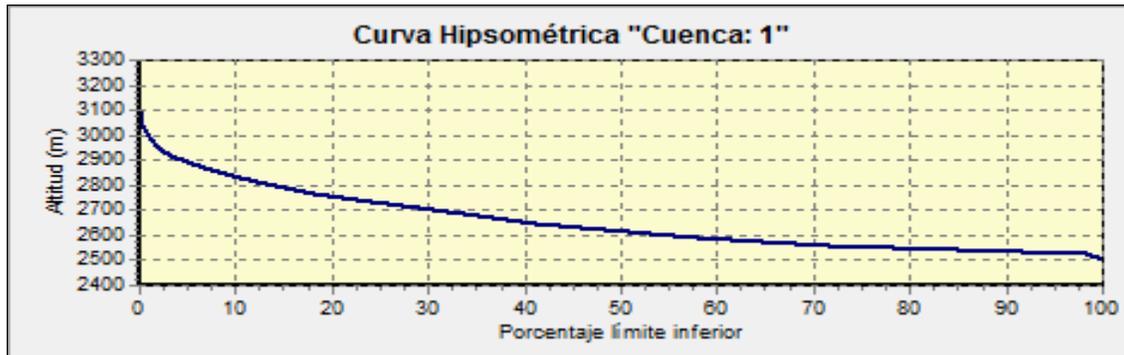
De acuerdo con la SRH, (1974) la cuenca El Tejocote es de tipo **endorreica** debido a que las corrientes se concentran al centro de la misma.

#### 4.3.2 Área y Perímetro de la cuenca

Se puede considerar a la cuenca El Tejocote de tamaño pequeño según la SARH (1988), al tener una superficie de sólo 177.31 Km<sup>2</sup> y un perímetro de 83.4 Km.

### 4.3.3 Pendiente media de la cuenca

La cuenca El Tejocote se registró una pendiente promedio de  $7.75^\circ$  sobre la que descienden los escurrimientos; la Figura 26 muestra la curva hipsométrica con la que se puede analizar como la mayor parte del terreno se asienta en altitudes mayores a los 2600 msnm.



Fuente: Determinación de datos propios utilizando programa IDRISI con base en INEGI, 2010.

**Figura 26. Curva Hipsométrica de la cuenca El Tejocote.**

### 4.3.4 Relación hipsométrica

La distribución espacial de la altitud en la cuenca es fundamental para caracterizar su condición morfológica, es decir saber qué porcentajes de la cuenca corresponden a zonas montañosas, lomeríos, planicies, etc. La altura máxima de la cuenca supera más de 3000 msnm y un poco más del 50% de la cuenca se asienta en pendientes de más de 2600 msnm.

Además la relación hipsométrica sirve para conocer el posible rango de antigüedad de una cuenca, es decir, cuando se tienen valores menores de 1, se considera una cuenca joven y potencialmente erosiva, cuando son iguales a 1 la cuenca está en equilibrio y, cuando es mayor a 1, como en el caso de la cuenca El Tejocote se suponen antiguas o viejas por tanto, sedimentarias.

### 4.3.5 Forma de la cuenca

La forma de la cuenca El Tejocote se analizó a través del coeficiente de compacidad y de la relación de circularidad, demostrando una forma alargada con mayor tiempo de concentración del agua al interior.

#### **4.3.5.1 Coeficiente de compacidad**

La forma de la cuenca interviene de manera importante en el comportamiento del agua al caer a la superficie, por la velocidad que adquiere y la erosión que produce y además, por el tiempo que tarda en llegar a los límites de la cuenca a la salida de la misma. Cuanto más irregular sea la cuenca, mayor será su coeficiente de compacidad.

Una cuenca circular tendrá un coeficiente de compacidad mínimo, igual a 1 y, una cuenca alargada suele tener valor mayores o igual a 3. Por tanto al considerar que para la cuenca El Tejocote el índice es de 1.7, se tendría que poseer una forma ligeramente alargada con mayor tiempo de concentración del agua y, de allí, es de esperarse que la magnitud de la escorrentía generada por una precipitación sea menor también.

#### **4.3.5.2 Relación de circularidad**

Es el cociente entre el área de la cuenca y la del círculo cuya circunferencia es equivalente al perímetro de la cuenca. Tiene un valor unitario cuando la cuenca es circular, cuando es cuadrada su valor será 0.785. Para la cuenca El Tejocote el valor es de 0.32 indicando una forma ligeramente alargada.

#### **4.3.6 Red de drenaje**

Como se mencionó anteriormente en la conceptualización de la red drenaje, ésta incluye los análisis de orden de corrientes, densidad de drenaje, densidad de corrientes, sinuosidad de las corrientes, pendientes del cauce y tiempo de concentración de Kirpich, entre otras.

##### **4.3.6.1 Orden de corrientes**

El orden de la cuenca está dado por el orden del cauce principal, entre más alto es el orden de la cuenca, indica un drenaje más eficiente que desalojará rápidamente el agua. En la cuenca se contabilizaron un total de 362 corrientes, de las cuales el 71.82% corresponde al primer orden, 24.03% de segundo orden y 4.15% de tercer y cuarto orden, el tipo de drenaje es radial como se muestra en la Figura 27.

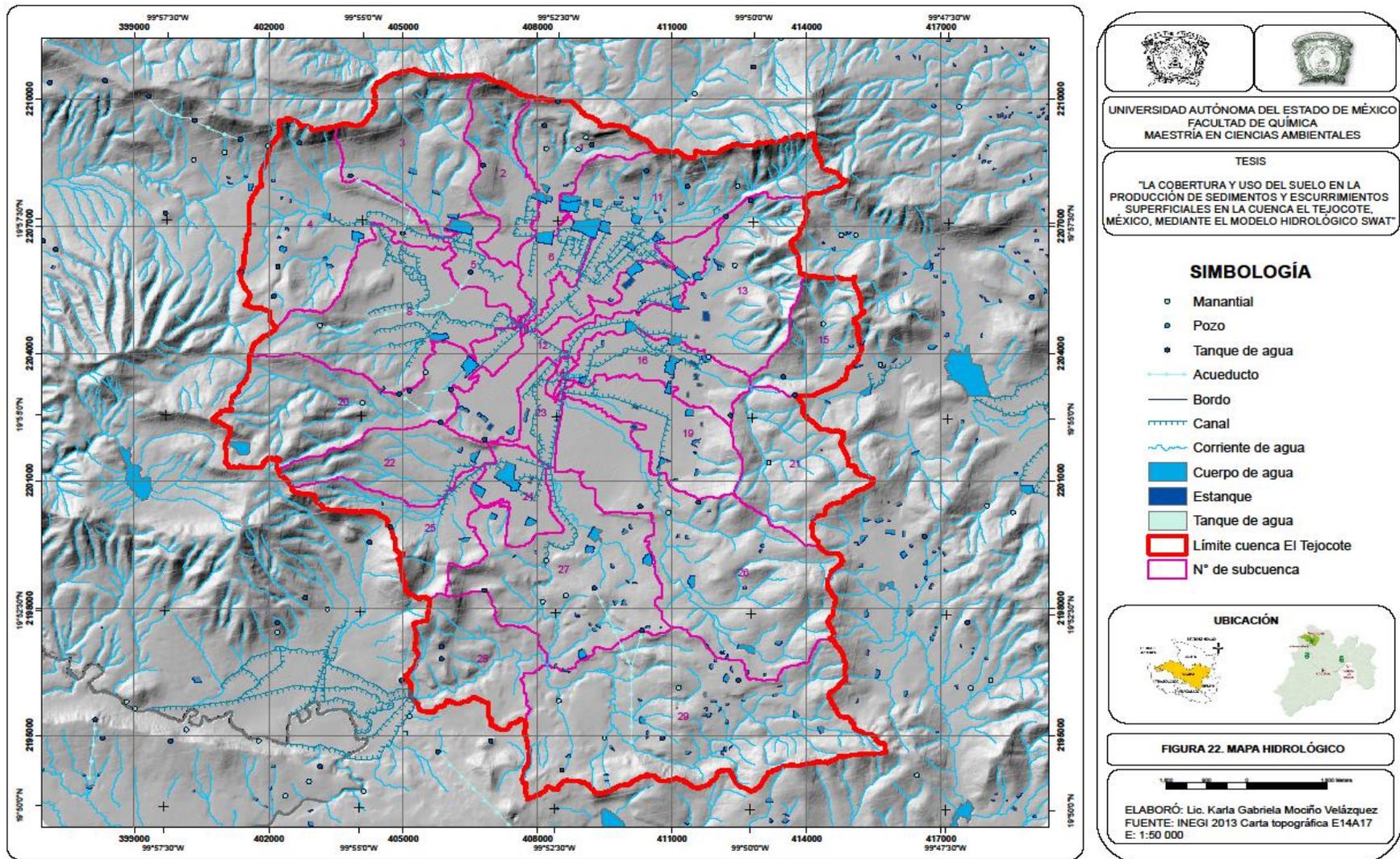


Figura 27. Orden de corrientes de la cuenca El Tejocote.

#### **4.2.6.2 Densidad de drenaje**

Se considera bajo la definición de la densidad de drenaje que, entre mayor densidad de drenaje, más rápida será la respuesta de la cuenca frente a una tormenta, evacuando el agua en menos tiempo. La cuenca tiene una densidad baja de  $0.17 \text{ km/km}^2$ .

#### **4.3.6.3 Densidad de corrientes**

Los valores altos de densidad de corriente significan un buen drenaje, en este sentido la cuenca El Tejocote tiene una densidad de  $1.06 \text{ km}^2$ , un poco baja.

#### **4.3.6.4 Pendiente del cauce**

El río que cruza la superficie de la cuenca tiene una elevación de  $2.66\%$  en promedio.

#### **4.3.6.5 Tiempo de concentración de Kirpich**

El tiempo de concentración para una cuenca es ampliamente usado como parámetro para estimar el caudal máximo en cuencas no aforadas. El tiempo de concentración se define como el tiempo de viaje de una partícula de agua que recorre el trayecto hidráulicamente más largo hasta la salida de una cuenca, es decir, el tiempo en que comienza a llegar la precipitación de todos los puntos de la cuenca. En la cuenca el tiempo de concentración es de 5.16 a 5.19 horas.

#### **4.4 Factores socioeconómicos de la cuenca El Tejocote**

En lo que respecta a su población, la cuenca cuenta con más de 60,000 habitantes y sus localidades con más concentración de población y que presentan cierto grado de consolidación urbana, son: la Cabecera Municipal, Juandó, La Loma y El Agostadero (INEGI, 2010)

De acuerdo con GEM, (2005) existe una centralización de los servicios, estableciéndose como núcleo concentrador la Cabecera Municipal. La vía más importante de comunicación, lo constituye la carretera federal 55, también conocida como Panamericana, la cual posee un flujo vehicular intenso y circulación de vehículos de carga, que a su paso por la Cabecera Municipal se establece como un problema a la circulación y un riesgo latente para los habitantes.

La cabecera municipal, presenta una conurbación con las localidades de Botidí, Endeje y Esdocá. La economía de Acambay está basada, en orden de importancia en las actividades correspondientes a los sectores: primario, terciario y secundario. Es la agricultura la actividad de mayor relevancia, esto debido a las características especiales de sus terrenos y a la superficie que se destina para este fin, esto es 42.6% del territorio; además de absorber el 41.0% de la población económicamente activa. Sus cultivos principales son: el maíz, avena forrajera, cebada, trigo.

El municipio de Acambay, dentro de la región se ha situado como uno de los más importantes productores de gramíneas, llegando a obtener el primer sitio en lo referente al maíz. En cuanto a las actividades agropecuarias, estas se desarrollan en 5,539 hectáreas, esto es el 11.26% del territorio municipal, conformado por pastizales y tierra de agostadero.

Destaca la producción de 19,116 cabezas de ganado ovino que significan el 25.41% de la obtenida a nivel regional, colocándose en primer sitio, además de contribuir en el 3.69% de la producción estatal. Asimismo, ocupó el segundo lugar, al participar con el 18.49% de la producción regional de ganado bovino, esto es 11,436 cabezas, únicamente superando por Aculco, en 14,944.

Acambay cuenta con un gran potencial agropecuario, el cual no ha sido explotado adecuadamente, ya que prevalece la práctica de la actividad en forma extensiva en el 99.04% de la superficie disponible y únicamente en un 0.06% en forma intensiva.

Finalmente, el 30.73% de territorio municipal está conformado por áreas arboladas de especies no comerciales, cuya explotación se realiza en forma no planeada, además de que se destina principalmente para consumo interno.

#### **4.4.1 Condiciones ambientales de la cuenca**

Debido a la variedad de climas, fenómenos hidrológicos, topográficos y tipos de suelo, existe una gran variedad de especies vegetales y de fauna al interior de la cuenca. De acuerdo con GEM, (2005) dentro de la vegetación es posible encontrar especies de pinus, quercus y abies en asociaciones de pino, encino, oyamel y latifoliados. Además las extensiones de pastizales aún existentes están compuestos por gramíneas herbáceas, no mayores de un metro de altura, los géneros que se pueden encontrar son Bonteloud, Andropogon, Aristida, Cynodon, Eragrostis y Stipa.

Para el caso de la fauna, es posible hallar mamíferos como el conejo castellano y de monte, ardillas, topes, ratas y ratones de los volcanes, comadreja, zorrillos, zorras, murciélagos, liebres, coyotes y tejones. Del grupo de las aves son notables los carpinteros, trepadores, colibríes, azulejos, tordos, lechuzas, codornices y gallinas de monte, así como algunos

depredadores como el aguililla de cola roja, los cercetos, gavilán, coliblanco, búho y halcón, que son de vital importancia para evitar la proliferación excesiva de ratones y otros roedores que afectan la producción agrícola. Entre los anfibios y reptiles se encuentran los sapos, camaleones, lagartijas, culebras y víboras como la cascabel.

Sin embargo, dichas especies se ven cada vez más afectadas por las presiones que ejerce la población mediante la ampliación de la frontera agrícola, la tala de bosques y los incendios forestales presentados.

En el año 2000 el gobierno municipal registró 22 incendios forestales para un total de 235 Ha, de las cuales 21.5 Ha correspondieron a pastizales, 12.5 Ha a hierbas y arbustos, 158.5 Ha a superficies de renuevo y 42.5 Ha de áreas arboladas, repercutiendo directamente al estado de ecosistema natural de la cuenca además de las actividades agropecuarias, agrícolas y forestales (GEM, 2000).

A ello se le suma el grado de erosión reportado por el GEM, (2005) donde se encuentra el 30.13% de territorio con grado medio de erosibilidad, 12.92% con un grado alto y 0.27% como muy alto. Una de las zonas afectadas por este efecto, es el Parque Estatal “Oso Bueno”, área natural protegida, cuya superficie comprende el 30.7% del territorio municipal de Acambay, no obstante, la deforestación supera las 2,000 Ha, así también, los incendios forestales, el libre pastoreo en áreas silvícolas, la acción del viento y del agua, han dado paso a la erosión del suelo, lo cual está presente en 433.1 Ha, esto es el 0.90 % de la superficie municipal.

Además, el mismo autor ha afirmado la presencia de algunos problemas más de contaminación de recursos naturales, principalmente de agua, ya que se ha ido disminuyendo la calidad debido al uso irracional de insecticidas, pesticidas y los desechos de los diferentes insumos domésticos e industriales (plásticos, metales, aceites,

detergentes). Los desechos de estos insumos han provocado la contaminación de los cuerpos de agua, tanto superficiales como subterráneos.

Igualmente, dichos desechos y productos han afectado al suelo provocando degradación y con ello erosión y pérdida de nutrientes necesarios para los cultivos; otro problema es la contaminación del mismo por la mala disposición de los envases de los agroquímicos aplicados, sumado a la ineficiente recolección y disposición final de los residuos sólidos por parte de las instituciones gubernamentales. La infraestructura con que cuenta el Ayuntamiento no le permite recolectar los residuos sólidos que se generan, principalmente en las zonas rurales, por tanto es muy común encontrar sitios clandestinos donde se abandonan los residuos sólidos, generalmente localizados en las barrancas.

Otro recurso afectado es el aire ya que se presentan fuentes contaminantes tanto fijas como móviles que producen grandes cantidades de emisiones atmosféricas que dañan la salud humana; entre las fijas, en este Municipio, se encuentran una tabiguera, algunas industrias y una gasolinera.

Un tercer grupo corresponde a las fuentes naturales, la emisión de las partículas minerales se deriva de las tolveneras, y la emisión de partículas biológicas o químicas que arrastra el viento desde las diversas fuentes, como pueden ser las parcelas con cultivos. El gobierno municipal público en el año 1988 durante el mes de junio, un muestreo de la calidad del aire con resultado “no satisfactoria”, a causa de los niveles de concentración de partículas suspendidas fracción respirables (PM10).

A manera de conclusión las condiciones ambientales de la cuenca pueden analizarse bajo un enfoque ecosistémico donde las interacciones entre los componentes sociales, económicos y naturales donde observarse de mejor manera, como se aprecia en el Cuadro 10.

**Cuadro 10. Enfoque ecosistémico de la cuenca El Tejocote.**

Económico	Social	Natural
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 40% de la PEA se dedica a la agricultura y actividades agropecuarias</li> <li>• Las zonas ocupadas por terrenos agrícolas y pecuarios brindan bienes y servicios ambientales como:</li> <li>• Disponibilidad de terreno</li> <li>• Suelos aptos para la agricultura y actividades pecuarias</li> <li>• Aporte de nutrientes</li> <li>• Recursos hidrológicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los recursos los que cuenta la cuenca le han brindado bienes y servicios ambientales a la sociales como:</li> <li>• Identidad social</li> <li>• Aspectos culturales basados en las actividades agrícolas</li> <li>• Fuentes de empleo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las zonas ocupadas por coberturas vegetales brindan bienes y servicios ambientales como:</li> <li>• Captación y filtración de agua</li> <li>• Mitigación de los efectos de cambio climático</li> <li>• Generación de oxígeno</li> <li>• Asimilación de diversos contaminantes</li> <li>• Protección de las especies de fauna y flora</li> <li>• Retención de suelo</li> <li>• Belleza escénica</li> <li>• Recreación</li> <li>• Ecoturismo</li> <li>• Control de erosión y azolves en las partes bajas</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia, 2014.

De dicha forma es posible notar que los bienes y servicios ambientales que prestan los recursos naturales de la cuenca a la población son básicos para su supervivencia, por tanto, es imprescindible la valoración del ecosistema que forma la cuenca de El Tejocote, con ello se busca la conservación de los recursos naturales y el aprovechamiento sustentable de los mismos con fines productivos, lo que mejora la calidad de vida de la población en armonía con el medio natural.

## **5. RESULTADOS**

### **5.1 Calibración y validación del modelo SWAT**

La calibración del modelo SWAT consistió en lograr un ajuste satisfactorio entre los escurrimientos observados y los calculados, mediante el cambio en los valores de los parámetros de mayor influencia, aún de aquellos que se consideraban conocidos. Para lograr dicha semejanza se necesitaron datos reales de caudales de las redes de drenaje de la estación hidrométrica El Tejocote, con la finalidad de comparar con los caudales simulados por el modelo SWAT.

En orden de temáticas se comenzó con la calibración de la biomasa, escurrimientos y por último sedimentación. Los años a utilizar para la calibración fueron a partir del 2000 al 2005, dejando 2006 y 2007 para validar el modelo.

#### **5.1.1 Ajuste de parámetros**

Para lograr la calibración se realizó un análisis de sensibilidad de variables que afectan al modelo en sus diversos componentes: Los principales parámetros que se ajustaron de acuerdo al análisis de sensibilidad realizado se resumen en el Cuadro 11:

- $CN_2$  a condiciones buenas para disminuir el escurrimiento superficial
- $GW\_DELAY$  se disminuyeron los días para aumentar la rapidez en la filtración del agua
- $ALPHA\_BF$  se incrementó el factor para disminuir el flujo de retorno
- $GW\_REVAP$  y  $REVAPMN$  para aumentar la evaporación y disminuir la percolación

- RCHRG\_DP se retomó el valor más valor para aumentar al máximo la recarga de acuíferos profundos
- SOL\_Z se incrementó la profundidad de suelos
- SOL\_AWC disminuyó la capacidad hidráulica de los suelos
- SLSOIL disminuyó el escurrimiento lateral

**Cuadro 11. Parámetros más sensibles que afectan los valores del modelo SWAT.**

<b>Parámetro modificado</b>	<b>Significado</b>	<b>Grado de sensibilidad</b>	<b>Parámetro de salida que modifica</b>
CN <sub>2</sub>	Curva numérica en la subcuenca	Alto	Escurrimiento superficial
RCHRG_DP	Fracción de percolación al acuífero profundo	Alto	Recarga de acuífero profundo
SLSOIL	Longitud de decantación para el flujo subsuperficial lateral	Alto	Escurrimiento subsuperficial
SLSUBBSN	Longitud de la pendiente	Medio	Escurrimiento de retorno
ALPHA_BF	Factor de flujo base	Medio	Escurrimiento subsuperficial
GW_REVAP	Coefficiente de “revap” del agua subterránea	Medio	Evaporación
REVAPMN	Umbral de profundidad del agua en el acuífero sómero para ocurrir “revap” o percolación	Medio	Escurrimiento de retorno
GWQMN	Profundidad umbral del agua en el acuífero sómero para producir flujo de retorno	Medio	Evaporación
SOL_Z	Profundidad máxima del suelo	Alto	Escurrimiento superficial
SURLAG	Coefficiente de retardo de escorrentía superficial	Medio	Escurrimiento superficial
GW_DELAY	Temporizador de retardo subterráneo	Bajo	Escurrimiento superficial
SOL_AWC	Capacidad de agua disponible en el suelo	Bajo	Escurrimiento superficial
ESCO	Factor de compensación de la evaporación del suelo	Bajo	Evaporación

Fuente: Elaboración propia, 2014.

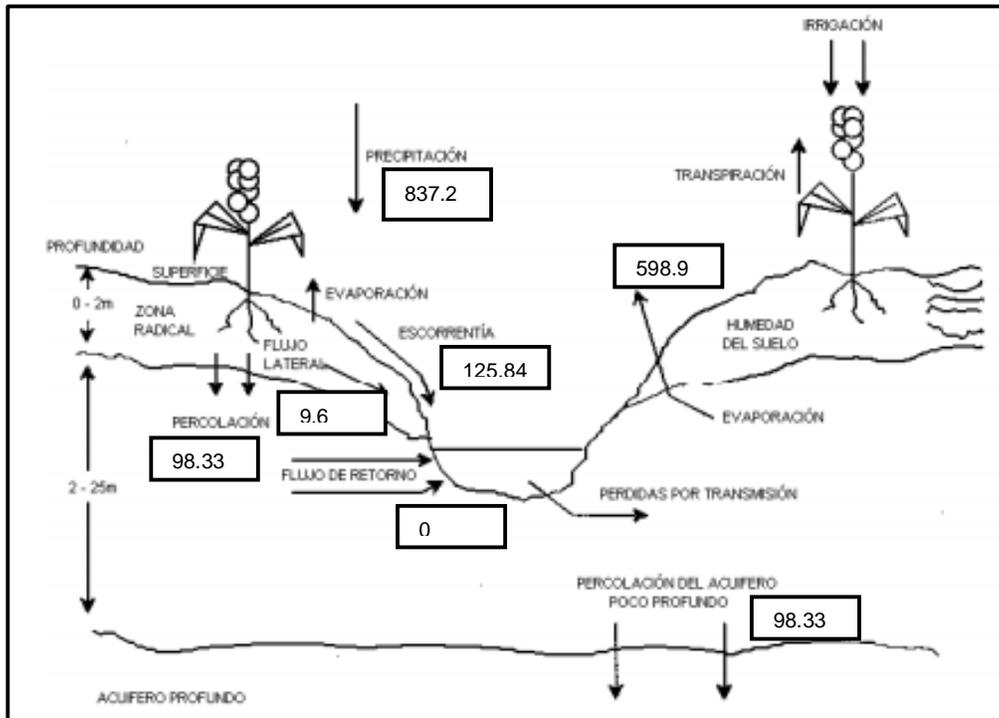
### **5.1.2 Validación del modelo SWAT**

Por su parte, la validación del modelo consistió en medir su capacidad predictiva mediante la comparación de los escurrimientos calculados y los observados con los parámetros determinados en la fase de calibración pero en un período diferente del utilizado en la calibración. Palacios, (1986) afirma que generalmente el ajuste entre escurrimientos observados y calculados obtenido durante la validación es menos satisfactorio que el obtenido en la calibración, pero es más representativo de la exactitud de las predicciones que se hagan con el modelo.

### **5.2 Producción de escurrimientos superficiales**

Con el fin de dimensionar la representatividad de la cantidad de escurrimiento superficial producido para la cuenca, es necesario conocer la producción de agua en la misma durante el periodo de simulación. El resultado que reporta el modelo es la suma de escurrimientos superficiales (SURQ) y subsuperficiales (LATQ y GWQ), menos las pérdidas por transmisión (TLOSS) y las abstracciones de los almacenamientos ( $WYLD = SURQ + LATQ + GWQ - TLOSS - IRR - SA\_IRR - DA\_IRR$ ) (Uribe 2010).

La Figura 28 muestra las cantidades de agua en milímetros de las anteriores variables de la ecuación del ciclo hidrológico. El promedio total de agua precipitada en la cuenca durante el período de simulación fue de 837.2 mm, de los cuáles 598.9 mm regresaron a la atmósfera por evaporación, 98.33 mm se infiltraron al suelo por percolación hasta llegar a los acuíferos profundos. Del todo de precipitación 125.84 mm actúa como flujo superficial y 9.6 mm de flujo subsuperficial.

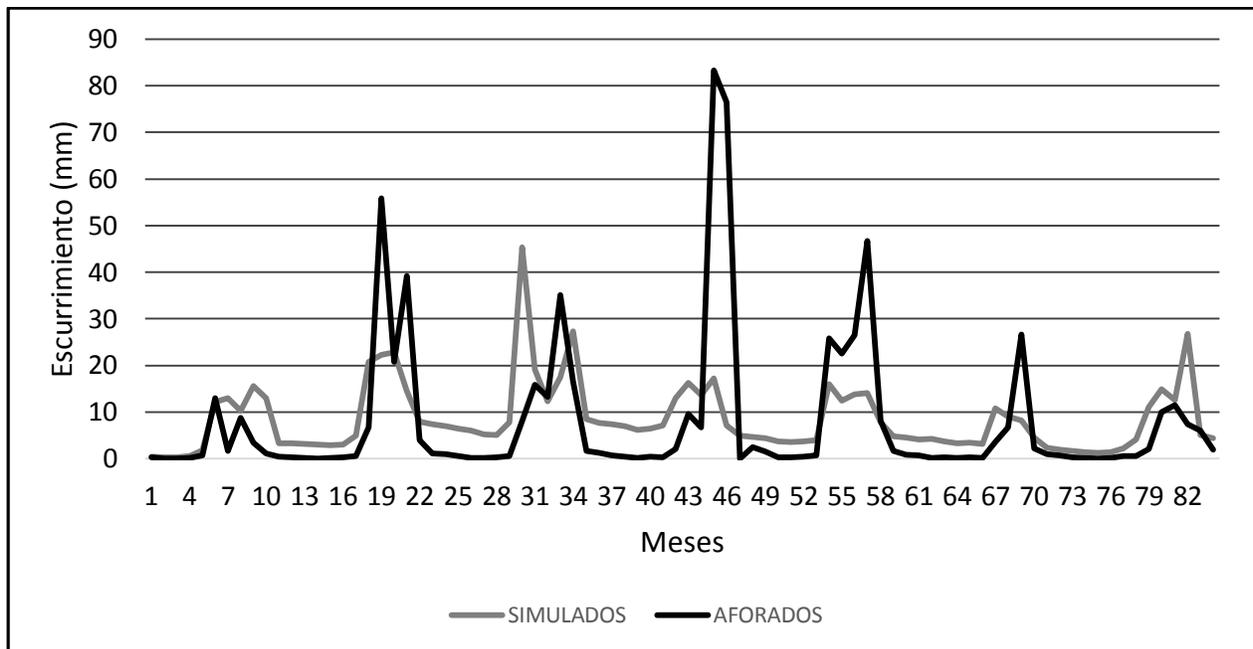


Fuente: Elaboración propia con base en Uribe, (2010)

**Figura 28. Ciclo del agua en la cuenca El Tejocote en un período de siete años.**

Al considerar ésta tres fuentes como las principales abastecedoras de los cuerpos de agua que son utilizados para el riego agrícola, los escurrimientos superficiales representan más del 16% del aporte, por tanto la necesidad de mejorar las prácticas agrícolas y el cambio de cobertura del suelo es de suma importancia.

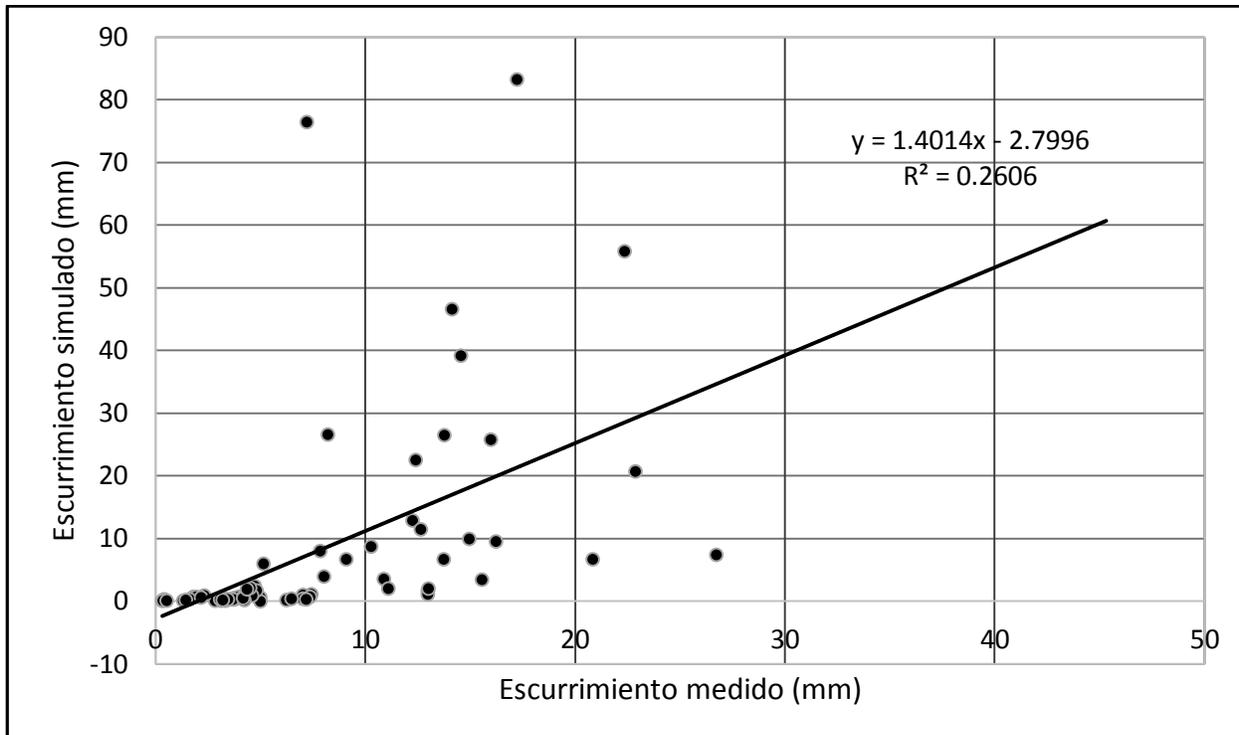
La Figura 29 exhibe la simulación que se realizó para la cuenca El Tejocote durante el periodo 2000-2006, es posible apreciar que los valores simulados se aproximan a los aforados por la estación hidrométrica El Tejocote. Como media se obtuvo un promedio aforado de 93.60 mm por año de escurrimiento, contra 101.85 mm arrojado por el modelo SWAT.



Fuente: Elaboración propia, 2014.

**Figura 29. Dinámica y magnitud de la producción de escurrimientos medidos y simulados en la cuenca El Tejocote con el modelo SWAT en un período de siete años.**

La Figura 30 presenta el análisis de regresión de los datos simulados y aforados. La pendiente de la recta y el  $r^2$  demuestran que la producción de agua simulada y aforada sólo tiene un porcentaje de correlación de 46% y de 26% para la pendiente de la recta. Por lo que los resultados quizás no son muy favorables debido a la falta de información disponible, aspecto que debe considerarse para futuras simulaciones, es probable que quizás un periodo de ejecución más largo arroje también mejores respuestas.

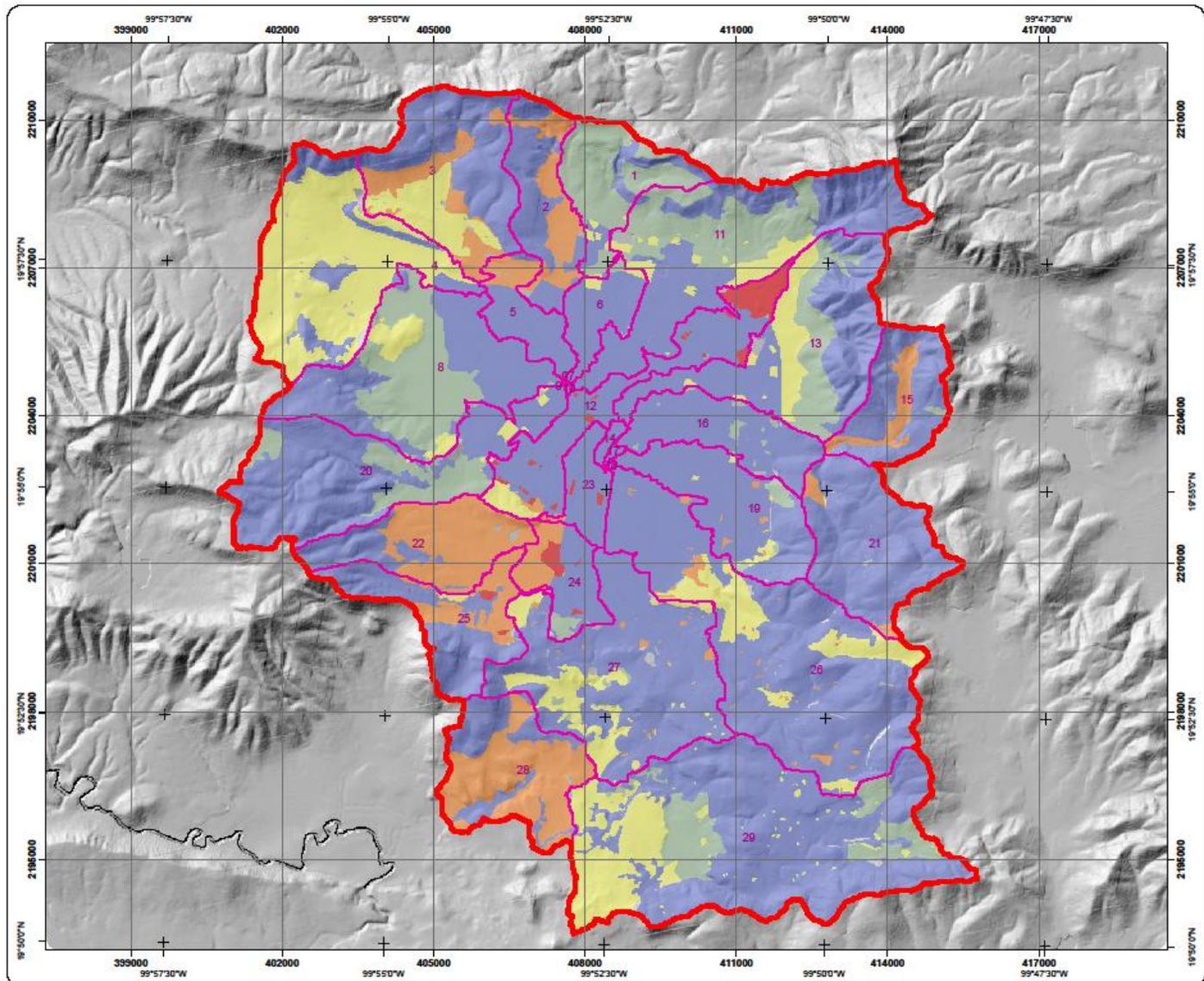


Fuente: Elaboración propia, 2014.

**Figura 30. Análisis de regresión para la producción de escurrimientos medidos y simulados en la cuenca El Tejocote con el modelo SWAT en un período de siete años.**

### 5.2.1 Coeficiente de escurrimiento

Con el fin de relacionar la lámina de agua precipitada sobre la cuenca y la lámina de agua que escurre superficialmente, se determinó el coeficiente de escurrimiento, donde se pudo observar que la cuenca tiene un coeficiente promedio de 1.00 sobre casi la totalidad del territorio, en menor medida es posible detectar un coeficiente de 2.00 en áreas ocupadas por agricultura de laderas y hasta 4.00 en áreas forestales; dichas cifras presentan una compatibilidad con los datos que reporta las SARH, (1988) (ver Figura 31).






UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO  
FACULTAD DE QUÍMICA  
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

TESIS

"LA COBERTURA Y USO DEL SUELO EN LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS Y ESCURRIMIENTOS SUPERFICIALES EN LA CUENCA EL TEJOCOTE, MÉXICO, MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT"

**SIMBOLOGÍA**

**Coefficiente de Escurrimiento**  
mm

	0.00 - 0.10
	0.11 - 0.20
	0.21 - 0.30
	0.31 - 0.40
	0.41 - 0.51

Límite cuenca El Tejocote  
 N° de subcuenca

**UBICACIÓN**



**FIGURA 31. MAPA COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO**

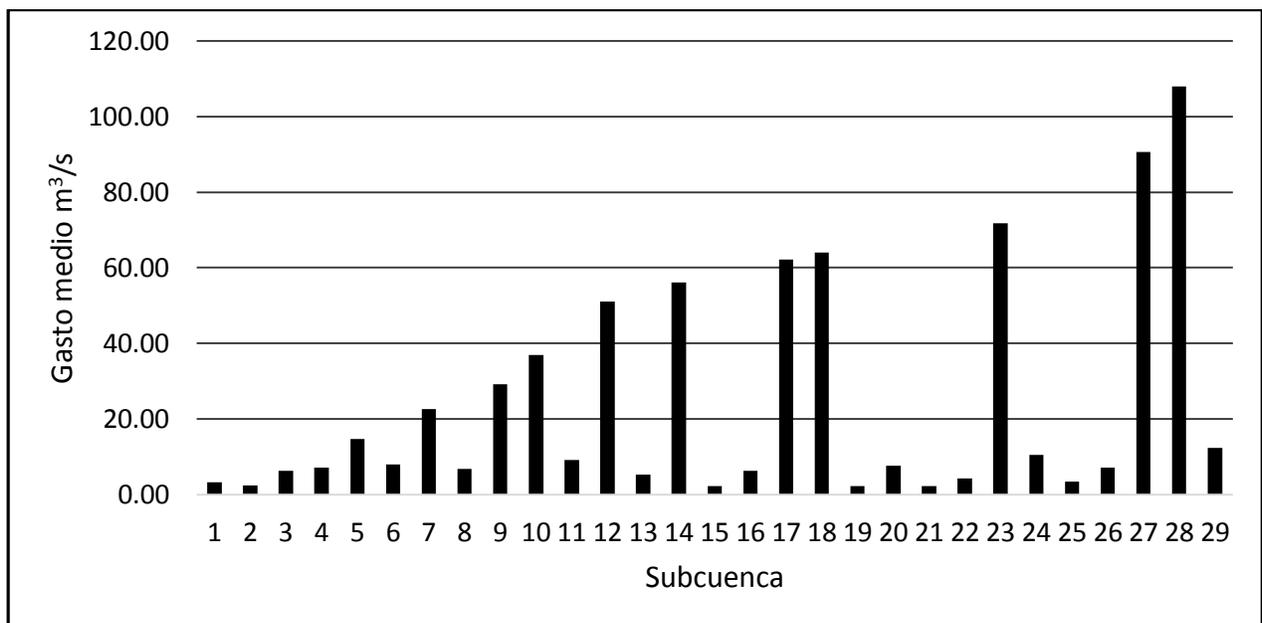


ELABORÓ: Lic. Karla Gabriela Mocioño Velázquez  
FUENTE: INEGI 2013 Carta topográfica E14A17  
E: 1:50 000

**Figura 31. Mapa Coeficiente de Escurrimiento.**

### 5.2.2 Gasto medio mensual por subcuenca

Para distinguir el área que produce mayor cantidad de escurrimientos y enfocar las alternativas de uso de suelo a dichas, la siguiente Figura 32 reporta los resultados arrojados durante los siete años de simulación, teniendo que únicamente los subcuenca 6, 8, 15, 16, 19, 20, 21, 22, 25 y 26 tienen un gasto por debajo de los 20 m<sup>3</sup>/s, por tanto se afirma que casi la totalidad de la cuenca requiere de técnicas que controlen la producción de escurrimiento.



Fuente: Elaboración propia, 2014.

**Figura 32. Escurrimiento promedio por subcuenca.**

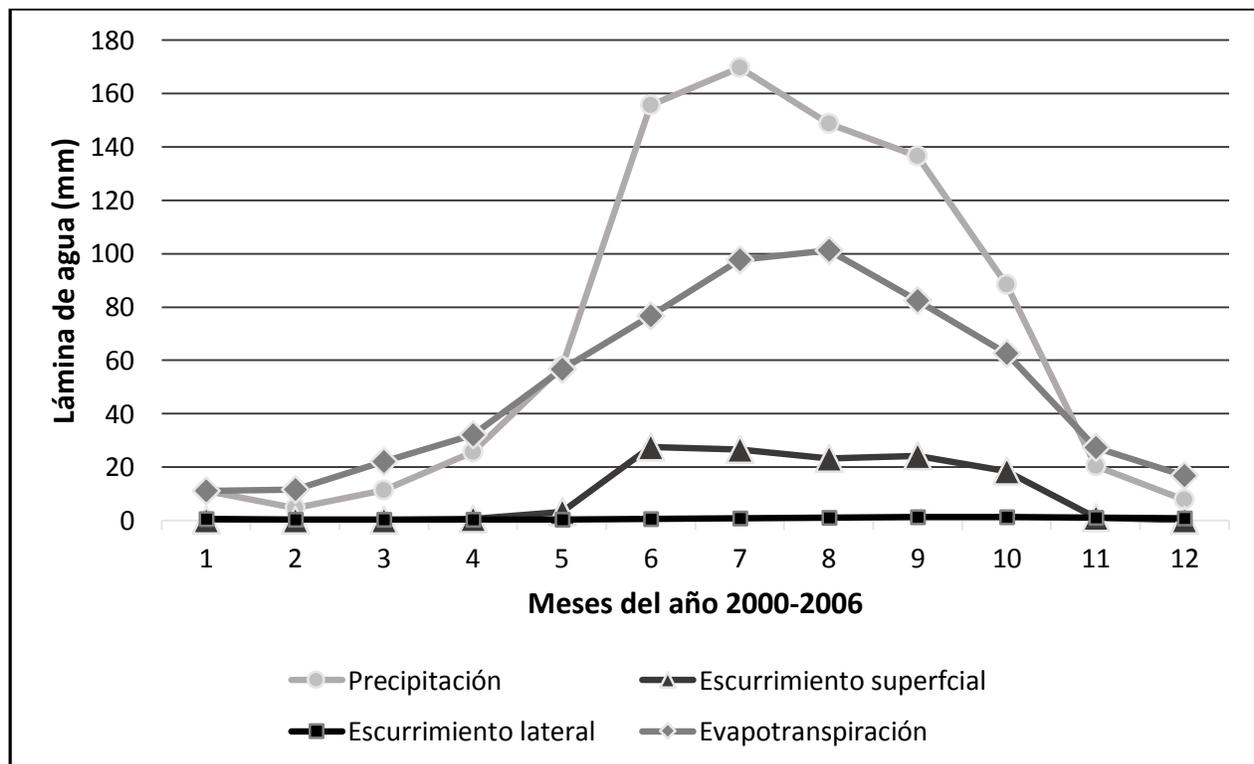
### 5.2.3 Condición hidrológica de la cuenca

La forma en que se distribuye el agua en la cuenca desde que precipita de la atmósfera, es interceptada por las plantas, escurre por los cauces y se percola hacia los acuíferos someros y profundos o se almacena en los suelos es importante para analizar los fenómenos que están interviniendo o cambiando los patrones naturales. Para hacer más entendible el análisis se procede a elaborar la siguiente Figura 33 que muestran la distribución mensual

de la lluvia, el escurrimiento superficial, subsuperficial y la evapotranspiración. Es posible apreciar que la mayor producción de escurrimiento es de tipo superficial principalmente de mayo a noviembre, ya que el escurrimiento lateral permanece constante a lo largo del año.

Respecto a la evapotranspiración es posible observar que ésta guarda una estrecha relación con los meses de cultivo correspondiente al periodo mayo-octubre, por tanto en los meses de sequía (de enero a abril y noviembre y diciembre) la evapotranspiración supera la precipitación.

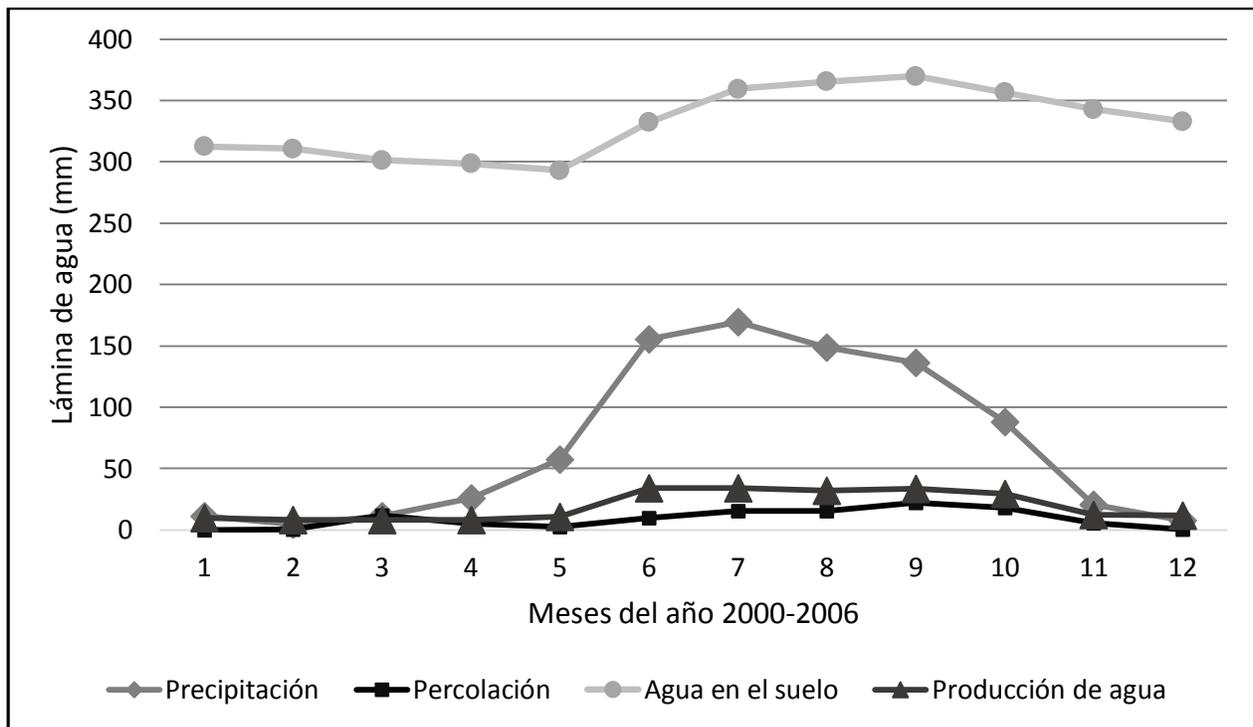
Asimismo es posible aseverar que la cuenca tiene un importante potencial de almacenamiento de agua debido a que el escurrimiento superficial y la precipitación tiene una relación directa.



Fuente: Elaboración propia, 2014.

**Figura 33. Distribución mensual de la precipitación, escurrimientos y evapotranspiración en la cuenca El Tejocote.**

Posteriormente la Figura 34 muestra la precipitación, producción de agua, percolación y el agua almacenada en el suelo, permitiendo observar que la humedad existente en el suelo se mantiene casi por arriba de los 300 mm y se comporta de forma directa con respecto al aumento de la precipitación durante los meses de abril a septiembre. La percolación y la producción de agua se comportan bajo un mismo patrón de distribución a lo largo del año, aunque la producción de agua o escurrimientos sean mayores a la percolación.



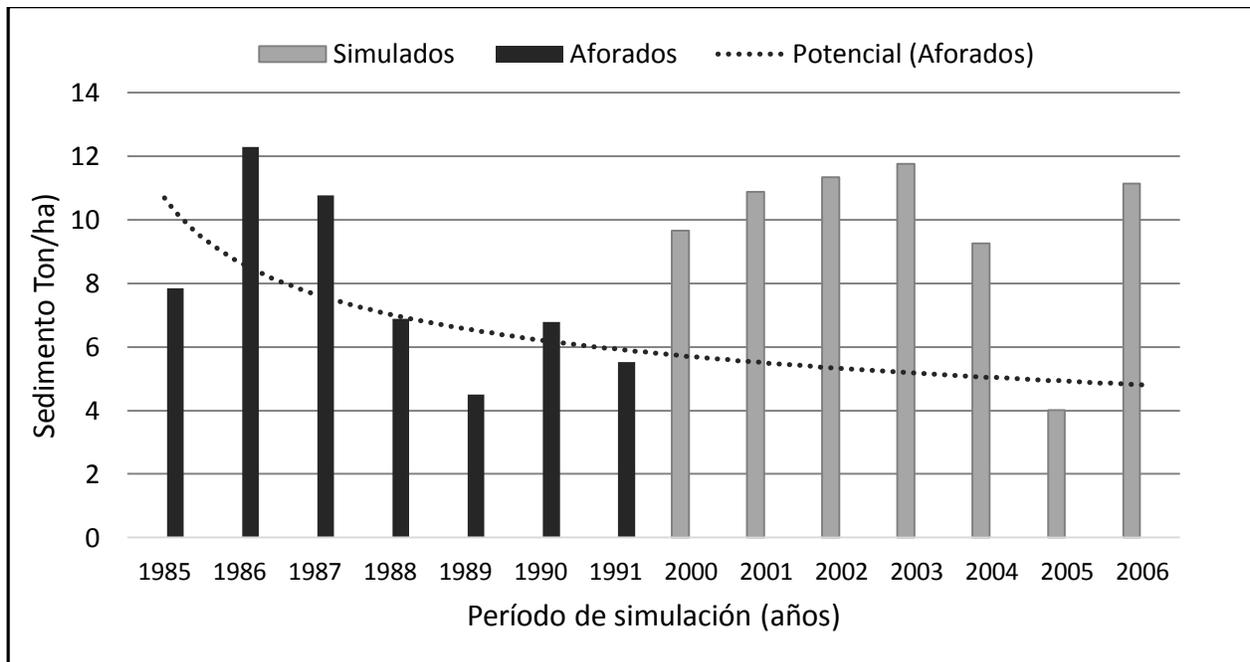
Fuente: Elaboración propia, 2014.

**Figura 34. Distribución mensual de la precipitación, producción de agua, percolación y agua en el suelo en la cuenca El Tejocote.**

### 5.3 Producción de sedimentos

La comparación de los datos aforados y simulados respecto a sedimentos, se realizó con una línea de tendencia para los aforos de la estación hidrométrica debido a que en ésta se dejaron de medir las cantidades de sedimentos producidos desde el año 1991. De dicha

forma se logró analizar que la línea de tendencia REGRESIÓN SIMPLE concuerda con las cantidades de sedimentos simuladas en la cuenca durante el periodo de simulación como lo muestra la Figura 35. Los resultados simulados dieron un media de 5.50 Ton/Ha en un periodo de siete años, en comparación con el promedio aforado de la estación hidrométrica de 7.80 Ton/Ha, mostrando un resultado favorable de simulación.

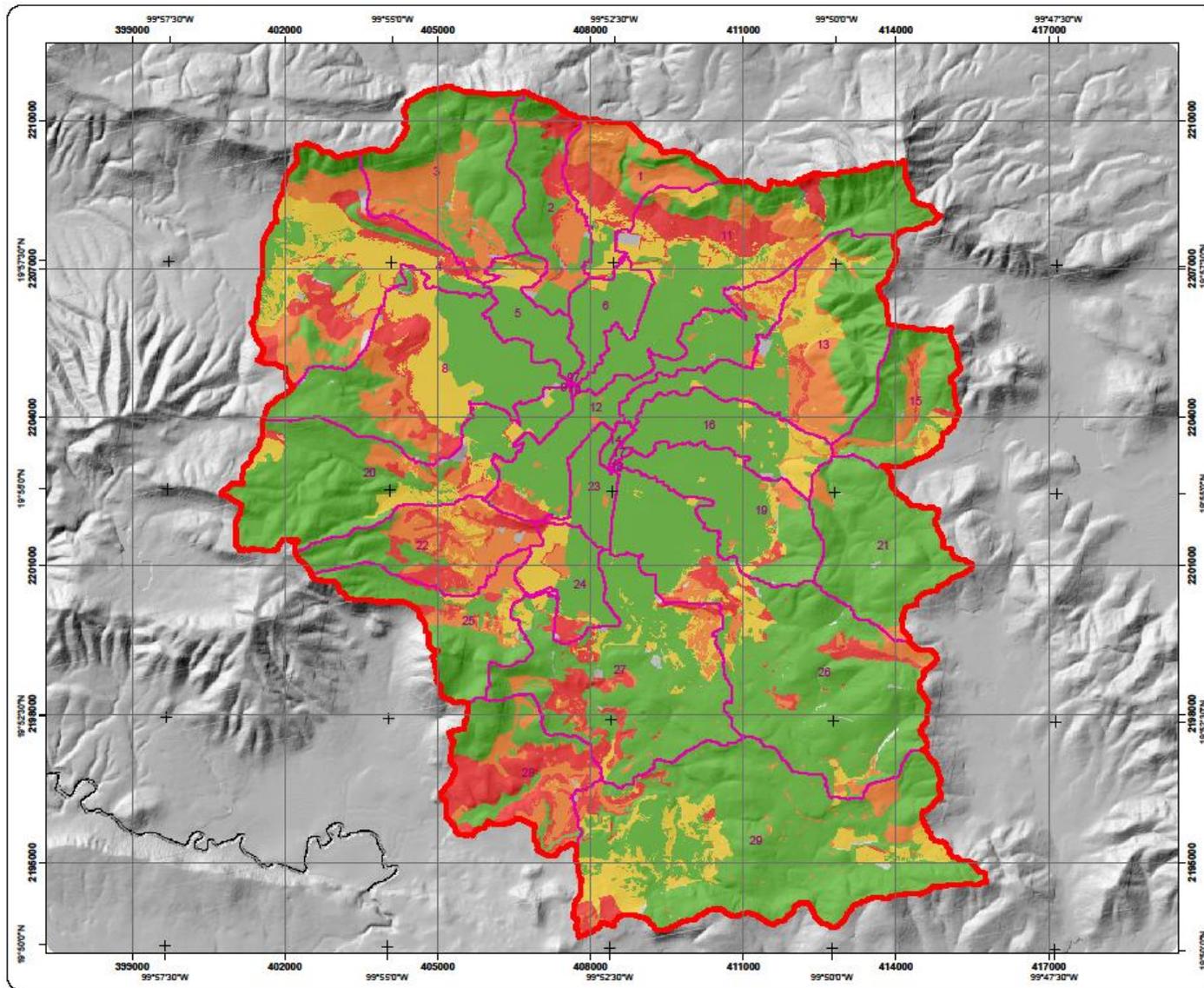


Fuente: Elaboración propia, 2014.

**Figura 35. Dinámica y magnitud de la producción de sedimentos medidos y simulados en la cuenca El Tejocote con el modelo SWAT en un período de siete años.**

La Figura 36 permite observar la producción de sedimentos en la cuenca y su distribución por subcuencas, es posible aseverar que en promedio la producción de éstos alcanza casi 15 Ton/Ha; sobre aquellas partes ocupadas por bosques la producción es menor a 1 Ton/Ha y, en la parte central de la cuenca donde se desarrolla la agricultura de riego se registran producciones de sedimentos hasta de 1 Ton/Ha, las partes donde se tienen registros más altos de 14 Ton/Ha son aquellas zonas donde se desarrolla la agricultura en laderas y en pastizales inducidos, del mismo modo dicha cifra es superada en pequeñas áreas bien localizadas en suelos desnudos de vegetación o pastizales inducidos también. Por tanto las

acciones de control de erosión y pérdida del suelo son necesarias en aquellos cultivos en pendientes pronunciadas donde no se cuentan con buenas técnicas agrícolas.






UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO  
FACULTAD DE QUÍMICA  
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

TESIS

"LA COBERTURA Y USO DEL SUELO EN LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS Y ESCURRIMIENTOS SUPERFICIALES EN LA CUENCA EL TEJOCOTE, MÉXICO, MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT"

**SIMBOLOGÍA**

**Producción de Sedimentos**  
Ton/Ha

- 0.00 - 1.00
- 1.11 - 4.21
- 4.22 - 12.30
- más de 12.31
- Límite cuenca El Tejocote
- N° de subcuenca

**UBICACIÓN**



**FIGURA 36. MAPA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS**



ELABORÓ: Lic. Karla Gabriela Mocioño Velázquez  
FUENTE: INEGI 2013 Carta topográfica E14A17  
E: 1:50 000

**Figura 36. Mapa producción de sedimentos.**

De manera puntual, aquellas áreas prioritarias situadas en zonas de agricultura de ladera y están demandando de pronta atención por problemas de erosión de suelo son las comunidades de Santa María Tixmadeje, San Antonio Dietiña, San Mateo El Viejo, Los Lanzados, San Juan de los Jarros y San Pedro de los Metates principalmente (ver Figura 37).

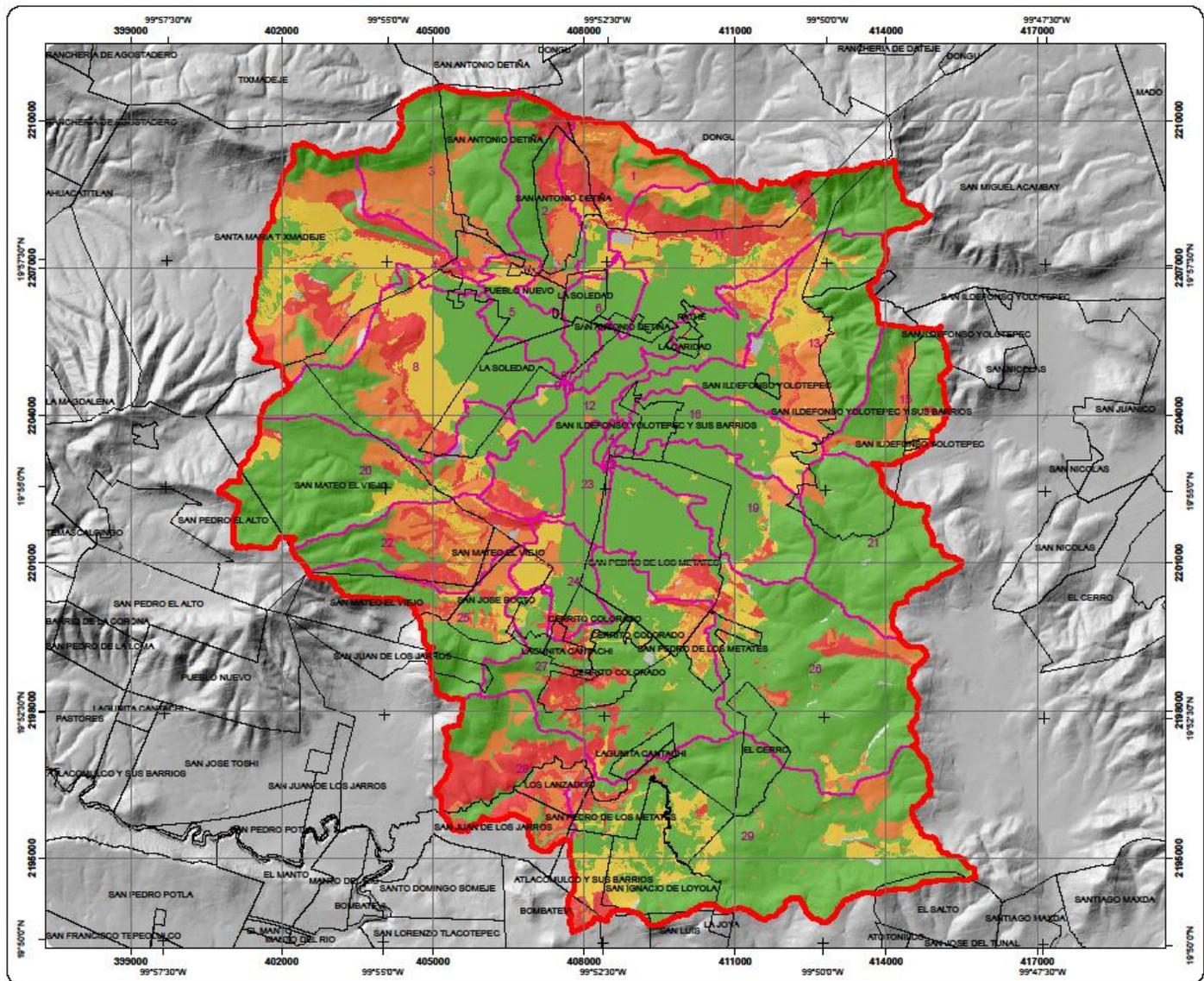


Figura 37. Producción de sedimentos por núcleos agrarios.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO  
FACULTAD DE QUÍMICA  
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

TESIS

"LA COBERTURA Y USO DEL SUELO EN LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS Y ESCURRIMIENTOS SUPERFICIALES EN LA CUENCA EL TEJOCOTE, MÉXICO, MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT"

**SIMBOLOGÍA**

**Producción de Sedimentos  
Ton/Ha**

- 0.00 - 1.00
- 1.11 - 4.21
- 4.22 - 12.30
- más de 12.31

Límite cuenca El Tejocote

N° de subcuenca

Núcleos Agrarios

**UBICACIÓN**

**FIGURA 37. MAPA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS POR NÚCLEOS AGRARIOS**

ELABORÓ: Lic. Karla Gabriela Mociño Velázquez  
FUENTE: INEGI 2013 Carta topográfica E14A17  
E: 1:50 000

Posteriormente, con el objetivo de sustentar los errores de simulación tanto de escurrimientos como de sedimentos, se utilizó la desviación estándar, coeficiente de correlación y la determinación de los datos simulados y aforados. Como resultado se puede observar que el coeficiente de correlación para la producción de escurrimientos fue mayor a la de los sedimentos, en la primera resultó un 0.46 y en la segunda 0.25, no obstante para ambos resultados, la correlación es directa, esto se aprecia en el Cuadro 12.

**Cuadro 12. Parámetros estadísticos anuales de las producciones de agua y sedimento en la cuenca El Tejocote.**

	<b>Media</b>	<b>Desv. Est.</b>	<b>R</b>	<b>CV</b>
Producción de escurrimientos (mm)				
Aforado	93.6	58.32	0.46	0.62
Simulado	101.85	35.88		0.35
Producción de sedimentos Ton/ha				
Aforado	7.80	2.8	0.25	0.36
Simulado	5.50	1.69		0.31

Fuente: Elaboración propia, 2014.

#### **5.4 Rendimiento de cultivos**

Respecto al análisis de los rendimientos agrícolas, el Cuadro 13 muestra los datos simulados de la cuenca con un promedio de 7.14 Ton/Ha sobre agricultura de temporal en laderas, 7.27 Ton/Ha para agricultura en valles planos y, 6.65 Ton/Ha para agricultura de riego. En comparación con lo reportado por la SIAP (2014), el modelo sobrestimo al doble las cifras, por tanto se requiere de un ajuste en los parámetros de entrada al modelo SWAT respecto al manejo de prácticas agrícolas, con el objetivo de obtener las cifras lo mayormente parecidas a la situación real y validar al modelo como una herramienta confiable. Sin embargo, para el caso de los cálculos de biomasa, éstos son muy semejantes

a los medido real, con un promedio de 19.30 Ton/Ha, 19.77 Ton/Ha y 18.11 Ton/Ha, para agricultura en laderas, valle y riego respectivamente.

**Cuadro 13. Rendimientos agrícolas simulados y observados de agricultura en la cuenca El Tejocote.**

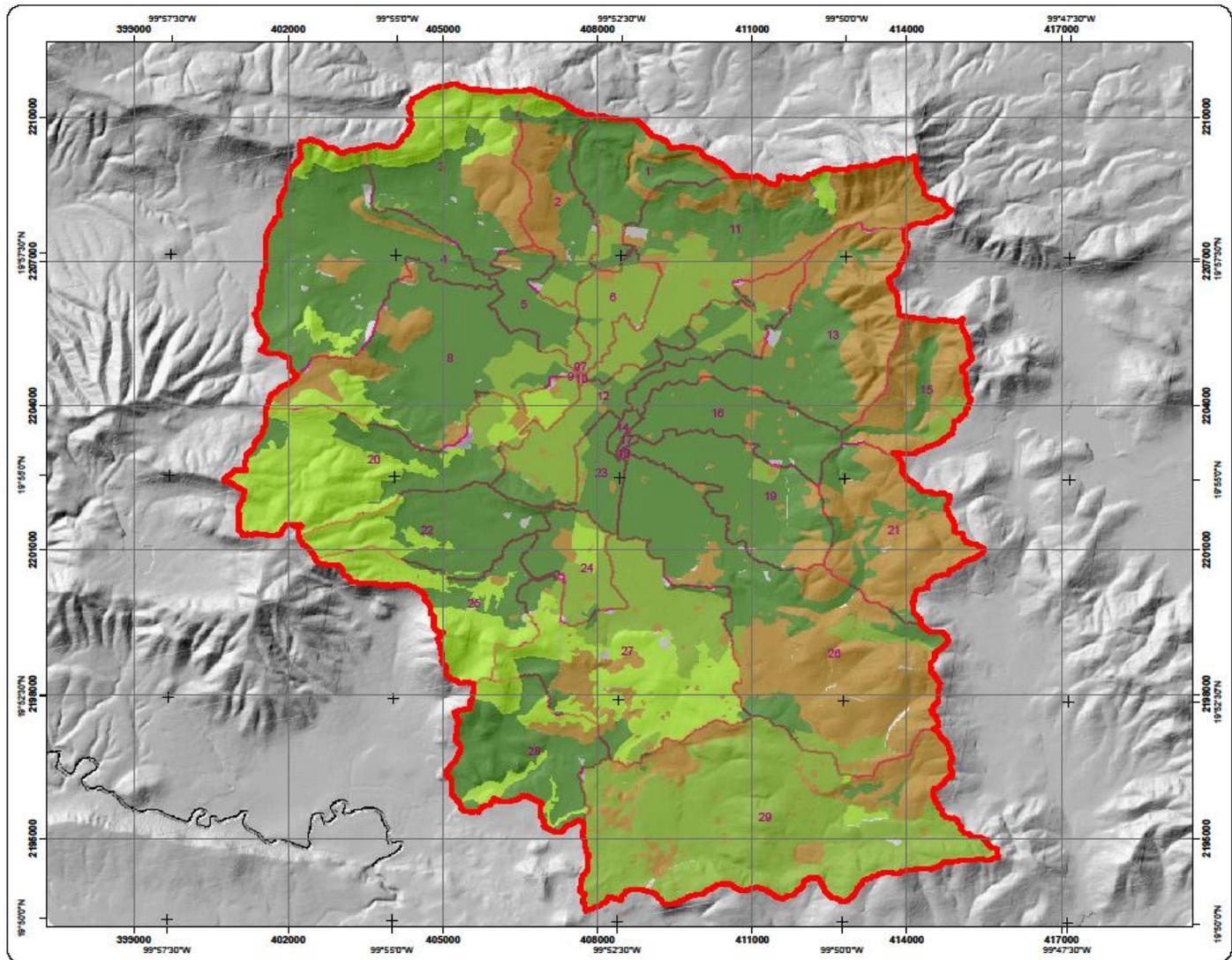
<b>Condición de siembre</b>	<b>Índice de cosecha</b>	<b>Rendimiento aforados (Ton/Ha)</b>	<b>Rendimiento simulado (Ton/Ha)</b>	<b>Biomasa simulada (Ton/Ha)</b>
Temporal en laderas	0.25	2.83	7.14	19.30
Temporal en valle	0.27	2.83	7.27	19.77
Riego	0.27	3.61	6.57	18.11

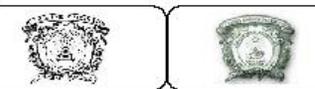
Fuente: Elaboración propia, 2014.

## **5.5 Producción de Biomasa**

Los datos obtenidos de la simulación de biomasa en la cuenca muestran una concentración de producción sobre las áreas forestales, hacia los extremos de la cuenca, por tanto es posible aseverar que dichas cifras coinciden con los rangos de producción reportados en diversas literaturas.

En específico las para las zonas agrícolas se reportan promedios de entre 5 y 15 Ton/Ha y para las zonas forestales hasta 20 Ton/Ha (ver Figura 38), por tanto la simulación que realiza el modelo SWAT es eficiente para ésta variable.





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO  
FACULTAD DE QUÍMICA  
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

TESIS

"LA COBERTURA Y USO DEL SUELO EN LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS Y ESCURRIMIENTOS SUPERFICIALES EN LA CUENCA EL TEJOCOTE, MÉXICO, MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT"

### SIMBOLOGÍA

#### Producción de Biomasa Ton/Ha

<span style="display: inline-block; width: 20px; height: 10px; background-color: #C8A27C; border: 1px solid black;"></span> 0.00 - 5.22
<span style="display: inline-block; width: 20px; height: 10px; background-color: #E6C8A2; border: 1px solid black;"></span> 5.23 - 10.45
<span style="display: inline-block; width: 20px; height: 10px; background-color: #F0F0A2; border: 1px solid black;"></span> 10.46 - 15.68
<span style="display: inline-block; width: 20px; height: 10px; background-color: #A2D9A2; border: 1px solid black;"></span> 15.69 - 20.91
<span style="display: inline-block; width: 20px; height: 10px; background-color: #70C870; border: 1px solid black;"></span> 20.92 - 26.14

Límite cuenca El Tejocote

N° de subcuenca

#### UBICACIÓN



**FIGURA 38. MAPA PRODUCCIÓN DE BIOMASA**



ELABORÓ: Lic. Karla Gabriela Mociño Velázquez  
FUENTE: INEGI 2013 Carta topográfica E14A17  
E: 1:50 000

**Figura 38. Mapa producción de biomasa.**

## 5.6 Cálculo de daños económicos por la producción de sedimentos y escurrimientos superficiales

Es claro que los daños producidos por la erosión de suelos repercute directamente en la pérdida de la fertilidad del suelo y de manera más tangible en la reducción de los rendimientos agrícolas; no obstante el costo de las molestias que la erosión de suelo produce en las partes bajas de la cuenca también son importantes, algunos de éstos daños se resumen en el Cuadro 14.

**Cuadro 14. Daños por erosión de suelos.**

Actividad	Impacto
Pérdidas de terrenos para cultivo	
Pérdida de agua, fertilizantes y pesticidas Pérdida de producción inmediata	Regional: posible compensación por importaciones Local: desastre personal para cada agricultor
Pérdida de la productividad a largo plazo	Disminución en el espesor de la capa superficial del suelo El almacenamiento de agua y la reducción de nutrientes Disminución de la eficacia de la lluvia Reducción de la rentabilidad = fatiga del suelo
Sedimentación de embalses	Disminución de la disponibilidad de agua para riego, azolvamiento
<i>Afectaciones para los habitantes de la ciudad</i>	
La degradación de la calidad del agua	Contaminación de los ríos, muerte de peces
El aumento de los sólidos en suspensión La inundación de zonas habitadas	Aumento en el precio del agua potable Flujos de lodo, zanjas cenagosas, sedimentos de carreteras y zonas urbanas, azolvamiento de drenajes
El aumento de los caudales máximos de los ríos	Destrucción de estructuras, puentes, etc.

Fuente: Elaboración propia, 2014.

Cotler y otros, (2007) afirman que las metodologías económicas convencionales para evaluar los costos asociados a la pérdida de suelos por actividad agrícola presentan una amplia complejidad en su implementación, debido principalmente a tres elementos clave: a) temporalidad: la tasa de erosión del suelo agrícola es un fenómeno temporal, que afecta negativamente las condiciones futuras de producción; b) espacio: los impactos de la erosión se manifiestan tanto in situ como off situ, y pueden ser difícilmente observables; c) institucional: aun suponiendo que es posible identificar y evaluar económicamente los costos de la erosión y de las medidas de conservación, la ausencia de esquemas institucionales que establezcan incentivos adecuados para balancearlos puede generar que la tasa de erosión óptima privada sea superior a la tasa óptima social. Esto puede ocurrir, por ejemplo, cuando los productores agrícolas toman en cuenta el total de los impactos in situ pero ignoran los impactos off situ.

Para el caso de México, los autores afirman que en relación con la superficie total de maíz blanco de temporal a nivel nacional, este costo sería de 4.2 a 7.2% del valor de producción, lo cual representa del 48 al 51% del monto entregado por PROCAMPO. Este análisis no enfatiza el valor del servicio ambiental del suelo, sino que da una idea de su valor in situ, por lo que dichas cifras subrayan la gravedad de la erosión del suelo en México como un obstáculo para la sostenibilidad financiera de las familias rurales.

La cuenca El Tejocote que pertenece al Distrito Atlacomulco, Estado de México se ha caracterizado por ir incrementando su superficie sembrada a través de los años, desde el año 2011 hasta el 2013 la superficie sembrada incrementó en casi 4 Ha y la cosechada en más de 10 Ha, lo cual indica buenas condiciones agrícolas, no obstante se deja entrever el constante cambio de uso del suelo, esto se puede apreciar en el Cuadro 15

**Cuadro 15. Cierre de producción municipal, 2013, 2012 y 2011.**

Año	Municipio	Sup. Sembrada (Ha)	Sup. Cosechada (Ha)	Valor producción (miles de pesos)
2013	Acambay de Ruíz Castañeda	21,080.00	21,080.00	259,907.88
	Atlacomulco	14,129.90	13,901.40	576,751.06
	Temascalcingo	15,588.00	15,588.00	192,667.81
2012	Acambay de Ruíz Castañeda	20,696.00	20,600.40	192,139.21
	Atlacomulco	14,031.00	14,006.00	421,168.50
	Temascalcingo	17,303.00	15,923.00	211,427.48
2011	Acambay de Ruíz Castañeda	17,905.00	11,573.00	54,772.08
	Atlacomulco	13,873.90	11,551.40	331,114.13
	Temascalcingo	10,808.00	6,608.00	56,434.00

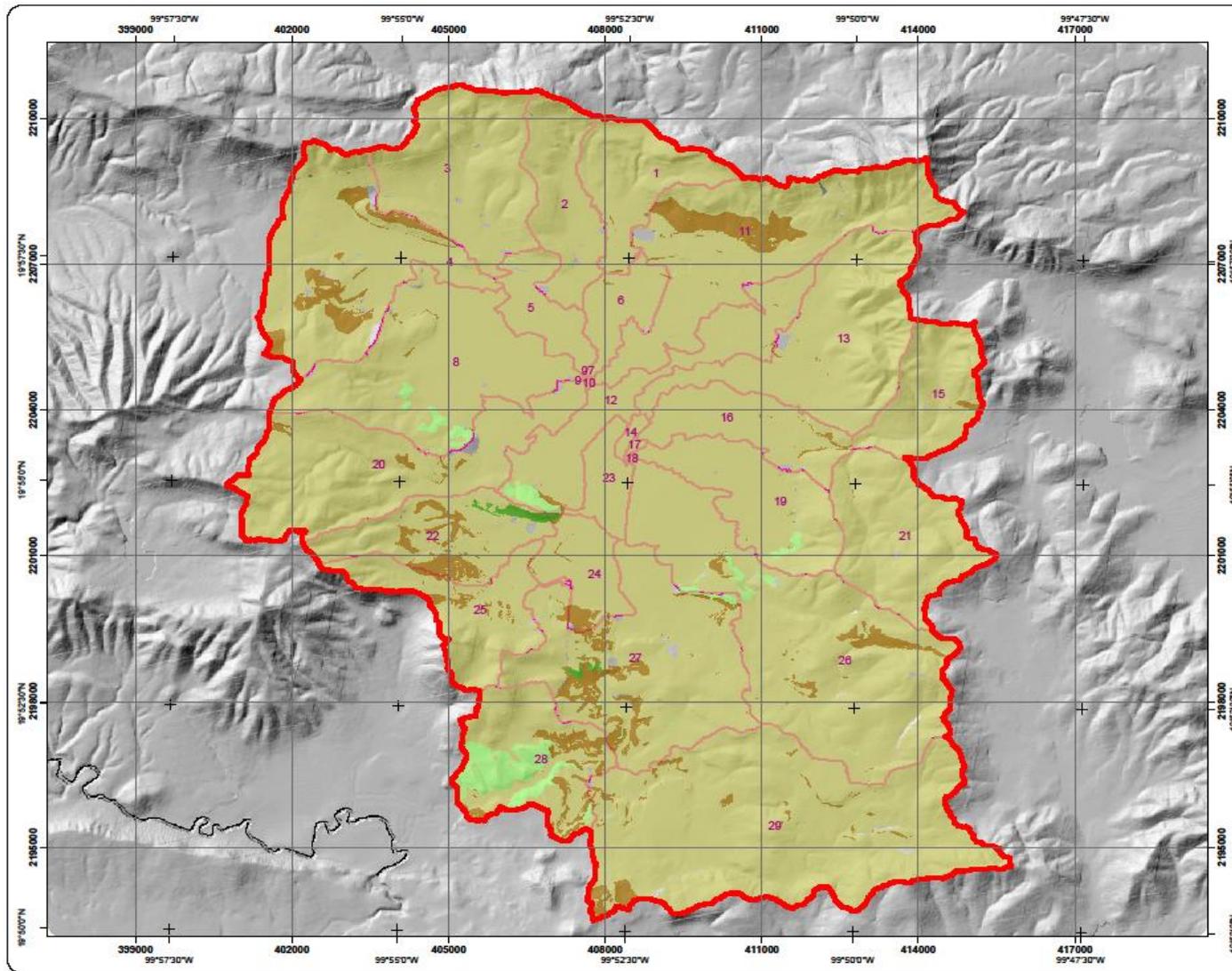
Fuente: SIAP, 2014.

En término económicos, de acuerdo con los resultados obtenidos de un promedio producido de sedimentos de 5.50 Ton/Ha y el costo de mantenimiento de drenes y presas de \$100/m<sup>3</sup>, se tiene que anualmente se gastaría en promedio un total de \$5,500,000 por Ha. La producción de erosión de suelos se puede apreciar en la Figura 39.

Para el caso de pérdida de producción de biomasa se estima en aproximadamente \$1,000/Ha, considerando que en la cuenca se produce un máximo de 15 Ton/Ha, esto costaría alrededor de \$15,000/Ha anuales.

A pesar de que en la cuenca la probabilidad de inundaciones en terrenos agrícolas es remota debido a que constantemente se mantienen los drenes a través de desazolves, en el caso de tener éste fenómeno se afectarían directamente la producción, por tanto se puede asumir a

manera de ejemplo que teniendo una superficie de 1,500 Ha inundadas, la pérdida de producción se estimaría en unos \$15,000 por Ha, dando como resultado \$22,500,000 anuales.






UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO  
FACULTAD DE QUÍMICA  
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

TESIS

"LA COBERTURA Y USO DEL SUELO EN LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS Y ESCURRIMIENTOS SUPERFICIALES EN LA CUENCA EL TEJOCOTE, MÉXICO, MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT"

### SIMBOLOGÍA

**Erosión del suelo**  
Ton/Ha

	0.00 - 1.04
	1.05 - 2.09
	2.10 - 3.13
	3.14 - 4.18

Límite cuenca El Tejocote  
 N° de subcuenca

**UBICACIÓN**



**FIGURA 39. MAPA EROSIÓN DE SUELOS**



ELABORÓ: Lic. Karla Gabriela Mociño Velázquez  
FUENTE: INEGI 2013 Carta topográfica E14A17  
E: 1:50 000

**Figura 39. Mapa erosión de suelos.**

## 5.7 Alternativas de uso de suelo y manejo de los recursos naturales

De acuerdo a las características encontradas para la cuenca El Tejocote se pueden diferenciar diversas condiciones de degradación y conservación para las coberturas y usos existentes, es decir, en aquellas zonas que están ocupadas por bosques aún presentan un buen estado de conservación ya que la simulación realizada por el SWAT no arrojó grandes cantidades de escurrimientos o sedimentos producidos en ellas, por tanto se recomiendan acciones de preservación y protección, a través de programas forestales y reforestaciones periódicas, también se pueden adaptar sistemas de plantación de frutales, actividades ecoturísticas y sobre todo el control de sobrepastoreo.

No obstante, se observa que para el caso de las subcuencas 7, 9, 10, 12, 14, 17, 18, 23, 27 y 28, se reporta un mayor gasto de escurrimiento durante los siete años de simulación por arriba de los 20 m<sup>3</sup>/s; dichas zonas están ocupadas por agricultura de temporal en laderas y pastizales sobre suelos de tipo Feozem.

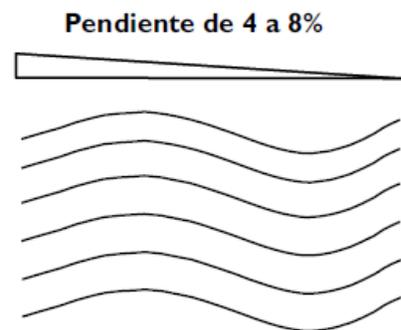
El año 2002 fue el mayor productor de escurrimientos con 354.84 mm y, caso contrario el año 2005 tuvo el menor resultado con 149.89 mm. Respecto a la producción de sedimentos, el año que presentó la mayor cifra fue 2002 con 9.9 Ton/Ha, inversamente al 2005 que obtuvo la cifra menor de 3.73 Ton/Ha.

La subcuenca que reflejó la mayor producción de sedimentos durante todo el periodo de simulación fue la 28 dedicada a la agricultura de temporal sobre laderas, y a ella se suman las subcuencas 1, 4, 8, 11 y 22 con más de 9 ton/ha producidas, todas asentadas sobre la misma pendiente, la subcuenca con menores datos fue la 9.

Dichos resultados demandan prontas acciones para el control y retención de escurrimientos y sedimentos, las subcuencas que coinciden en ambos resultados son la 28, 4, 8, 11 y 22;

es por ello que se proponen las siguientes técnicas de conservación del suelo bajo las consideraciones que establece el Organismo para la Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (US-EPA, 1993) sobre que no existen soluciones aisladas para combatir la erosión de suelos, las medidas dependen en gran parte de las situación económica del agricultor, de la importancia que den las autoridades ambientales a la erosión de suelos y del nivel de desarrollo del país:

- **Ordenación ecológica de los cultivos.** Secuencia de cultivos destinada a aportar residuos orgánicos adecuados para el mantenimiento de la aptitud de la tierra para la labranza. Esta práctica reduce la erosión aumentando la materia orgánica. Puede también obstaculizar los ciclos de reproducción de malas hierbas e insectos y la propagación de enfermedades, reduciendo de esa manea la necesidad de plaguicidas. Un ejemplo sería la rotación de gramíneas y leguminosas.
- **Labranza conservacionista.** Este sistema de plantación, conocido también con el nombre de labranza reducida, mantiene al menos el 30% de la superficie del cielo cubierta con residuos después de la plantación. La erosión se reduce gracias a la cubierta del suelo. Disminuye también la escorrentía y aumenta la infiltración hacia las aguas subterráneas.
- **Cultivo en curvas de nivel.** Las prácticas de aradura, plantación y algunas otras de ordenación se realizan siguiendo las curvas de nivel, con lo que se reduce la erosión y la escorrentía (Figura 40).

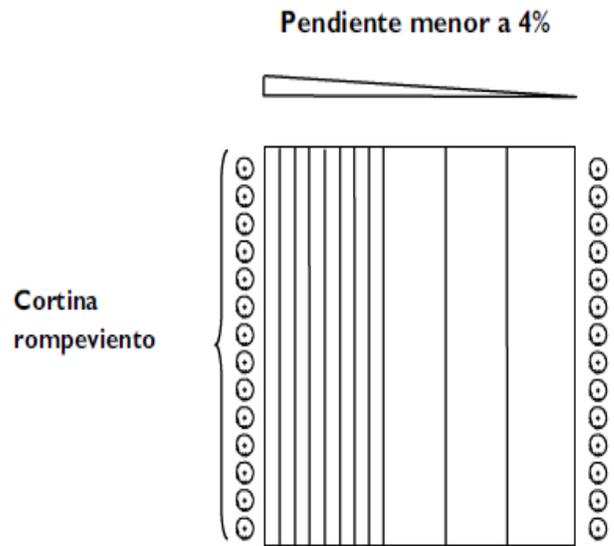


Fuente: GEM, (2009).

**Figura 40. Surcado en contorno.**

- **Cultivos para cubierta y abono verde.** Cultivo de gramíneas, leguminosas o cereales pequeños sembrados a escasa distancia con la finalidad principal de conseguir una protección estacional y mejorar los suelos, normalmente, durante un año, o menos.
- **Plantación en las zonas más expuestas.** Plantación de vegetación, como árboles, arbustos, parras, hierbas o leguminosas, en zonas sometidas a procesos de erosión o muy erosionables.
- **Aprovechamiento de los residuos de las cosechas.** Utilización de los residuos vegetales para proteger los terrenos cultivados durante períodos de fuerte erosión.
- **Retraso en la preparación del suelo de cultivo.** Todo sistema de cultivo en que los residuos vegetales se dejan en la superficie del suelo hasta poco antes de la plantación de la cosecha siguiente. Con ello se reduce el período en que se puede producir la erosión.
- **Desviaciones.** Canales construidos en sentido transversal en una ladera con un pequeño lomo de apoyo en la parte inferior. Controlando la escorrentía de la pendiente, se reduce la erosión y aumenta la infiltración hacia las aguas subterráneas.
- **Franjas de filtro y delimitación de las fincas.** Franjas de vegetación herbácea perenne en el linde de las fincas. Con ello se frena la escorrentía y se detienen los sedimentos más gruesos. Sin embargo, la eficacia es pequeña en el caso de los sedimentos finos y de los contaminantes a ellos asociados.

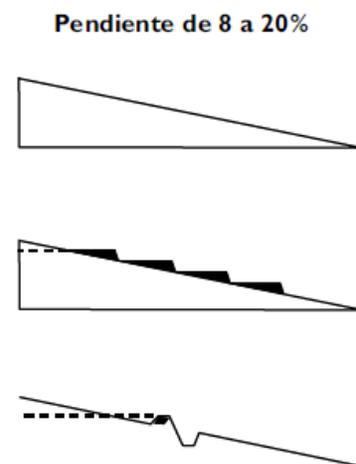
- **Cursos de agua cubiertos de hierba.** Cursos de agua natural o artificial cubiertos de vegetación y con una sección transversal apropiada para impedir la erosión del cauce. La vegetación servirá también para detener los sedimentos que se filtran de las fincas adyacentes.
- **Cultivo en franjas.** Distribución sistemática de los cultivos en franjas o bandas en sentido transversal al de la pendiente general (no siguiendo las curvas de nivel) para reducir la erosión del agua. Los cultivos se disponen de manera que se pueda alternar una franja de hierba o de cultivos sembrados muy próximos con una franja de barbecho o de un cultivo sin hierbas (Figura 41).



Fuente: GEM, (2009).

**Figura 41. Surcos o melgas rectas.**

- **Construcción de terrazas.** Las terrazas son terraplanes contruidos de tierra (o de piedras u otros materiales) que retrasan la escorrentía y reducen la erosión fragmentando la ladera en numerosas superficies llanas separadas por pendientes protegidas con vegetación permanente. Las terrazas se construyen en tierras con inclinación muy pronunciada; en laderas de pendiente suave, las terrazas son muy anchas (Figura 42).



Fuente: GEM, (2009).

**Figura 42. Terraza de formación sucesiva.**

Para la zona centro de la cuenca ocupada por agricultura de temporal en valle y riego, se aprecian fenómenos de azolvamiento provocada por el acarreo de material suelto de las laderas, el principal problema recae en que en dicha zona se encuentran los cuerpos de agua más importantes de la cuenca de los que se abastece la actividad agrícola, por tanto las actividades antes propuestas son de urgente prioridad.

Una posible práctica para controlar los sedimentos deslavados son:

- **Pozas de sedimentación.** Pozas construidas para recoger y almacenar los sedimentos durante los episodios de escorrentía. Se conocen también con el nombre de estanques de retención. Los sedimentos se depositan por efecto de la escorrentía durante el represamiento en la poza de sedimentación.

A manera de conclusión el Cuadro 16, muestra algunas estimaciones sobre los costos que conllevan algunas prácticas de conservación de suelos, ello con la intención de retomar las posibilidades con las que cuentan los agricultores y elegir la opción más adecuada.

**Cuadro 16. Estimaciones analizadas de los costos de algunas prácticas adoptadas en los Estados Unidos para combatir la erosión.**

<b>Práctica</b>	<b>Orden</b>
Franjas de protección cubiertas de hierba	1 (menos costosa)
Cultivos protectores	2
Cultivos en franjas	3
Labranza conservacionista	4
Repoblación forestal de tierras de cultivo y pasto	5
Desviaciones	6
Vegetación permanente en las zonas más expuestas	7
Terrazas	8
Estructuras y pozas de sedimentación	9 (más costosa)

Fuente: Roose, (1994).

Además se recomienda determinar la cantidad de agua aplicada a los cultivos y el método de riego, con el fin de mejorar la productividad y hacer eficiente el uso de agua, por ejemplo:

- **Riego por aspersión.** Consiste en el riego en forma de lluvia a través de unos dispositivos de emisión de agua, llamados aspersores, que generan un chorro de agua pulverizada en gotas. El agua sale por los aspersores a presión, después de a través de una red de tuberías cuya longitud depende del tamaño de la zona de cultivo.

La técnica funciona a presión gracias a un sistema de bombeo, mientras que la disposición de los aspersores es para que humedezca toda la superficie del suelo, de la forma más homogénea posible.

Además de la disponibilidad de estas técnicas de riego, muchas organizaciones en pro del medio ambiente difunden la necesidad de medidas de reúso del agua, tratamientos para su limpieza, una mejor distribución y proyectos educativos y concientización para la población.

También es necesario el control de uso de fertilizantes y agroquímicos, ello debido a la afectación que provoca a los recursos naturales existentes y a la salud humana. Ello considera los siguientes puntos:

- Identificación del problema.
- Selección del plaguicida y dosis, específicos para controlar dicho problema.
- Momento oportuno de la aplicación.
- Calibración y uso correcto del equipo de aplicación, logrando una cobertura adecuada.
- Manejo seguro del plaguicida, tanto del operador como para el medio ambiente.

La planeación del cambio de uso de suelo, es otro aspecto que debe considerar para conservación el suelo de la cuenca, ya que ello repercute en la calidad ambiental de la zona, la pérdida de superficies boscosas disminuye la filtración y recarga de agua a los acuíferos y plantas, producción de oxígeno y captura de carbono, pérdidas de especies vegetales y de

fauna endémicas. El aumento de superficies agrícolas, pastizales, suelos desnudos y áreas urbanas crean una mayor presión en el uso de agua y suelo.

- Para ello se presenta lo establecido en la *Actualización del Modelo de Ordenamiento Ecológico Estatal (POEMET)* donde cada unidad de gestión ecológica (UGA) refleja el uso predominante y la política a la cual está sometida. La cuenca se encuentra asentada sobre las unidades que se describen el Cuadro 17.

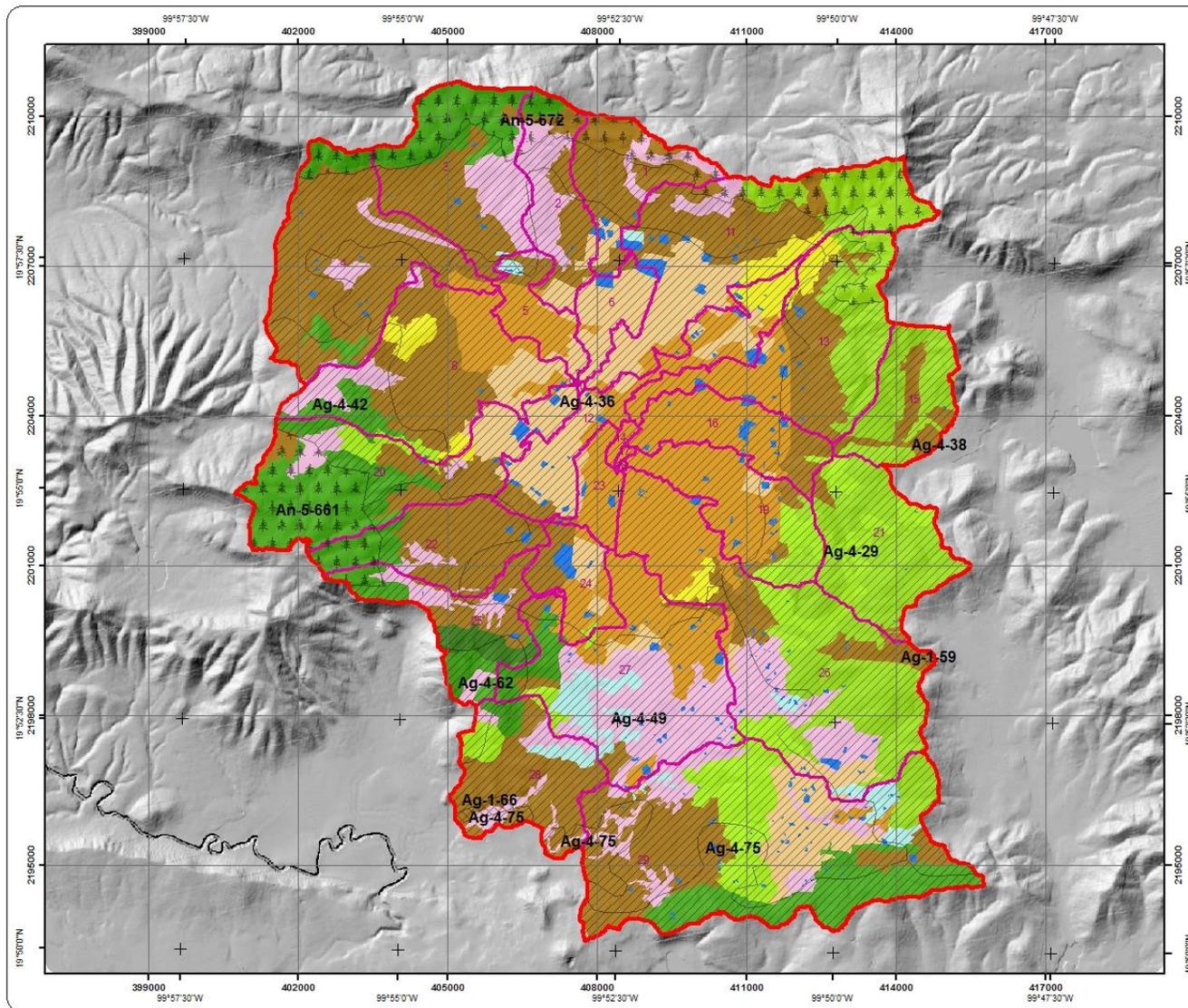
Bajo los criterios de regulación establecido por el POEMET se busca controlar las actividades permitidas en la cuenca a fin de conservar los recursos naturales y mantener la productividad de la zona considerando que es la principal actividad económica a la que se dedica la población.

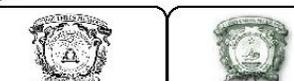
**Cuadro 17. Unidades de gestión ecológica de la cuenca El Tejocote.**

UGA	Política	Uso predominante	Criterios de regulación
Ag-4-36	Conservación	Forestal	109-131,170-73,187,189,190,196
Ag-4-49	Conservación	Forestal	109-131,170-73,187,189,190,196
Ag-1-59	Aprovechamiento	Pastizal (Pecuario)	109-131,170-73,187,189,190,196
Ag-4-62	Conservación	Forestal	109-131,170-73,187,189,190,196
Ag-1-66	Aprovechamiento	Agrícola	109-131,170-73,187,189,190,196
Ag-4-75	Conservación	Forestal	109-131,170-73,187,189,190,196
Ag-4-29	Conservación	Forestal	109-131,170-73,187,189,190,196
An-5-661	Protección	Área Natural	82-108
Ag-4-42	Conservación	Agrícola	109-131,170-73,187,189,190,196
Ag-4-38	Conservación	Forestal	109-131,170-73,187,189,190,196
An-5-672	Protección	Pastizal (Pecuario)	82-108

Fuente: GEM, (2006)

La Figura 43 permite visualizar la distribución de las UGA's de la cuenca, es posible analizar que casi la totalidad de la misma se encuentra bajo políticas de conservación y aprovechamiento para el uso agrícola y pecuario, no obstante también se pueden encontrar importantes superficies ocupados por bosques que tienen una política de protección.





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO  
FACULTAD DE QUÍMICA  
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

TESIS

"LA COBERTURA Y USO DEL SUELO EN LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS Y ESCURRIMIENTOS SUPERFICIALES EN LA CUENCA EL TEJOCOTE, MÉXICO, MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT"

**SIMBOLOGÍA**

<b>UGA's</b>	Coníferas
<b>Política</b>	Encino
 Aprovechamiento  Conservación  Protección	 Encino-Pino  Pino  Pastizal inducido  Suelo desnudo  Área Urbana  Cuerpo de agua  límite sub  N° de subcuenca  Nombre de UGA

**UBICACIÓN**



**FIGURA 43. UNIDADES DE GESTIÓN AMBIENTAL CUENCA EL TEJOCOTE**

ELABORÓ: Lic. Karla Gabriela Mociño Velázquez  
FUENTE: INEGI 2013 Carta topográfica E14A17  
E: 1:50 000 y MOETEM 2006

Fuente: GEM, (2006)  
**Figura 43. Unidades de Gestión Ambiental de la cuenca El Tejocote.**

## **5.8 Acuse de recibo de artículo en extenso**

karla mociño:

Gracias por enviar el manuscrito "DETERMINACIÓN DE ESCURRIMIENTOS SUPERFICIALES Y SEDIMENTOS EN LA CUENCA EL TEJOCOTE MEDIANTE EL MODELO SWAT"

a Ecosistemas y Recursos Agropecuarios. Con nuestro sistema de gestión de revistas en línea, podrá iniciar sesión en el sitio web de la revista y hacer un seguimiento de su progreso a través del proceso editorial.

URL del manuscrito:

<http://132.248.10.25/era/index.php/rera/author/submission/109>

Nombre de usuario/a: karlavela

En caso de dudas, contacte conmigo. Gracias por elegir esta revista para publicar su trabajo.

Dr. Maximiano Antonio Estrada Botello  
Ecosistemas y Recursos Agropecuarios

---

Ecosistemas y Recursos Agropecuarios <http://132.248.10.25/era/index.php/era>

## **6 DISCUSIÓN GENERAL**

Es posible concluir al término del estudio que el modelo SWAT tiene un mayor acercamiento a lo medido para la producción de escurrimientos superficiales que para sedimentos, sobre todo al realizar análisis anuales más que mensuales o diarios.

Esta misma situación se presenta para los datos respecto a la producción de biomasa en la agricultura de laderas, valle y riego, que en los datos simulados a razón de rendimientos agrícolas. Cabe destacar que comparando los resultados con los autores Fernández (1996) y Torres (2000) en sus estudios sobre la misma zona de estudio, los resultados obtenidos indican una continuación en la tendencia de producción de sedimentos, y la cobertura que continúa siendo la de mayor incidencia en la producción de estos, es la agricultura sobre laderas, por tanto se recomiendan acciones de manejo de suelos y agua como construcción de terrazas, bordes, rotación de cultivos, control de canales, etc.

Para el caso de los escurrimientos superficiales, las subcuencas que más los reflejaron son aquellas ocupadas por pastizales inducidos, suelos desnudos y agricultura sobre laderas también, esto debido a que no existe ninguna cobertura vegetal que los retenga.

Debido a que las subcuencas que reportaron mayores producciones de escurrimientos y sedimentos están en las partes altas de la cuenca, se afirman procesos de sedimentación y azolvamiento de cuerpos de agua hacia la zona centro de la misma, por tanto se requieren alternativas que detengan la erosión del suelo y controlen los deslizamientos y pérdidas del mismo.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Debido a que los resultados obtenidos con el modelo SWAT coinciden con la información de fuentes oficiales y a que el presente trabajo de investigación se suma a los reportes exitosos de su aplicación, se verifica que éste modelo es sin duda una herramienta valiosa en la determinación de información climatológica e hidrométrica de cualquier territorio, sobre todo en aquellos en los que no se dispone de ninguna estación de medición.

Este aporte se considera de suma importante para la ciencia, ya que brinda a los usuarios un instrumento más para la obtención y análisis de información respecto al tema y que puede aplicarse sobre cualquier zona de estudio requerida.

Una ventaja más del modelo SWAT es el trabajo con plataformas de SIG, ya que se facilita la manipulación de grandes cantidades de datos requeridos, por periodos extensos de tiempo y con el manejo de diversas variables.

De manera particular, cabe hacer la recomendación que la calibración del modelo requiere de un ajuste continuo de los parámetros de entrada al mismo, además para obtener una máxima confiabilidad de los resultados, es necesario disponer de la mayor cantidad de información disponible en cuanto al manejo de la cuenca y producciones agrícolas. Posteriormente, la comparación de los resultados obtenidos contra los medidos por estaciones de aforo, es indispensable para la validación del modelo.

Como información agregada, debido a que el modelo SWAT arroja los resultados a nivel subcuenca, es más sencillo para el usuario o investigador determinar la cobertura o uso del suelo que genera más escurrimiento y sedimento, y con ello aplicar las medidas específicas en dichas coberturas.

La cuenca El Tejocote es un territorio que a través de los años ha cambiado su ocupación del suelo, ello le traído consecuencias respecto a la disponibilidad del agua y degradación de suelos principalmente; lo que resalta la atención es la misma tendencia reportada desde los años 80's hasta la actualidad; es por ello la preponderante necesidad de considerar este tipo de estudios de investigación para la futura toma de decisiones sobre las prácticas de manejo de recursos naturales, actividades económicas y planificación del cambio de uso del suelo.

## BIBLIOGRAFÍA

Abbaspour, K.C., M. Vejdani y S. Haghghat, 2007: SWATCUP calibration and uncertainty programs for SWAT. In *Proc. Intl. Congress on Modelling and Simulation (MODSIM'07)*, 1603-1609. L. Oxley and D. Kulasiri, eds. Melbourne, Australia: Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand.

Amorim, R.S., 2004: “Avaliação dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para condições edafoclimáticas brasileiras” en *Revista Dissertação (Doutorado em Engenharia Agrícola)* 120f. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa.

Andreu, J., 1993: *Análisis de sistemas de modelación en Conceptos y métodos para la planificación hidrológica*, Barcelona: Editorial Diputación de Alicante.

Aparecida, L.T. y M.L. Calijuri, 2010: “Modelagem hidrossedimentológica de bacia hidrográfica na região sudeste do Brasil, utilizando o SWAT” en *Revista Ambiente e Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, vol. 5, núm. 2, Brasil: Universidad de Taubaté; Taubaté.

Aparicio, F.J., 1989: *Fundamentos de Hidrología de Superficie*, México: Editorial Limusa.

Arias, L.E. y M. Duque, 1992: *La cuenca hidrográfica como una unidad de análisis y planificación territorial*, Medellín: Tesis Doctoral (Economista Agrícola) 250p.: Universidad Nacional de Colombia.

Arnold, J.G., M.D. Bircket, J.R. Williams, W. F. Smith y H. N. McGill, 1987: “Modelling the effects of urbanization on basin water yield and reservoir sedimentation” en *Water Resources Bulletin* 23(6) 1101-1107, EUA.

Arnold, J.G., R. Srinivasan, R.S. Muttiah y J.R. Williams, 1998: “Large area hydrologic modeling and assessment: part I. Model development”, en *Revista Journal of the American Water Resources Association* 34 (1), 73–89, EUA.

Arnold J.G., D.N. Moriasi, P.W. Gassman, K.C. Abbaspour, M.J. White, R. Srinivasan, C. Santhi, R.D. Harmel, A. Van Griensven, M.W. Van Liew, N. Kannan y M.K. Jha, 2012: “SWAT: MODEL USE, CALIBRATION, AND VALIDATION” en *Revista Soil and Water Division of ASABE*, Texas, USA.

Balvanera, P. y H. Cotler, 2009: *Estado y tendencias de los servicios ecosistémicos, Capital natural de México, voll. II: Estado de conservación y tendencias de cambio*. Ed. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).

Barkin, R., 1986: *Embalses y su impacto ambiental*, España: Ed. Labor Scientific American.

Barrow, C., "River basin development planning and management; a critical review" en *World Development* 26(1), 1998, pp171-186.

Bonini, J., E. Guzmán y D. Matamoros, 2003: *Estimación de caudales y sedimentos en la cuenca del río Chaguana, mediante el modelo matemático AVSWAT*, E.U.A.: Tesis Doctoral, Universidad de Nueva Orleans.

Bonneau, M. y B. Souchier, 1987: *Edafología. Constituyentes y propiedades del suelo*, Barcelona: Editorial London (u.a.).

Breña, A.F. y M.A. Jacobo, 2006: *Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial*, México: Editorial Universidad Autónoma Metropolitana.

Cabeda, M.S.V., 1983: "Degradação física e erosão" en *I Simpósio de manejo do solo e plantio direto no sul do Brasil e III Simpósio de conservação de solos do planalto*, Passo Fundo, RS, Anais.

Caire, G., 2004: "Implicaciones del marco institucional y de la organización gubernamental para la gestión ambiental por cuencas. El caso de la cuenca Lerma-Chapala" en *Gaceta Ecológica* 71, Instituto Nacional de Ecología, México: Editorial INE.

Campos, D.F., 1992: *Procesos del Ciclo Hidrológico*, México: Editorial Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Carrasco, J. y J. Riquelme, 2003: *Métodos y Prácticas de Conservación de Suelos y Aguas*, Rancagua, Chile: Editorial Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA).

Casillas, J.A., 2007: *El Programa Nacional de microcuencas una estrategia de desarrollo integral, El manejo integral de cuencas en México, 2da Edición*, México: Editorial H. Cotler (comp)- INE.

Christofoletti, A., 1999: *Modelagem de sistemas ambientais*, São Paulo: Editorial Edgard Blucher.

CIAT, Centro Internacional de Agricultura Tropical, 1999: *Nueve instrumentos para la toma de decisiones en el manejo de los recursos naturales*, Colombia: Editorial CIAT.

Coffey, M. E., S. R. Workman, J. L. Taraba y A. W. Fogle, 2004: Statistical procedures for evaluating daily and monthly hydrologic model predictions, EUA: Editorial Trans. ASAE 47(1).

Colegio de Postgraduados, 2005: “Empleo del Modelo SWAT para generar alternativas de manejo en la cuenca del río Laja, Guanajuato, México” en *Programa e Hidrociencias. IRENAT*, Estado de México: Colegio de Postgraduados.

Colegio de Postgraduados, 1977: *Manual de Conservación del Suelo y Agua, Instructivo SARH-CP*, Estado de México: Editorial Colegio de Postgraduados.

CONAGUA, Comisión Nacional del Agua, 2012: *Base de datos estación hidrométrica El Tejocote*, México, Editorial CONAGUA.

CONAGUA, Comisión Nacional del Agua, 2006: *Documentos temáticos, Ejes Temáticos y perspectivas transversales. IV Foro Mundial del agua*, México: Editorial CONAGUA,

CVC, Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, 1995: *Procedimientos Metodológicos de Planificación en Cuencas Hidrográficas*, Santiago de Cali: Editorial CVC.

Daubenmire, R.F., 1982: *Ecología Vegetal, Tratado de Autoecología de Plantas*, EUA: Editorial Universidad Estatal de Washington.

De Pablo, A., 1996: *Ingeniería Ambiental: Contaminación y Soluciones*, México, Editorial Productica.

De Roo, A.P.J., C.G. Wesseling y C.J. Ritsema, 1996: “LISEM: a single event physically-based hydrologic and soil erosion model for drainage basins: I. Theory, input and output” en *Revista Hydrological Processes 10*, 1107–1117, EUA.

Dourojeanni, A., 1994: “La gestión del agua y las cuencas en América Latina” en *Revista de la CEPAL No. 53*, EUA.

Dourojeanni, A., 1993: *Evolución de la gestión integral de cuencas en América Latina y el Caribe*, Chile: Editorial CEPAL-ECLAC.

Dourojeanni, A., A. Jouravlev y G. Chávez, 2002: “Gestión del Agua a Nivel de Cuencas: Teoría y Práctica” en *División de Recursos Naturales e Infraestructura*, Santiago de Chile, Editorial CEPAL-ECLAC.

Estrela, T., 1997: *Máster e Hidrología general y aplicada Tomo II*, Madrid: Editorial Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.

Hernández, G.J., C. Guariguata e I. Padrón, 2009: *Conservación de cuencas hidrográficas caso: cuenca del río Orituco. Emblase de Guanapito*, Chile: Editorial Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA).

FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación e IITA, Instituto Internacional de Agricultura Tropical, 2000: *Manual de Prácticas integradas de manejo y conservación de suelos*, Nigeria: Editorial FAO e IITA.

Fernández, 1996: “Aplicación del modelo de simulación SWRRB para determinar el balance hidrológico de la cuenca “El Tejocote”, Atlacomulco, Estado de México”, México: Tesis Maestría, Colegio de Postgraduados.

Fernández, M., A. Vela y S. Castaño, s/f: *La utilización de modelos en hidrología; Sección de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica*, España: Editorial Instituto de Desarrollo Regional de la Universidad de Castilla La Mancha.

Flanagan, D.C. y M.A. Nearing, 1995: “USDA-Water Erosion Prediction Project (WEPP) Hillslope Profile and Watershed Model Documentation” en *NSERL Report No. 10, National Soil Erosion Research Laboratory 298 pp*, Indiana: USDA-Agricultural Research Service West Lafayette.

Flanagan, D.C., J.E. Gilley y T.G. Franti, 2007: “Water Erosion Prediction Project (WEPP): development history, model capabilities, and future enhancements” en *Revista Transactions of the ASABE 50, 1603–1612*, España.

Fohrer, N., S. Haverkamp, K. Eckhardt y G. Frede, 2001: “Hydrologic response to land use changes on the catchment scale” en *Revista Phys. Chem. Earth 26:577-682*, EUA.

García, E., 1973: *Modificación del sistema de clasificación de clima Köpen*, México: Editorial UNAM, Instituto de Geografía.

Gassman, P.W., M.R. Reyes, C.H. Green y J.G. Arnold, 2007: “The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions” en *Revista Transactions of the ASABE 50, 1211–1250*, España.

GEA, SANZEKAN SINEMI, RAISES, UDG, UNISUR, 2008: *Foro comunitario del manejo del agua en México Rural*, Chilpancingo, Guerrero: Editorial GEA-UDG.

GEM, Gobierno del Estado de México, 2005: *Plan de Desarrollo Urbano del Municipio de Acambay*, México. Editorial: GEM.

GEM, Gobierno del Estado de México, 2006: *Actualización del modelo de ordenamiento ecológico del Estado de México*. Editorial: GEM.

GEM, Gobierno del Estado de México, 2009: *Manual de conservación de suelo y agua*, México. Editorial: GEM.

Gidahatari, 2014: Los 10 mejores softwares libres en recursos hídricos en línea en <http://gidahatari.com/ih-es/los-10-mejores-softwares-libres-en-recursos-hidricos>, Chile.

Grigg, N.S., 1996: *Water resources management: principles, regulations, and cases*, New York: Editorial McGraw-Hill Book.

Helweg, J., 1992: *Recursos Hidráulicos: planeación y administración*, México: Editorial Limusa.

Herrero, J., M.I. Rodríguez y A. Avilés, 2010: *Modelo integrales de cuencas hidrográficas y prognosis de escenarios de gestión. SWAT aplicado a la cuenca del Guadalfeo*, España: Editorial Universidad de Granada (Grupo de Ríos y Embalses, CEAMA).

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010: *Carta edafológica y de uso del suelo escala 1:250000, carta topográfica y geológica escala 1:50000*, México, Editorial INEGI.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010: *Censo de Población y Vivienda 2010*, México, Editorial INEGI.

Jetten, V., 2002: *User Manual of the Limburg Soil Erosion Model (LISEM)*, The Netherlands: Editorial Utrecht University.

Jouravlev, A., 2001: “Administración del agua en América Latina y el Caribe en el umbral del siglo XXI” en *Revista Naciones Unidas / CEPAL 77 p. (Serie de Recursos Naturales e Infraestructura 27)*, Santiago de Chile: ONU-CEPAL.

Kühnle, R.A., R.L. Binger, G.R. Foster y E.H. Grissinger, 1996: “Effect of land use changes on sediment transport in Goodwin Creek” en *Revista Water Resources Research 32(10) 3189-3196*, EUA.

Lal, R. y B.A. Stewart, 1990: “Soil degradation. A global Threat” en *Revista Advance in Soil Science, 11,3-17*, EUA.

Lane, L.J., 1983: "On the subject of a flood propagation method" in *Hydraulics Research* 7(2):205-230.

Linsley K., A. Kohler y L.H. Paulhus, 1990: *Hidrología para ingenieros*, México: Editorial McGraw-Hill.

Loredo, O., S. Beltrán, F. Moreno y M. Casiano, 2007: *Riesgo a la erosión hídrica y proyección de acciones de manejo y conservación del suelo en 32 microcuencas de San Luis Potosí*, México: Editorial SAGARPA, inifap, CONACYT y CONAFOR.

Ma, L., J.C. Ascough II, L.R. Ahuja, M.J. Shaffer, J.D. Hanson y K.W. Rojas, 2000: *Root Zone Water Quality Model sensitivity analysis using Monte Carlo simulation*, EUA: Editorial Trans. ASAE 43(4).

Maas, M., 2005: *Principios Generales sobre Manejo de Ecosistemas*, México: Editorial Centro de Investigaciones en Ecosistemas, UNAM.

Machado, R.E., 2002: *Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento*, Brasil: Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

Machado, R.E., C.A. Vettorazzi y A.C. Xavier, 2003: "Simulação de cenários alternativos de uso da terra em uma microbacia utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento" en *Revista Basilerira de Ciência do Solo* vol. 27, núm, 4, Brasil: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

Maderey, L.E., 1977: *El agua de escurrimiento en la República Mexicana*, México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Mielniczuk, J. y P. Schneider, 1984: "Aspectos sócioeconômicos do manejo de solos no sul do Brasil" en *I Simpósio de manejo do solo e plantio direto no sul do Brasil e III Simpósio de conservação de solos do planalto, Passo Fundo, RS.*, Anais: Editorial Univeridad de Passo Fundo.

Minoti, R.T., 2006: *Abordagens qualitativa e quantitativa de micro-bacias hidrográficas e áreas alagáveis de um compartimento do Médio Mogi-Superior/SP 231f.*, Brasil: Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Mollard, E. y S. Vargas, 2005: *Introducción, Problemas socio-ambientales y experiencias organizativas en las cuencas de México*, México: Editorial IMTA-IRD.

Montenegro, H. y D. Malagon, 1990: *Propiedades físicas de los suelos*, Colombia; IGAC, Subdirección Agrológica, Instituto Geográfico.

Nadal, E., 1993: *Introducción al análisis de la Planificación Hidrológica*, Madrid: Editorial MOPT.

Nash, J.E. y J.E. Sutcliffe, 1970: *River flow forecasting through conceptual models: Part I. A discussion of principles*, EUA: Editorial *J. Hydrol.* 10(3).

Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry y J.R. Williams, 2005: *Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua, Documentación Teórica, Versión 2005*, Texas: Editorial Agricultural Research Service.

Nicks, A.D., 1974: “Stochastic generation of the occurrence, pattern and location of maximum amount of daily rainfall” in Proc. Symp. Statistical Hydrology, Tucson, Arizona.

Nicklow, J.W. y M.K. Muleta, 2005: “Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model” en *Revista Journal of Hydrology* v. 306, p. 127–145, EUA.

Narro, E., 1994: *Física de los suelos, con enfoque agrícola*, México: Editorial Trillas.

OEA, Organización de las Naciones Unidas, 1978: *Calidad ambiental y desarrollo de cuencas hidrográficas: un modelo para planificación y análisis integrados*, Washington: Editorial Secretaría General de la OEA.

Oestreicher, J., 2010: *Prospectivas y Aplicaciones del Modelo Hidrológico SWAT: Adaptación del modelo para su uso en la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá*, Canadá: Editorial Universidad de McGill Montreal.

Oñate, F. y G. Aguilar, 2003: “Aplicación del Modelo SWAT para la estimación de caudales y sedimentos en la cuenca alta del río Catamayo” en *Tercer Congreso Latinoamericano de Manejo de Cuencas Hidrográficas 8-13 de junio*, Arequipa-Perú.

Ortiz, B. y C.A. Ortiz, 1987: *Edafología*, México: Editorial Universidad Autónoma de Chapingo (Departamento de Suelos).

Palacios, O.L., 1986: *El uso de modelos en irrigación y áreas a fines*: Editorial Terra.

Parra, O., 2009: *Gestión integrada de cuencas hidrográficas*, Chile: Editorial Centro de Ciencias Ambientales, EULA-Chile (Universidad de Concepción).

Peralta, J.M., 1993: “Agentes erosivos y tipos de erosión” en *Programa de Capacitación a Agentes de Extensión-Tecnologías de Conservación de Suelos y Agua Serie Platina n°46*, Santiago de Chile: INIA

Pessoa, M.C.P.Y., A.J. Luchiari, E.N. Fernandes y M.A. Lima, 1997: *Principais modelos matemáticos e simuladores utilizados para análise de impactos ambientais das atividades agrícolas*, Jaguariúna: Editorial EMBRAPA/CNPMA, (EMBRAPA. CNPMA. Documentos, 8).

Pérez, J., 1992: *Estudio de la estabilidad estructural del suelo en relación con el complejo de cambio (comportamiento de algunos suelos característicos españoles)*, Madrid: Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid.

Pineda, R., 2007: *Hacia una gestión integral de cuencas en México, 2da Edición*, México: Editorial INE.

Porta, J., M. López-Acevedo y C. Roquero, 1994: *Edafología. Para la agricultura y el medio ambiente*, México: Editorial Mundi-Prensa.

Priestley, C.H.B y R.J. Taylor, 1972: *On the assessment of Surface heat flux and evaporation using large-scale parameters*. Mon. Weather Rev. 100:81

Proaño, M., C. Gavilanes, P. Valenzuela y C. Cisneros, 2006: “Aplicación del Modelo SWAT en la subcuenca del río Ambato” en *Proyecto Cuencas Andinas-CODESAN-GTZ, Challenge Program*, Argentina: Editorial Corporación randi.

Refsgaard, J. C., 1997: Parameterisation, calibration, and validation of distributed hydrological models, EUA: Editorial *J. Hydrol.* 198(1).

Renschler, C.S., 2003: “Designing geo-spatial interfaces to scale process models: the GeoWEPP approach” en *Revista Hydrological Processes* 17, 1005–1017, EUA.

Renschler, C.S., 2008: GeoWEPP—the geo-spatial interface for the water erosion prediction project WEPP. En línea en URL: <http://www.geog.buffalo.edu/~rensch/geowepp/>. Accessed November 19, 2008.

Richardson, C.W. y D.A. Wright, 1984: *WGEN: a model for generating daily weather variables*, USA: Editorial Department of Agriculture, Agricultural Research Service.

Roose, E., 1994: *Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)*, Roma: Editorial Bulletin Pédologique de la FAO No. 70.

Rostagno, C., H. del Valle y D. Buschiazzi, 2004: *La erosión eólica*, Buenos Aires: Editorial CONICET-CENPAT.

SAGARPA, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, 2012: *Base de datos de rendimientos agrícolas, Distrito de Desarrollo Rural 05 Atlacomulco*, México: Editorial SAGARPA.

SARH, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1988: *Diagnóstico para el Manejo de Cuencas*, México: Editorial SARH.

SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2001: *Programa Nacional de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2001-2006*, México: Editorial SEMARNAT.

SIAP, Servicio e Información Agroalimentaria y Pesquera, 2014: *Cierres de producción agrícola por Estado*, México, Editorial SIAP- SAGARPA.

SMN, Sistema Meteorológico Nacional, 2012: *Base de datos estaciones climatológicas*, México: Editorial SMN.

Sorooshian S., H.V. Gupta y L.A. Bastidas, 1998: "Calibration of hidrologic Model Using Multi-Objectives and Visualization Techniques" en *Final Report on Project Proposal Number EAR-9418147*, EUA: Department of Hydrology and Water Resources, University of Arizona.

SRH, Secretaría de Recursos Hídricos, 1974: *Elementos de Escurrimiento Superficial*, México: Editorial SRH.

Stallings, J.H., 1982: *El suelo: su uso y mejoramiento*, México: Editorial Continental.

Torres, B.E., 2000: *Comparación de los modelos de simulación hidrológica SWRRB y SWAT en la cuenca "El Tejocote", Atlacomulco, Estado de México*, México: Tesis Maestría, Colegio de Postgraduados.

Torres, E., D. Fernández, J.L. Oropeza y E. Mejía, 2004: "Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca El Tejocote, Atlacomulco, Estado de México" en *Revista TERRA Latinoamericana vol. 22 núm, 4, octubre-diciembre, pp 437-444*, México: Universidad Autónoma Chapingo.

Tucci, C.E.M., 1998: *Modelos hidrológicos*, Brasil: Editorial Porto Alegre, UFRGS, Associação Brasileira de Recursos Hídricos.

Universidad de Chile, s/f: *Conservación de suelos*, Chile: Editorial Facultad de Ciencias Agronómicas.

Uribe, N., 2010: *Conceptos básicos y guía rápida para el usuario, Versión SWAT 2005*, Colombia: Editorial Centro Internacional de Agricultura Tropical.

Uribe, N. y M. Quintero, 2011: *Aplicación del Modelo Hidrológico SWAT (Soil Water Assessment Tool) a la cuenca del río Cañete*, Colombia: Editorial Centro Internacional de Agricultura Tropical.

USDA Soil Conservation Service, 1986: *National Engineering Handbook Section 4 Hydrology*, Chapter 19.

USDA Soil Conservation Service, 1972. *National Engineering Handbook Section 4 Hydrology*, Chapter 4-10.

van Griensven, A. y W. Bauwens, 2003: *Multiobjective autocalibration for semidistributed water quality models*, EUA: Editorial Water Resour. Res. 39(12).

Van Liew, M.W., J.G. Arnold y D.D. Bosch, 2005: *Problems and potential of autocalibrating a hydrologic model*, EUA: Editorial Trans. ASAE 48(3).

Varela, E., 1992: “Planificación–Acción en Cuencas Hidrográficas: un enfoque empírico desestructurado o estructurante” en *Seminario Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas* Medellín 20-23, España: AINSA.

Vásquez, G., 1997: *Consideraciones ambientales para la planificación de cuencas hidrográficas en áreas de influencia cafetera en Colombia*, Colombia: Editorial Crónica Forestal y del Medio Ambiente 12: 79–88.

Vélez, A., 1992: *Degradación del Medio Ambiente*, España: Editorial Ministerio de Cultura.

Wischmeier, W.H. y D.D. Smith, 1978: *Predicting rainfall losses: A guide to conservation planning*, Washington, D.C.: Editorial: USDA Agricultural Handbook N° 537.

White, M. J., R. D. Harmel, J. G. Arnold y J. R. Williams, 2012: *SWAT Check: A screening tool to assist users in the identification of potential model application problems*, EUA:

Editorial J. Environ. Quality (in press). Available at:  
<http://swatmodel.tamu.edu/software/swat-check>

Yarrow, M., s/f: *El Manejo Integrado de Cuencas Aplicaciones del Modelo SWAT; ecomanage: Integrated Ecological Coast Zone Management System*, Chile: Editorial LME-U Chile.

Yüksel, A., A.E. Akay, R. Gundogan, M. Reis y M. Cetiner, 2008: “Application of GeoWEPP for determining sediment yield and runoff in the Orcan Creek Watershed in Kahramanmaras” en *Revista Sensors* 8, 1222–1236, Turkey: Kahramanmaras Sutcu Imam University.

# ANEXOS

## A) BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA EL TEJOCOTE

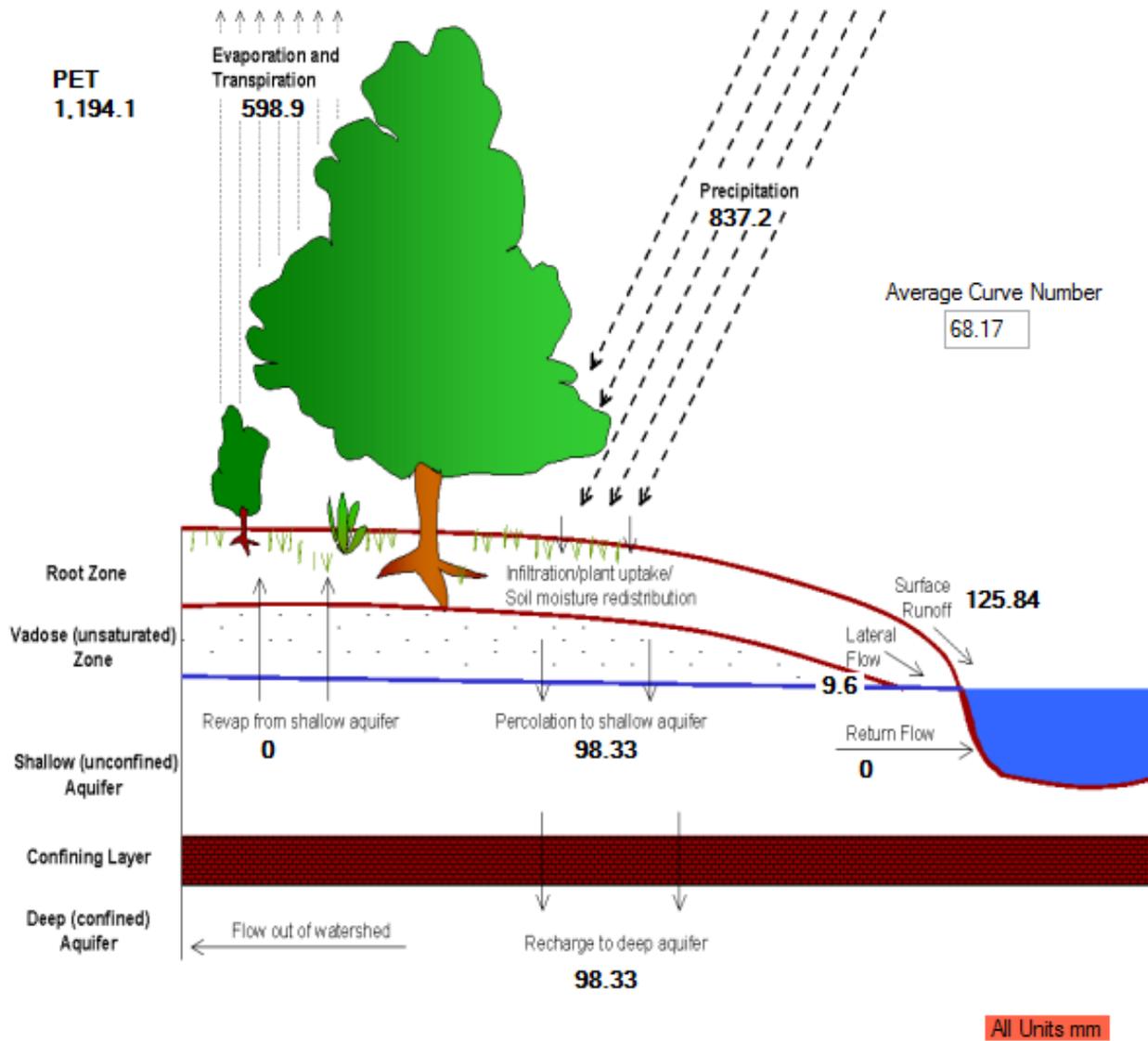


Figura 1. Ciclo hidrológico de la Cuenca El Tejocote

**Tabla 1. Resultados ciclo hidrológico de la cuenca El Tejocote**

AVE ANNUAL BASIN VALUES

PRECIP = 837.2 MM  
SNOW FALL = 0.00 MM  
SNOW MELT = 0.00 MM  
SUBLIMATION = 0.00 MM  
SURFACE RUNOFF Q = 125.84 MM  
LATERAL SOIL Q = 9.60 MM  
TILE Q = 0.00 MM  
GROUNDWATER (SHAL AQ) Q = 0.00 MM  
GROUNDWATER (DEEP AQ) Q = 93.83 MM  
REVAP (SHAL AQ => SOIL/PLANTS) = 0.00 MM  
DEEP AQ RECHARGE = 98.33 MM  
TOTAL AQ RECHARGE = 98.33 MM  
TOTAL WATER YLD = 231.91 MM  
PERCOLATION OUT OF SOIL = 106.27 MM  
ET = 598.9 MM  
PET = 1194.1MM  
TRANSMISSION LOSSES = 0.00 MM  
SEPTIC INFLOW = 0.00 MM  
TOTAL SEDIMENT LOADING = 7.344 TON/HA  
TILE FROM IMPOUNDED WATER = 0.000 (MM)  
EVAPORATION FROM IMPOUNDED WATER = 0.000 (MM)  
SEEPAGE INTO SOIL FROM IMPOUNDED WATER = 0.000 (MM)  
OVERFLOW FROM IMPOUNDED WATER = 0.000 (MM)

## B) HOJAS DE SALIDA DEL MODELO SWAT

**Tabla 2. Resultados de salida del modelo SWAT**

SWAT Mar 4 2014 VER 2012/Rev 622  
0/ 0 0: 0: 0

0/

General Input/Output section (file.cio):

10/28/2014 12:00:00 AM ARCGIS-SWAT interface AV

Number of years in  
run: 8  
Area of watershed: 176.085  
km2

SWAT Mar 4 2014 VER 2012/Rev 622

General Input/Output section (file.cio):

10/28/2014 12:00:00 AM ARCGIS-SWAT interface AV

Annual Summary for Watershed in year 1 of  
simulation

UNIT	PREC	SURQ	LAT	GWQ	LATE	PERCO	TILE	Q	SW	ET	PET	WATER	YIELD	NO3	NO3	NO3	NO3	N	P	P	TILENO
TIME	PREC	SURQ	Q	GWQ	LATE	PERCO	Q	SW	ET	PET	YIELD	D	SURQ	Q	PERC	CROP	nutrie	ORGANI	SOLUBL	ORGANI	3
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	-----	-----	(kg	n	---	-----	-----	(kg/ha)

SWAT Mar 4 2014 VER 2012/Rev 622

General Input/Output section (file.cio):

10/28/2014 12:00:00 AM ARCGIS-SWAT interface AV

Annual Summary for Watershed in year 2 of  
simulation

UNIT											WATER		NO3	NO3	NO3	NO3	N	P	P	TILENO
TIME	PREC	SURQ	LAT	PERCO		TILE					YIELD	SED	NO3	NO3	NO3	NO3	ORGANI	SOLUBL	ORGANI	3
	(mm)	(mm)	(mm)	GWQ	LATE	Q	SW	ET	PET	(mm)	(mm)	(mm)	SURQ	Q	PERC	CROP	TON	---	---	(kg/ha)
				(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	---	---	(kg	nutrie	---	---	---	(kg/ha)
1	4.19	0	0.35	0	0	0	221.23	13.02	68.58	0.88	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0
2	5.31	0	0.25	0	0.54	0	230.63	14.56	83.81	0.71	0	0	0	0.01	0.17	0	0	0	0	0
3	3.79	0.03	0.25	0	11.16	0	201.34	21.82	115.9	0.93	0	0	0	0.01	1.03	7.31	0	0	0	0
4	4.41	0.01	0.2	0	4.17	0	182.17	28.95	117	1.29	0	0	0	0.01	0.18	7.54	0	0	0	0
5	66.55	3.87	0.22	0	1.23	0	195.71	47.19	115.2	5.6	0.38	0.15	0.01	0.04	25.11	0.07	0.04	0.02	0	0
6	213.11	26.46	0.47	0	2.86	0	295.03	81.34	108.4	26.91	1.54	0.09	0.02	0.19	15.56	0.43	0.22	0.1	0	0
7	153.1	20.88	0.98	0	10.42	0	315.71	97.91	125.8	24.72	0.83	0.24	0.04	0.26	27.6	0.25	0.18	0.05	0	0
8	137.04	15.58	1.05	0	2.85	0	334.78	97.63	115.9	19.61	0.7	0.05	0.04	0.26	8.46	0.22	0.13	0.05	0	0
9	176.36	29.92	1.31	0	24.51	0	370.46	81.93	94.31	33.81	2.11	0.09	0.05	6.41	3.22	0.31	0.17	0.07	0	0
10	92.89	18.09	1.34	0	12.87	0	362.48	68.37	97.42	23.55	0.9	0.05	0.04	2.21	0.91	0.21	0.1	0.05	0	0
11	8.29	0.15	1.08	0	4.2	0	339.63	26.68	78.39	6.85	0	0	0.03	0.07	0.15	0	0	0	0	0
12	13.8	0.11	0.82	0	0.16	0	334.87	18.19	67.75	7.3	0	0	0.02	0	0.31	0	0	0	0	0
2000	878.84	115.11	8.31	0	74.96	0	334.87	597.59	1188	152.18	6.47	0.68	0.26	10.84	96.17	1.49	0.84	0.33	0	0

SWAT Mar 4 2014 VER 2012/Rev 622

General Input/Output section (file.cio):

10/28/2014 12:00:00 AM ARCGIS-SWAT interface AV

Annual Summary for Watershed in year 3 of simulation

UNIT											WATER		NO3	NO3	NO3	NO3	N	P	P	TILENO
TIME	PREC	SURQ	LAT	PERCO		TILE					YIELD	SED	NO3	NO3	NO3	NO3	ORGANI	SOLUBL	ORGANI	3
	(mm)	(mm)	(mm)	GWQ	LATE	Q	SW	ET	PET	(mm)	(mm)	(mm)	SURQ	Q	PERC	CROP	TON	---	---	(kg/ha)
				(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	---	---	(kg	nutrie	---	---	---	(kg/ha)
1	4.92	0.05	0.63	0	0.02	0	328.6	11.06	78.57	7.08	0.01	0	0	0.02	0	0	0	0	0	0
2	6.58	0.02	0.45	0	0.01	0	323.49	11.6	92.38	5.97	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0

3	8.13	0.13	0.47	0	13.62	0	313.44	23.36	111.9	6.47	0	0	0.02	1.1	7.23	0	0	0	0
4	32.76	0.42	0.4	0	6.44	0	312.86	35.73	105.2	6.54	0.01	0	0.01	0.2	16.67	0	0	0	0
5	76	3.56	0.43	0	2.82	0	317.59	64.17	123.6	10.22	0.13	0.27	0.02	0.04	28.47	0.09	0.04	0.02	0
6	201.75	34.84	0.55	0	13.66	0	393.02	74.81	99.33	39.62	2.36	0.16	0.03	1.33	14.43	1.04	0.39	0.21	0
7	213.4	38.29	1.22	0	53.3	0	412.32	97.17	112.2	46.29	1.49	1.43	0.04	3.35	26.78	0.72	0.37	0.15	0
8	180.97	41.43	1.72	0	45.3	0	389.52	112.96	132.3	52.48	2.84	0.21	0.04	1.62	14.94	0.6	0.28	0.13	0
9	108.7	16.6	1.76	0	16.64	0	385.06	77.48	92.42	31.48	0.81	0.07	0.03	0.69	1.78	0.21	0.11	0.04	0
10	19.33	1.2	1.46	0	1.82	0	338.55	62.59	96.43	18.28	0.06	0.01	0.02	0.02	0.61	0.02	0.01	0	0
11	9.7	0.09	1.03	0	0.13	0	325.69	22.26	79.95	16.32	0	0	0.02	0	0.11	0	0	0	0
12	2.75	0	0.81	0	0.05	0	315.02	13.35	67.33	16.02	0	0	0.01	0	0.15	0	0	0	0
2001	864.98	136.64	10.94	0	153.81	0	315.02	606.54	1192	256.77	7.71	2.16	0.28	8.36	111.2	2.69	1.21	0.55	0

SWAT Mar 4 2014 VER 2012/Rev 622

General Input/Output section (file.cio):

10/28/2014 12:00:00 AM ARCGIS-SWAT interface AV

Annual Summary for Watershed in year 4 of simulation

UNIT	PREC	SURQ	LAT Q	GWQ	PERCO LATE	TILE Q	SW	ET	PET	WATER YIELD	SED YIELD	NO3 SURQ	NO3 LAT Q	NO3 PERC	NO3 CROP nutrient	N ORGANIC	P SOLUBLE	P ORGANIC	TILENO 3
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	-----	-----	(kg)	---	Ton(Ha)--	-----	-----	(kg/ha)
1	10.71	0.24	0.64	0	0.02	0	318.66	6.68	79.04	14.98	0.01	0	0.01	0	0	0	0	0	0
2	9.69	0.04	0.47	0	0.01	0	319.54	8.65	89.38	12.06	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0
3	0.48	0	0.49	0	11.85	0	309.58	17.59	113.6	12.09	0	0	0.01	0.82	5.45	0	0	0	0
4	40.44	1.14	0.41	0	4.78	0	323.26	30	99.96	11.78	0.05	0.01	0.01	0.18	15.21	0.01	0	0	0
5	62.23	5.8	0.44	0	2.69	0	323.21	53.26	115.7	16.02	0.41	0.25	0.02	0.06	38.28	0.26	0.07	0.05	0
6	255.22	75.72	0.84	0	37.98	0	379.86	80.24	105.2	84.28	3.68	0.33	0.04	0.63	17.18	2.1	0.85	0.43	0
7	179.11	32.37	1.2	0	18.13	0	404.93	100.5	125.4	44.07	2	1.74	0.03	0.34	29.69	0.64	0.32	0.13	0
8	104.33	14.82	1.24	0	7.26	0	385.12	100.6	119.4	27.58	1.05	0.1	0.02	0.16	14.83	0.25	0.12	0.05	0

9	141.17	25.89	1.45	0	29.12	0	386.07	81.08	97.07	39.95	1.21	0.11	0.02	0.42	1.63	0.35	0.17	0.07	0
10	144.32	38.25	1.83	0	43.92	0	387.68	56.85	81.58	54.07	1.29	0.15	0.03	0.81	1.81	0.51	0.24	0.11	0
11	35.63	2.97	1.57	0	11.61	0	378.34	29.32	73.01	20	0.18	0.02	0.02	0.11	0.37	0.1	0.01	0.03	0
12	1.98	0	1.21	0	0.73	0	361.36	18.22	69.64	17.97	0	0	0.01	0.01	0.22	0	0	0	0
2002	985.32	197.23	11.79	0	168.09	0	361.36	583	1169	354.84	9.9	2.7	0.24	3.55	124.7	4.23	1.78	0.87	0

SWAT Mar 4 2014 VER 2012/Rev 622

General Input/Output section (file.cio):

10/28/2014 12:00:00 AM ARCGIS-SWAT interface AV

Annual Summary for Watershed in year 5 of simulation

UNIT	PREC	SURQ	LAT Q	PERCO GWQ	TILE Q	SW	ET	PET	WATER YIELD	SED YIELD	NO3 SURQ	NO3 LAT Q	NO3 PERC	NO3 CROP	N ORGANIC	P SOLUBLE	P ORGANIC	TILENO3	
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	-----	-----	(kg)	nutrie n	Ton/Ha)--	-----	-----	(kg/ha)	
1	4.12	0.01	0.9	0	0.11	0	355.58	9.76	78.49	17.3	0	0	0.01	0	0	0	0	0	
2	4.85	0.04	0.64	0	0.04	0	349.33	10.98	92.56	14.56	0	0	0.01	0	0	0	0	0	
3	3.98	0.02	0.62	0	13.1	0	338.75	20.44	109	14.91	0	0	0.01	0.93	6.57	0	0	0	
4	36.27	1.36	0.51	0	5.05	0	345.13	32.74	111.5	14.57	0.05	0.01	0.01	0.15	17.72	0.03	0	0.01	
5	45.14	2.82	0.49	0	2.41	0	324.48	60.21	131	16.02	0.17	0.22	0.01	0.05	37.9	0.14	0.04	0.02	
6	132.22	18.17	0.57	0	3.22	0	354.26	79.5	113.9	29.73	1.37	0.32	0.02	0.07	25.48	0.69	0.24	0.13	
7	178.39	27.2	0.82	0	7.25	0	399.87	95.69	113.9	38.51	1.74	1.37	0.02	0.2	28.8	0.77	0.3	0.14	
8	110.05	18.44	0.91	0	7.29	0	378.98	103.66	130.2	29.29	1.19	0.13	0.02	0.18	16.35	0.55	0.18	0.1	
9	166.25	37.52	1.37	0	35.57	0	388.95	78.1	95.37	48.54	2.46	0.16	0.02	0.73	2.25	0.57	0.23	0.12	
10	51.19	10.33	1.5	0	15.7	0	350.43	61.89	93.36	22.8	0.44	0.03	0.02	0.16	0.58	0.11	0.06	0.02	
11	3.68	0.19	1.17	0	2.8	0	326.87	24.15	82.18	12.66	0	0	0.01	0.01	0.16	0.01	0	0	
12	13.11	0.26	0.91	0	0.22	0	324.99	14.39	67.95	12.5	0.01	0	0.01	0	0.3	0	0	0	
2003	749.24	116.35	10.4	0	92.75	0	324.99	591.51	1219	271.38	7.43	2.25	0.18	2.47	136.1	2.86	1.05	0.54	0

SWAT Mar 4 2014 VER 2012/Rev 622

General Input/Output section (file.cio):

10/28/2014 12:00:00 AM ARCGIS-SWAT interface AV

Annual Summary for Watershed in year 6 of simulation

UNIT	PREC	SURQ	LAT Q	PERCO GWQ	TILE Q	SW	ET	PET	WATER YIELD	SED YIELD	NO3 SURQ	NO3 LAT Q	NO3 PERC	NO3 CROP nutrient	N ORGANIC	P SOLUBLE	P ORGANIC	TILENO3	
TIME	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	-----	-----	(kg)	---	Ton/Ha)---	-----	-----	(kg/ha)	
1	27.24	0.33	0.72	0	0.07	0	337.65	13.94	64.45	11.8	0.01	0.01	0	0	0	0	0	0	
2	0	0	0.54	0	0.86	0	343.27	12.68	98.1	9.72	0	0	0.01	0.15	0	0	0	0	
3	25.65	0.34	0.51	0	11.44	0	332.19	24.63	109.9	9.89	0.01	0	0.01	0.81	5.9	0	0	0	
4	19.6	1.03	0.43	0	5.38	0	322.91	31.84	114.9	9.57	0.01	0.03	0.01	0.21	20.04	0.01	0	0	
5	64.65	3.16	0.45	0	2.62	0	324.35	56.75	112	11.87	0.16	0.21	0.01	0.07	40.02	0.11	0.04	0.02	
6	199.42	28.21	0.6	0	10.54	0	398.44	83.78	103.6	35.83	1.59	0.19	0.02	0.22	21.67	1.11	0.36	0.19	
7	139.35	22.33	0.92	0	16.63	0	390.67	106.09	127.7	30.63	1.61	1.7	0.02	0.23	33.73	0.62	0.23	0.12	
8	161.61	26.67	1.17	0	22.03	0	389.63	110.69	129.5	36.71	2.03	0.2	0.02	0.36	14.63	0.62	0.22	0.12	
9	141.1	23.85	1.4	0	26.47	0	388.7	88.09	101.2	34.58	1.8	0.13	0.02	0.58	2.42	0.58	0.19	0.1	
10	59.11	6.88	1.42	0	9.49	0	364.17	66.2	91.47	19.53	0.25	0.04	0.02	0.12	2.22	0.17	0.06	0.03	
11	17.69	0.7	1.07	0	1.02	0	352.9	27.06	73.71	12.87	0.04	0.02	0.01	0	0.63	0.02	0	0	
12	12.48	0.48	0.84	0	0.12	0	346.71	17.97	66.8	12.68	0.04	0.02	0.01	0	0.2	0.01	0	0	
2004	867.91	113.98	10.07	0	106.67	0	346.71	639.71	1193	235.66	7.55	2.54	0.19	2.77	141.5	3.24	1.1	0.58	0

SWAT Mar 4 2014 VER 2012/Rev 622

General Input/Output section (file.cio):

10/28/2014 12:00:00 AM ARCGIS-SWAT interface AV

Annual Summary for Watershed in year 7 of simulation

UNIT											WATER		NO3	NO3	NO3	NO3	N	P	P	TILENO
TIME	PREC	SURQ	LAT	PERCO	TILE					YIELD	SED	NO3	NO3	NO3	NO3	ORGANI	SOLUBL	ORGANI	3	
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	(kg/ha)	
1	14.58	0.27	0.65	0	0.03	0	348.07	12.79	77.98	11.58	0.01	0.02	0.01	0	0	0	0	0	0	
2	6.22	0.47	0.48	0	0.06	0	340.52	13.18	88.58	9.74	0.01	0.02	0.01	0	0	0.03	0	0	0	
3	21.54	0.47	0.51	0	14.88	0	339.34	26.02	105.8	10	0.01	0.01	0.01	1.16	6.05	0.02	0	0	0	
4	4.78	0.01	0.43	0	4.77	0	315.03	33.84	120.8	8.75	0	0	0.01	0.16	23.68	0	0	0	0	
5	10.91	0.4	0.38	0	1.35	0	274.07	50.01	138.7	9.3	0.02	0.17	0.01	0.02	39.2	0.02	0.01	0	0	
6	15.48	0.49	0.31	0	0.04	0	224.98	63.91	136.8	8.27	0.02	0.02	0.01	0	25.44	0.02	0.01	0	0	
7	166.99	23.64	0.47	0	0.39	0	269.73	96.4	133.6	30.55	1.61	0.58	0.02	0.03	36.04	0.75	0.25	0.14	0	
8	155.89	15.51	0.68	0	1.87	0	319.95	86.08	98.68	22.3	1.22	0.08	0.02	0.08	4.81	0.43	0.14	0.08	0	
9	73.04	11.21	0.82	0	3.59	0	289.44	87.4	110.1	17.84	0.52	0.05	0.02	0.08	1.97	0.4	0.12	0.07	0	
10	61.66	5.44	0.78	0	2.4	0	285.35	57.06	90.32	11.55	0.31	0.02	0.01	0.11	1.12	0.13	0.05	0.02	0	
11	23.77	0.29	0.6	0	0.08	0	284.31	24.24	72.94	5.36	0.01	0	0.01	0	0.37	0	0	0	0	
12	8.52	0.07	0.48	0	0.02	0	277.23	15.44	67.13	4.66	0	0	0.01	0	0.15	0	0	0	0	
2005	563.38	58.28	6.6	0	29.48	0	277.23	566.37	1241	149.89	3.73	0.99	0.16	1.66	138.8	1.8	0.58	0.32	0	

SWAT Mar 4 2014 VER 2012/Rev 622

General Input/Output section (file.cio):

10/28/2014 12:00:00 AM ARCGIS-SWAT interface AV

Annual Summary for Watershed in year 8 of simulation

UNIT											WATER		NO3	NO3	NO3	NO3	N	P	P	TILENO
TIME	PREC	SURQ	LAT	PERCO	TILE					YIELD	SED	NO3	NO3	NO3	NO3	ORGANI	SOLUBL	ORGANI	3	
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	(kg/ha)	
1	12.25	0.08	0.39	0	0.01	0	278.32	10.96	77.89	4.04	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	
2	0.22	0	0.29	0	0.01	0	268.47	10.06	93.11	3.09	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	

3	15.94	0.21	0.31	0	6.95	0	275.22	20.98	108.2	3.33	0.01	0	0.01	0.45	5.25	0	0	0	0
4	40.94	1.01	0.28	0	5.02	0	287.67	31.66	96.15	3.83	0.04	0	0.01	0.24	17.43	0.01	0	0	0
5	78.28	2.57	0.38	0	4.01	0	293.2	65.45	106.6	5.9	0.12	0.23	0.01	0.09	40.96	0.06	0.02	0.01	0
6	71.81	9.02	0.4	0	0.72	0	280.76	73.83	124.8	12.1	0.8	0.07	0.01	0.01	20.16	0.34	0.11	0.07	0
7	157.2	21.69	0.48	0	1.32	0	323.01	90.21	119.2	25.04	1.14	0.99	0.02	0.02	30.07	0.83	0.26	0.15	0
8	190.28	30.27	0.96	0	21.28	0	361.28	96.39	105.2	34.31	1.6	0.19	0.03	0.43	19.54	1.2	0.36	0.21	0
9	148.81	24.92	1.2	0	18.73	0	379.79	83.53	96.58	30.18	2.14	0.1	0.02	0.32	3.12	0.77	0.24	0.15	0
10	189.26	49.51	1.59	0	41.2	0	407.21	66.12	83.92	55.66	2.58	0.17	0.04	1.18	1.56	1.62	0.46	0.32	0
11	44.48	3.99	1.59	0	17.48	0	392.29	37.03	74.58	13.72	0.18	0.03	0.02	0.12	0.19	0.1	0.02	0.03	0
12	1.49	0	1.22	0	1.43	0	371.29	21.05	68.98	11.44	0	0	0.02	0	0.28	0	0	0	0
2006	950.96	143.27	9.11	0	118.16	0	371.29	607.27	1155	202.67	8.62	1.79	0.2	2.87	138.6	4.92	1.47	0.94	0

**Tabla 3. Producción de escurrimientos superficiales por subcuenca (mm)**

<b>Subcuenca</b>	<b>2000</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>Total general</b>
1	0.50	0.61	0.78	0.33	0.33	0.16	0.46	3.19
2	0.32	0.50	0.64	0.30	0.23	0.13	0.29	2.42
3	0.29	0.58	1.38	1.41	1.11	0.82	0.69	6.27
4	1.10	1.34	1.80	0.73	0.73	0.32	1.04	7.06
5	1.53	2.20	3.57	2.34	1.99	1.24	1.87	14.75
6	1.09	1.58	1.93	0.97	0.84	0.54	0.98	7.93
7	2.61	3.77	5.49	3.29	2.81	1.76	2.84	22.58
8	0.92	1.31	1.74	0.82	0.71	0.40	0.86	6.75
9	3.51	5.07	7.22	4.09	3.50	2.15	3.69	29.24
10	4.04	5.95	8.45	5.68	4.98	3.03	4.69	36.82
11	1.14	1.77	2.21	1.18	0.97	0.67	1.09	9.03
12	5.80	8.73	11.87	7.57	6.54	4.15	6.36	51.02
13	0.60	1.02	1.46	0.69	0.50	0.30	0.63	5.20
14	6.36	9.74	13.33	8.23	7.01	4.42	6.95	56.05
15	0.22	0.47	0.63	0.36	0.21	0.17	0.23	2.28
16	0.48	1.30	1.92	1.07	0.54	0.45	0.54	6.29
17	6.80	11.00	15.22	9.27	7.52	4.83	7.46	62.10
18	6.90	11.43	15.92	9.61	7.69	4.94	7.59	64.09
19	0.14	0.46	0.74	0.38	0.21	0.15	0.17	2.25
20	0.54	0.89	1.24	1.59	1.49	0.90	1.01	7.65
21	0.12	0.46	0.69	0.45	0.16	0.18	0.15	2.20
22	0.39	0.53	0.67	0.82	0.74	0.41	0.64	4.20
23	7.53	13.00	18.28	10.82	8.37	5.42	8.30	71.72
24	0.88	1.29	1.69	2.08	1.91	1.12	1.48	10.44
25	0.24	0.39	0.57	0.73	0.66	0.40	0.43	3.42
26	0.61	1.43	2.13	1.11	0.64	0.45	0.68	7.04
27	8.87	15.28	21.39	14.73	12.00	7.48	10.89	90.64
28	9.99	17.04	23.80	18.20	15.68	9.98	13.35	108.06
29	0.59	1.10	1.63	2.51	2.81	2.02	1.67	12.33
<b>Total general</b>	<b>74.08</b>	<b>120.28</b>	<b>168.39</b>	<b>111.35</b>	<b>92.87</b>	<b>58.99</b>	<b>87.02</b>	<b>712.98</b>

### C) ANEXO GENERADORES CLIMÁTICOS

**Tabla 4. Estadísticas climatológicas de la estación 15001 Acambay**

STATION	WLATITUDE	WLONGITUDE	WELEV	MESES											
15001	19.57	-99.5	2388	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
TMPMX1	20.3	22.0	24.1	25.7	25.2	23.2	21.7	21.9	21.5	21.1	21.1	20.3			
TMPMN1	2.1	2.9	5.1	6.6	7.7	8.7	8.4	8.4	8.1	6.4	4.0	2.8			
TMPSTDMX1	3.1	2.6	3.2	3.2	3.2	3.2	2.2	2.3	2.4	2.8	3.4	3.5			
TMPSTDMN1	2.5	2.1	2.1	2.0	1.8	2.1	1.9	1.9	2.4	2.8	2.8	2.4			
PCPMM1	14.9	8.1	12.8	38.6	83.2	165.5	170.6	156.2	130.9	65.7	15.2	13.3			
PCPSTD1	2.3	2.4	2.0	4.0	6.6	9.2	8.5	8.4	8.8	6.2	2.3	2.0			
PCPSKW1	7.8	6.6	7.4	4.6	5.8	2.5	2.6	2.4	3.3	4.3	7.0	8.0			
PR_W1_1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1	0.0			
PR_W2_1	0.5	0.3	0.4	0.4	0.5	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.3	0.5			
PCPD1	2.9	1.7	2.5	5.6	9.8	14.5	16.6	15.0	12.4	7.2	2.7	2.9			
RAINHHMX1	2.4	2.4	4.0	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4			
SOLARAV1	16.0	19.0	20.0	19.0	20.0	19.0	19.0	19.0	17.0	17.0	16.0	15.0			
WNDVAV1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			

**Tabla 5. Estadísticas climatológicas de la estación 15029 Atlacomulco**

STATION	WLATITUDE	WLONGITUDE	WELEV	MESES											
15029	19.51	-99.55	2487	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
TMPMX1	20.6	21.9	23.4	25.2	25.2	22.8	21.2	21.1	21.1	21.3	21.1	20.5			
TMPMN1	-0.4	0.7	2.8	5.1	7.3	9.3	9.3	9.2	8.9	5.9	2.4	0.5			
TMPSTDMX1	3.0	3.2	3.1	3.4	3.2	3.2	2.3	2.0	2.3	2.6	2.5	2.6			
TMPSTDMN1	2.8	2.7	2.5	2.3	2.1	2.1	1.7	1.8	2.4	3.3	3.3	2.8			
PCPMM1	10.5	8.4	10.0	22.8	55.2	140.6	189.1	165.5	130.8	59.2	16.8	9.4			
PCPSTD1	2.3	1.7	1.7	3.0	5.7	9.2	10.5	9.6	8.5	5.3	2.8	1.4			
PCPSKW1	9.9	10.3	8.7	6.0	7.7	3.1	3.3	3.0	2.9	3.8	8.3	7.0			
PR_W1_1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.3	0.1	0.1	0.0			
PR_W2_1	0.4	0.3	0.3	0.4	0.5	0.7	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4			
PCPD1	1.8	2.3	2.6	4.6	9.5	14.6	18.0	16.8	13.9	7.9	3.3	2.8			
RAINHHMX1	2.3	2.3	3.9	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3			
SOLARAV1	16.0	19.0	20.0	20.0	20.0	19.0	19.0	19.0	17.0	18.0	16.0	15.0			
WNDVAV1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			

**Tabla 6. Estadísticas climatológicas de la estación 15251 Atlacomulco (Prepa)**

STATION	WLATITUDE	WLONGITUDE	WELEV	MESES											
15251	19.47	-99.52	2579	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
TMPMX1	20.0	21.4	23.6	25.4	25.2	22.9	21.0	20.9	20.8	21.1	20.8	20.2			
TMPMN1	-2.2	-0.6	1.4	3.8	6.3	7.8	7.7	7.5	7.2	4.4	0.3	-1.0			
TMPSTDMX1	2.2	2.3	2.7	2.9	2.9	2.6	1.7	1.4	1.8	1.9	2.0	2.0			
TMPSTDMN1	2.7	2.6	2.5	2.0	2.1	2.5	2.2	2.2	2.7	3.4	3.2	3.1			
PCPMM1	13.1	8.1	11.6	17.0	50.0	126.2	153.8	140.8	121.0	64.3	19.1	11.5			
PCPSTD1	2.4	1.4	2.3	2.4	4.3	7.7	7.8	7.5	7.5	6.1	2.6	2.0			
PCPSKW1	7.7	6.7	9.9	6.4	4.5	2.9	2.3	2.6	2.7	2.8	5.8	8.8			
PR_W1_1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.3	0.1	0.1	0.1			
PR_W2_1	0.4	0.3	0.2	0.4	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.4	0.3			
PCPD1	1.8	2.1	2.1	3.3	8.0	13.7	17.0	15.7	12.8	7.8	3.2	2.2			
RAINHHMX1	2.2	2.2	3.7	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2			
SOLARAV1	16.0	19.0	20.0	19.0	20.0	19.0	19.0	19.0	17.0	17.0	16.0	15.0			
WNDVAV1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			

**Tabla 7. Estadísticas climatológicas de la estación 15261 El Jasmin**

STATION	WLATITUDE	WLONGITUDE	WELEV	MESES											
15261	20.01	-99.52	2693	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
TMPMX1	18.0	19.9	22.2	23.9	24.3	22.2	20.1	20.0	19.1	18.7	19.0	18.2			
TMPMN1	2.0	2.8	4.4	6.2	7.4	8.4	8.3	8.2	7.8	5.5	3.6	2.6			
TMPSTDMX1	2.5	2.7	2.8	2.9	2.9	2.8	2.1	2.0	2.0	2.5	2.3	2.5			
TMPSTDMN1	2.0	2.0	2.1	2.1	2.1	2.1	1.5	1.7	2.1	2.6	2.3	2.2			
PCPMM1	16.1	11.7	11.7	15.7	29.2	81.6	174.9	163.1	154.7	123.7	57.4	29.2			
PCPSTD1	2.5	2.2	2.8	2.4	6.0	8.9	17.4	9.7	9.1	8.2	5.1	3.6			
PCPSKW1	6.1	8.0	15.1	5.7	18.7	5.8	8.6	2.9	2.3	2.7	3.3	5.3			
PR_W1_1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1			
PR_W2_1	0.5	0.3	0.3	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5			
PCPD1	2.0	1.6	1.7	2.0	3.3	5.7	10.4	12.5	11.7	9.5	5.4	3.3			
RAINHHMX1	2.5	2.5	4.1	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5			
SOLARAV1	16.0	19.0	20.0	19.0	20.0	19.0	19.0	19.0	17.0	17.0	16.0	15.0			
WNDVAV1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			

**Tabla 8. Temperatura máxima mensual promedio por subcuenca**

SUBBASIN	STATION	TMPMX1	TMPMX2	TMPMX3	TMPMX4	TMPMX5	TMPMX6	TMPMX7	TMPMX8	TMPMX9	TMPMX10	TMPMX11	TMPMX12
1	15001	20.267	21.980	24.091	25.730	25.168	23.237	21.725	21.854	21.539	21.143	21.119	20.300
2	15001	20.267	21.980	24.091	25.730	25.168	23.237	21.725	21.854	21.539	21.143	21.119	20.300
3	15261	18.020	19.929	22.210	23.887	24.270	22.187	20.081	20.047	19.109	18.741	19.036	18.230
4	15001	20.267	21.980	24.091	25.730	25.168	23.237	21.725	21.854	21.539	21.143	21.119	20.300
5	15001	20.267	21.980	24.091	25.730	25.168	23.237	21.725	21.854	21.539	21.143	21.119	20.300
6	15001	20.267	21.980	24.091	25.730	25.168	23.237	21.725	21.854	21.539	21.143	21.119	20.300
7	15001	20.267	21.980	24.091	25.730	25.168	23.237	21.725	21.854	21.539	21.143	21.119	20.300
8	15001	20.267	21.980	24.091	25.730	25.168	23.237	21.725	21.854	21.539	21.143	21.119	20.300
9	15001	20.267	21.980	24.091	25.730	25.168	23.237	21.725	21.854	21.539	21.143	21.119	20.300
10	15001	20.267	21.980	24.091	25.730	25.168	23.237	21.725	21.854	21.539	21.143	21.119	20.300
11	15001	20.267	21.980	24.091	25.730	25.168	23.237	21.725	21.854	21.539	21.143	21.119	20.300
12	15001	20.267	21.980	24.091	25.730	25.168	23.237	21.725	21.854	21.539	21.143	21.119	20.300
13	15001	20.267	21.980	24.091	25.730	25.168	23.237	21.725	21.854	21.539	21.143	21.119	20.300
14	15001	20.267	21.980	24.091	25.730	25.168	23.237	21.725	21.854	21.539	21.143	21.119	20.300
15	15001	20.267	21.980	24.091	25.730	25.168	23.237	21.725	21.854	21.539	21.143	21.119	20.300
16	15001	20.267	21.980	24.091	25.730	25.168	23.237	21.725	21.854	21.539	21.143	21.119	20.300
17	15001	20.267	21.980	24.091	25.730	25.168	23.237	21.725	21.854	21.539	21.143	21.119	20.300
18	15001	20.267	21.980	24.091	25.730	25.168	23.237	21.725	21.854	21.539	21.143	21.119	20.300
19	15001	20.267	21.980	24.091	25.730	25.168	23.237	21.725	21.854	21.539	21.143	21.119	20.300
20	15029	20.630	21.914	23.377	25.179	25.167	22.770	21.229	21.145	21.148	21.268	21.128	20.464
21	15001	20.267	21.980	24.091	25.730	25.168	23.237	21.725	21.854	21.539	21.143	21.119	20.300
22	15029	20.630	21.914	23.377	25.179	25.167	22.770	21.229	21.145	21.148	21.268	21.128	20.464
23	15001	20.267	21.980	24.091	25.730	25.168	23.237	21.725	21.854	21.539	21.143	21.119	20.300
24	15029	20.630	21.914	23.377	25.179	25.167	22.770	21.229	21.145	21.148	21.268	21.128	20.464
25	15029	20.630	21.914	23.377	25.179	25.167	22.770	21.229	21.145	21.148	21.268	21.128	20.464
26	15001	20.267	21.980	24.091	25.730	25.168	23.237	21.725	21.854	21.539	21.143	21.119	20.300

Continuación Tabla 9.

SUBBASIN	STATION	TMPMX1	TMPMX2	TMPMX3	TMPMX4	TMPMX5	TMPMX6	TMPMX7	TMPMX8	TMPMX9	TMPMX10	TMPMX11	TMPMX12
27	15029	20.630	21.914	23.377	25.179	25.167	22.770	21.229	21.145	21.148	21.268	21.128	20.464
28	15029	20.630	21.914	23.377	25.179	25.167	22.770	21.229	21.145	21.148	21.268	21.128	20.464
29	15251	19.955	21.409	23.628	25.398	25.176	22.878	21.015	20.927	20.811	21.118	20.809	20.173

**Tabla 9. Temperatura mínima mensual promedio por subcuenca**

SUBBASIN	STATION	TMPMN1	TMPMN2	TMPMN3	TMPMN4	TMPMN5	TMPMN6	TMPMN7	TMPMN8	TMPMN9	TMPMN10	TMPMN11	TMPMN12
1	15001	2.092	2.906	5.063	6.595	7.684	8.661	8.445	8.408	8.137	6.447	4.047	2.818
2	15001	2.092	2.906	5.063	6.595	7.684	8.661	8.445	8.408	8.137	6.447	4.047	2.818
3	15261	1.966	2.796	4.412	6.206	7.367	8.415	8.325	8.234	7.802	5.534	3.622	2.621
4	15001	2.092	2.906	5.063	6.595	7.684	8.661	8.445	8.408	8.137	6.447	4.047	2.818
5	15001	2.092	2.906	5.063	6.595	7.684	8.661	8.445	8.408	8.137	6.447	4.047	2.818
6	15001	2.092	2.906	5.063	6.595	7.684	8.661	8.445	8.408	8.137	6.447	4.047	2.818
7	15001	2.092	2.906	5.063	6.595	7.684	8.661	8.445	8.408	8.137	6.447	4.047	2.818
8	15001	2.092	2.906	5.063	6.595	7.684	8.661	8.445	8.408	8.137	6.447	4.047	2.818
9	15001	2.092	2.906	5.063	6.595	7.684	8.661	8.445	8.408	8.137	6.447	4.047	2.818
10	15001	2.092	2.906	5.063	6.595	7.684	8.661	8.445	8.408	8.137	6.447	4.047	2.818
11	15001	2.092	2.906	5.063	6.595	7.684	8.661	8.445	8.408	8.137	6.447	4.047	2.818
12	15001	2.092	2.906	5.063	6.595	7.684	8.661	8.445	8.408	8.137	6.447	4.047	2.818
13	15001	2.092	2.906	5.063	6.595	7.684	8.661	8.445	8.408	8.137	6.447	4.047	2.818
14	15001	2.092	2.906	5.063	6.595	7.684	8.661	8.445	8.408	8.137	6.447	4.047	2.818
15	15001	2.092	2.906	5.063	6.595	7.684	8.661	8.445	8.408	8.137	6.447	4.047	2.818
16	15001	2.092	2.906	5.063	6.595	7.684	8.661	8.445	8.408	8.137	6.447	4.047	2.818

Continuación Tabla 10.

SUBBASIN	STATION	TMPMN1	TMPMN2	TMPMN3	TMPMN4	TMPMN5	TMPMN6	TMPMN7	TMPMN8	TMPMN9	TMPMN10	TMPMN11	TMPMN12
17	15001	2.092	2.906	5.063	6.595	7.684	8.661	8.445	8.408	8.137	6.447	4.047	2.818
18	15001	2.092	2.906	5.063	6.595	7.684	8.661	8.445	8.408	8.137	6.447	4.047	2.818
19	15001	2.092	2.906	5.063	6.595	7.684	8.661	8.445	8.408	8.137	6.447	4.047	2.818
20	15029	-0.411	0.675	2.792	5.061	7.326	9.335	9.264	9.222	8.933	5.921	2.423	0.539
21	15001	2.092	2.906	5.063	6.595	7.684	8.661	8.445	8.408	8.137	6.447	4.047	2.818
22	15029	-0.411	0.675	2.792	5.061	7.326	9.335	9.264	9.222	8.933	5.921	2.423	0.539
23	15001	2.092	2.906	5.063	6.595	7.684	8.661	8.445	8.408	8.137	6.447	4.047	2.818
24	15029	-0.411	0.675	2.792	5.061	7.326	9.335	9.264	9.222	8.933	5.921	2.423	0.539
25	15029	-0.411	0.675	2.792	5.061	7.326	9.335	9.264	9.222	8.933	5.921	2.423	0.539
26	15001	2.092	2.906	5.063	6.595	7.684	8.661	8.445	8.408	8.137	6.447	4.047	2.818
27	15029	-0.411	0.675	2.792	5.061	7.326	9.335	9.264	9.222	8.933	5.921	2.423	0.539
28	15029	-0.411	0.675	2.792	5.061	7.326	9.335	9.264	9.222	8.933	5.921	2.423	0.539
29	15251	-2.191	-0.633	1.392	3.849	6.330	7.787	7.685	7.461	7.176	4.376	0.346	-1.030

**Tabla 10. Valores de radiación solar por subcuenca**

SUBBASIN	STATION	SOLARAV1	SOLARAV2	SOLARAV3	SOLARAV4	SOLARAV5	SOLARAV6	SOLARAV7	SOLARAV8	SOLARAV9	SOLARAV10	SOLARAV11	SOLARAV12
1	15001	16	19	20	19	20	19	19	19	17	17	16	15
2	15001	16	19	20	19	20	19	19	19	17	17	16	15
3	15261	16	19	20	19	20	19	19	19	17	17	16	15
4	15001	16	19	20	19	20	19	19	19	17	17	16	15
5	15001	16	19	20	19	20	19	19	19	17	17	16	15
6	15001	16	19	20	19	20	19	19	19	17	17	16	15

Continuación Tabla 11.

SUBBASIN	STATION	SOLARAV1	SOLARAV2	SOLARAV3	SOLARAV4	SOLARAV5	SOLARAV6	SOLARAV7	SOLARAV8	SOLARAV9	SOLARAV10	SOLARAV11	SOLARAV12
7	15001	16	19	20	19	20	19	19	19	17	17	16	15
8	15001	16	19	20	19	20	19	19	19	17	17	16	15
9	15001	16	19	20	19	20	19	19	19	17	17	16	15
10	15001	16	19	20	19	20	19	19	19	17	17	16	15
11	15001	16	19	20	19	20	19	19	19	17	17	16	15
12	15001	16	19	20	19	20	19	19	19	17	17	16	15
13	15001	16	19	20	19	20	19	19	19	17	17	16	15
14	15001	16	19	20	19	20	19	19	19	17	17	16	15
15	15001	16	19	20	19	20	19	19	19	17	17	16	15
16	15001	16	19	20	19	20	19	19	19	17	17	16	15
17	15001	16	19	20	19	20	19	19	19	17	17	16	15
18	15001	16	19	20	19	20	19	19	19	17	17	16	15
19	15001	16	19	20	19	20	19	19	19	17	17	16	15
20	15029	16	19	20	20	20	19	19	19	17	18	16	15
21	15001	16	19	20	19	20	19	19	19	17	17	16	15
22	15029	16	19	20	20	20	19	19	19	17	18	16	15
23	15001	16	19	20	19	20	19	19	19	17	17	16	15
24	15029	16	19	20	20	20	19	19	19	17	18	16	15
25	15029	16	19	20	20	20	19	19	19	17	18	16	15
26	15001	16	19	20	19	20	19	19	19	17	17	16	15
27	15029	16	19	20	20	20	19	19	19	17	18	16	15
28	15029	16	19	20	20	20	19	19	19	17	18	16	15
29	15251	16	19	20	19	20	19	19	19	17	17	16	15

**Tabla 11. Cantidad máxima de lluvia en 0.5 h por subcuenca**

SUBBASIN	RAINHHMX1	RAINHHMX2	RAINHHMX3	RAINHHMX4	RAINHHMX5	RAINHHMX6	RAINHHMX7	RAINHHMX8	RAINHHMX9	RAINHHMX10	RAINHHMX11	RAINHHMX12
1	2.393	2.393	3.986	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393
2	2.393	2.393	3.986	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393
3	2.488	2.488	4.094	2.488	2.488	2.488	2.488	2.488	2.488	2.488	2.488	2.488
4	2.393	2.393	3.986	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393
5	2.393	2.393	3.986	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393
6	2.393	2.393	3.986	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393
7	2.393	2.393	3.986	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393
8	2.393	2.393	3.986	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393
9	2.393	2.393	3.986	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393
10	2.393	2.393	3.986	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393
11	2.393	2.393	3.986	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393
12	2.393	2.393	3.986	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393
13	2.393	2.393	3.986	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393
14	2.393	2.393	3.986	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393
15	2.393	2.393	3.986	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393
16	2.393	2.393	3.986	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393
17	2.393	2.393	3.986	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393
18	2.393	2.393	3.986	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393
19	2.393	2.393	3.986	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393
20	2.296	2.296	3.865	2.296	2.296	2.296	2.296	2.296	2.296	2.296	2.296	2.296
21	2.393	2.393	3.986	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393
22	2.296	2.296	3.865	2.296	2.296	2.296	2.296	2.296	2.296	2.296	2.296	2.296
23	2.393	2.393	3.986	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393
24	2.296	2.296	3.865	2.296	2.296	2.296	2.296	2.296	2.296	2.296	2.296	2.296
25	2.296	2.296	3.865	2.296	2.296	2.296	2.296	2.296	2.296	2.296	2.296	2.296
26	2.393	2.393	3.986	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393	2.393

Continuación Tabla 12.

SUBBASIN	RAINHHMX1	RAINHHMX2	RAINHHMX3	RAINHHMX4	RAINHHMX5	RAINHHMX6	RAINHHMX7	RAINHHMX8	RAINHHMX9	RAINHHMX10	RAINHHMX11	RAINHHMX12
27	2.296	2.296	3.865	2.296	2.296	2.296	2.296	2.296	2.296	2.296	2.296	2.296
28	2.296	2.296	3.865	2.296	2.296	2.296	2.296	2.296	2.296	2.296	2.296	2.296
29	2.153	2.153	3.740	2.153	2.153	2.153	2.153	2.153	2.153	2.153	2.153	2.153

**Tabla 12. Promedio mensual de un día de lluvia después de un día seco por subcuenca**

SUBBASIN	STATION	PR_W11	PR_W12	PR_W13	PR_W14	PR_W15	PR_W16	PR_W17	PR_W18	PR_W19	PR_W110	PR_W111	PR_W112
1	15001	0.04	0.03	0.04	0.11	0.2	0.28	0.36	0.33	0.23	0.12	0.06	0.04
2	15001	0.04	0.03	0.04	0.11	0.2	0.28	0.36	0.33	0.23	0.12	0.06	0.04
3	15261	0.03	0	0	0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1
4	15001	0.04	0.03	0.04	0.11	0.2	0.28	0.36	0.33	0.23	0.12	0.06	0.04
5	15001	0.04	0.03	0.04	0.11	0.2	0.28	0.36	0.33	0.23	0.12	0.06	0.04
6	15001	0.04	0.03	0.04	0.11	0.2	0.28	0.36	0.33	0.23	0.12	0.06	0.04
7	15001	0.04	0.03	0.04	0.11	0.2	0.28	0.36	0.33	0.23	0.12	0.06	0.04
8	15001	0.04	0.03	0.04	0.11	0.2	0.28	0.36	0.33	0.23	0.12	0.06	0.04
9	15001	0.04	0.03	0.04	0.11	0.2	0.28	0.36	0.33	0.23	0.12	0.06	0.04
10	15001	0.04	0.03	0.04	0.11	0.2	0.28	0.36	0.33	0.23	0.12	0.06	0.04
11	15001	0.04	0.03	0.04	0.11	0.2	0.28	0.36	0.33	0.23	0.12	0.06	0.04
12	15001	0.04	0.03	0.04	0.11	0.2	0.28	0.36	0.33	0.23	0.12	0.06	0.04
13	15001	0.04	0.03	0.04	0.11	0.2	0.28	0.36	0.33	0.23	0.12	0.06	0.04
14	15001	0.04	0.03	0.04	0.11	0.2	0.28	0.36	0.33	0.23	0.12	0.06	0.04
15	15001	0.04	0.03	0.04	0.11	0.2	0.28	0.36	0.33	0.23	0.12	0.06	0.04
16	15001	0.04	0.03	0.04	0.11	0.2	0.28	0.36	0.33	0.23	0.12	0.06	0.04
17	15001	0.04	0.03	0.04	0.11	0.2	0.28	0.36	0.33	0.23	0.12	0.06	0.04

Continuación Tabla 13.

SUBBASIN	STATION	PR_W11	PR_W12	PR_W13	PR_W14	PR_W15	PR_W16	PR_W17	PR_W18	PR_W19	PR_W110	PR_W111	PR_W112
18	15001	0.04	0.03	0.04	0.11	0.2	0.28	0.36	0.33	0.23	0.12	0.06	0.04
19	15001	0.04	0.03	0.04	0.11	0.2	0.28	0.36	0.33	0.23	0.12	0.06	0.04
20	15029	0.04	0.05	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.3	0.1	0.07	0.04
21	15001	0.04	0.03	0.04	0.11	0.2	0.28	0.36	0.33	0.23	0.12	0.06	0.04
22	15029	0.04	0.05	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.3	0.1	0.07	0.04
23	15001	0.04	0.03	0.04	0.11	0.2	0.28	0.36	0.33	0.23	0.12	0.06	0.04
24	15029	0.04	0.05	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.3	0.1	0.07	0.04
25	15029	0.04	0.05	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.3	0.1	0.07	0.04
26	15001	0.04	0.03	0.04	0.11	0.2	0.28	0.36	0.33	0.23	0.12	0.06	0.04
27	15029	0.04	0.05	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.3	0.1	0.07	0.04
28	15029	0.04	0.05	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.3	0.1	0.07	0.04
29	15251	0.04	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.3	0.1	0.1	0.1

**Tabla 13. Probabilidad mensual de un día de lluvia después e otro día de lluvia por subcuenca**

SUBBASIN	STATION	PR_W21	PR_W22	PR_W23	PR_W24	PR_W25	PR_W26	PR_W27	PR_W28	PR_W29	PR_W210	PR_W211	PR_W212
1	15001	0.53	0.34	0.43	0.44	0.52	0.68	0.64	0.62	0.63	0.55	0.32	0.45
2	15001	0.53	0.34	0.43	0.44	0.52	0.68	0.64	0.62	0.63	0.55	0.32	0.45
3	15261	0.5	0.3	0.3	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5
4	15001	0.53	0.34	0.43	0.44	0.52	0.68	0.64	0.62	0.63	0.55	0.32	0.45
5	15001	0.53	0.34	0.43	0.44	0.52	0.68	0.64	0.62	0.63	0.55	0.32	0.45
6	15001	0.53	0.34	0.43	0.44	0.52	0.68	0.64	0.62	0.63	0.55	0.32	0.45
7	15001	0.53	0.34	0.43	0.44	0.52	0.68	0.64	0.62	0.63	0.55	0.32	0.45
8	15001	0.53	0.34	0.43	0.44	0.52	0.68	0.64	0.62	0.63	0.55	0.32	0.45
9	15001	0.53	0.34	0.43	0.44	0.52	0.68	0.64	0.62	0.63	0.55	0.32	0.45

Continuación Tabla 14.

SUBBASIN	STATION	PR_W21	PR_W22	PR_W23	PR_W24	PR_W25	PR_W26	PR_W27	PR_W28	PR_W29	PR_W210	PR_W211	PR_W212
10	15001	0.53	0.34	0.43	0.44	0.52	0.68	0.64	0.62	0.63	0.55	0.32	0.45
11	15001	0.53	0.34	0.43	0.44	0.52	0.68	0.64	0.62	0.63	0.55	0.32	0.45
12	15001	0.53	0.34	0.43	0.44	0.52	0.68	0.64	0.62	0.63	0.55	0.32	0.45
13	15001	0.53	0.34	0.43	0.44	0.52	0.68	0.64	0.62	0.63	0.55	0.32	0.45
14	15001	0.53	0.34	0.43	0.44	0.52	0.68	0.64	0.62	0.63	0.55	0.32	0.45
15	15001	0.53	0.34	0.43	0.44	0.52	0.68	0.64	0.62	0.63	0.55	0.32	0.45
16	15001	0.53	0.34	0.43	0.44	0.52	0.68	0.64	0.62	0.63	0.55	0.32	0.45
17	15001	0.53	0.34	0.43	0.44	0.52	0.68	0.64	0.62	0.63	0.55	0.32	0.45
18	15001	0.53	0.34	0.43	0.44	0.52	0.68	0.64	0.62	0.63	0.55	0.32	0.45
19	15001	0.53	0.34	0.43	0.44	0.52	0.68	0.64	0.62	0.63	0.55	0.32	0.45
20	15029	0.4	0.3	0.3	0.4	0.5	0.7	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4
21	15001	0.53	0.34	0.43	0.44	0.52	0.68	0.64	0.62	0.63	0.55	0.32	0.45
22	15029	0.4	0.3	0.3	0.4	0.5	0.7	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4
23	15001	0.53	0.34	0.43	0.44	0.52	0.68	0.64	0.62	0.63	0.55	0.32	0.45
24	15029	0.4	0.3	0.3	0.4	0.5	0.7	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4
25	15029	0.4	0.3	0.3	0.4	0.5	0.7	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4
26	15001	0.53	0.34	0.43	0.44	0.52	0.68	0.64	0.62	0.63	0.55	0.32	0.45
27	15029	0.4	0.3	0.3	0.4	0.5	0.7	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4
28	15029	0.4	0.3	0.3	0.4	0.5	0.7	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4
29	15251	0.4	0.3	0.2	0.4	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.4	0.3

**Tabla 14. Punto de rocío por subcuenca**

SUBBASIN	STATION	DEWPT1	DEWPT2	DEWPT3	DEWPT4	DEWPT5	DEWPT6	DEWPT7	DEWPT8	DEWPT9	DEWPT10	DEWPT11	DEWPT12
1	15001	7.96	7.18	5.63	6.66	9.42	11.84	13.59	13.36	12.05	8.73	7.6	5.57
2	15001	7.96	7.18	5.63	6.66	9.42	11.84	13.59	13.36	12.05	8.73	7.6	5.57
3	15261	7.96	7.18	5.63	6.66	9.42	11.84	13.59	13.36	12.05	8.73	7.6	5.57
4	15001	7.96	7.18	5.63	6.66	9.42	11.84	13.59	13.36	12.05	8.73	7.6	5.57
5	15001	7.96	7.18	5.63	6.66	9.42	11.84	13.59	13.36	12.05	8.73	7.6	5.57
6	15001	7.96	7.18	5.63	6.66	9.42	11.84	13.59	13.36	12.05	8.73	7.6	5.57
7	15001	7.96	7.18	5.63	6.66	9.42	11.84	13.59	13.36	12.05	8.73	7.6	5.57
8	15001	7.96	7.18	5.63	6.66	9.42	11.84	13.59	13.36	12.05	8.73	7.6	5.57
9	15001	7.96	7.18	5.63	6.66	9.42	11.84	13.59	13.36	12.05	8.73	7.6	5.57
10	15001	7.96	7.18	5.63	6.66	9.42	11.84	13.59	13.36	12.05	8.73	7.6	5.57
11	15001	7.96	7.18	5.63	6.66	9.42	11.84	13.59	13.36	12.05	8.73	7.6	5.57
12	15001	7.96	7.18	5.63	6.66	9.42	11.84	13.59	13.36	12.05	8.73	7.6	5.57
13	15001	7.96	7.18	5.63	6.66	9.42	11.84	13.59	13.36	12.05	8.73	7.6	5.57
14	15001	7.96	7.18	5.63	6.66	9.42	11.84	13.59	13.36	12.05	8.73	7.6	5.57
15	15001	7.96	7.18	5.63	6.66	9.42	11.84	13.59	13.36	12.05	8.73	7.6	5.57
16	15001	7.96	7.18	5.63	6.66	9.42	11.84	13.59	13.36	12.05	8.73	7.6	5.57
17	15001	7.96	7.18	5.63	6.66	9.42	11.84	13.59	13.36	12.05	8.73	7.6	5.57
18	15001	7.96	7.18	5.63	6.66	9.42	11.84	13.59	13.36	12.05	8.73	7.6	5.57
19	15001	7.96	7.18	5.63	6.66	9.42	11.84	13.59	13.36	12.05	8.73	7.6	5.57
20	15029	7.96	7.18	5.63	6.66	9.42	11.84	13.59	13.36	12.05	8.73	7.6	5.57
21	15001	7.96	7.18	5.63	6.66	9.42	11.84	13.59	13.36	12.05	8.73	7.6	5.57
22	15029	7.96	7.18	5.63	6.66	9.42	11.84	13.59	13.36	12.05	8.73	7.6	5.57
23	15001	7.96	7.18	5.63	6.66	9.42	11.84	13.59	13.36	12.05	8.73	7.6	5.57
24	15029	7.96	7.18	5.63	6.66	9.42	11.84	13.59	13.36	12.05	8.73	7.6	5.57
25	15029	7.96	7.18	5.63	6.66	9.42	11.84	13.59	13.36	12.05	8.73	7.6	5.57
26	15001	7.96	7.18	5.63	6.66	9.42	11.84	13.59	13.36	12.05	8.73	7.6	5.57

Continuación Tabla 15.

SUBBASIN	STATION	DEWPT1	DEWPT2	DEWPT3	DEWPT4	DEWPT5	DEWPT6	DEWPT7	DEWPT8	DEWPT9	DEWPT10	DEWPT11	DEWPT12
27	15029	7.96	7.18	5.63	6.66	9.42	11.84	13.59	13.36	12.05	8.73	7.6	5.57
28	15029	7.96	7.18	5.63	6.66	9.42	11.84	13.59	13.36	12.05	8.73	7.6	5.57
29	15251	7.96	7.18	5.63	6.66	9.42	11.84	13.59	13.36	12.05	8.73	7.6	5.57

## D) ANEXO BASE DE DATOS DE SUELOS

**Tabla 15. Textura, Grupo Hidrológico, Número de capas y Profundidad máximo de la última capa de cada suelo en la cuenca El Tejocote**

Nombre/Clave	N° Capas	Grupo Hidrológico	Prof. Máx. de última capa (mm)	Textura
TEJ_HhFd	7	C	2,766.68	Mra
TEJ_HhFdp	7	D	2,766-3,500	Mr
TEJ_HhFl	7	D	2,771.44	Mr
TEJ_HhFlp	7	B	2,800	C
TEJ_HhFp	7	D	3,020	Mr
TEJ_HhSF	7	C	3,100	Mra
TEJ_HIFd	7	B	2,914.28-3,500	C
TEJ_HIFdp	7	C	2,933.32-3,500	Mra
TEJ_HIFl	7	C	2,766.68-3,500	Mra
TEJ_HIFlp	7	B	2,771.44	C
TEJ_HIFp	7	C	3,133.32	Mra
TEJ_HISF	7	C	2,800	Mra
TEJ_LcFdp	7	D	2,733.32-3,500	Mr
TEJ_LcFl	7	D	2,800	R
TEJ_LcFlp	7	C	2,875	Mra
TEJ_LcSF	7	B	2,800	C
TEJ_ToSF	7	B	2,800	Ma
TEJ_VpFd	7	C	3,000	Mra
TEJ_VpFdp	7	D	2,900	Mr
TEJ_VpSF	7	C	3,111.12-3,500	Mra
TEJ_WmFdp	7	B	3,000-3,500	Ma
TEJ_WmSF	7	C	3,111.12-3,500	Mra

**Tabla 16. Contenido de arcilla del suelo**

Nombre/Clave	N° de capas del suelo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TEJ_HhFd	20.00	23.33	25.00	35.90	36.75	35.45	37.35	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFdp	29.00	29.00	28.95	29.00	29.00	19.00	33.92	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFl	40.00	40.00	40.00	36.00	36.00	35.76	37.93	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFlp	25.00	25.00	25.00	26.00	26.00	26.00	26.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFp	30.50	30.50	32.01	31.99	37.40	34.44	36.34	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhSF	27.30	27.98	27.98	30.00	30.00	30.63	30.63	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFd	26.00	26.86	27.71	32.00	33.23	32.07	35.86	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFdp	28.40	28.91	28.91	32.78	32.78	30.67	30.22	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFl	24.00	24.00	40.00	38.77	36.75	35.45	37.35	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFlp	14.00	14.00	14.00	34.00	34.00	34.00	34.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFp	24.00	24.00	40.00	40.00	37.47	30.93	32.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HISF	24.00	24.00	24.00	32.00	32.00	32.00	32.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_ISF	28.85	29.75	31.90	36.20	36.55	34.40	36.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFdp	29.60	46.40	46.40	46.40	46.40	50.80	53.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFl	48.00	49.67	50.00	52.00	52.00	33.10	34.57	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFlp	33.00	35.13	35.13	50.38	51.88	50.44	50.44	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcSF	26.00	39.20	44.70	44.70	41.10	39.30	39.30	0.00	0.00	0.00
TEJ_TmFlp	13.00	13.00	11.50	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_ToSF	7.40	7.40	4.30	4.30	4.30	4.30	6.30	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpFd	32.00	32.00	32.00	38.00	38.00	35.00	36.90	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpFdp	34.30	35.01	35.01	40.00	40.00	40.00	40.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpSF	32.40	35.53	35.53	46.50	46.50	36.33	36.33	0.00	0.00	0.00
TEJ_WmFdp	35.50	37.13	37.13	42.00	42.00	42.00	42.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_WmSF	32.30	30.46	32.23	25.78	32.00	32.00	32.00	0.00	0.00	0.00

**Tabla 17. Contenido de fragmentos de roca del suelo**

Nombre/Clave	N° de capas del suelo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TEJ_HhFd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFdp	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFl	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFlp	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFp	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	0.00	0.00	0.00

Continuación Tabla 18

Nombre/Clave	Nº de capas del suelo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TEJ_HhSF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFdp	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFl	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFlp	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFp	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HISF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_ISF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFdp	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFl	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFlp	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcSF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_TmFlp	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_ToSF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpFd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpFdp	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpSF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_WmFdp	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_WmSF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

**Tabla 18. Contenido de arena del suelo**

Nombre/Clave	Nº de capas del suelo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TEJ_HhFd	58.30	53.63	51.30	39.30	37.23	39.42	36.77	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFdp	43.00	43.00	44.80	44.50	44.50	68.25	42.45	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFl	42.00	42.00	42.00	32.00	32.00	37.64	36.31	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFlp	47.00	47.00	47.00	43.00	43.00	43.00	43.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFp	44.50	44.50	43.05	43.01	36.90	40.83	38.18	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhSF	49.00	49.25	49.25	50.00	50.00	48.25	48.25	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFd	44.00	43.71	43.43	42.00	41.10	42.14	38.10	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFdp	51.00	50.11	50.11	43.11	43.11	44.56	44.78	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFl	56.00	56.00	44.00	43.48	37.23	39.42	36.77	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFlp	42.00	42.00	42.00	30.00	30.00	30.00	30.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFp	56.00	56.00	44.00	44.00	36.37	43.53	41.63	0.00	0.00	0.00
TEJ_HISF	58.00	58.00	58.00	42.00	42.00	42.00	42.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_ISF	47.50	46.85	45.25	39.25	37.40	39.80	36.95	0.00	0.00	0.00

Continuación Tabla 19.

Nombre/Clave	N° de capas del suelo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TEJ_LcFdp	41.60	32.00	32.00	32.00	32.00	27.33	25.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFl	30.00	28.33	28.00	30.00	30.00	40.83	38.17	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFlp	48.00	45.58	45.58	28.21	26.66	27.69	27.69	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcSF	41.00	34.70	30.70	30.70	30.70	30.70	30.70	0.00	0.00	0.00
TEJ_TmFlp	58.00	58.00	57.00	56.00	56.00	56.00	55.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_ToSF	55.70	55.70	53.80	53.80	53.80	53.80	56.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpFd	53.00	53.00	53.00	44.00	44.00	39.90	36.70	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpFdp	44.30	44.26	44.26	43.75	43.75	42.25	42.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpSF	45.60	42.24	42.24	30.50	30.50	41.67	41.67	0.00	0.00	0.00
TEJ_WmFdp	49.00	43.75	43.75	28.00	28.00	28.00	28.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_WmSF	47.20	47.82	45.16	47.33	38.00	38.00	38.00	0.00	0.00	0.00

**Tabla 19. Contenido de limo del suelo**

Nombre/Clave	N° de capas del suelo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TEJ_HhFd	21.70	23.03	23.70	24.87	26.08	25.15	25.95	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFdp	28.00	28.00	26.26	26.50	26.50	12.75	23.70	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFl	18.00	18.00	18.00	32.00	32.00	26.60	25.83	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFlp	28.00	28.00	28.00	31.00	31.00	31.00	31.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFp	25.00	25.00	24.95	25.01	25.77	24.74	25.54	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhSF	23.70	22.78	22.78	20.00	20.00	21.13	21.13	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFd	30.00	29.43	28.86	26.00	25.69	25.79	26.10	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFdp	20.60	20.98	20.98	24.11	24.11	24.78	25.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFl	20.00	20.00	16.00	17.77	26.08	25.15	25.95	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFlp	44.00	44.00	44.00	36.00	36.00	36.00	36.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFp	20.00	20.00	16.00	16.00	26.20	25.53	26.40	0.00	0.00	0.00
TEJ_HISF	18.00	18.00	18.00	26.00	26.00	26.00	26.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_ISF	23.65	23.40	22.90	24.55	26.05	25.80	27.10	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFdp	28.80	21.60	21.60	21.60	21.60	21.87	22.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFl	22.00	22.00	22.00	18.00	18.00	26.07	27.33	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFlp	19.00	19.30	19.30	21.41	21.46	21.88	21.88	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcSF	33.00	26.10	24.70	24.70	28.23	30.00	30.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_TmFlp	29.00	29.00	31.50	34.00	34.00	34.00	35.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_ToSF	36.90	36.90	42.00	42.00	42.00	42.00	37.70	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpFd	15.00	15.00	15.00	18.00	18.00	25.10	26.40	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpFdp	21.50	20.81	20.81	16.25	16.25	17.75	18.00	0.00	0.00	0.00

Continuación Tabla 20.

Nombre/Clave	N° de capas del suelo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TEJ_VpSF	22.00	22.22	22.22	23.00	23.00	22.00	22.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_WmFdp	15.50	19.13	19.13	30.00	30.00	30.00	30.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_WmSF	20.50	21.72	22.61	26.89	30.00	30.00	30.00	0.00	0.00	0.00

**Tabla 20. Albedo húmedo del suelo**

Nombre/Clave	N° de capas del suelo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TEJ_HhFd	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFdp	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFl	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFlp	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFp	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhSF	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFd	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFdp	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFl	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFlp	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFp	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00
TEJ_HISF	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00
TEJ_ISF	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFdp	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFl	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFlp	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcSF	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00
TEJ_TmFlp	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.00	0.00	0.00
TEJ_ToSF	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpFd	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpFdp	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpSF	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00
TEJ_WmFdp	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00
TEJ_WmSF	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00

**Tabla 21. Capacidad disponible de agua en suelos**

Nombre/Clave	N° de capas del suelo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TEJ_HhFd	0.14	0.14	0.14	0.13	0.13	0.13	0.11	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFdp	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.23	0.13	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFl	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.11	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFlp	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFp	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.11	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhSF	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFd	0.19	0.18	0.17	0.13	0.12	0.13	0.12	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFdp	0.14	0.14	0.14	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFl	0.14	0.14	0.08	0.09	0.13	0.13	0.11	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFlp	0.19	0.19	0.19	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFp	0.14	0.14	0.08	0.08	0.13	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00
TEJ_HISF	0.14	0.14	0.14	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00
TEJ_ISF	0.14	0.14	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFdp	0.13	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFl	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFlp	0.14	0.13	0.13	0.08	0.08	0.09	0.09	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcSF	0.19	0.11	0.08	0.08	0.11	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00
TEJ_TmFlp	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.00	0.00	0.00
TEJ_ToSF	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpFd	0.14	0.14	0.14	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpFdp	0.13	0.12	0.12	0.09	0.09	0.12	0.13	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpSF	0.14	0.13	0.13	0.08	0.08	0.14	0.14	0.00	0.00	0.00
TEJ_WmFdp	0.25	0.21	0.21	0.08	0.08	0.08	0.08	0.00	0.00	0.00
TEJ_WmSF	0.14	0.14	0.14	0.14	0.13	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00

**Tabla 22. Densidad húmeda aparente del suelo**

Nombre/Clave	N° de capas del suelo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TEJ_HhFd	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.53	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFdp	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.53	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFl	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.51	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFlp	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFp	1.60	1.60	1.60	1.60	1.58	1.60	1.52	0.00	0.00	0.00

Continuación Tabla 23.

Nombre/Clave	N° de capas del suelo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TEJ_HhSF	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFd	1.60	1.60	1.60	1.60	1.57	1.60	1.54	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFdp	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFl	1.60	1.60	1.40	1.43	1.60	1.60	1.53	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFlp	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFp	1.60	1.60	1.40	1.40	1.60	1.60	1.60	0.00	0.00	0.00
TEJ_HISF	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	0.00	0.00	0.00
TEJ_ISF	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFdp	1.60	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFl	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.60	1.60	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFlp	1.60	1.58	1.58	1.40	1.40	1.43	1.43	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcSF	1.60	1.53	1.40	1.40	1.53	1.60	1.60	0.00	0.00	0.00
TEJ_TmFlp	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	0.00	0.00	0.00
TEJ_ToSF	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpFd	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpFdp	1.60	1.58	1.58	1.43	1.43	1.58	1.60	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpSF	1.60	1.56	1.56	1.40	1.40	1.47	1.47	0.00	0.00	0.00
TEJ_WmFdp	1.60	1.55	1.55	1.40	1.40	1.40	1.40	0.00	0.00	0.00
TEJ_WmSF	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	0.00	0.00	0.00

**Tabla 23. Contenido de carbonato de Calcio del suelo**

Nombre/Clave	N° de capas del suelo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TEJ_HhFd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFdp	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFl	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFlp	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFp	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhSF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFdp	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFl	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFlp	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFp	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HISF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_ISF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Continuación Tabla 24.

Nombre/Clave	N° de capas del suelo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TEJ_LcFdp	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFl	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFlp	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcSF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_TmFlp	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_ToSF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpFd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpFdp	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpSF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_WmFdp	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_WmSF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

**Tabla 24. Contenido orgánico de carbón del suelo**

Nombre/Clave	N° de capas del suelo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TEJ_HhFd	0.78	0.58	0.48	0.81	0.91	0.82	0.86	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFdp	0.94	0.94	0.80	0.73	0.73	0.46	0.80	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFl	0.90	0.90	0.90	0.93	0.93	0.83	0.86	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFlp	2.70	2.70	2.70	1.16	1.16	1.16	1.16	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFp	0.93	0.93	0.94	0.92	0.91	0.85	0.89	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhSF	0.74	0.62	0.62	0.29	0.29	0.46	0.46	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFd	0.64	0.59	0.54	0.29	0.38	0.39	0.81	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFdp	1.25	1.15	1.15	0.34	0.34	0.39	0.37	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFl	1.57	1.57	0.70	0.73	0.91	0.82	0.86	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFlp	2.44	2.44	2.44	1.57	1.57	1.57	1.57	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFp	1.57	1.57	0.70	0.70	1.06	0.90	0.93	0.00	0.00	0.00
TEJ_HISF	1.00	1.00	1.00	0.41	0.41	0.41	0.41	0.00	0.00	0.00
TEJ_ISF	1.48	1.40	1.17	0.85	0.94	0.82	0.88	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFdp	0.93	0.66	0.66	0.66	0.66	0.80	0.87	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFl	1.45	1.21	1.16	1.33	1.33	0.83	0.86	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFlp	1.29	1.25	1.25	0.91	0.79	0.73	0.73	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcSF	2.30	1.06	0.79	0.79	0.56	0.45	0.45	0.00	0.00	0.00
TEJ_TmFlp	5.42	5.42	3.55	1.68	1.68	1.68	1.13	0.00	0.00	0.00
TEJ_ToSF	3.15	3.15	1.83	1.83	1.83	1.83	1.23	0.00	0.00	0.00

Continuación Tabla 25.

Nombre/Clave	N° de capas del suelo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TEJ_VpFd	1.09	1.09	1.09	0.62	0.62	0.76	0.84	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpFdp	1.53	1.45	1.45	0.84	0.84	0.32	0.23	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpSF	0.98	0.96	0.96	0.90	0.90	0.73	0.73	0.00	0.00	0.00
TEJ_WmFdp	1.88	1.80	1.80	1.57	1.57	1.57	1.57	0.00	0.00	0.00
TEJ_WmSF	1.06	0.85	1.20	0.46	1.68	1.68	1.68	0.00	0.00	0.00

**Tabla 25. Conductividad eléctrica del suelo**

Nombre/Clave	N° de capas del suelo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TEJ_HhFd	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFdp	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFl	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFlp	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFp	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhSF	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFd	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFdp	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFl	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFlp	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFp	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HISF	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_ISF	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFdp	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFl	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFlp	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcSF	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_TmFlp	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_ToSF	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpFd	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpFdp	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpSF	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_WmFdp	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_WmSF	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	0.00	0.00	0.00

**Tabla 26. Conductividad hidráulica saturada del suelo**

Nombre/Clave	N° de capas del suelo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TEJ_HhFd	4.32	4.32	4.32	2.29	2.29	2.29	1.69	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFdp	2.29	2.29	2.29	2.29	2.29	21.97	5.63	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFl	2.29	2.29	2.29	2.29	2.29	2.29	1.52	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFlp	13.21	13.21	13.21	13.21	13.21	13.21	13.21	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFp	2.29	2.29	2.29	2.29	2.11	2.49	1.78	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhSF	4.32	4.32	4.32	4.32	4.32	3.81	3.81	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFd	13.21	11.65	10.09	2.29	2.03	2.29	1.78	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFdp	4.32	4.09	4.09	2.29	2.29	2.51	2.51	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFl	4.32	4.32	0.51	0.80	2.29	2.29	1.69	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFlp	13.21	13.21	13.21	2.29	2.29	2.29	2.29	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFp	4.32	4.32	0.51	0.51	2.29	2.96	2.96	0.00	0.00	0.00
TEJ_HISF	4.32	4.32	4.32	2.29	2.29	2.29	2.29	0.00	0.00	0.00
TEJ_ISF	4.32	4.32	2.29	2.29	2.29	2.29	2.29	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFdp	2.29	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFl	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	2.29	2.29	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFlp	4.32	3.84	3.84	0.51	0.51	0.73	0.73	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcSF	13.21	1.69	0.51	0.51	1.69	2.29	2.29	0.00	0.00	0.00
TEJ_TmFlp	25.91	25.91	25.91	25.91	25.91	25.91	25.91	0.00	0.00	0.00
TEJ_ToSF	25.91	25.91	25.91	25.91	25.91	25.91	25.91	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpFd	4.32	4.32	4.32	2.29	2.29	2.29	2.29	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpFdp	2.29	2.06	2.06	0.73	0.73	2.06	2.29	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpSF	4.32	3.47	3.47	0.51	0.51	8.97	8.97	0.00	0.00	0.00
TEJ_WmFdp	25.91	19.56	19.56	0.51	0.51	0.51	0.51	0.00	0.00	0.00
TEJ_WmSF	4.32	4.32	3.87	3.87	2.29	2.29	2.29	0.00	0.00	0.00

**Tabla 27. pH del suelo**

Nombre/Clave	N° de capas del suelo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TEJ_HhFd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFdp	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFl	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFlp	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFp	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhSF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Continuación Tabla 28.

Nombre/Clave	N° de capas del suelo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TEJ_HIFd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFdp	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFl	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFlp	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFp	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HISF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_ISF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFdp	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFl	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFlp	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcSF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_TmFlp	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_ToSF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpFd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpFdp	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpSF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_WmFdp	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_WmSF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

**Tabla 28. Profundidad de cada capa del suelo**

Nombre/Clave	N° de capas del suelo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TEJ_HhFd	150.00	233.33	300.00	383.33	480.00	568.33	691.67	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFdp	133.33	233.33	300.00	383.33	480.00	568.33	691.67	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFl	135.71	235.71	300.00	385.71	482.86	570.00	692.86	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFlp	116.67	216.67	300.00	383.33	483.33	583.33	700.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFp	170.00	260.00	336.00	440.00	542.00	637.00	755.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhSF	150.00	237.50	337.50	437.50	555.00	675.00	775.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFd	157.14	250.00	321.43	407.14	518.57	615.71	728.57	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFdp	150.00	244.44	323.33	427.78	518.89	610.00	733.33	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFl	133.33	233.33	300.00	383.33	480.00	568.33	691.67	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFlp	128.57	228.57	300.00	385.71	482.86	572.86	692.86	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFp	116.67	223.33	300.00	366.67	566.67	683.33	783.33	0.00	0.00	0.00
TEJ_HISF	116.67	216.67	300.00	383.33	483.33	583.33	700.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_ISF	125.00	225.00	300.00	375.00	475.00	575.00	700.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFdp	150.00	250.00	300.00	383.33	476.67	553.33	683.33	0.00	0.00	0.00

Continuación Tabla 29.

Nombre/Clave	N° de capas del suelo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TEJ_LcFl	116.67	216.67	300.00	383.33	483.33	583.33	700.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFlp	156.25	250.00	318.75	400.00	510.00	607.50	718.75	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcSF	116.67	216.67	300.00	383.33	483.33	583.33	700.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_TmFlp	125.00	225.00	300.00	375.00	475.00	575.00	675.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_ToSF	100.00	200.00	300.00	400.00	500.00	600.00	700.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpFd	100.00	200.00	300.00	400.00	500.00	600.00	750.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpFdp	150.00	243.75	318.75	406.25	512.50	613.75	725.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpSF	166.67	257.78	340.00	438.89	574.44	678.89	777.78	0.00	0.00	0.00
TEJ_WmFdp	175.00	262.50	337.50	412.50	537.50	650.00	750.00	0.00	0.00	0.00
TEJ_WmSF	166.67	257.78	340.00	438.89	574.44	678.89	777.78	0.00	0.00	0.00

**Tabla 29. Factor K de erosividad del suelo**

Nombre/Clave	N° de capas del suelo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TEJ_HhFd	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFdp	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFl	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFlp	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhFp	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.00	0.00	0.00
TEJ_HhSF	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFd	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFdp	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFl	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFlp	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.00	0.00	0.00
TEJ_HIFp	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.00	0.00	0.00
TEJ_HISF	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.00	0.00	0.00
TEJ_ISF	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFdp	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFl	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcFlp	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.00	0.00	0.00
TEJ_LcSF	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.00	0.00	0.00
TEJ_TmFlp	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.00	0.00	0.00
TEJ_ToSF	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpFd	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.00	0.00	0.00
TEJ_VpFdp	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.00	0.00	0.00

Continuación Tabla 30.

Nombre/Clave	N° de capas del suelo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TEJ_VpSF	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.00	0.00	0.00
TEJ_WmFdp	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.00	0.00	0.00
TEJ_WmSF	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.00	0.00	0.00

## E) ANEXO BASE DE DATOS DE CAUCES

**Tabla 30. Ancho promedio, profundidad del cauce, pendiente media, longitud promedio y rugosidad del cauce**

SUBBASIN	CH_W2	CH_D	CH_S2	CH_L2	CH_N2
1	5.5	0.35	0.065	2.006	0.037
2	5.5	0.35	0.065	2.006	0.037
3	5.6	1	0.06	3.067	0.047
4	3.2	0.5	0.645	3.978	0.033
5	3.2	0.5	0.645	3.978	0.033
6	3.2	0.5	0.645	3.978	0.033
7	11.3	1	0.004	4.088	0.027
8	1.7	0.9	0.003	3.078	0.03
9	11.3	1	0.004	4.088	0.027
10	11.3	1	0.004	4.088	0.027
11	4	0.35	0.085	2.161	0.032
12	11.3	1	0.004	4.088	0.027
13	0.9	0.4	0.051	2.38	0.08
14	14	1.5	0.001	9.471	0.03
15	3.2	0.5	0.645	3.978	0.033
16	14	1.5	0.001	9.471	0.03
17	14	1.5	0.001	9.471	0.03
18	14	1.5	0.001	9.471	0.03
19	0.9	0.4	0.034	1.684	0.08
20	11.3	1	0.004	4.088	0.027
21	10.7	0.7	0.05	3.575	0.05
22	3	0.7	0.043	3.221	0.029
23	14	1.5	0.001	9.471	0.03
24	6.6	0.8	0.023	3.604	0.04
25	3	0.7	0.04	3.221	0.029
26	6.6	0.8	0.023	3.604	0.04
27	5.5	1.8	0.022	7.402	0.04
28	3.1	0.5	0.075	1.207	0.03
29	11.5	1	0.064	2.261	0.06

**Tabla 31. Grupos hidrológicos usados por el SCS**

<b>Grupo de suelos</b>	<b>Descripción de las características del suelo</b>
A	Suelo con bajo potencial de escurrimiento, incluye arenas profundas con muy poco limo y arcilla; también suelo permeable con grava en el perfil. Infiltración básica 8-12 mm/h
B	Suelos con moderadamente bajo potencial de escurrimiento. Son suelos arenosos menos profundos y más agregados que el grupo A. Este grupo tiene una infiltración mayor que el promedio cuando húmedo. Ejemplos: suelos migajones, arenosos ligeros y migajones limosos. Infiltración básica 4-8 mm/h
C	Suelos con moderadamente alto potencial de escurrimiento. Comprende suelos someros y suelos con considerable contenido de arcilla, pero menos que el grupo D. Este grupo tiene una infiltración menor que la promedio después de saturación. Ejemplo: suelos migajones arcillosos. Infiltración básica 1-4 mm/h
D	Suelos con alto potencial de escurrimiento. Por ejemplo, suelos pesados, con alto contenido de arcillas expandibles y suelos someros con materiales fuertemente cementados. Infiltración básica menor 1 mm/h

**Tabla 32. Curva numérica (CN) para estimar el escurrimiento bajo diferentes complejos suelo – cobertura y manejo de condición (condición de humedad II, y Ia = 0.2S)**

<b>Uso del suelo</b>	<b>Cobertura Tratamiento o práctica</b>	<b>Condición hidrológica</b>	<b>Grupo de suelos</b>			
			<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
Suelo en descanso	Surcos rectos		77	86	91	94
Cultivo de escarda	Surcos rectos	Mala	71	81	88	91
	Surcos rectos	Buena	67	78	85	89
	Curva a nivel	Mala	70	79	84	88
	Curva a nivel	Buena	65	75	82	86
	Terraza y curva a nivel	Mala	66	74	80	82
	Terraza y curva a nivel	Buena	62	71	78	81
Cultivos tupidos	Surcos rectos	Mala	65	76	84	88
	Surcos rectos	Buena	63	75	83	87
	Curva a nivel	Mala	63	74	82	85
	Curva a nivel	Buena	61	73	81	84
	Terraza y curva a nivel	Mala	61	72	79	82
	Terraza y curva a nivel	Buena	59	70	78	81

Continuación Tabla 33.

Uso del suelo	Cobertura		Grupo de suelos			
	Tratamiento o práctica	Condición hidrológica	A	B	C	D
Leguminosas en hilera o forraje en rotación	Surcos rectos	Mala	66	77	85	85
	Surcos rectos	Buena	58	72	81	85
	Curva a nivel	Mala	64	75	83	85
	Curva a nivel	Buena	55	69	78	83
	Terraza y curva a nivel	Mala	63	73	80	83
	Terraza y curva a nivel	Buena	51	67	76	80
Pastizales	Sin tratamiento mecánico	Mala	68	79	86	89
	Sin tratamiento mecánico	Regular	49	69	79	84
	Sin tratamiento mecánico	Buena	39	61	74	80
	Curva a nivel	Mala	47	67	81	88
	Curva a nivel	Regular	25	59	75	83
	Curva a nivel	Buena	6	35	70	79
Pasto de corte		Buena	30	58	71	78
Bosque		Mala	45	66	77	83
		Regular	36	60	73	79
		Buena	25	55	70	77
Caminos de tierra		Buena	72	82	87	89
Caminos pavimentados		Buena	74	84	90	952

## F) ANEXO BASE DE DATOS DE CUERPOS DE AGUA

**Tabla 33. Fracción de cada subcuenca que drena hacia los cuerpos de agua, área total de la superficie del almacenamiento, volumen de agua necesaria**

SUBBASIN	PND_FR	PND_PSA	PND_PVOL	PND_ESA	PND_EVOL	PND_VOL	PND_SED	PND_NSED	PND_K
1	0.452	11.3	27.2	0	0	20.4	63	100	0.08
2	0.001	2.1	5.2	0	0	3.9	63	100	0.08
3	0.253	3.8	9.1	0	0	6.8	63	100	0.08
4	0.256	5.3	12.8	0	0	9.6	63	100	0.08
5	0.001	1.1	2.6	0	0	1.9	63	100	0.08
6	0.522	13.5	32.4	0	0	24.3	63	100	0.08
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0.549	2	4.9	0	0	3.7	63	100	0.08
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0.568	35.8	85.9	0	0	64.4	63	100	0.08
12	0.153	25.3	60.8	0	0	45.6	63	100	0.08
13	0.425	19.8	47.6	0	0	35.7	63	100	0.08
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0.003	0.3	0.7	0	0	0.5	63	100	0.08
16	0.784	20.9	50.2	0	0	37.6	63	100	0.08
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0.404	11.5	27.7	0	0	20.8	63	100	0.08
20	0.555	16.7	40.1	0	0	30.1	63	100	0.08
21	0	0.7	1.7	0	0	1.3	63	100	0.08
22	0.088	5	12	0	0	9	63	100	0.08
23	0.002	5.3	12.6	0	0	9.5	63	100	0.08
24	0.018	22.6	54.3	0	0	40.7	63	100	0.08
25	0.144	7.2	17.3	0	0	12.9	63	100	0.08
26	0.253	22.9	55	0	0	41.2	63	100	0.08
27	0.388	23.6	56.7	0	0	42.5	63	100	0.08
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0.426	23.2	55.6	0	0	41.7	63	100	0.08

## G) ANEXO DE MANEJO DE CULTIVOS

**Tabla 34. Manejo de los cultivos**

Cultivo	Unidad	Temp. Laderas		Temp. Valle		Riego		
		Fecha	Cantidad	Fecha	Cantidad	Fecha	Cantidad	
Plantación		15-Mayo		15-Marzo		15-Marzo		
Cosecha		3-Nov		10-Oct		16-Oct		
Fertilización								
Dosis y fecha aplic.	Tipo							
	Nitrógeno	k.ha-1	30		40		50	
1	Fósforo		15-Mayo	40	15-Marzo	60	15-Marzo	60
	Nitrógeno			50		80		90
2	Fósforo		4-Julio	0	4-Mayo	0	4-Mayo	0
Pesticidas								
Dosis y fecha aplic.	Tipo							
1	2,4-D amina	k.ha-1	4-Junio	1	4-Abril	1	4-Abril	1
2	Aatrex		4-Junio	0.5	4-Abril	0.5	4-Abril	0.5
3	Furadan		15-Mayo	1	14-Mayo	1	15-Marzo	1
4	Parationmetílico		14-Julio	1	15-Marzo	1	14-Mayo	1
Riegos								
1		mm				1-Marzo	200	
2						15-Abril	100	

## H) ANEXO BASE DE DATOS EXTENSIÓN .SUB

**Tabla 35. Longitud, pendiente promedio, ancho promedio, conductividad hidráulica y rugosidad del cauce por subcuenca**

SUBBASIN	CH_L1	CH_S1	CH_W1	CH_K1	CH_N1
1	4.767	0.089	3.172	0	0.014
2	5.368	0.113	3.187	0	0.014
3	5.431	0.112	4.588	0	0.014
4	7.346	0.038	5.397	0	0.014
5	4.350	0.007	2.197	0	0.014
6	3.911	0.001	2.062	0	0.014
7	0.121	0.008	0.050	0	0.014
8	7.535	0.046	5.383	0	0.014
9	0.124	0.001	0.058	0	0.014
10	0.226	0.001	0.152	0	0.014
11	9.508	0.064	5.790	0	0.014
12	7.168	0.013	3.800	0	0.014
13	8.406	0.041	5.024	0	0.014
14	0.783	0.001	0.569	0	0.014
15	4.513	0.078	3.144	0	0.014
16	5.817	0.026	3.075	0	0.014
17	0.461	0.002	0.301	0	0.014
18	0.277	0.004	0.152	0	0.014
19	5.875	0.056	3.654	0	0.014
20	9.308	0.051	5.248	0	0.014
21	5.372	0.059	4.078	0	0.014
22	6.054	0.076	3.500	0	0.014
23	3.517	0.001	1.791	0	0.014
24	3.911	0.022	2.389	0	0.014
25	5.273	0.084	3.414	0	0.014
26	12.174	0.036	7.141	0	0.014
27	9.432	0.016	5.926	0	0.014
28	5.802	0.014	3.963	0	0.014
29	12.424	0.038	8.085	0	0.014

## **D) ANEXO ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN**