

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA  
ESCUELA DE AGRONOMÍA  
DEPARTAMENTO DE AGRONOMÍA



Evaluación del Impacto de Cambios de Cobertura Vegetal en la Producción de  
Agua de la Cuenca del Río Güey

Ladu Gopal Rojas Núñez

Oscar Silva (Tutor).

TRABAJO PRESENTADO COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE INGENIERO AGRÓNOMO MENCIÓN FITOTÉCNIA QUE OTOTRGA LA  
UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA

MARACAY, OCTUBRE 2015

## **ACTA DE APROBACION DEL JURADO**

Nosotros los abajo Firmantes, miembros del jurado examinador del trabajo Titulado EVALUACION DEL IMPACTO DE DIFERENTES TIPOS DE COBERTURA VEGETAL EN LA PRODUCCION DE AGUA EN LA CUENCA DEL RIO GÜEY, cuyo autor es el Bachiller Ladu Gopal Rojas Nuñez, Cedula de Identidad 18.640.403, certificamos que lo hemos leído y que en nuestra opinión, reúne las condiciones necesarias de adecuada presentación y es enteramente satisfactorio en alcance y calidad como Trabajo de Grado para optar al Título de Ingeniero Agrónomo.

---

**ÓSCAR SILVA**

**C.I. 06.843.153**

**Tutor-Coordinador**

---

**NAPOLEÓN FERNÁNDEZ**

**C.I. 2.592.659**

**Jurado Principal**

---

**ROBERTO VILLAFANE**

**C.I. 2.144.038**

**Jurado Principal**

---

**ELADYS CÓRCEGA**

**C.I. 16.436.835**

**Jurado Suplente**

## **AGRADECIMIENTOS**

Principalmente a mi familia por su apoyo para lograr esta meta. En especial a mi madre Teresa Núñez, y a mi tía Sara Núñez.

Al profesor Oscar Silva, por su orientación en la ejecución de este trabajo.

A los profesores e ingenieros: Marelia Puche, Liliana Márquez, Corina Pineda, Juan Carlos Rey, Egli, Pablo D'Enjoy, María Martelo, por su colaboración para la obtención de información de la cuenca.

A los compañeros que de alguna manera colaboraron para que fuese posible realizar este trabajo: Santiago, Chuy, Chigüi, Enrique, Frank, Coco, Kenia, Wolfgang, Ronald, Endri, Miguel, Rozmer, Edward,

Gracias...

## RESUMEN

Mediante el empleo del modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) calibrado según aforos, se evaluó el efecto de distintos tipos de cobertura vegetal sobre la producción de agua y sedimentos en la cuenca del río Güey (superficie de 1922 ha, en la zona montañosa y de pie de monte de la depresión del lago de Valencia, al norte del estado Aragua). El trabajo se efectuó en tres fases: a) estimación de la producción de agua en la canalización del río según aforos puntuales diarios durante 10 meses; b) calibración del modelo SWAT según la producción de agua estimada a partir de los aforos y c) evaluación de la producción de agua con el modelo SWAT en diversos escenarios de cobertura vegetal en la cuenca para un período de registros diarios de precipitación de 22 años. Con el modelo calibrado mediante modificaciones de los parámetros de agua subterránea y de los valores de Número de Curva se logró un buen ajuste general de los valores de producción de agua, en especial del flujo base, y con ligera sobreestimación de las crecidas en la época de lluvias y subestimación de los gastos totales. La producción de agua simulada y sus componentes para el escenario de uso (o cobertura) actual de la cuenca se comparó con diversos escenarios hipotéticos: a) total cobertura de herbazales claros (como escenario degradado), b) total cobertura de bosques (como escenario de máxima conservación), c) reforestación de la planicie y d) protección del sector montañoso norte (mejoramiento de los herbazales). En cuanto a régimen de producción de agua y sedimentos la condición actual de la cuenca está cercana a la condición de degradación. La reforestación de la planicie no conduciría a cambios importantes en régimen de producción de agua y de sedimentos en comparación con el escenario de uso actual, aunque sí beneficiaría la carga de acuíferos. El establecimiento de vegetación boscosa en toda la cuenca, disminuiría la producción de agua, y reduciría considerablemente la escorrentía superficial y producción de sedimentos, así como aumentaría los flujos subsuperficiales y recarga de los acuíferos. La protección de los herbazales del sector montañoso norte, con miras al desarrollo de una vegetación sucesional más densa y protectora, produciría regímenes de producción de agua y sedimentos y de recarga de acuíferos benignos, cercanos al que se obtendría con bosques. Aunque el escenario de bosque resultó más eficiente en el mejoramiento de la hidrología, se consideró al escenario de protección del sector montañoso como más adecuado, dadas las posibles restricciones que el suelo y el relieve representan para el establecimiento de bosques y por los beneficios comparativos en reducción de la escorrentía superficial y producción de sedimentos, así como por el incremento de los flujos subsuperficiales y recarga de los acuíferos.

## TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	iii
RESUMEN.....	iv
TABLA DE CONTENIDO.....	5
ÍNDICE DE FIGURAS.....	7
ÍNDICE DE CUADROS.....	10
INDICE DE ANEXOS.....	10
1. INTRODUCCIÓN.....	11
2. OBJETIVOS.....	12
2.1 Objetivo General.....	12
2.2 Objetivos específicos.....	12
3. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACION.....	13
3.1 Cuenca hidrográfica.....	13
3.2 El ciclo hidrológico:.....	13
3.3 Degradación de una cuenca.....	15
3.4 Relación de la cobertura vegetal y los procesos hidrológicos de una cuenca.....	15
3.5 Modelos de simulación hidrológica.....	15
3.6 El modelo SWAT.....	16
FASE TERRESTRE DEL CICLO HIDROLOGICO.....	17
FASE DE TRÁNSITO DEL CICLO HIDROLOGICO.....	20
3.7 Algunas experiencias con el modelo SWAT.....	20
4. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	23
4.1 Ubicación.....	23
4.2 Clima.....	24
4.3 Geología.....	25
4.4 Relieve.....	26
4.5 Sensibilidad ambiental.....	26
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	27
5.1 Empleo del modelo SWAT.....	27
5.1.1 Recopilación de información.....	28
5.2 Calibración del modelo.....	34

5.3 Evaluación de cambios de cobertura.....	37
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
6.1. Calibración del modelo. ....	38
6.1.1 Resumen del levantamiento topográfico de las secciones del canal .....	38
6.1.2 Curvas de aforo .....	39
6.1.3 Representación de la cuenca en la simulación. ....	40
6.1.4 Ajuste de parámetros.....	45
6.2 Impacto de cambios de en la cobertura vegetal sobre la producción de agua. ....	52
6.2.1 Resumen comparativo sobre las variables anuales en los diversos escenarios. ....	52
6.2.2 Efecto de la degradación de la vegetación (escenario de herbazales claros).....	54
6.2.3 Efecto del incremento de la superficie bajo bosque (escenarios de bosque en toda la cuenca y bosque en la planicie).....	58
6.2.4 Efecto de la protección de herbazales contra incendios (escenario de uso protegido).....	62
6.2.5 Efecto del cambio de vegetación en el flujo subsuperficial lateral. ....	66
6.2.6 Efecto del cambio de vegetación en el flujo base.....	67
6.2.7 Efecto del cambio de vegetación en la evapotranspiración en la cuenca. ....	68
6.2.8 Efecto del cambio de vegetación en la recarga de los acuíferos. ....	70
6.2.9 Producción de sedimentos.....	70
7. CONCLUSIONES .....	72
8. RECOMENDACIONES .....	73
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74
10. ANEXOS.....	79

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Representación en diagrama de bloques del sistema hidrológico global.....	14
<b>Figura 2.</b> Ubicación geográfica de la cuenca del río Güey.....	23
<b>Figura 3.</b> Períodos de crecimiento en la estación Maracay – CENIAP (1970 -2000). Evapotranspiración estimada mediante el método de Penman – Monteith. ....	24
<b>Figura 4.</b> Períodos de crecimiento en la estación Castaño Cabecera (1988 -2003). ....	25
<b>Figura 5.</b> Esquema general de manejo del modelo.....	28
<b>Figura 6.</b> Curvas de nivel de la cuenca del río Güey.....	30
<b>Figura 7.</b> Frecuencia acumulada del agua aprovechable del suelo estimadas según las diversas opciones de <i>Soilpar</i> . ....	32
<b>Figura 8.</b> Frecuencia acumulada de conductividad hidráulica saturada del suelo estimada según las opciones del sistema <i>SoilPar</i> . ....	33
<b>Figura 9.</b> Localización de las secciones aforadas. Imagen Google Earth. ....	34
<b>Figura 10.</b> Componentes de sección de flujo en un canal trapezoidal.....	35
<b>Figura 11.</b> Curvas de aforo de las tres secciones del canal. ....	39
<b>Figura 12.</b> Producción de agua mensual aforada en la sección 2. ....	39
<b>Figura 13.</b> Producción de agua diaria aforada en la sección de flujo 2. ....	40
<b>Figura 14.</b> Representación y división de la cuenca en Unidades de Respuesta Hidrológica. ....	41
<b>Figura 15.</b> Producción de agua mensual obtenida de aforos y las salidas de la simulación 1.....	46
<b>Figura 16.</b> Selección del factor alfa del suelo. Fase de calibración.....	47
<b>Figura 17.</b> Selección del retardo del agua subterránea. ....	47
<b>Figura 18.</b> Selección del coeficiente de re evaporación del suelo. Fase de calibración. ....	48
<b>Figura 19.</b> Producción de agua promedio mensual registrada y simulada con variación de 5% en el Número de curva. Fase de calibración.....	49
<b>Figura 20.</b> Producción de agua promedio mensual registrada y simulada con diversas combinaciones de parámetros de agua subterránea. Fase de calibración. ....	50
<b>Figura 21.</b> Distribución de frecuencia acumulada de la producción de agua en los escenarios de herbazales claros y uso actual.....	54
<b>Figura 22.</b> Producción de agua promedio mensual en los escenarios de herbazales claros y uso actual.....	55

<b>Figura 23.</b> Distribución de frecuencia acumulada de la escorrentía superficial escenarios de herbazales claros y uso actual.....	56
<b>Figura 24.</b> Producción de escorrentía superficial mensual en los escenarios de herbazales claros y uso actual. ....	56
<b>Figura 25.</b> Distribución de frecuencia acumulada del flujo subterráneo. Escenarios de herbazales claros y uso actual.....	57
<b>Figura 26.</b> Producción de flujo subsuperficial total mensual en los escenarios de herbazales claros y uso actual.....	57
<b>Figura 27.</b> Distribución de frecuencia acumulada de la producción de agua en los escenarios de planicie con bosque y uso actual. ....	58
<b>Figura 28.</b> Producción de agua mensual en los escenarios de bosque, planicie con bosque y uso actual.....	59
<b>Figura 29.</b> Distribución de frecuencia acumulada de la escorrentía superficial en los escenarios de bosque, planicie con bosque y uso actual. ....	60
<b>Figura 30.</b> Producción de escorrentía superficial mensual en los escenarios de bosque, planicie con bosque y uso actual. ....	60
<b>Figura 31.</b> Distribución de frecuencia acumulada de flujo subsuperficial total en los escenarios de bosque, planicie con bosque y uso actual. ....	61
<b>Figura 32.</b> Producción de flujo subterráneo mensual en los escenarios de bosque, planicie con bosque y uso actual.....	62
<b>Figura 33.</b> Distribución de frecuencia acumulada de producción de agua en los escenarios de uso mejorado y uso actual. ....	62
<b>Figura 34.</b> Producción de agua mensual en los escenarios de uso mejorado y uso actual. ....	63
<b>Figura 35.</b> Distribución de frecuencia acumulada de escorrentía superficial en los escenarios de uso mejorado y uso actual. ....	64
<b>Figura 36.</b> Producción de escorrentía superficial mensual en los escenarios de uso mejorado y uso actual.....	64
<b>Figura 37.</b> Distribución de frecuencia acumulada del flujo subterráneo en los escenarios de uso mejorado y uso actual. ....	65
<b>Figura 38.</b> Producción de flujo subsuperficial total mensual en los escenarios de uso mejorado y uso actual. ....	65

<b>Figura 39.</b> Frecuencia acumulada del flujo subsuperficial lateral en los diferentes escenarios de cambio de vegetacion. ....	66
<b>Figura 40.</b> Producción de flujo subsuperficial lateral mensual en los diferentes escenarios de cambio de vegetación. ....	67
<b>Figura 41.</b> Frecuencia acumulada del flujo base en los diferentes escenarios de cambio de vegetación. ....	67
<b>Figura 42.</b> Producción de flujo base mensual en los diferentes escenarios de cambio de vegetación. ....	68
<b>Figura 43.</b> Distribución de frecuencia acumulada de la evapotranspiración (mm) de los escenarios de uso de la tierra. ....	69
<b>Figura 44.</b> Promedios mensuales de evapotranspiración (mm). ....	69
<b>Figura 45.</b> Distribución de frecuencia acumulada de la producción de sedimentos ( $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) de los escenarios de uso de la tierra. ....	71
<b>Figura 46.</b> Promedios mensuales de producción de sedimentos ( $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ). ....	71

## INDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Estaciones pluviométricas empleadas en las simulaciones. ....	29
<b>Cuadro 2.</b> Promedios generalizados de agua aprovechable del suelo estimados mediante las opciones de <i>SoilPar</i> . ....	32
<b>Cuadro 3.</b> Resumen de levantamiento topográfico de las estaciones de aforo. ....	38
<b>Cuadro 4.</b> Fracción del área de la cuenca influida por cada estación. Precipitación en cada estación para el año de calibración. ....	42
<b>Cuadro 5.</b> Información topográfica por subcuenca. ....	43
<b>Cuadro 6.</b> Suelos por subcuencas. ....	44
<b>Cuadro 7.</b> Cobertura vegetal por Unidad de Respuesta Hidrológica. ....	45
<b>Cuadro 8.</b> Combinaciones de parámetros de agua subterránea utilizados en la calibración del modelo. ....	51
<b>Cuadro 9.</b> Promedios anuales para toda la cuenca e indicadores del escurrimiento superficial y del flujo base. ....	53
<b>Cuadro 10.</b> Promedio anual de la recarga de los acuíferos (mm) de los escenarios de uso de la tierra. ....	70

## INDICE DE ANEXOS

ANEXO A. Estadísticas climáticas de cada una de las estaciones empleadas en SWAT. ....	79
ANEXO B. Información de los suelos empleada en SWAT. ....	81

## 1. INTRODUCCIÓN

La cuenca del río Güey provee de agua a las instalaciones y campos experimentales del Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias (MCT- INIA) y de las Facultades de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Central de Venezuela (Verea, 1993). Al igual que muchas áreas montañosas, confronta problemas de degradación y carece de información básica hidrológica para apoyar la implantación de programas de conservación ambiental. En particular, esta cuenca presenta problemas de escorrentía y erosión debido al impacto de los incendios ocasionados durante la época seca. Por otra parte, durante la época de lluvias la cuenca genera volúmenes de agua y sedimentos que ocasionan desbordamientos y que afectan a sectores de la Facultad de Agronomía, el barrio El Milagro, la urbanización Caña de Azúcar y las avenidas Casanova Godoy y Universidad de Maracay.

Para hacer un manejo eficiente de los recursos hídricos de una cuenca, se tiene que conocer la oferta o disponibilidad de éstos, tanto en cantidad y régimen, como en calidad (Barrios y Urribarri, 2010). A medida que surge la necesidad de una gestión integrada de los recursos hídricos, cobra mayor importancia la evaluación cuantitativa de los procesos que influyen en la cantidad y calidad de los flujos de agua (Carmona, 2007). Al respecto, se han desarrollado diversos modelos de simulación para su evaluación y estimación en múltiples escenarios de suelo, clima, relieve, uso y manejo de la tierra (Silva, 2004).

Diversos autores concuerdan que mediante modelos de simulación hidrológica se puede evaluar el efecto que tienen distintos tipos de cobertura vegetal sobre los regímenes de producción y calidad del agua, y a su vez obtener resultados que orienten las líneas de acción que se deban adoptar en pro del desarrollo sustentable de la cuenca (Jácome, 2002; Carvallo, 2006; Silva, 2010; Carrera, 2012).

Con este trabajo, mediante la comparación de la producción de agua simulada con el modelo SWAT en diversos escenarios de cobertura vegetal, se logró obtener información para el uso racional de la cuenca.

## **2. OBJETIVOS**

### 2.1 Objetivo General

Evaluar el impacto que causarían diferentes arreglos de cobertura sobre la producción de agua y sus componentes en la cuenca del río Güey mediante el empleo del modelo de simulación SWAT.

### 2.2 Objetivos específicos

1. Obtener valores de gasto del río Güey mediante el aforo de diversas secciones de su canalización para ser empelados como referencia en la calibración del modelo SWAT.
2. Recopilar información básica de la cuenca a los fines de su empleo en el modelo SWAT.
3. Representar con el modelo SWAT el escenario de condiciones actuales de cobertura vegetal de la cuenca.
4. Calibrar la simulación de producción de agua con el modelo SWAT para las condiciones actuales según los valores de gasto obtenidos.
5. Aplicar el modelo calibrado a diversos escenarios de uso y manejo de la tierra.
6. Establecer patrones de la producción de agua según los cambios de cobertura vegetal simulados en la cuenca.

### 3. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACION

Es conveniente establecer algunas definiciones básicas en el contexto del estudio, en especial, lo referente a la cuenca hidrográfica como unidad de evaluación, el ciclo hidrológico como proceso medular del análisis funcional de la cuenca, la importancia de la vegetación en la regulación de los componentes de este flujo, los principales procesos de degradación que lo afectan, y finalmente, los modelos de simulación como herramientas para el análisis y evaluación integrados de las relaciones entre los cambios de vegetación y los cambios en los componentes del balance hidrológico, en especial, la composición y régimen de la producción de agua.

#### 3.1 Cuenca hidrográfica

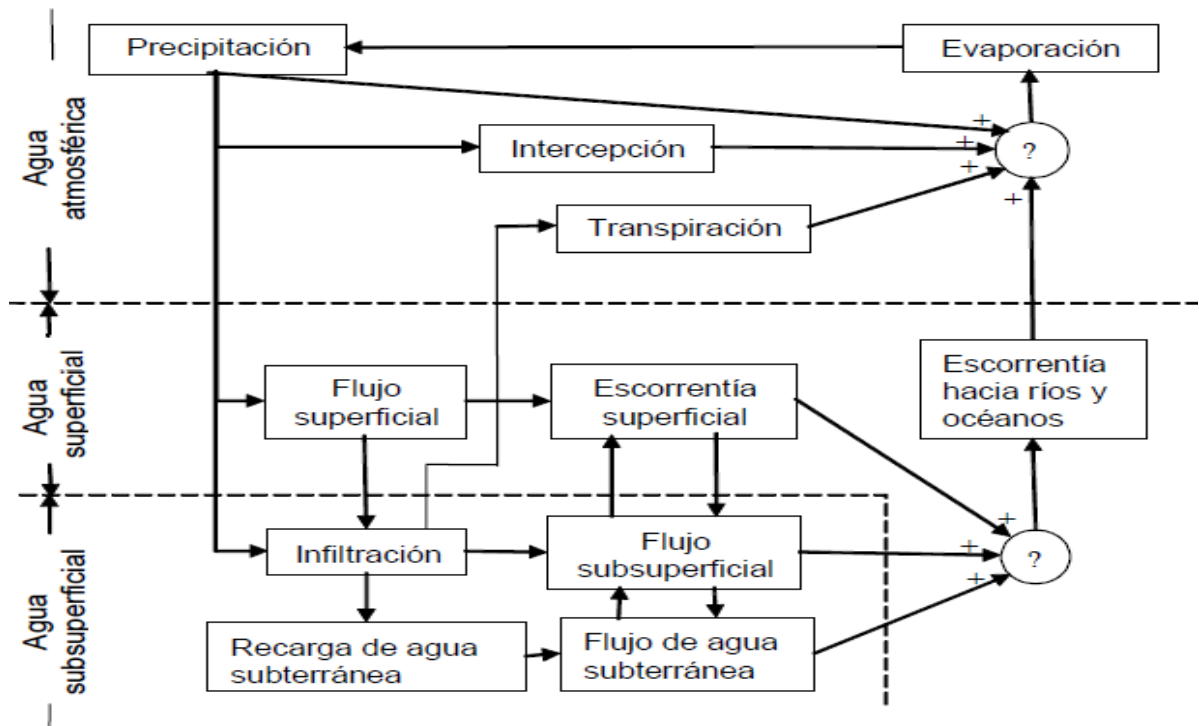
La cuenca hidrográfica es una unidad hidrológica que ha sido descrita y utilizada como una unidad físico-biológica y también, en muchas ocasiones, como una unidad socio-económico-política para la planificación y ordenación de recursos naturales (FAO, 1992). Es una zona delimitada topográficamente que desagua mediante un sistema fluvial, es decir, la superficie total de tierras que desaguan en un cierto punto de un curso de agua o río. Puede ser dividida en la parte alta, media y baja. Los cambios, uso y manejo en la parte alta, afectan de manera determinante las partes más bajas.

#### 3.2 El ciclo hidrológico:

El ciclo hidrológico es el foco central de la hidrología. En su carácter de ciclo, es recurrente y continuo: el agua se evapora de los océanos y la superficie terrestre para volverse parte de la atmósfera; el vapor de agua se transporta y se eleva en la atmósfera hasta que se condensa y precipita sobre la superficie terrestre y océanos; el agua precipitada puede ser interceptada por la vegetación, convertirse en flujo superficial sobre el suelo, infiltrarse en él, correr a través del suelo como flujo subsuperficial y descargar en los ríos como escorrentía superficial. La mayor parte del agua interceptada y de escorrentía superficial regresa a la atmósfera mediante la evaporación. El agua infiltrada puede percolar profundamente para recargar los acuíferos de donde emerge en manantiales o fluye hacia los ríos para formar la escorrentía superficial, y finalmente fluye hacia el mar o lagos a medida que el ciclo hidrológico continúa (Ven Te Chow *et al.*, 1994). El conocimiento del ciclo hidrológico como un sistema físico ayuda en el desarrollo

de un buen modelo y en la determinación de su precisión, puede dividirse en tres subsistemas (Figura 1):

- a) el sistema de agua atmosférica, que contiene los procesos de precipitación, evaporación, interceptión y transpiración;
- b) el sistema de agua superficial, que contiene los procesos de flujo superficial, escorrentía superficial, nacimientos de agua subsuperficial y subterránea y escorrentía hacia ríos y océanos; y
- c) el sistema de agua subsuperficial, que contiene los procesos de infiltración recarga de acuíferos, flujo subsuperficial y flujo de agua subterránea.



**Figura 1.** Representación en diagrama de bloques del sistema hidrológico global. Fuente: Ven Te Chow *et al.*, 1994

**3.3 Degradación de una cuenca:** La degradación de una cuenca hidrográfica es la pérdida de valor en el tiempo, incluyendo el potencial productivo de tierras y aguas, acompañado de cambios pronunciados en el comportamiento hidrológico de un sistema fluvial que se traduce en una peor calidad, cantidad y regularidad en el tiempo del caudal hídrico. La degradación de una cuenca hidrográfica contempla impactos recíprocos entre el uso inadecuado de las tierras (destrucción indiscriminada de los bosques, cultivos inadecuados, alteración de suelos, utilización sin control del agua) y pérdida de productividad o calidad de los recursos suelo y agua. A su vez ocasiona una degeneración ecológica acelerada, menores oportunidades económicas y mayores problemas sociales (Rojo, 2000).

### **3.4 Relación de la cobertura vegetal y los procesos hidrológicos de una cuenca**

La cobertura vegetal ejerce importante influencia en los procesos de degradación de una cuenca ya que ella tiene gran incidencia en las modificaciones de las propiedades del suelo (Carvalho, 2006). La vegetación afecta al escurrimiento, infiltración, transpiración y evaporación ya que la cobertura vegetal modifica la forma en que los volúmenes de agua acceden a los cauces, disminuyendo los aportes superficiales y aumentando los aportes subterráneos, en pocas palabras opone una resistencia mecánica y a su vez desempeña una acción potente contra la erosión (Frederic, 1975).

### **3.5 Modelos de simulación hidrológica**

Los modelos hidrológicos son herramientas de análisis y de planificación que permiten, a partir de información básica disponible, obtener aproximaciones cuantitativas de los efectos que causarían sobre el comportamiento de la cuenca alteraciones en el ambiente y el impacto de diversos escenarios sin tener que esperar a que ocurran para saber la respuesta que tendrá el sistema (Carmona, 2007). Silva (2003) define a los “modelos agroambientales” como un conjunto de ecuaciones y reglas que asocian información de entrada para calcular variables de interés agronómico-idrológico y de calidad ambiental y que permiten cuantificar procesos de productividad y/o degradación en unidades ambientales bajo diversos escenarios de uso y manejo.

La evaluación de los distintos escenarios busca responder la pregunta ¿Qué ocurriría si...?. Por ejemplo, si lloviera más, si se cambia la fecha de siembra, si se introduce otro cultivo, etc. Para responder a estas preguntas es necesario recurrir a simulaciones debido a la imposibilidad de

establecer ensayos continuos y representativos del escenario planteado y el costo que pueda generar (Silva, 2002).

Aunque sea imposible establecer la calidad de las simulaciones en una gran cantidad de escenarios de ambiente y uso, es necesario, que los modelos de simulación sean evaluados como paso previo a la transferencia de resultados o recomendaciones, bien sea en términos de la precisión, órdenes de magnitud o tendencias de sus estimaciones. Negahban (1991) menciona que la evaluación de un modelo de simulación es un proceso donde se examina su credibilidad, en el que el usuario busca conocer si éste puede representar adecuadamente el comportamiento del sistema. Una forma común de evaluar los modelos es mediante la validación, es decir, la comparación de los valores producidos por el modelo con los valores reales o medidos (Comerma *et al.*, 1987)

La calibración y validación de los modelos son procedimientos claves para reducir la incertidumbre y, consecuentemente, aumentar la confianza del usuario en cuanto a las capacidades de estimación y hacer efectiva su aplicación. El establecimiento de valores adecuados de parámetros relevantes para SWAT servirá de referencia o línea base para ser empleado por investigadores y planificadores en el análisis de los impactos que sobre la producción de agua ocasionarían el cambio de uso, manejo y ordenamiento de la tierra en una cuenca determinada (Silva, 2010).

### **3.6 El modelo SWAT**

SWAT (Arnold *et al.*, 1999; Neitsch *et al.*, 2005; y 2011) es un modelo de simulación hidrológica desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en conjunto con la Universidad de Texas. Es un modelo a escala de cuencas que opera de forma continua en el tiempo a intervalos diarios (Gassman *et al.*, 2007). El modelo SWAT puede ser aplicado en cuencas hidrográficas, desde cientos de hectáreas a miles de kilómetros cuadrados, con fines de evaluar el efecto del uso y manejo de la tierra sobre la calidad y régimen de las producciones de agua y sedimento.

Se basa en el balance hídrico para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en la cuenca. El modelo se mantiene en una continua revisión y expansión, tanto en su uso generalizado, como en la descripción y cantidad de los procesos hidrológicos simulados. La

cuenca bajo estudio puede dividirse en diversas Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU por sus iniciales en inglés) según el clima, los suelos, la vegetación o el relieve (Silva, 2003). Cada HRU es una combinación única de los factores ambientales y de manejo, y mediante ellas, se representa su variación espacial en la cuenca.

SWAT es uno de los modelos más utilizados en la actualidad para estimar el impacto que tienen las actividades de manejo en la producción de agua. Se tiene evidencia de que el modelo ha ganado aceptación internacional debido a la cantidad de trabajos publicados relacionados con SWAT, los cuales han sido evaluados y validados por distintos investigadores alrededor del mundo (Barrios y Urribarri, 2010).

La simulación puede ser separada en dos fases: la primera es la fase de tierra del ciclo hidrológico, la cual controla la cantidad de agua, el sedimento, carga de nutrientes y pesticidas en el cauce principal. La segunda división es la fase de enrutamiento del ciclo hidrológico, definido como el movimiento del agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas a través de la red de canales de la cuenca hidrológica hacia el vertedero (Neitsch et al., 2005).

## **FASE TERRESTRE DEL CICLO HIDROLOGICO**

El ciclo hidrológico simulado por SWAT está basado en la ecuación de balance de agua:

$$SW_i = SW_{i-1} + \sum (R_{day_i} - Q_{surf_i} - E_{a_i} - W_{seep_i} - Q_{gw_i})$$

Donde:

Para un día dado de simulación (i), SW es el contenido final de agua en el suelo (mm),  $SW_{i-1}$  es el contenido inicial de agua del suelo del día (mm), y es igual al valor final del día anterior (i-1), R<sub>day</sub> es la cantidad de precipitación (mm), Q<sub>surf</sub> es la cantidad de escorrentía superficial (mm), E<sub>a</sub> es la cantidad de agua evaporada y transpirada (mm), W<sub>seep</sub> es la cantidad de agua que entra la zona no saturada en el perfil del suelo (mm), y Q<sub>gw</sub> es la cantidad de flujo de retorno o flujo base (mm).

- **Clima**

El clima de una cuenca proporciona las entradas de humedad y energía, que controlan el equilibrio del agua y determinan la importancia relativa de los diferentes componentes del ciclo hidrológico. Las variables climáticas imprescindibles en SWAT consisten en precipitación diaria, temperatura máxima y mínima del aire y radiación solar. Se requiere velocidad del viento y humedad relativa en caso de emplear el método de Penman-Monteith para estimar la evapotranspiración de referencia. El usuario puede indicar diversas combinaciones de lectura o generación de datos según se disponga o no de registros diarios de cada elemento. (Neitsch et al., 2005).

- **Hidrología**

La escorrentía superficial se estima mediante el método del Número de Curva modificado para considerar el efecto de la humedad y pendiente del suelo. La infiltración se estima como la diferencia entre la precipitación y la escorrentía superficial. Una vez que el agua infiltra al suelo, ésta puede moverse a los horizontes inferiores según la capacidad de campo y conductividad hidráulica de éstos. Luego de trasponer el último horizonte, se efectúa la recarga del acuífero superficial. Si este último sobrepasa un nivel de agua límite, se produce flujo de base, (Neitsch et al., 2005).

- **Crecimiento del cultivo**

SWAT utiliza un modelo genérico de crecimiento de plantas para simular diversos tipos de cultivo y formaciones vegetales. El modelo puede diferenciar entre plantas anuales y perennes. Las plantas anuales crecen de la fecha de plantación a la fecha de cosecha o hasta que las unidades de calor acumuladas igualen las unidades potenciales de calor para la planta. Las plantas perennes mantienen sus sistemas de raíz a través del año, llegando a ser inactiva en los meses de invierno. Ellas reanudan el crecimiento cuando el promedio de temperatura del aire diaria supera la temperatura mínima requerida (temperatura base). El modelo del crecimiento de la planta es utilizado para estimar el consumo de agua y nutrientes de la zona de la raíz, la transpiración y la producción de biomasa (Neitsch et al., 2005).

- **Erosión y sedimentación**

La erosión es estimada mediante una adaptación de la USLE para operar diariamente. Este valor no se considera en las simulaciones sino que se ofrece al usuario como referencia. La producción de sedimentos se estima para cada Unidad de Respuesta Hidrológica con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE). Mientras que en la USLE se utiliza la lluvia como un indicador de energía erosiva, en la MUSLE se utiliza la escorrentía para simular la producción de sedimentos. El componente de hidrología suministra las estimaciones de volumen y tasa máxima de escorrentía que, con el área de la sub-cuenca, se utilizan para calcular la energía erosiva de escorrentía. El factor de cobertura y manejo del cultivo se calcula cada día en que la escorrentía ocurre. Es una función de la biomasa y residuos sobre la superficie, acotada según un factor C mínimo para el cultivo o formación vegetal (Neitsch et al., 2005).

- **Nutrientes**

SWAT estima el movimiento y la transformación de las diversas formas de nitrógeno y fósforo en las cuencas. Los nutrientes pueden ser introducidos a los canales principales y transportados río abajo por escorrentía y flujo superficial o subterráneo lateral (Neitsch *et al.*, 2005).

- **Plaguicidas**

Aunque SWAT no simula el efecto negativo ocasionado en el crecimiento de una planta debido a las malezas, insectos, y otros competidores, los plaguicidas pueden ser aplicados a un HRU para estudiar el movimiento de la sustancia química en la cuenca. SWAT simula el movimiento de plaguicidas en la red de escorrentía superficial (en solución y absorbido por el sedimento transportado), y hacia el perfil de suelo y acuífero por filtración (en solución en el agua). Las ecuaciones usadas para modelar el movimiento del pesticida en la fase de suelo del ciclo hidrológico fueron adoptadas de GLEAMS (Leonard et al., 1987). El movimiento del pesticida es controlado por su solubilidad, degradación de vida media, y coeficiente de adsorción del carbono orgánico en el suelo. El plaguicida en el follaje de la planta y en el suelo se degrada de manera exponencial según el valor de vida media. El transporte del pesticida por agua y sedimento se calcula para cada evento de escorrentía, y se estima para cada capa de suelo cuando ocurre filtración (Neitsch et al., 2005).

- **Manejo del cultivo y la vegetación.**

SWAT permite al usuario definir las prácticas de manejo que ocurren en cada HRU. El usuario puede definir el principio y conclusión del ciclo del cultivo, y especificar momentos y cantidades de fertilizante, aplicaciones de plaguicida y riego. Al final del ciclo de cultivo, la biomasa puede ser removida del HRU como rendimiento o colocada en la superficie como residuo (Neitsch *et al.*, 2005).

## **FASE DE TRÁNSITO DEL CICLO HIDROLOGICO**

- **Tránsito en el canal principal**

El tránsito en el canal principal puede ser dividido en cuatro componentes: agua, sedimento, nutrientes y sustancias químicas orgánicas (Neitsch *et al.*, 2005).

### **Tránsito del flujo**

Cuando el agua fluye río abajo, una porción puede perderse debido a la evaporación y transmisión por la capa del canal. Otra pérdida potencial es la extracción de agua del canal para el uso agrícola o humano. El flujo puede ser suplementado por la lluvia directamente en el canal y/o por el agua de descargas puntuales. El flujo transita por el canal mediante un método de coeficiente de almacenamiento variable desarrollado por Williams (1969) o el método de tránsito de Muskingum (Neitsch *et al.*, 2005).

### **3.7 Algunas experiencias con el modelo SWAT**

En la cuenca del Golfo de Texas (683.200 Km<sup>2</sup>) los valores simulados de producción de sedimentos se ajustaron bien con los valores estimados por función logarítmica, considerando imprecisiones en los valores de entrada, errores de muestreo y los supuestos de modelo (Arnold *et al.*, 1999).

En México se validó el modelo SWAT en la cuenca El Tejocote, Atlacomulco, con el fin de comparar valores simulados y observados de producción de agua, sedimentos, gastos medios y biomasa durante un periodo de 5 años de observación (1980- 1985). Se obtuvo una estimación satisfactoria de la producción de agua y sedimentos, con un  $R^2$  de 0.85 y 0.71 respectivamente (Torres *et al.*, 2000)

En la cuenca Negwan, en la india, distrito de Bihar, se calibró y se aplicó el modelo SWAT sobre base diaria (año 1997) y base mensual (1992-1998). El estudio indicó el buen funcionamiento de SWAT para identificar y priorizar subcuencas críticas con el fin de definir lineamientos de manejo (Tripathi *et al.*, 2003).

En Venezuela, Silva (2002) evaluó el componente de producción de agua del modelo SWAT en una cuenca montañosa de 125 ha, en Macapo, estado Cojedes, zona Central de Venezuela. Obtuvo que el modelo sobreestimó los valores de escurrimiento superficial durante la ocurrencia de lluvia y subestimó el caudal en ausencia de ellas. El autor concluye que el modelo puede ser de uso conveniente en la evaluación comparativa de escenarios de uso de la tierra ya que es capaz de diferenciar los órdenes de magnitud de los procesos de degradación que ocurrirán en diversos escenarios de uso y manejo. Por otra parte, sostiene que la buena selección del número de curva y de los parámetros de flujo superficial es fundamental para obtener resultados favorables. En la misma cuenca, Carmona (2007) efectuó detallados análisis de sensibilidad, con los que determinó los parámetros críticos para la calibración de modelo. Luego de validar el modelo, concluyó que el modelo SWAT fue capaz de estimar razonablemente bien la producción de agua.

En la cuenca del río Chama, estado Mérida el modelo SWAT tuvo un buen desempeño aun cuando no se realizó calibración ni ajuste de parámetros. La simulación de la escorrentía mensual fue satisfactoria. A nivel diario, la simulación resultó insatisfactoria con reducida correlación entre los registros diarios de precipitación y los de escorrentía superficial observada (Barrios y Urribarri, 2010).

En la cuenca media del río Pao (1552 km<sup>2</sup>) se realizó la simulación mediante el modelo SWAT (Silva, 2010). Sin calibrar, la producción de agua mensual y su flujo base se subestimaron notablemente. Con el ajuste de parámetros de agua subterránea, se obtuvieron simulaciones satisfactorias. La ligera sobrestimación obtenida se atribuyó a sobrevaloración del número de

curva, subvaloración del agua aprovechable y conductividad hidráulica saturada del suelo. Concluye el autor, que tal como fue calibrado, SWAT puede ser empleado como apoyo en la gestión de la cuenca media del río Pao y servir como referencia para usuarios del modelo en cuencas similares.

Diversas experiencias apuntan hacia la utilidad de SWAT para la evaluación y planificación de cuencas hidrográficas. Carvallo (2006) evaluó el efecto de cambios de cobertura sobre la producción de agua y sedimentos en una cuenca montañosa de los Teques, estado Miranda. Con la simulación fue posible diferenciar el efecto de los tipos de cobertura y finalmente establecer tendencias cuantitativas de la dinámica hidrológica de la cuenca. Finalmente concluye que el mejor escenario fue uso de bosque en las cabeceras y herbazal denso en las áreas medias y bajas.

SWAT fue aplicado por Jácome (2002), en la estimación de la producción de sedimentos de diversos escenarios de cambio en el uso de la tierra, donde utilizó índices de degradación basados en simulación hidrológica (propuestos por Silva, 2001). Obtuvo que cerca del 60% de la cuenca sufrió aumentos en el índice de degradación, debido al deterioro de la cobertura vegetal producido por un proceso de transformación de bosques y matorrales a herbazales.

## 4. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

### 4.1 Ubicación.

El estudio se efectuó en la cuenca media y alta del Río Güey, localizada al norte del lago de Valencia, en el flanco sur de la rama litoral de la cordillera de la Costa, municipio Girardot, en el norte del estado Aragua (Figura 2). Hasta el final de la canalización del río, en la Facultad de Agronomía, ocupa aproximadamente una superficie de 1922 ha. Parte de ella se encuentra dentro del Parque Nacional Henri Pittier. El 67% de la cuenca corresponde a montañas escarpadas de las formaciones geológicas Las Brisas y Las Mercedes (Verea, 1993). Aguas abajo, hasta el Lago de Valencia, se conforma de una planicie de rellenos aluviales en área totalmente urbanizada.



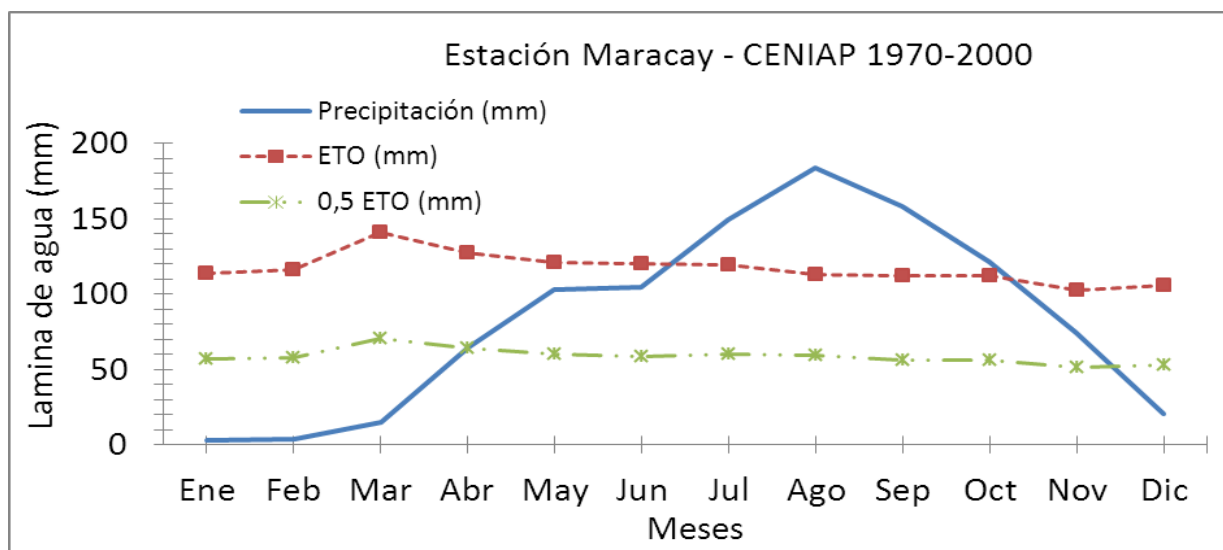
**Figura 2.** Ubicación geográfica de la cuenca del río Güey. Fuente: Nuñez (2007).

Varias quebradas confluyen al río Güey, desde el nacimiento del mismo éstas forman un salto de agua cerca del piedemonte conocido como Pozo del Diablo. Desde allí continúa en un cauce rocoso y de fondo arenoso, de aproximadamente un 1 km de largo, protegido por una selva de galería moderadamente intervenida y afectada ocasionalmente por incendios anuales de vegetación. Luego continúa a través del valle, en un curso de unos 3 km aproximadamente, desprovisto de vegetación arbórea. Finalmente corre sobre un canal de concreto, pasando por la ciudad de Maracay hasta su desembocadura en el Lago de Valencia (Lugo, 1990).

## 4.2 Clima.

El clima presenta una variación influida principalmente por la altitud. No obstante, en toda la cuenca la distribución de la precipitación es biestacional (épocas seca y lluviosa) con el máximo de precipitación promedio en julio y agosto. En general, la precipitación anual promedio varía entre 1000 mm en la parte más baja (alrededor de 500 metros de altitud) hasta 1600 mm (alrededor de 1400 m de altitud). La temperatura media anual, en el mismo sentido, varía entre 25 y 20°C (Silva, 2014)

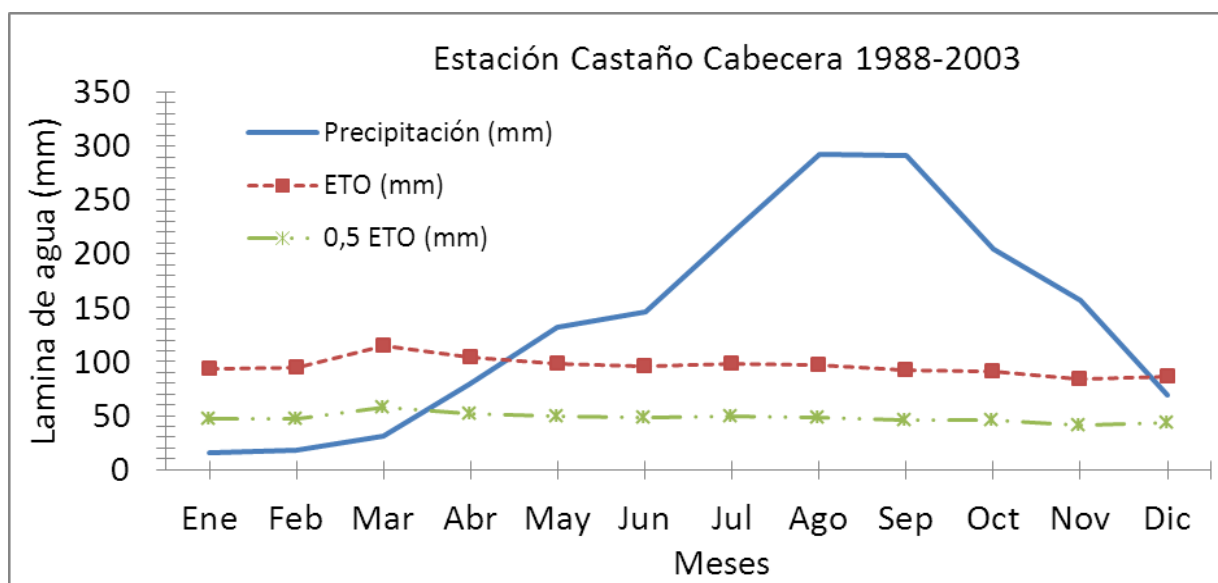
En la zona más baja, la época seca ocupa desde noviembre hasta abril y un período de lluvias de mayo a octubre (Figura 3). La temperatura media anual es 25°C, la precipitación media anual es 1063 mm, concentrándose cerca del 90% en la estación lluviosa. La evaporación media anual es 1080 mm (Viloria *et al.*, 2009). La zona de vida del área es clasificada como Bosque Seco Premontano transicional a Bosque Seco Tropical (Núñez *et al.*, 2012).



**Figura 3.** Períodos de crecimiento en la estación Maracay – CENIAP (1970 -2000). Tomado de Silva, 2014.

En la zona alta, la época seca ocupa desde diciembre hasta marzo y el periodo de lluvias desde abril hasta noviembre (Figura 4). La temperatura promedio anual es de 20°C, la precipitación

media anual es de 1657,2 mm y la evapotranspiración media anual es de 1150,6 mm (Silva, 2014).



**Figura 4.** Períodos de crecimiento en la estación Castaño Cabecera (1988 -2003). Tomado de Silva 2014.

### 4.3 Geología

La cuenca del Río Güey está constituida por montañas pertenecientes a dos formaciones geológicas distintas. La formación Las Brisas, que cuenta con una extensión dentro de la cuenca de 1109 ha y que domina la porción norte. La formación Las Mercedes, que se encuentra en la porción sur, ocupa una superficie de 168 ha (Márquez, 1989).

Existe un área de sedimentos aluviales en la planicie de la cuenca, desarrollada a partir de sedimentos provenientes principalmente de la formación geológica Las Brisas, y en menor escala, de la formación geológica Las Mercedes, transportada principalmente por el río Güey. Cuenta con un área de aproximadamente 635 ha (Núñez, 2007).

Según Urbani (2002) la Formación Las Brisas presenta esquisto cuarzo - moscovítico - feldespático (sin biotita, ni granate), así como otros tipos de rocas. Según Aguerrevere *et al.* (1937), esta formación presenta principalmente esquistos y gneis, cuarzo-feldespáticos-micáceos,

esquistos cuarzo-sericitico-grafitosos con lentes, bloques y bandas de mármoles oscuros. Generalmente se encuentran capas de gneis asociadas con cuerpos calcáreos

La formación Las Mercedes está compuesta por una secuencia de esquistos cuarzo moscovíticos-grafitosos-calcáreos, con inclusiones de plagioclasa (Marco, 1987). Tiene una extensión ubicada dentro de la cuenca de 168 ha (Núñez *et al.*, 2012).

#### **4.4 Relieve**

La parte plana constituye un sitio aluvial de poca pendiente, está bordeada por montañas que adquieren una configuración de herraduras y cuyas alturas aumentan hasta confundirse con las serranías mayores de la cordillera. En las montañas que circundan dicha zona no se divisan crestas ni picos dominantes. Se puede notar un fuerte contraste entre el valle y la zona montañosa. Estas montañas presentan un perfil longitudinal de pendiente fuerte, que se ha originado como consecuencia de desprendimientos en masa, poder erosivo, y el curso escabroso y profundo de los torrentes invernales periódicos que suelen arrastrar grandes peñones hasta parte del valle (Machado, 2006).

#### **4.5 Sensibilidad ambiental**

Según Marco (1987), la zona califica de alta sensibilidad ambiental debido a la combinación de diferentes factores, como a) el clima, caracterizado por la biestacionalidad, y consecuentemente, una marcada época seca, b) el relieve, que muestra cambios abruptos y bien diferenciados (en la zona plana predominan las de 0- 3% mientras que en las zonas altas se observan fuertes pendientes que pueden superar el 60%), c) la intervención humana, que ha contribuido al deterioro de la cuenca al provocar los extensos incendios que causan pérdidas de vegetación en esta áreas, dejando así empinadas laderas completamente desprovistas de cobertura, produciendo un importante arrastre de sedimentos, que afecta la red de drenaje de la ciudad y que se deposita en gran medida en el Lago de Valencia al ocurrir las precipitaciones.

## **5. MATERIALES Y MÉTODOS**

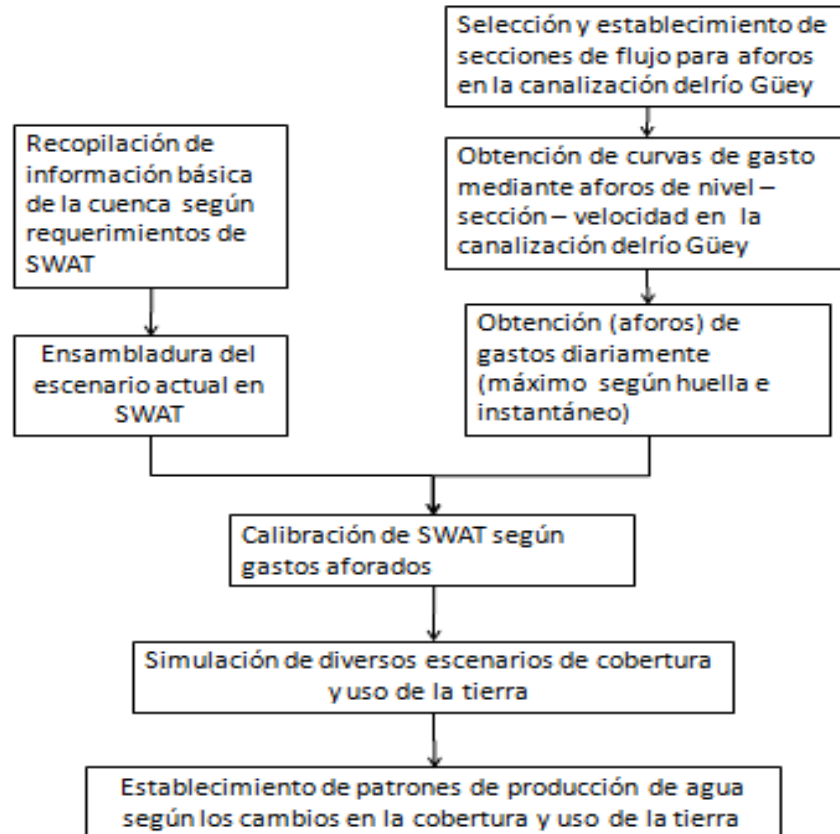
### **5.1 Empleo del modelo SWAT**

Para estimar el efecto de cambios en la cobertura vegetal sobre la producción de agua de la cuenca, se empleó el modelo de simulación hidrológica SWAT, versión 99.2 (3.0.4), con interfaz para Windows.

El empleo del modelo consistió de dos fases:

- a) El modelo fue calibrado según valores de producción de agua obtenidos mediante aforos a lo largo del período 13 de marzo al 19 de diciembre de 2014, con un total de 56 eventos de lluvia. En esta fase se emplearon registros diarios de precipitación coincidentes con el período de aforos.
- b) Luego, se simularon diversos ordenamientos de la vegetación y tipos de uso de la tierra para estimar el impacto de tales cambios en el régimen y componentes de la producción de agua. En esta fase, se emplearon registros diarios de precipitación del período 1979 – 2000 (22 años).

La figura 5 muestra un esquema general de empleo del modelo. Más adelante se especifica el origen de los registros empleados.



**Figura 5.** Esquema general de manejo del modelo.

### 5.1.1 Recopilación de información

En primer lugar, se recopiló información básica de la cuenca a los fines de su empleo en el modelo SWAT: registros climáticos, información topográfica, tipos de suelo y uso actual. La información se obtuvo a partir de la revisión de trabajos realizados en la cuenca, así como por reconocimiento y muestreos en campo.

#### 5.1.1.1 Información climática

En general, se utilizaron los registros de cuatro estaciones meteorológicas: dos dentro de la cuenca y dos vecinas a ella. La estación del INIA-CENIAP, la estación del Servicio de Climatología Agrícola de la Facultad de Agronomía - UCV y la estación meteorológica Castaño Cabeceras (ubicada fuera de la cuenca, y empleada para representar el clima de la cabecera de la cuenca). Dada las restricciones en calidad y cantidad de la información de esta última, fue necesario el empleo de la estación Rancho Grande (Cuadro 1). Una vez que se representó la cuenca en sus

diversas Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU), se asignó la estación climatológica más cercana a cada una de ellas.

**Cuadro 1.** Estaciones pluviométricas empleadas en las simulaciones para calibración.

Estación	Serial	Elementos	Coordenada Este	Coordenada Norte
Climatología UCV	9319	P, Tmax, Tmin, Rad	10,272	-67,60
INIA-CENIAP	447	P, Tmax, Tmin, Rad	10,283	-67,61
Rancho Grande	426	P	10,352	-67,68
Castaño-Cabeceras	438	P	10,356	-67,58

P: precipitación; Tmax: temperatura máxima; Tmin: temperatura mínima; Rad: radiación solar.

### **Precipitación**

Para la fase de calibración, el modelo se programó para leer los valores de precipitación diaria correspondiente al período de aforos efectuados (13 de marzo al 19 de diciembre de 2014), obtenidos a partir del procesamiento de registros provistos por el servicio de climatología de la facultad de agronomía-UCV, la estación INIA-CENIAP, y la estación Rancho Grande. Con el fin proveer al modelo de un “período de calentamiento”<sup>1</sup>, se incluyó la precipitación diaria de tres años anteriores al 2014.

### **Temperatura**

El modelo se programó para generar los valores de temperaturas máximas y mínimas de la cuenca. Para ello, el modelo emplea los valores promedio de la temperatura máxima y mínima de cada mes y de las desviaciones típicas mensuales de los valores diarios. En este caso, se emplearon los valores de la estación INIA-CENIAP (de 1979 a 2000) para la parte baja de la cuenca. Para la parte alta de la cuenca, los valores de temperatura máxima y mínima media se ajustaron según el gradiente altotérmico de la estación INIA-CENIAP a la altitud de la estación Castaño Cabecera. Se mantuvieron los valores de desviación típica.

<sup>1</sup> Se conoce como “período de calentamiento” a un intervalo de simulación previo al momento en que inicia la simulación con fines de ajuste o calibración. Tiene como fin estabilizar las condiciones en que se iniciará la dicha simulación.

## Radiación

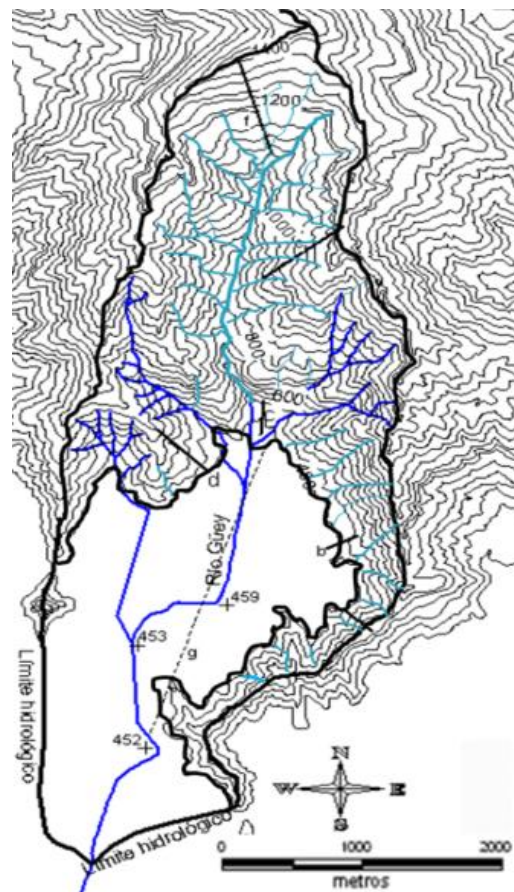
La radiación, se generó con el modelo según los valores promedios de cada mes y de las desviaciones típicas mensuales de los valores diarios a partir de la información de la estación INIA-CENIAP (de 1979 a 2000).

## Evapotranspiración

Para la estimación de la evapotranspiración se empleó la opción Priesley-Taylor provista por el modelo, que requiere información de radiación solar y temperatura.

### 5.1.1.2 Información topográfica

Para obtener la información topográfica requerida por el modelo (área, pendiente y la longitud del cauce por subcuenca) se empleó un mapa de curvas de nivel con equidistancia de 40 m (Silva, 2014), provisto por la Sección de Evaluación de Tierras del Instituto de Edafología, obtenido a partir de un modelo digital de terreno de la cuenca (Figura 6)



**Figura 6.** Curvas de nivel de la cuenca del río Güey. **Fuente:** Silva (2014).

### 5.1.1.3 Información de suelos

Se utilizó la información de suelos provenientes de seis perfiles representativos. De ellos, dos descritos por Núñez (2007) en la parte alta de la cuenca perteneciente a la formación Las Brisas (sector montañoso norte). Otros dos descritos por Silva y Márquez (Márquez, 2014) en la formación Las Mercedes (sector montañoso sur). Para los suelos de la planicie se utilizó la información de un perfil descrito por Vilorio y Ostos (Ostos, 1993) en el campo experimental de la Facultad de Agronomía, y un perfil descrito por Sucre *et al.*, (1979) de suelo en el campo experimental del INIA-CENIAP.

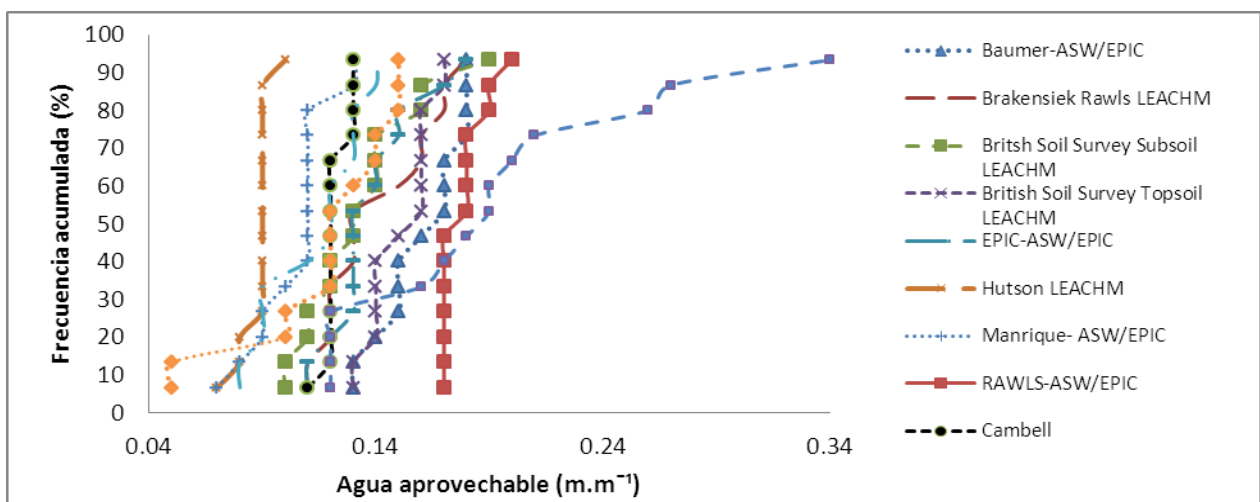
La información faltante en cada perfil de suelos (densidad aparente, agua aprovechable y conductividad hidráulica saturada) se estimó con el sistema SoilPar (Donatelli y Acutis, 2001; Acutis y Donatelli, 2003):

La densidad aparente se estimó mediante la opción *Baumer- Epic* por ser de uso común en los modelos cuyo componente de hidrología del suelo es derivado del modelo EPIC.

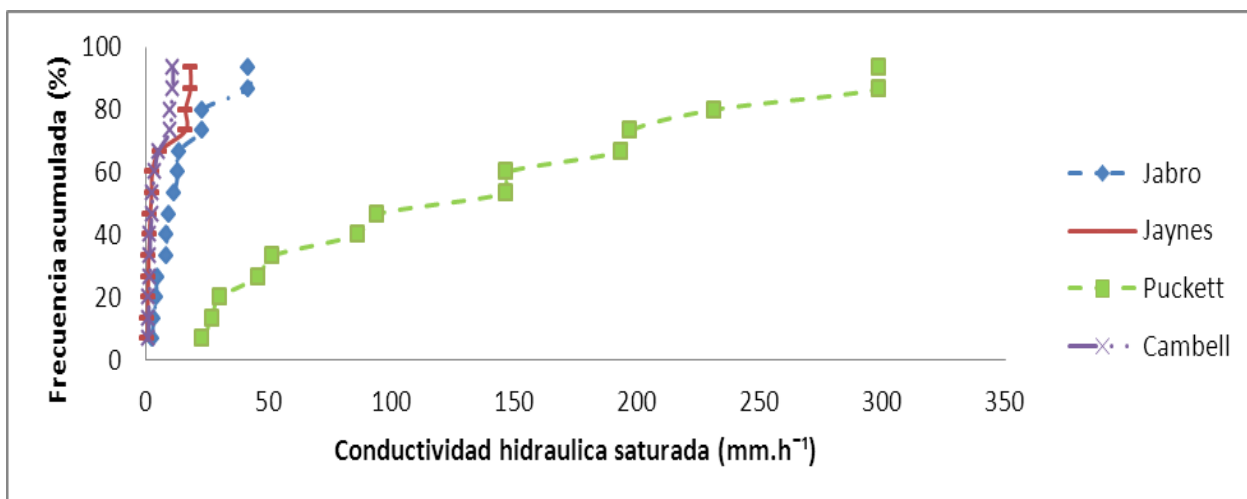
El valor de agua aprovechable se estimó como la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, obtenidos mediante la opción *Cambell*. Esta opción se seleccionó, según recomienda Silva (2009), por producir los valores de agua aprovechable más cercanos a la mediana que los producidos por la mayoría de las opciones disponibles. (Cuadro 2, Figura 7). Ello permite, al momento de la calibración, seleccionar otras opciones con mayores o menores valores según eventualmente se requiera. Consecuentemente, se estimó la conductividad hidráulica saturada mediante la misma opción, la cual también produce valores intermedios con respecto al resto de las opciones (Figura 8).

**Cuadro 2.** Promedios generalizados de agua aprovechable del suelo estimados mediante las opciones de *SoilPar*.

Opción	Capacidad de Campo ( $m.m^{-1}$ )	Punto de Marchitez Permanente ( $m.m^{-1}$ )	Agua aprovechable estimada en $m.m^{-1}$
Hutson LEACHM	0,3	0,21	0,09
Vereecken	0,24	0,13	0,11
RAWLS/Brakensiek 1985	0,20	0,09	0,11
Manrique- ASW/EPIC	0,19	0,07	0,12
Campbell	0,25	0,12	0,13
Mediana	0,24	0,11	0,13
British Soil Survey Subsoil	0,24	0,11	0,13
Brakensiek Rawls LEACHM	0,26	0,12	0,14
EPIC- ASW/EPIC	0,27	0,13	0,14
Mayr-Jarvis	0,18	0,03	0,15
British Soil Survey Topsoil LEACHM	0,29	0,14	0,15
Baumer- ASW/EPIC	0,24	0,09	0,15
RAWLS-ASW/EPIC	0,25	0,08	0,17



**Figura 7.** Frecuencia acumulada del agua aprovechable del suelo estimada según las diversas opciones de *Soilpar*.



**Figura 8.** Frecuencia acumulada de conductividad hidráulica saturada del suelo estimada según las opciones del sistema *SoilPar*.

Para estimar la erosionabilidad del suelo (Factor K de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo, USLE) se empleó el nomograma propuesto por Wischmeier *et al.*, (1971) ajustado a unidades métricas; citado por Rodríguez (2010). El valor obtenido se dividió entre 0,13 para adaptarlo al requerimiento de unidades de SWAT (según indican Neitsch *et al.* 2011).

#### 5.1.1.4 Cobertura vegetal, uso y manejo de la tierra.

El uso actual de la cuenca se determinó mediante imágenes satelitales de Google Earth. Con éstas, se efectuaron delineaciones que luego se asociaron con la vegetación y tipos de uso de la tierra mediante observación directa en campo y con la ayuda de investigadores de la Facultad de Agronomía<sup>2</sup>.

Cada clase de vegetación y uso de la tierra fue asociada a un archivo de formación vegetal o cultivo disponible en la base de datos del modelo.

La asignación del valor de Número de Curva se efectuó según la tabla típica incluida en la interfaz del modelo. Previamente, a cada perfil de suelo empleado se le asignó un grupo hidrológico de suelos según Chiang (1971), quien considera la clase de drenaje, textura, profundidad y subyacencia de horizontes rocosos fracturados. En el caso de los grupos hidrológicos

<sup>2</sup> Profesora Liliana Márquez, Cátedra de Ecología Agrícola, Departamento de Botánica Agrícola (lilianaemilia@gmail.com). Profesor Oscar Silva, Cátedra de Conservación de Suelos y Agua (oscar.silva@ucv.ve).

transicionales que resultaron de aplicar este método, se asignó el valor promedio entre los dos grupos en que existe la transición (por ejemplo: el Número de Curva cuando el suelo es de grupo hidrológico transicional +B es el promedio de los valores correspondientes a los grupos B y A).

## 5.2 Calibración del modelo.

Con el fin de calibrar la simulación de producción de agua con el modelo SWAT para las condiciones actuales, se estimaron gastos diarios en la canalización del río. Estos gastos se obtuvieron a partir de mediciones del nivel del agua y su velocidad correspondiente.

Para obtener los volúmenes diarios escurridos (producción de agua) se efectuaron aforos (obtención de pares de valores de nivel y velocidad del agua) en tres secciones de la canalización. La Sección 1 se ubicó bajo el puente peatonal en el Instituto de Edafología, la Sección 2, a 470 m aguas arriba, frente al Instituto de Genética, y la Sección 3, 130 m después, frente a la esquina final del Departamento de Química y Tecnología.

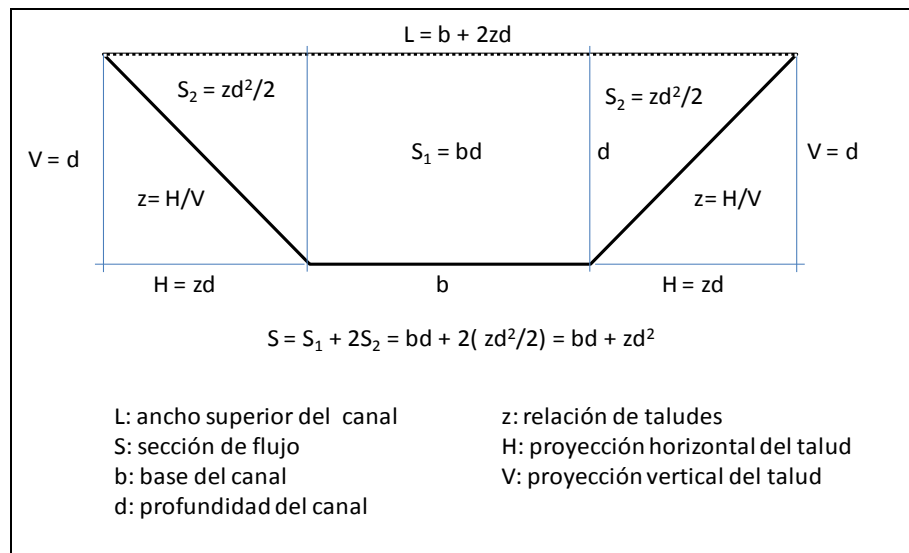
En la Figura 9 se muestra la ubicación de ellas:



**Figura 9.** Localización de las secciones aforadas. Imagen Google Earth.

Las dimensiones, forma y pendiente del canal se determinaron mediante levantamiento topográfico. Una vez determinados los parámetros de la forma (ancho de la plantilla, relación de taludes), la sección de flujo depende sólo del nivel del agua en la sección del canal.

En la Figura 10, se muestran los componentes de la sección de flujo en un canal trapezoidal:



**Figura 10.** Componentes de la sección de flujo de un canal trapezoidal.

Finalmente, conociendo la sección de flujo ( $S$ ) y la velocidad del mismo ( $V$ ), se obtuvo el gasto:

$$Q_{m^3 s^{-1}} = S_{m^2} * V_{m s^{-1}}$$

Con los pares de valores de nivel y gasto obtenidos, se construyeron curvas de aforo de cada sección. Estas curvas, aunque no son imprescindibles para la validación del modelo, se consideró pertinente presentarlas como resultado dada su utilidad en estimaciones del gasto del río que puedan efectuarse a posterioridad (por ejemplo, de instalarse una eventual estación de aforo).

A los fines de calibración del modelo, los valores de gasto obtenidos ( $Q_{m^3 s^{-1}}$ ) se transformaron a lámina escurrida diaria (o producción de agua,  $L_{mm día^{-1}}$ ) con la siguiente expresión:

$$L_{mm\ d^{-1}} = \frac{Q_{m^3\ s^{-1}} * 1000_{mm\ m^{-1}} * 86400_{s\ dia^{-1}}}{A_{ha} * 10000_{m^2\ ha^{-1}}}$$

Donde: A es el área de la cuenca.

Para obtener los niveles del flujo de agua, en un talud de cada sección seleccionada, se pintó una escala ajustada que permite obtener la lectura del nivel de agua en proyección vertical. La velocidad del agua en los aforos se determinó midiendo el tiempo que tarda un trozo de anime en recorrer veinte metros. Se tomaron lecturas frecuentes (por lo general, diarias, dos veces al día). Cada lectura de nivel se transformó a sección de flujo con los factores de forma del canal. Luego, con este valor de sección y la correspondiente velocidad del aforo, se calculó el gasto correspondiente como el producto de ambos valores.

Las determinaciones del nivel a los fines de estimar el gasto se efectuaron con las siguientes consideraciones:

Durante la época lluviosa, la medición del nivel se efectuaron de manera frecuente, dos veces al día (8:00 y 17:00 horas aproximadamente). En caso de ocurrencia de lluvias, se determinó el nivel de la huella de la crecida. En la época seca, se efectuó solo una medición diaria, pues el gasto de estiaje se considera de poca variación diaria.

Los valores de producción de agua diaria se emplearon como referencia para ajustar la producción de agua simulada por SWAT. Para ello, a los fines de ajustar la producción de agua en los días de lluvia, se modificaron los valores de Número de Curva (en no más del 5%) y del coeficiente de evaporación del suelo. El gasto de estiaje (producción de agua en la época seca), se ajustó mediante la modificación de los parámetros de agua subterránea: relación de flujo subsuperficial o factor alfa de agua subterránea ( $\alpha$ ), tiempo de retardo del flujo superficial (*delay*) y coeficiente de re-evaporación del acuífero (*revap*).

Para esta simulación de calibración, se emplearon los registros de precipitación diaria de las estaciones INIA-CENIAP, Facultad de Agronomía y Rancho Grande correspondientes al período en el cual se efectuaron los aforos.

### 5.3 Evaluación de cambios de cobertura

Una vez calibrado el modelo, se procedió a simular distintos ordenamientos y alteraciones de cobertura vegetal para evaluar los impactos que estos cambios producen sobre la producción de agua. En este caso, con el fin de efectuar simulaciones con el mayor plazo posible, se emplearon los registros de precipitación diaria de los años 1979 a 2000 de las estaciones INIA-Ceniap y Rancho Grande.

Se evaluaron los siguientes escenarios:

**Escenario “Herbazales Claros”:** supone el escenario de mayor degradación y abandono de la cuenca, donde todos los tipos de vegetación y uso se reemplazan por herbazales claros, como respuesta por ejemplo, a incendios extendidos y recurrentes.

**Escenario “Bosque”:** que se utilizará como situación hipotética de referencia en cuanto a una condición de conservación idealizada, donde se supone la presencia de bosques en toda la superficie de la cuenca. Este escenario solo se emplea como referencia, ya que su establecimiento real no es posible dadas las eventuales restricciones de las tierras (suelo, pendiente, clima)

**Escenario “Uso Protegido”:** representa mejoras en las unidades donde estaba presente el herbazal claro en la zona montañosa norte de la cuenca, donde se espera que gracias a prevención de incendios se logre aumentar la densidad de la cobertura vegetal sucesional.

**Escenario “Reforestación de Planicie”:** se emplea como escenario alternativo de uso, donde la vegetación y uso de la tierra del área plana se reemplazan por bosques. Se mantiene la vegetación actual de las zonas montañosa norte (herbazales claros) y sur (bosque decíduo). Supone el escenario físicamente factible de máxima reforestación en la cuenca (donde, en principio, las tierras admitirían sin mayores restricciones vegetación boscosa).

El impacto en la producción de agua se evaluó según los cambios en el régimen de producción de agua (distribución de frecuencias de las magnitudes, estacionalidad), balance entre los componentes del flujo (escorrentía superficial, flujo lateral, flujo de base y recarga del acuífero).

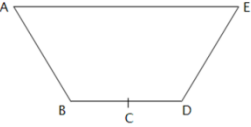
## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

### 6.1. Calibración del modelo.

#### 6.1.1 Resumen del levantamiento topográfico de las secciones del canal

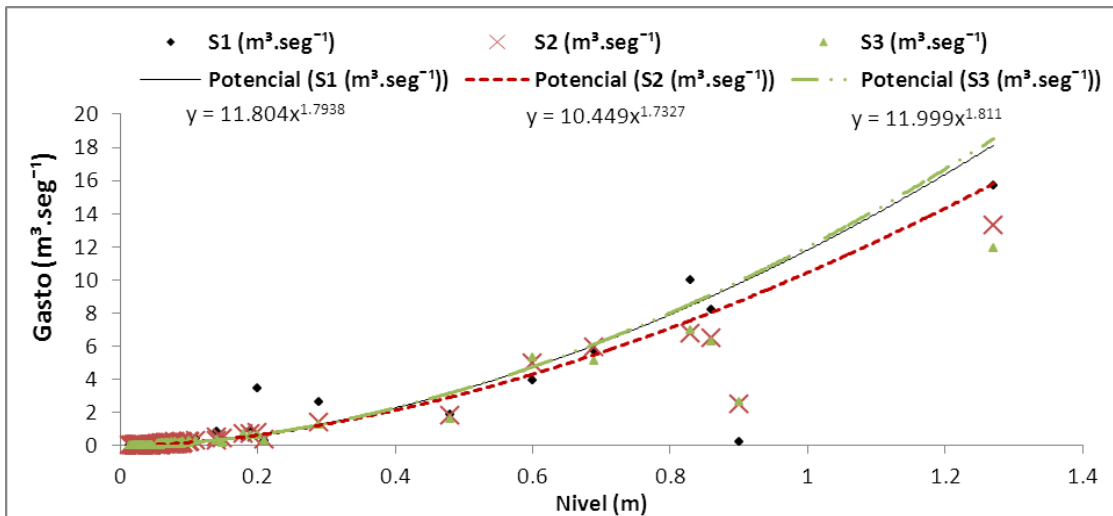
El cuadro 3 muestra las dimensiones de las secciones:

**Cuadro 3.** Resumen de levantamiento topográfico de las estaciones de aforo.

	<b>Sección 1</b>	<b>Sección 2</b>	<b>Sección 3</b>
<b>Talud A-B (m)</b>	3	3,01	3
Angulo de inclinación	34°	38°	37°
Relación de talud	1,48:1	1,27:1	1,32:1
<b>Talud D-E(m)</b>	2,92	3,17	3,02
Angulo de inclinación	35°	40°	36°
Relación de talud	1,42:1	1,19:1	1,37:1
<b>Plantilla (m)</b>	3,12	2,51	2,91
<b>Pendiente %</b>	0,32	0,68	0,47

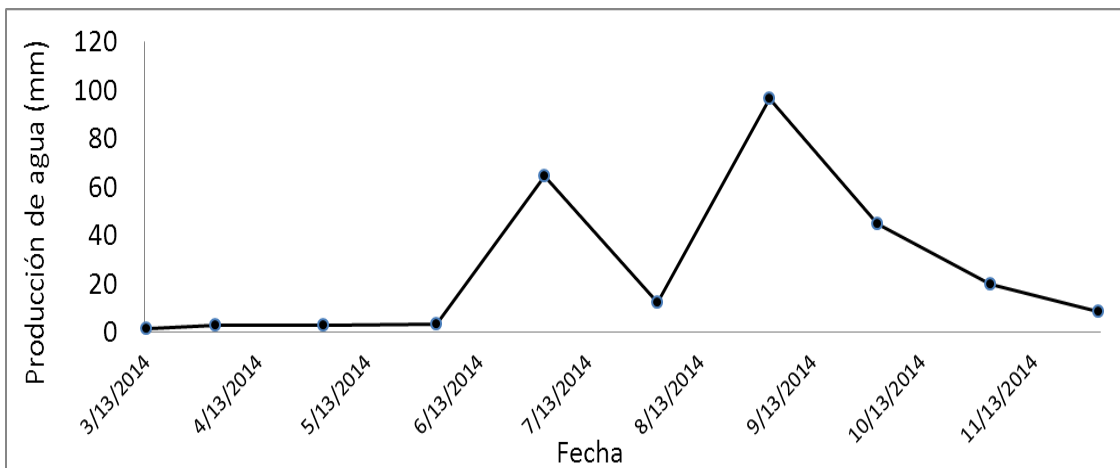
### 6.1.2 Curvas de aforo

La Figura 11 muestra las curvas de aforo de las secciones establecidas:



**Figura 11.** Curvas de aforo de las tres secciones del canal.

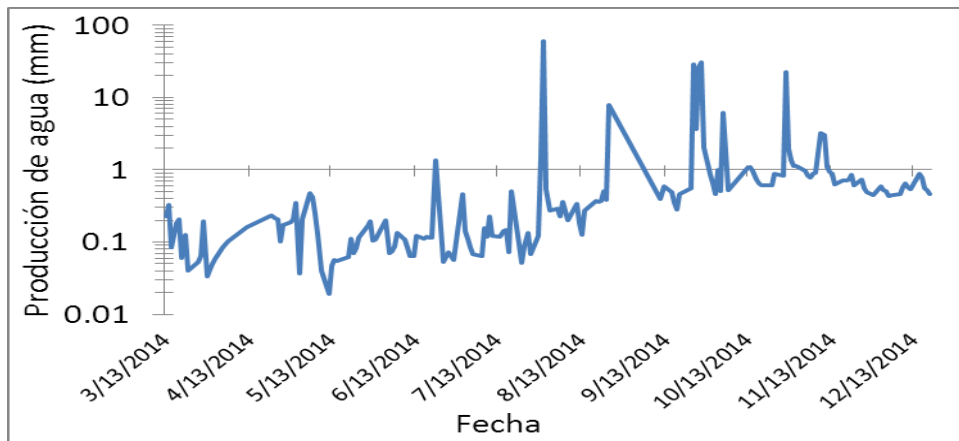
Debido a problemas de sedimentación de las secciones uno y tres, solamente se emplearon los valores de producción de agua de la sección dos como referencia para calibrar la simulación. La serie tiempo de la producción de agua según los aforos se muestra a continuación (figura 12):



**Figura 12.** Producción de agua mensual aforada en la sección 2.

En la serie de producción de agua mensual registrada se pueden observar los meses donde ocurrió la mayor producción de agua en la cuenca, el incremento comienza en el mes de mayo. Mientras que la mayor producción se registró entre septiembre y octubre.

Mediante los aforos se obtuvo un caudal base promedio (producción de agua promedio en días sin lluvia) de  $0,14 \text{ mm.dia}^{-1}$  ( $0,033 \text{ m}^3 \text{ seg}^{-1}$ ). En la época de lluvias, la mayor producción de agua fue de  $59,83 \text{ mm.dia}^{-1}$  ( $13,31 \text{ m}^3 \text{ seg}^{-1}$ ) (Figura 13).

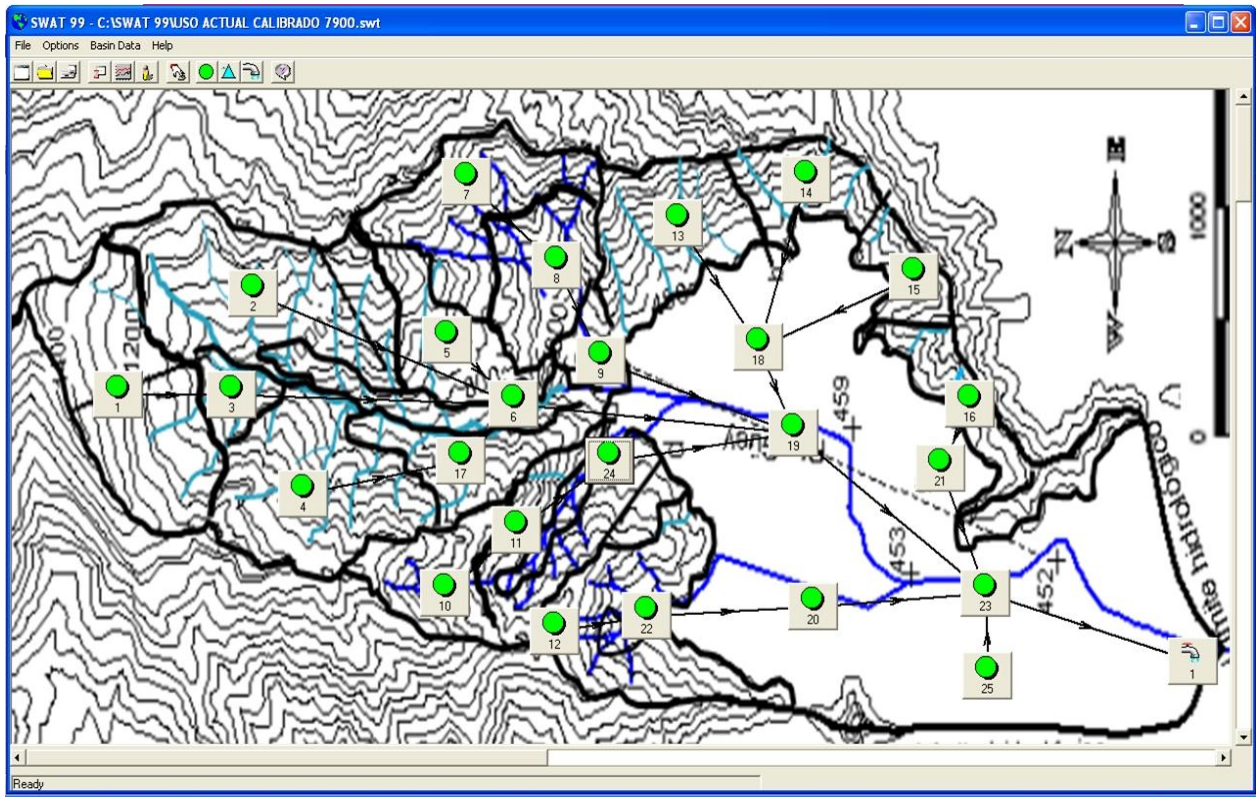


**Figura 13.** Producción de agua diaria aforada en la sección de flujo 2.

### 6.1.3 Representación de la cuenca en la simulación.

#### 6.1.3.1 Unidades de Respuesta Hidrológica.

La cuenca se representó con 25 Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU), es decir, unidades de características homogéneas de clima, suelo, topografía y uso actual. En general, la cuenca resultó dividida en subcuencas por tributario al cauce principal, y algunas de estas, divididas a su vez según el relieve o la vegetación (Figura 14). La superficie de la cuenca fue de 1730 ha, la correspondiente hasta la sección de aforo número dos.



**Figura 14.** Representación y división de la cuenca en Unidades de Respuesta Hidrológica.

### 6.1.3.2 Clima

#### Precipitación

En la simulación de calibración, el área alta de la cuenca quedó asociada a la estación Rancho Grande, el área de planicie y laderas bajas, quedó asociada con las estaciones INIA-CENIAP y Facultad de Agronomía. En el Cuadro 4 se muestra la fracción del área de la cuenca influida por cada estación, así como la precipitación en cada una para el año de la calibración. La precipitación promedio ponderada para toda el área fue de 1226,5 mm, con valores entre 948,8 y 1184 mm año<sup>-1</sup> en la zona baja y de 1545,6 mm año<sup>-1</sup> en la zona alta.

**Cuadro 4.** Fracción del área de la cuenca influida por cada estación. Precipitación en cada estación para el año de calibración.

Estación	HRU asociadas	Área de influencia en la simulación (%)	Precipitación en el año de calibración (mm)
INIA-CENIAP	5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,17,18,19, 20,22,24	64	1184,2
Facultad de Agronomía	16,21,23,25	21	949,8
Rancho Grande	1,2,3,4	15	1545,6

### Temperatura y Radiación

En cuanto a la temperatura, el 85% de la cuenca se representó por la estación INIA-CENIAP asociada a la parte baja y media de la cuenca. El 15% del área restante, se representó por la estación Rancho Grande, asociada a la parte alta de la cuenca.

A lo largo del año, en el área de la cuenca asociada a la estación Rancho Grande la temperatura máxima generada por el modelo varió entre 24,5 y 27,4°C, y la mínima entre 12,4 y 16,5°C. En el área de la cuenca asociada a la estación INIA-CENIAP la temperatura máxima varió entre 30,4 y 33,3°C, y la mínima entre 18,3 y 22,4°C.

La radiación fue generada en toda la cuenca según promedios de la estación INIA-CENIAP, varió entre 417,48 y 516,52 cal.cm<sup>-2</sup>.día<sup>-1</sup>.

#### 6.1.3.3 Topografía

Los atributos topográficos relevantes de las diversas unidades de respuesta hidrológica quedaron representados en el modelo de la siguiente manera (Cuadro 5):

**Cuadro 5.** Información topográfica por subcuenca.

HRU	Área en Fracción	Pendiente (m/m)	Longitud del cauce (km)
1	0,0731	0,28	1
2	0,0940	0,26	1,15
3	0,0209	0,29	0,5
4	0,0418	0,34	1,5
5	0,0278	0,21	0,7
6	0,0278	0,17	3,15
7	0,0557	0,26	0,5
8	0,0243	0,3	1
9	0,0209	0,3	0,6
10	0,0348	0,3	0,3
11	0,0487	0,3	0,4
12	0,0418	0,3	0,3
13	0,0487	0,38	0,8
14	0,0313	0,38	0,65
15	0,0243	0,3	0,3
16	0,0209	0,3	0,25
17	0,0209	0,3	0,7
18	0,0905	0,016	2
19	0,0662	0,016	2
20	0,0522	0,016	2
21	0,0557	0,016	2,5
22	0,0069	0,25	0,6
23	0,0278	0,016	0,8
24	0,0139	0,25	1,35
25	0,02787	0,016	0,8

#### 6.1.3.4 Suelos

La cuenca se representó en SWAT bajo seis suelos distintos, distribuidos en superficie según se muestra en el Cuadro 6. Todos los suelos clasificaron en el grupo hidrológico C+ (de moderado potencial de escorrentía).

**Cuadro 6.** Suelos por sucuencias.

Unidad de Respuesta Hidrológica (HRU)	Suelos	Grupo Hidrológico	Área	
			km <sup>2</sup>	%
1,2,3,4,5,7,8,10,11,12,13,14	Lithic Hapustepts	+C	8,65	50
6,9,17,24,22	Typic Haplustepts	+C	2,07	12
15,16	Typic Calciustepts	+C	0,86	5
18, 21	Fluventics Haplustolls	+C	2,20	12,7
19, 20	Fluventics Haplustolls	+C	1,78	10,3
23, 25	Suelos pavimentados	—	1,74	10

#### 6.1.3.5 Cobertura y uso actual

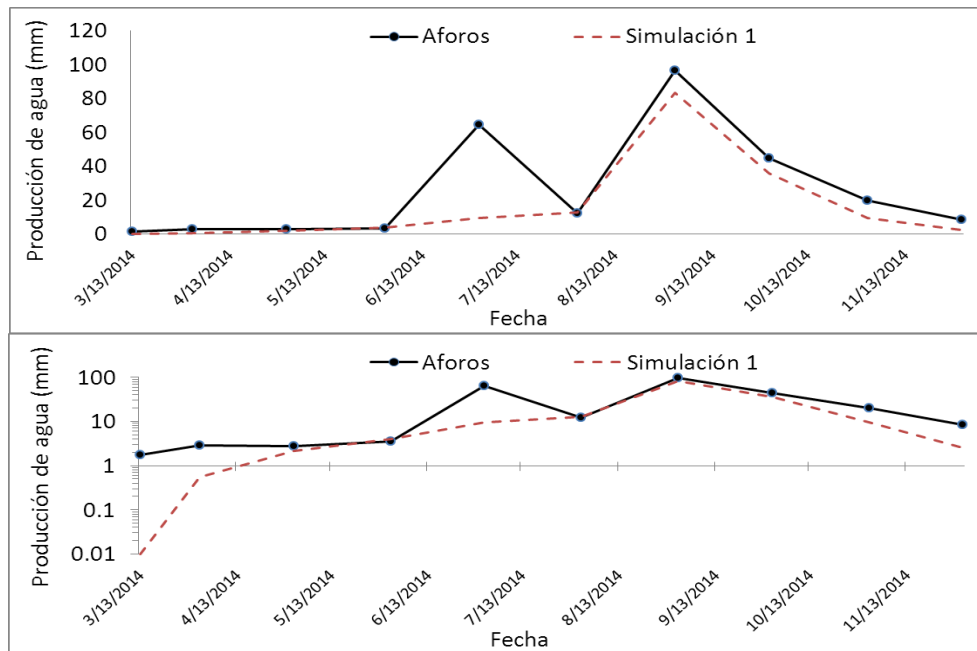
La cuenca quedó representada en SWAT con seis tipos distintos de cobertura vegetal: herbazales claros, bosque siempre verde o de galería, bosque deciuo, pastos de pastoreo, cultivos y área urbana (Cuadro 7).

**Cuadro 7.** Cobertura vegetal por Unidad de Respuesta Hidrológica.

Unidad de respuesta hidrológica (HRU)	Clase de uso de la tierra	Código del cultivo o formación vegetal en SWAT	Biomasa alcanzable (kg ha <sup>-1</sup> )	Numero de Curva CN2
1,2,3,4,5,7,8,10,11,12,13,14	Herbazales claros	SPCL	4000	77,7
	Herbazales densos	RGNB	8000	67,5
6,9,17,24,22	Bosque de galería	FREG	100000	59,85
15,16	Bosque deciduo	FRSD	80000	59,85
18, 21	Pastos (pastoreo)	PAST	10000	68,25
19, 20	Cultivos	AGRC	10000	68,25
23,25	Instalaciones urbanas	URB	0	88,2

#### 6.1.4 Ajuste de parámetros

Los valores de producción de agua de la primera corrida del modelo (sin calibrar, con los parámetros de agua subterránea iguales a cero), aunque representaron la tendencia general de los valores obtenidos de aforos, resultaron siempre inferiores (Figura 15). Llama la atención que el incremento de producción de agua en el mes de julio fue totalmente ignorado por el modelo, lo cual puede atribuirse a deficiencias en la disponibilidad y ubicación de las estaciones climatológicas. Es posible que haya ocurrido precipitaciones en la cabecera de la cuenca no registradas en la estación Rancho Grande.



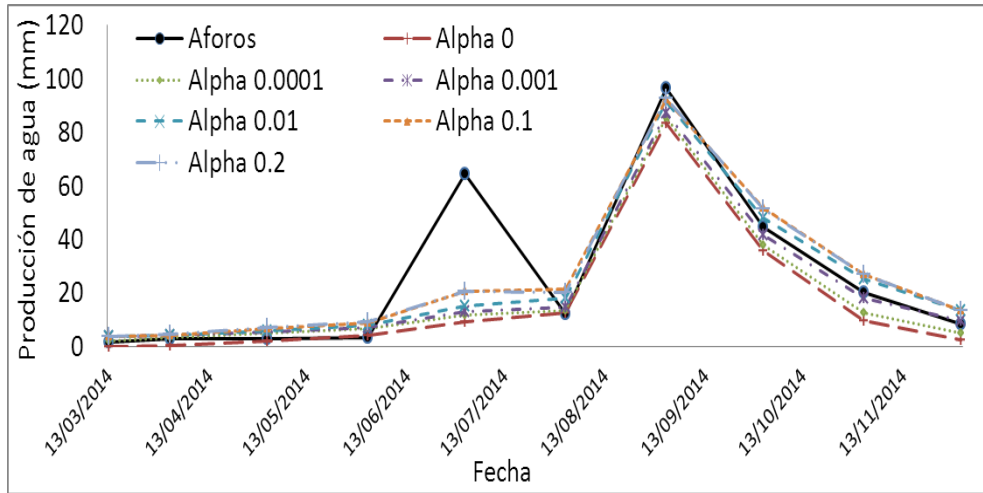
Se emplea la escala logarítmica (abajo) para visualizar las diferencias en los valores bajos.

**Figura 15.** Producción de agua mensual obtenida de aforos y las salidas de la simulación 1.

La subestimación generalizada de los valores indica un exceso de retención de agua en la cuenca. Por ello, se consideró conveniente modificar parámetros de agua subterránea para promover el flujo de base, y posteriormente, aumentar ligeramente los valores de Número de Curva (para aumentar la escorrentía),

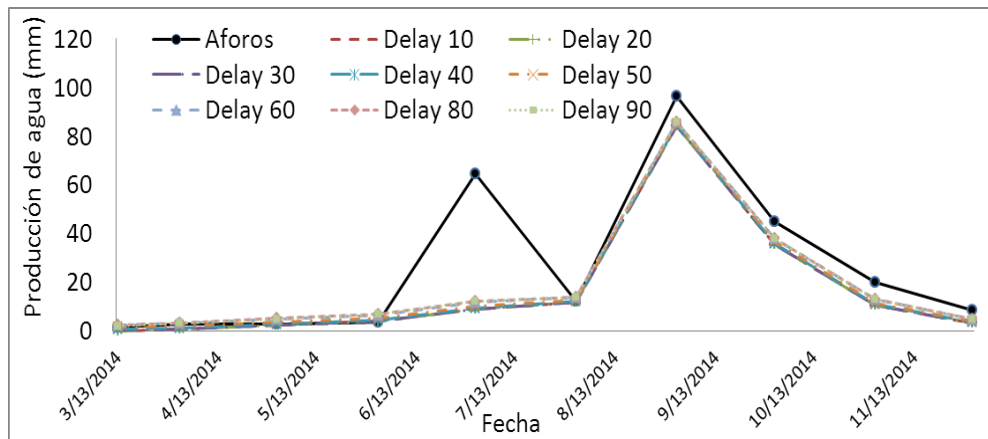
Con el fin de incrementar los valores de flujo base simulados, se introdujeron los valores obtenidos por (Carmona, 2007) y se modificaron sólo los parámetros (factor alfa del agua subterránea, retardo del agua subterránea y el coeficiente *revap*), los valores se incrementaron progresivamente partiendo desde cero. Se obtuvo lo siguiente:

- a) Con valores de parámetros de agua subterránea iguales a cero, se subestimó muy notablemente la producción de agua en la época seca.
- b) Al ir incrementando el factor alfa del flujo base se observó que valores menores a una diez milésima subestiman la producción de agua, mientras que valores superiores los sobreestiman (Figura 16).



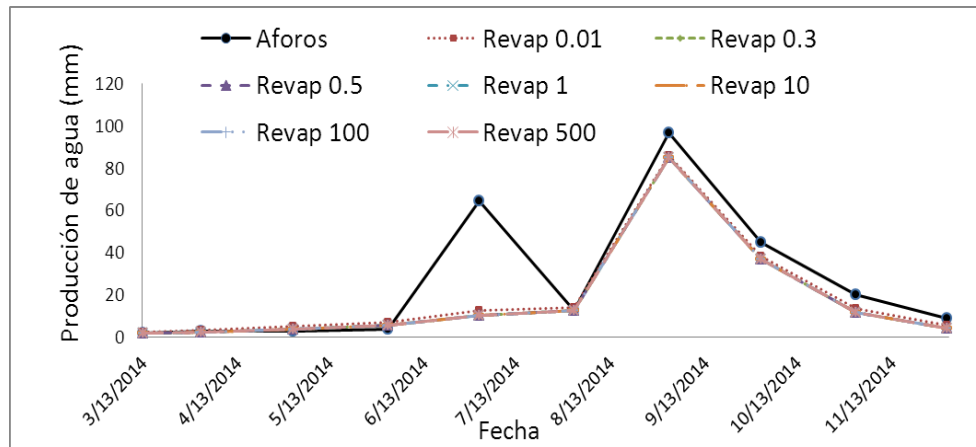
**Figura 16.** Selección del factor alfa del suelo. Fase de calibración.

c) Con valores de tiempo de retardo del agua subterránea (días) iguales a cero se subestima la producción de agua en la época seca. Al incrementarlos, valores superiores a cincuenta días presentan una sobrestimación de la producción de agua en la época seca. En la época de crecidas hubo subestimación, aun cuando los valores de reevaporación fueron iguales a cero (Figura 17).



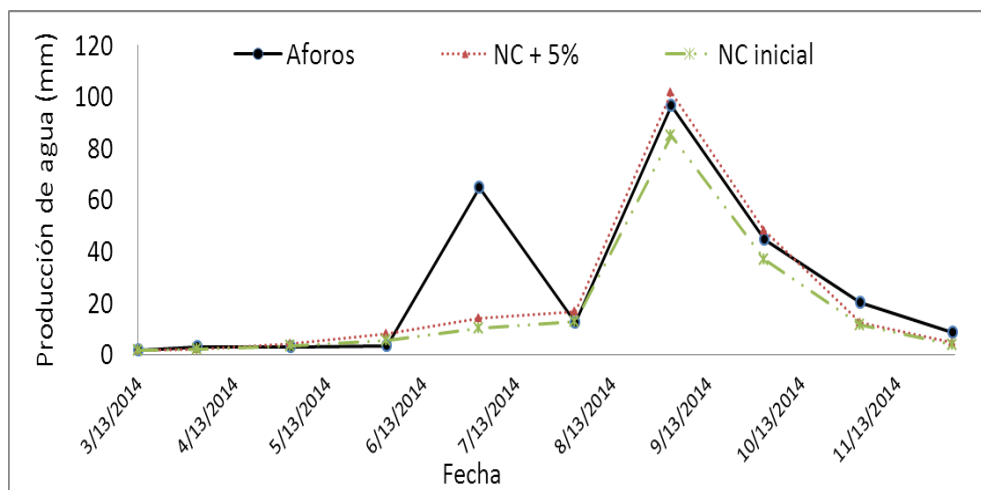
**Figura 17.** Selección del retardo del agua subterránea.

d) Al modificar el coeficiente de reevaporación del acuífero (revap), se encontró una sobrestimación de la producción de agua cuando los valores son cercanos a cero y subestimación con valores  $\geq 0.3$  (figura 18).



**Figura 18.** Selección del coeficiente de re evaporación del suelo. Fase de calibración.

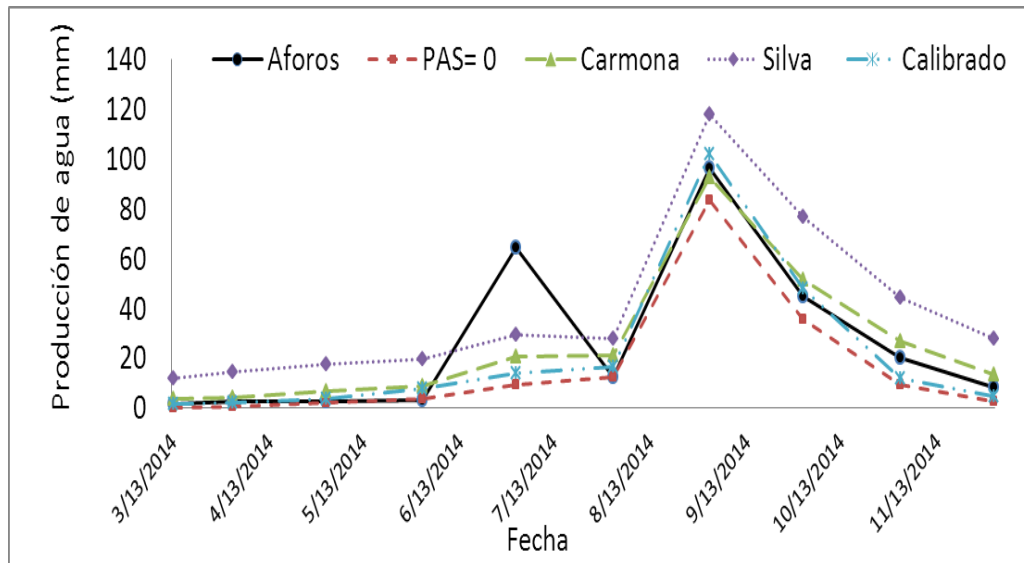
Al incrementar los valores de Número de Curva en 5%, los valores simulados se acercaron un poco a los obtenidos en aforos, encontrando una ligera sobrestimación de las crecidas (Figura 19). No se consideró conveniente proseguir con incrementos del Número de Curva ya que se distorsionaría la descripción del sistema, es decir, se asignarían valores no correspondientes con la descripción de la realidad. No fue posible representar el incremento de producción de agua del mes de julio, por lo cual se descarta un déficit de escorrentía por parte del modelo, y se reafirma la posibilidad de la ocurrencia de lluvias no registradas en la estación Rancho Grande.



**Figura 19.** Producción de agua promedio mensual registrada y simulada con variación de 5% en el Número de Curva. Fase de calibración.

Al final, se obtuvo una combinación que se identificó como “calibrado”, que se considera que representa adecuadamente el gasto base en la época seca, aún cuando se subestimó el gasto total de la cuenca y se sobreestimó un poco el gasto máximo cuando ocurrieron las crecidas.

Al comparar las salidas de esta combinación de parámetros de agua subterránea con las combinaciones obtenidas por Silva (2010) en la cuenca media del río Pao (1522 Km<sup>2</sup>) y Carmona (2007) en una cuenca pequeña de Macapo (1,25 Km<sup>2</sup>), zona montañosa del estado Cojedes (cuadro 8, figura 20), se observó que con tales combinaciones, se sobrestima la producción de agua en la época seca y de lluvias y además, se distorsiona el patrón (forma) de la distribución. Ello muestra la importancia de la calibración de acuerdo al área de estudio, para lo cual es necesario que las simulaciones se apoyen en valores de referencia de las salidas de interés.



**Figura 20.** Producción de agua promedio mensual registrada y simulada con diversas combinaciones de parámetros de agua subterránea. Fase de calibración.

**Cuadro 8.** Combinaciones de parámetros de agua subterránea utilizados en la calibración del modelo.

	Combinaciones de parámetros de agua subterránea					
	Silva	Carmona	Calibrado	PAS=0	Alpha=0	Delay=0
Altura inicial del flujo de agua subterránea (m)	0	0	0	0	0	0
Contribución del flujo subterráneo al flujo del canal (mm.día <sup>-1</sup> )	0.06	0.06	0.06	0	0.06	0.06
Factor alfa del agua subterránea	0.5	0.1	0.0001	0	0	0.0001
Rendimiento específico	0.3	0.3	0.3	0	0.3	0.3
Retardo del agua subterránea (días)	300	70	50	0	0	0
Coefficiente <i>revap</i>	0.1	0.5	0.3	0	0	0
Coefficiente de percolación del acuífero profundo	0	0.1	0.1	0	0.1	0.1
Almacenamiento umbral <i>revap</i> (mm)	250	0.6	0.6	0	0.6	0.6
almacenamiento inicial del acuífero profundo (mm)	0	0	0	0	0	0

Con los ajustes empleados, a pesar de que no se mejoró en su totalidad la simulación, se logró representar el caudal base en la época seca. Por otra parte, hubo una ligera sobreestimación de la producción de agua cuando ocurrieron las crecidas en la época de lluvias y, finalmente se subestiman los valores totales de producción de agua de la cuenca.

## **6.2 Impacto de cambios de en la cobertura vegetal sobre la producción de agua.**

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones de largo plazo (años 1979 a 2000) para los escenarios de uso actual y supuestos, efectuadas con el modelo calibrado. Por razones prácticas, en especial, por la extensión de la discusión, en primer lugar se presenta, para cada escenario planteado, el análisis en cuanto a producción de agua, escorrentía superficial y flujo subsuperficial total. Luego, se comparan los resultados de los escenarios según flujos subsuperficiales por separado (lateral y de base), recarga de acuíferos y producción de sedimentos.

### **6.2.1 Resumen comparativo sobre las variables anuales en los diversos escenarios.**

La magnitud del agua y sedimentos producidos, junto a las proporciones de escurrimiento superficial y flujo base, pueden servir de indicadores en cuanto a las bondades relativas de los escenarios en cuanto a producción de agua. Al respecto, los escenarios se considerarán aptos o convenientes en la medida que produzcan la mayor cantidad de agua, con menor proporción de escurrimiento superficial, mayor proporción de flujo base y baja producción de sedimentos.

En el cuadro 9 se puede observar los promedios de las salidas anuales para toda la cuenca y los indicadores para el escurrimiento superficial y el flujo base.

**Cuadro 9.** Promedios anuales para toda la cuenca e indicadores del escurrimiento superficial y del flujo base.

Escenario	Qt. <sup>1</sup> (mm)	Qs. <sup>2</sup> (mm)	Qs/Qt	Qsub. <sup>3</sup> (mm)	Qb. <sup>4</sup> (mm)	Qb/ Qt	Qrec. <sup>5</sup> (mm)	Qet. <sup>6</sup> (mm)	Sed. (Mg ha <sup>-1</sup> )
Uso actual	268,83	148,65	0,55	73,36	46,91	0,17	474,72	768,8	80,85
Herbazales claros	294,44	178,43	0,60	71,55	44,58	0,15	438,04	777,2	101,79
Planicie con bosque	254,84	134,79	0,52	73,36	46,75	0,18	480,68	776,3	80,44
Bosque	197,73	51,86	0,26	83,35	62,57	0,31	566,46	763,1	1,00
Uso protegido	226,23	87,88	0,38	80,24	58,20	0,25	529,45	766,9	1,94

<sup>1</sup> Producción de agua; <sup>2</sup> Escurrimiento superficial; <sup>3</sup> Escurrimiento subsuperficial lateral; <sup>4</sup> Flujo base; <sup>5</sup> Recarga de acuíferos; <sup>6</sup> Evapotranspiración.

El escenario de herbazales claros presentó la mayor producción de agua. Al mismo tiempo, presentó los valores más altos de escorrentía superficial y de producción de sedimentos. Por otra parte, presentó los valores más bajos de flujo base, ubicándolo de acuerdo con los resultados como el peor escenario de uso de la tierra. En menor medida, pero con valores muy cercanos a los producidos por los herbazales ralos, se ubica el escenario de uso actual. Puede entonces identificarse a ambos como los escenarios más desfavorables en términos de conservación.

La reforestación de la planicie no mejoró en términos de conservación de la cuenca. En este escenario, se disminuye un poco la escorrentía superficial y presenta la mayor recarga de acuíferos. No obstante, la producción de sedimentos es similar a la del escenario de uso actual,

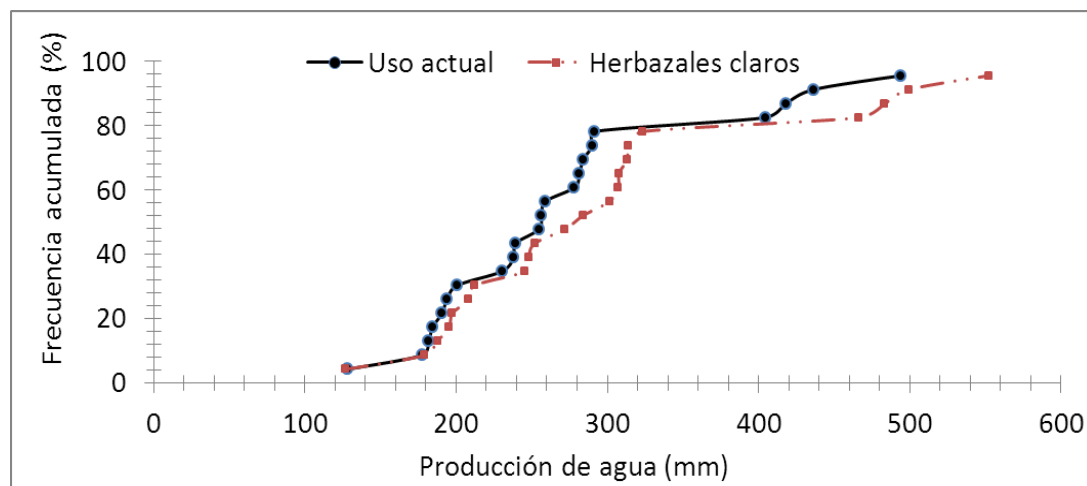
pues el área de mayor erosión (sector montañoso norte) permanece con cobertura de herbazales claros.

El escenario de uso protegido, en comparación con el escenario de uso actual, presenta una disminución de la escorrentía superficial y un incremento del flujo subsuperficial, ambos, cambios favorables en el régimen hidrológico. Complementariamente, presentan una disminución considerable de pérdidas de suelo, ya que las zonas de altas pendientes se encuentran bajo una cobertura más protectora.

Finalmente, el escenario de bosque presenta la escorrentía superficial más baja de los escenarios evaluados, así como la menor producción de sedimentos. Por otra parte, presenta indicadores que pudieran ser desfavorables, como la producción más baja de agua total y el flujo base más bajo, lo que indica una mayor retención de agua en la cuenca (intercepción en el dosel y agua en el suelo), mayores tasas de pérdida de agua por transpiración o mayor recarga del acuífero.

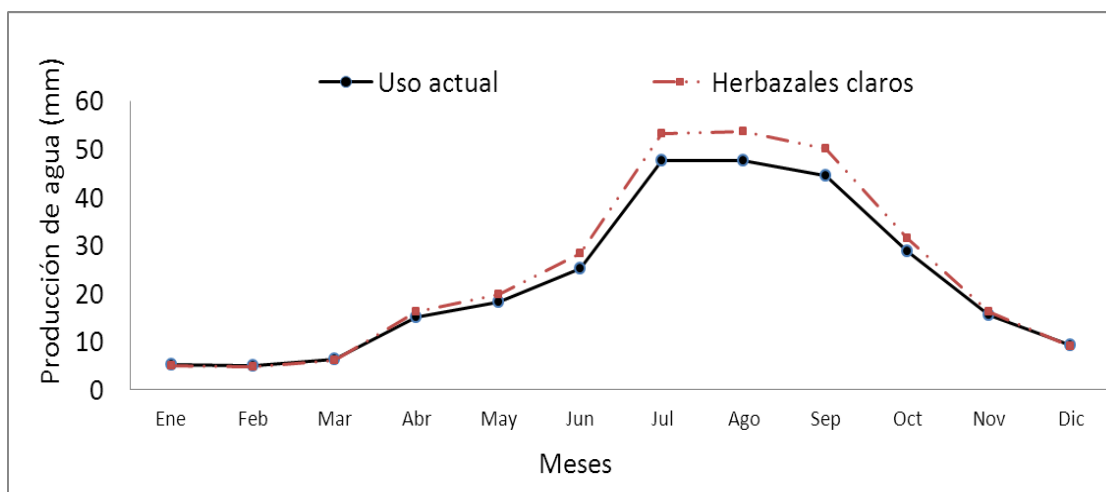
### 6.2.2 Efecto de la degradación de la vegetación (escenario de herbazales claros)

La producción de agua bajo el uso actual resulta un poco menor al escenario de degradación de la cuenca (herbazales claros). Con un mismo nivel de probabilidad, la producción de agua en los herbazales claros es mayor que la obtenida en el escenario de uso actual (Figura 21).



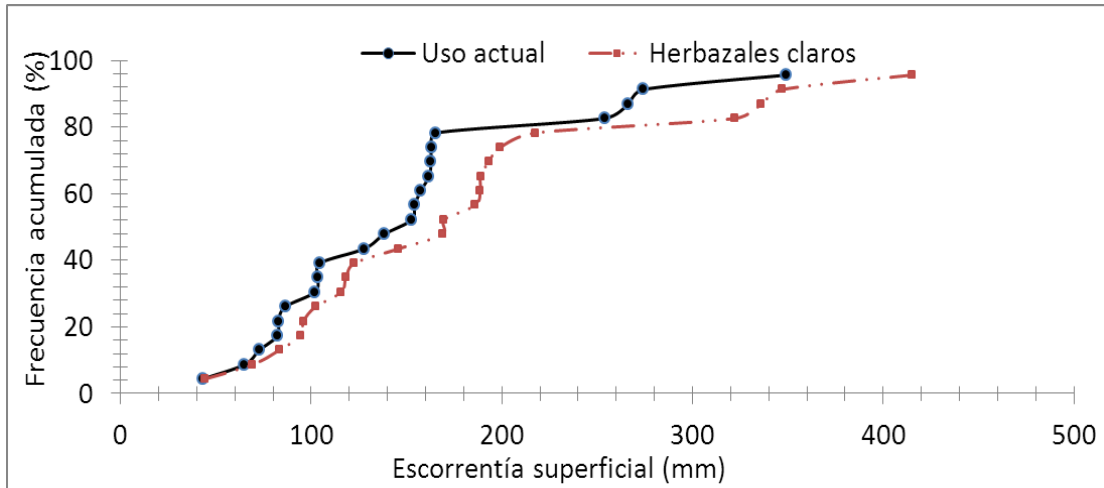
**Figura 21.** Distribución de frecuencia acumulada de la producción de agua en los escenarios de herbazales claros y uso actual.

En promedio, en ambos escenarios la producción de agua es similar en los meses secos, de entrada y salida de lluvias, pero un poco mayor en la entrada del periodo de lluvias (Figura 22). Ello muestra la poca retención de agua que ocurre bajo la cobertura actual de la cuenca.



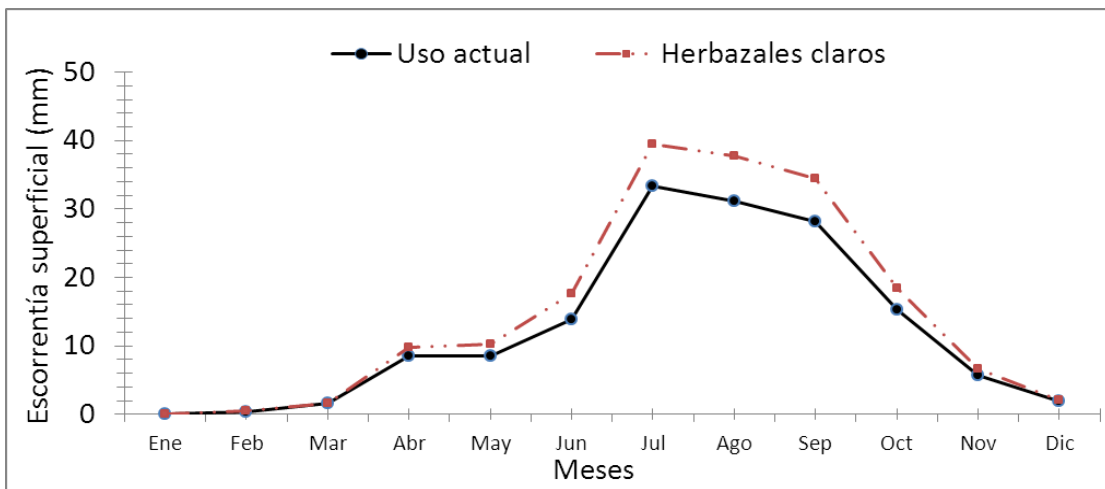
**Figura 22.** Producción de agua promedio mensual en los escenarios de herbazales claros y uso actual.

Al igual que ocurrió con la producción de agua, la escorrentía superficial en el escenario de herbazales claros, resultó mayor al compararse con los resultados del escenario de uso actual. Con un mismo nivel de probabilidad, la escorrentía en el escenario de herbazales claros fue mayor que la obtenida en el escenario de uso actual (Figura 23). Ello explica en gran medida que la producción de agua sea mayor en el escenario de herbazales claros que en el escenario de uso actual. En el contexto de uso del modelo SWAT esto se explica preferentemente por el mayor valor de Número de Curva de la vegetación de herbazales claros.



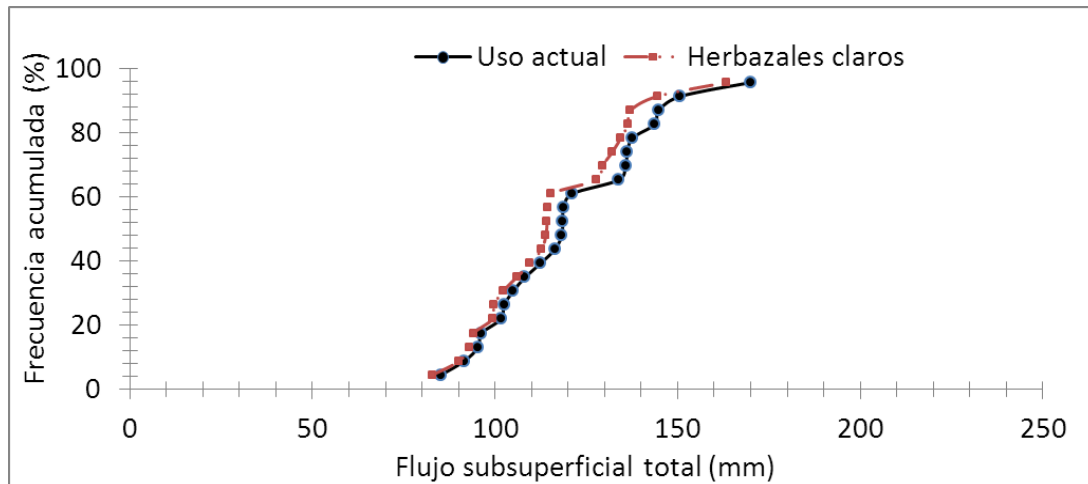
**Figura 23.** Distribución de frecuencia acumulada de la escorrentía superficial escenarios de herbazales claros y uso actual.

A lo largo de casi todo el año, la escorrentía superficial es mayor en el escenario de herbazales claros (Figura 24).



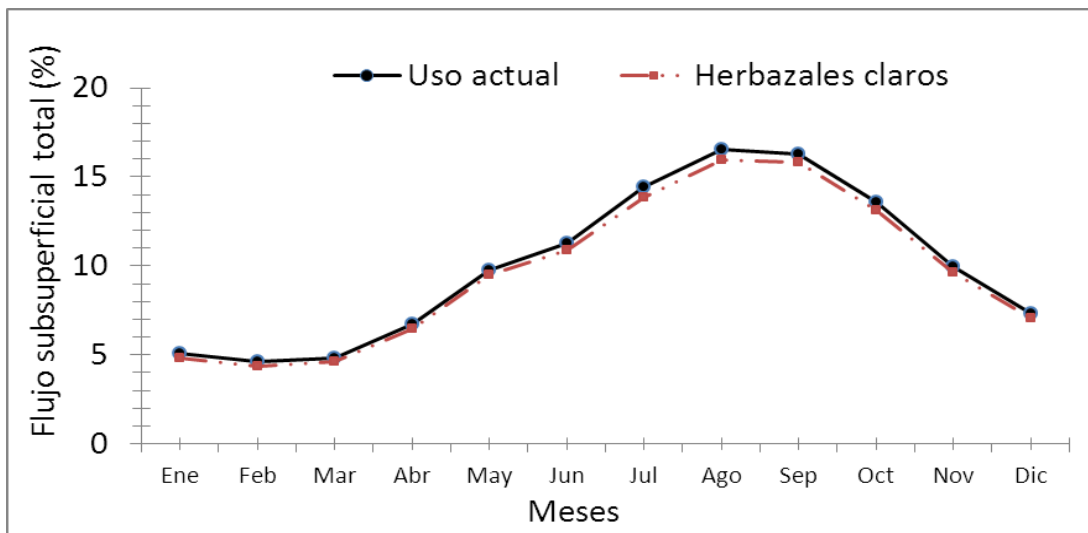
**Figura 24.** Producción de escorrentía superficial mensual en los escenarios de herbazales claros y uso actual.

En el caso de la producción de flujo subsuperficial, se obtuvo una disminución con la degradación de la cuenca (Figura 25), con valores siempre inferiores en el escenario de herbazales claros.



**Figura 25.** Distribución de frecuencia acumulada del flujo subterráneo. Escenarios de herbazales claros y uso actual.

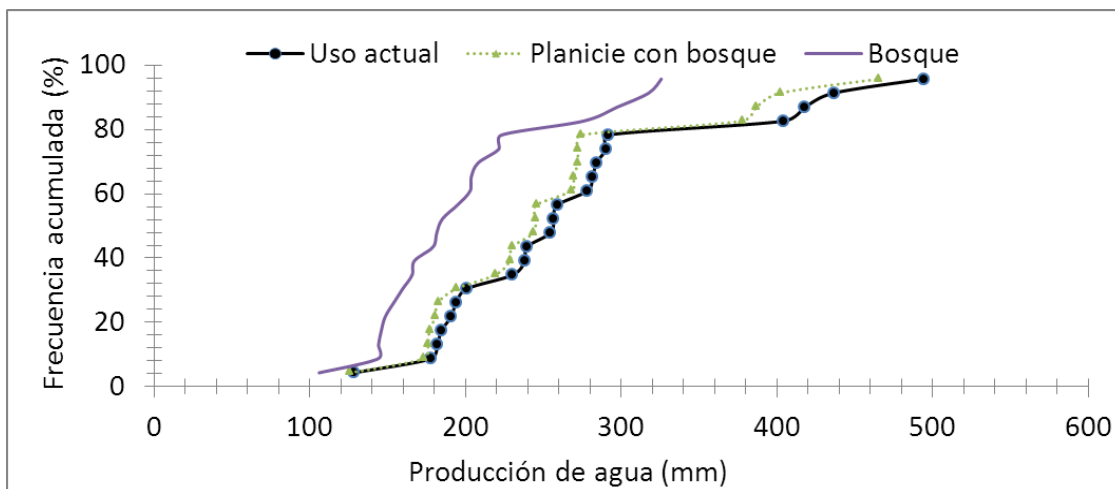
A lo largo del año, el flujo subsuperficial total en el escenario de herbazales claros es menor al producido por el uso actual (Figura 26), aunque con diferencias muy pequeñas entre ambos. Ello muestra la poca capacidad de infiltración por parte de la vegetación actual.



**Figura 26.** Producción de flujo subsuperficial total mensual en los escenarios de herbazales claros y uso actual.

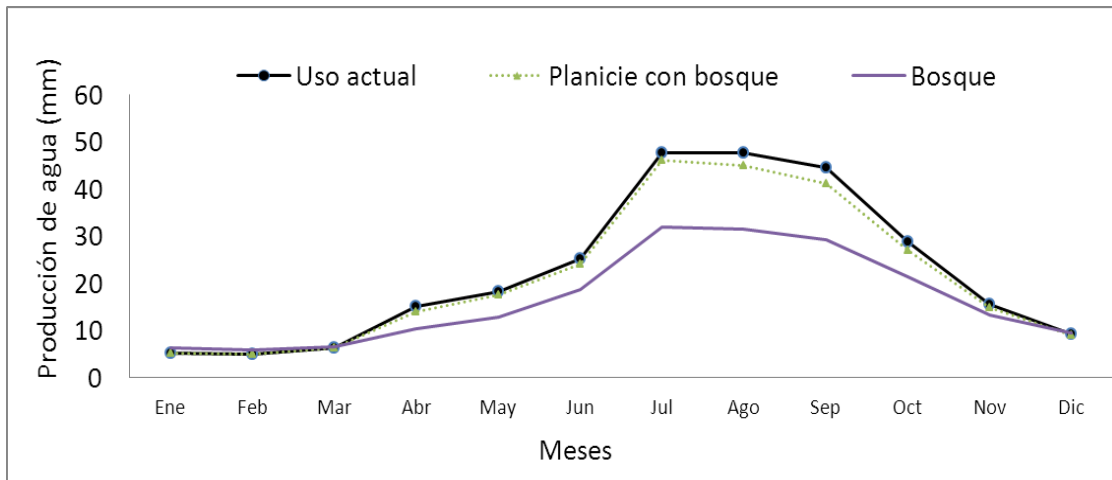
### 6.2.3 Efecto del incremento de la superficie bajo bosque (escenarios de bosque en toda la cuenca y bosque en la planicie)

Los valores de producción de agua disminuyen con el incremento de la superficie bajo bosque (Figura 27). El escenario donde se obtuvo la menor producción de agua fue el de toda la cuenca bajo bosque. Con un mismo nivel de probabilidad se obtuvo valores notablemente inferiores a los valores del escenario de uso actual. En menor medida, el escenario de planicie con bosque presenta una disminución de la producción de agua, presentando diferencias muy pequeñas con relación al escenario de uso actual.



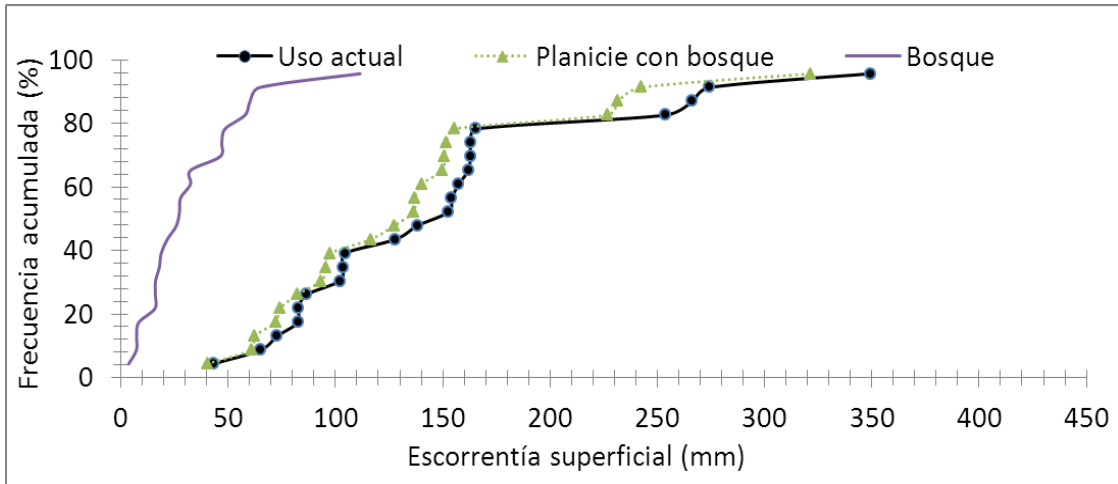
**Figura 27.** Distribución de frecuencia acumulada de la producción de agua en los escenarios de planicie con bosque y uso actual.

En promedio, la producción de agua en los escenarios de planicie con bosque y de uso actual a lo largo del año, tiene un comportamiento muy similar. Se presentan pequeñas diferencias en los meses donde ocurre la mayor producción (de julio a octubre), con menores valores en el escenario de planicie con bosque. Las mayores diferencias las presenta el escenario de bosque, disminuyendo notablemente la producción de agua total, especialmente en los meses de lluvia, mientras que en los meses secos, la producción de agua se mantiene por encima de los valores generados por los escenarios de planicie con bosque y uso actual (Figura 28). En este sentido se puede decir que el escenario de bosque presenta la mejor estabilidad en cuanto a la producción de agua.



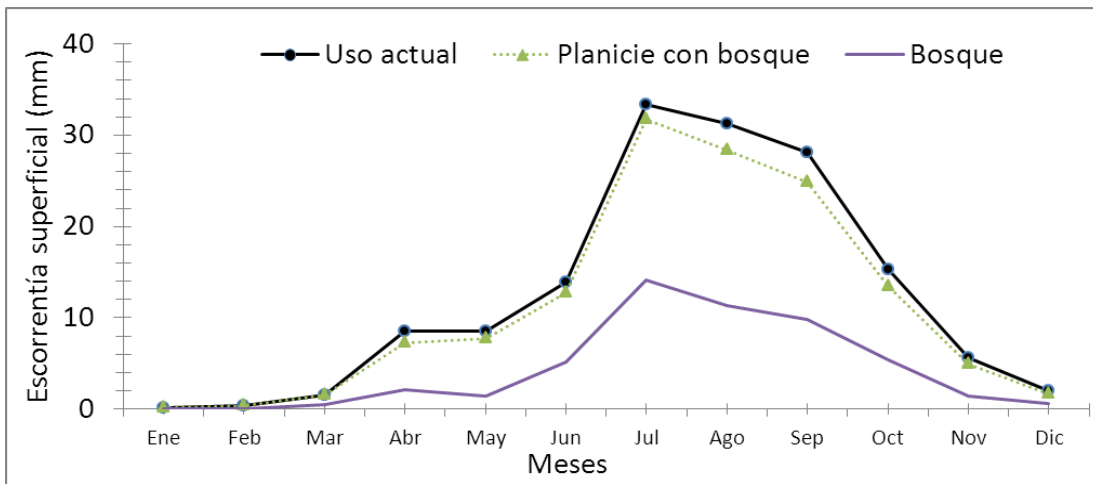
**Figura 28.** Producción de agua mensual en los escenarios de bosque, planicie con bosque y uso actual.

Las magnitudes de escorrentía superficial fueron siempre inferiores en la medida en que se aumentó la superficie bajo bosque (Figura 29). Las mayores diferencias las obtuvo el escenario donde se reforesta, presentando los valores más bajos de escorrentía superficial. La reforestación de la parte plana no disminuye en gran medida el escurrimiento superficial debido a que la parte alta de la cuenca sigue generando grandes volúmenes de escorrentía que la parte plana no es capaz de retener.



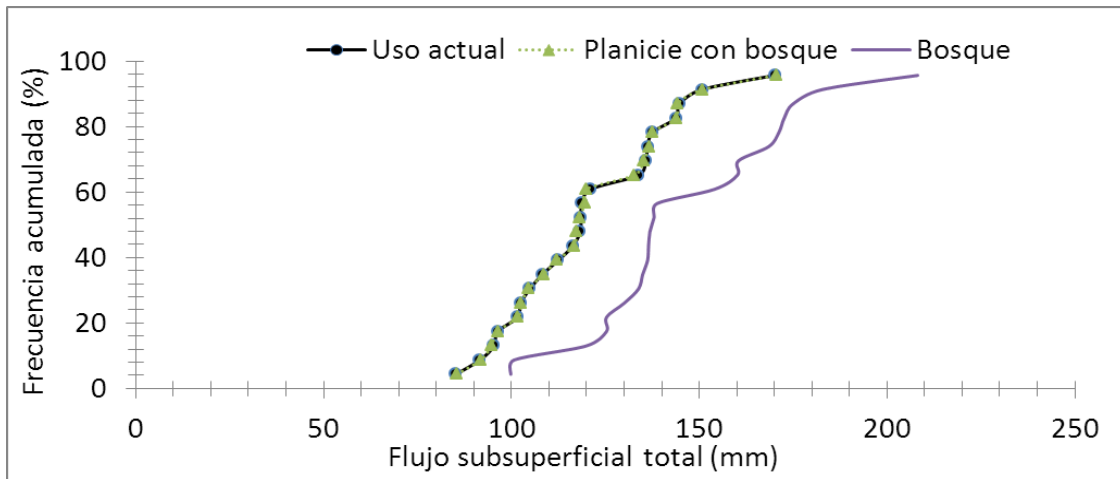
**Figura 29.** Distribución de frecuencia acumulada de la escorrentía superficial en los escenarios de bosque, planicie con bosque y uso actual.

La distribución promedio a lo largo del año de la escorrentía superficial de los escenarios de planicie con bosque y uso actual fue similar. Fue muy marcada la diferencia de ambos con respecto al escenario de toda la cuenca cubierta con bosque (Figura 30). Esto muestra la necesidad de que se mejore la cobertura vegetal del sector montañoso norte con el fin de reducir la escorrentía superficial producida por la cuenca.



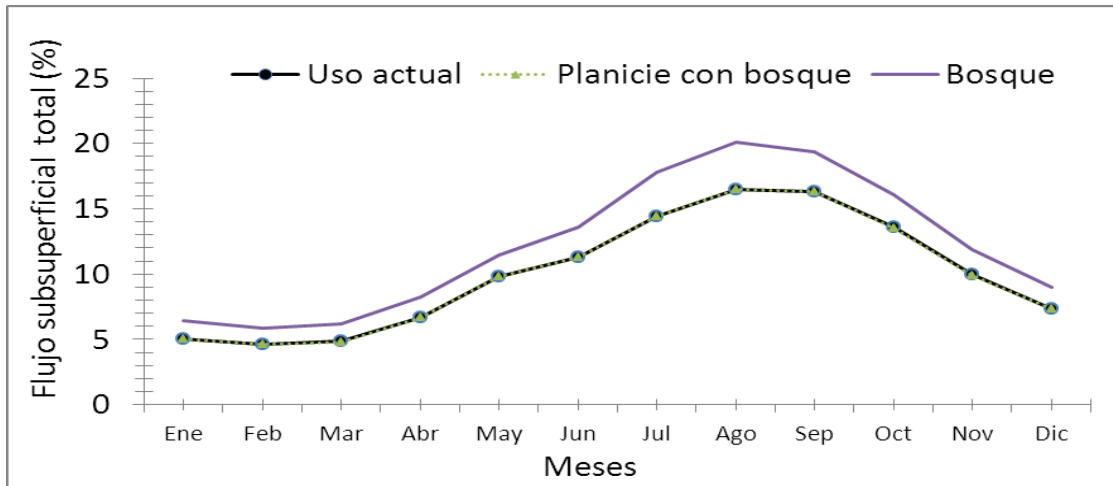
**Figura 30.** Escorrentía superficial mensual en los escenarios de bosque, planicie con bosque y uso actual.

La magnitud del flujo subsuperficial total aumenta considerablemente con la reforestación de toda la cuenca con bosques (figura 31). Por otra parte, con la reforestación de la parte plana no se logra aumentar el flujo subsuperficial, los valores son prácticamente iguales a los generados por el escenario de uso actual.



**Figura 31.** Distribución de frecuencia acumulada de flujo subsuperficial total en los escenarios de bosque, planicie con bosque y uso actual.

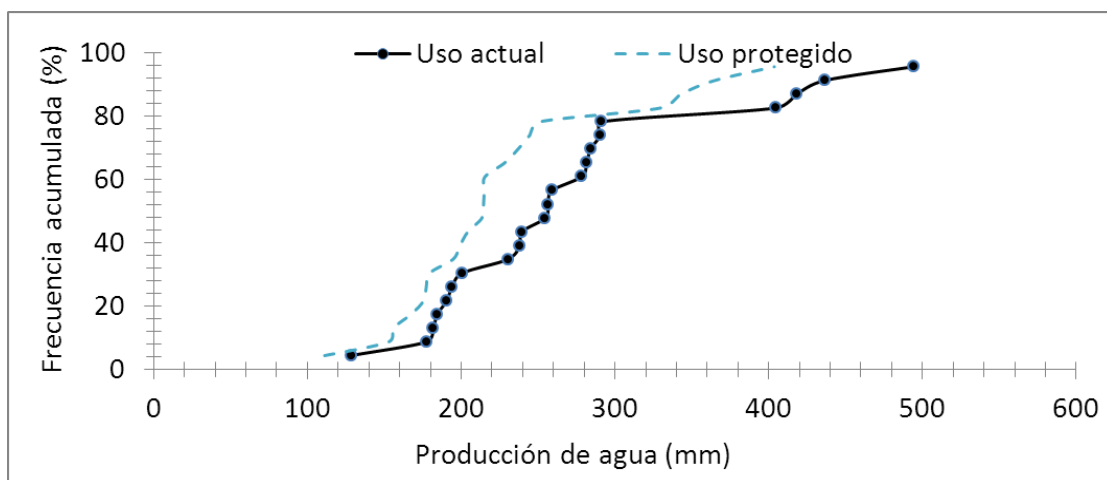
Los valores del flujo subsuperficial total a lo largo del año se incrementan con la reforestación de toda la cuenca con bosques. Las mayores diferencias se observan en los meses donde ocurre la mayor precipitación, demostrando que a mayor densidad de cobertura vegetal se aumenta la probabilidad de que el agua sea retenida en la cuenca (Figura 32). Sin embargo, la reforestación de la parte plana por sí sola no produce cambios importantes con respecto al flujo subsuperficial total, siendo evidente que las zonas de alta pendiente son las que se deben proteger.



**Figura 32.** Producción de flujo subterráneo mensual en los escenarios de bosque, planicie con bosque y uso actual.

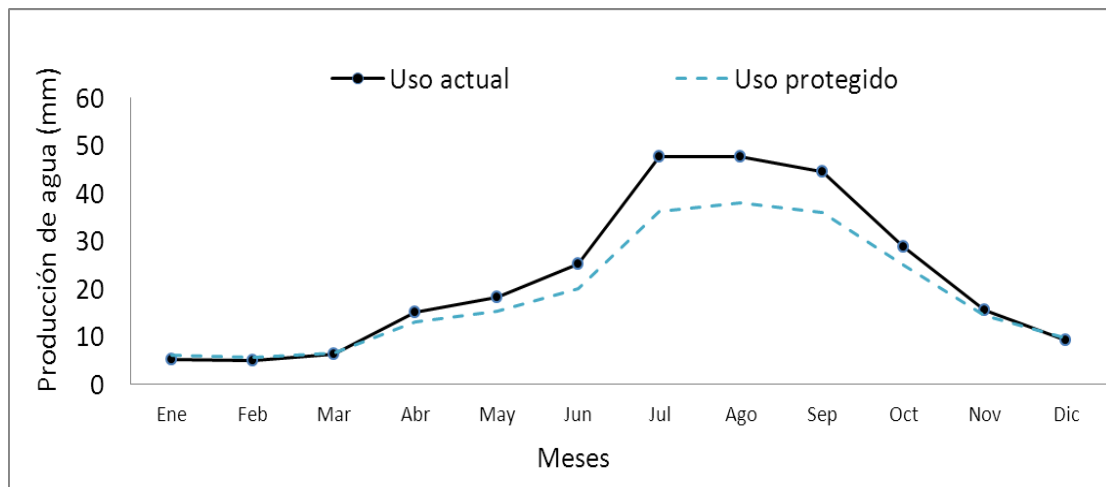
#### 6.2.4 Efecto de la protección de herbazales contra incendios (escenario de uso protegido)

Al evaluar el escenario en el que se protegen los herbazales de incendios en la parte alta de la cuenca, se obtuvo una disminución de la producción de agua, la cual puede ser atribuida a una mayor retención e infiltración de agua debido a la vegetación mejorada. Para todas las probabilidades, la producción de agua en el escenario de uso protegido fue menor a la del escenario de uso actual (Figura 33).



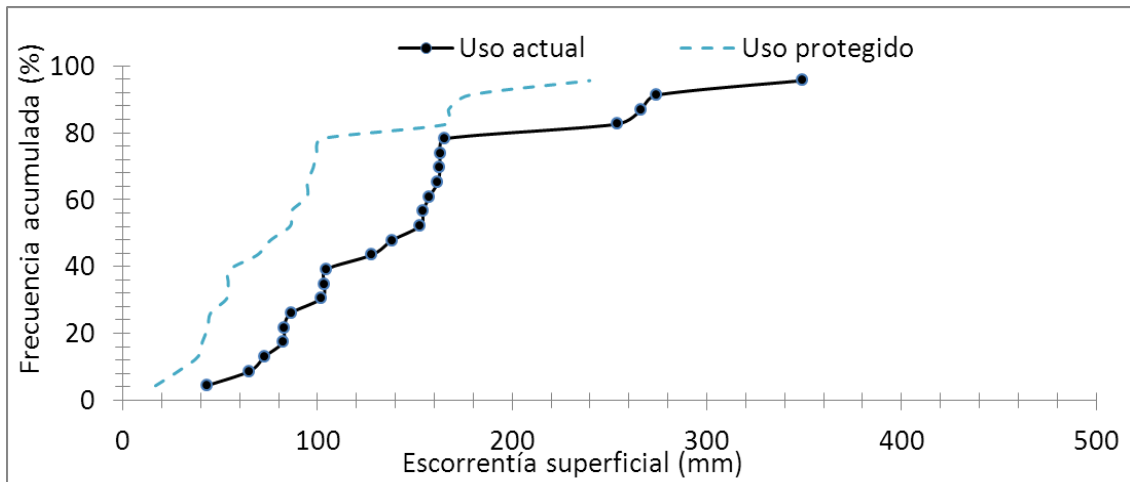
**Figura 33.** Distribución de frecuencia acumulada de producción de agua en los escenarios de uso mejorado y uso actual.

Al analizar las salidas mensuales, encontramos que en los meses donde ocurre la mayor precipitación, la producción de agua en el escenario de uso protegido es menor a la producida por el uso actual (figura 34). No obstante, en los meses secos la producción de agua es ligeramente superior en el escenario de uso protegido.



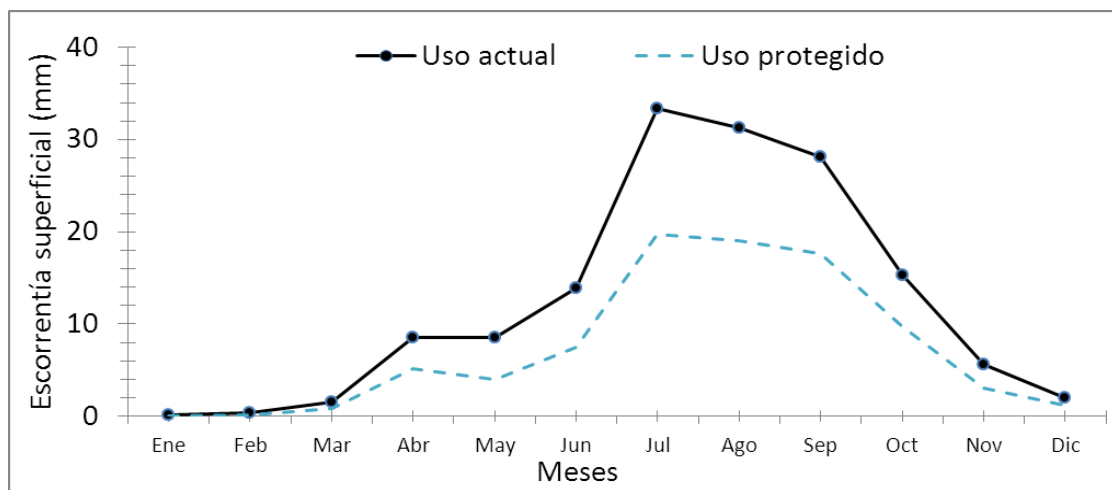
**Figura 34.** Producción de agua mensual en los escenarios de uso mejorado y uso actual.

Como se pudo observar en la producción de agua, las salidas de escorrentía superficial muestran una disminución notable en las magnitudes (Figura 35). La disminución es atribuida a la mejora de la calidad de los herbazales en la parte alta de la cuenca, lo cual permite que el agua retenida tenga mayores oportunidades de infiltrar, ser aprovechada por la vegetación o formar parte del flujo subsuperficial.



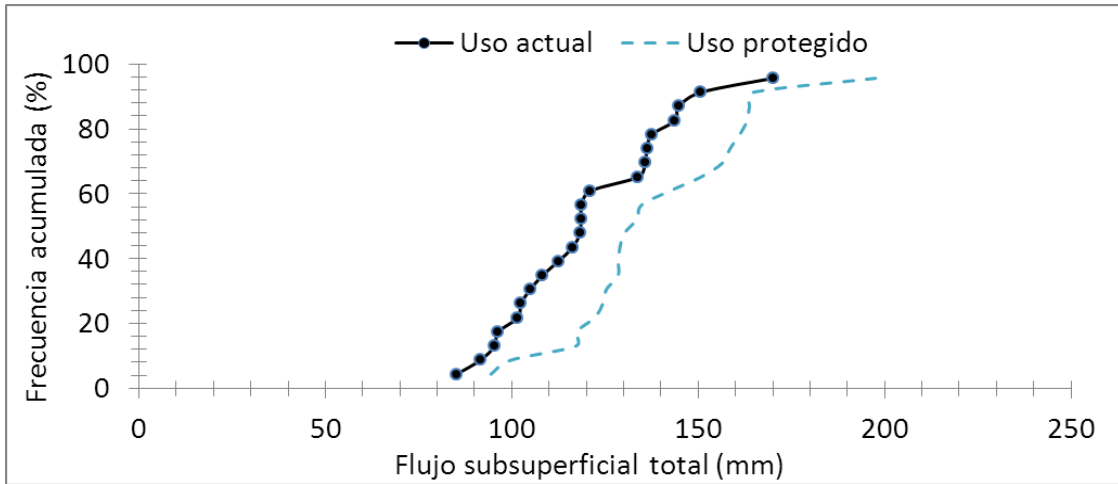
**Figura 35.** Distribución de frecuencia acumulada de escorrentía superficial en los escenarios de uso mejorado y uso actual.

La escorrentía superficial se disminuye notablemente con la protección de los herbazales en la parte alta, sobre todo en los meses de mayor precipitación (Figura 36).



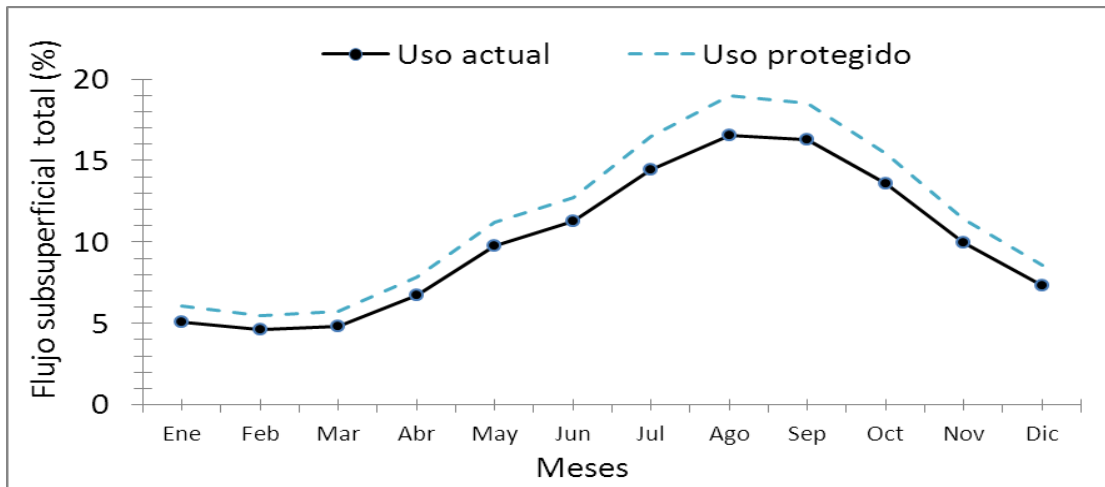
**Figura 36.** Producción de escorrentía superficial mensual en los escenarios de uso mejorado y uso actual.

El flujo subsuperficial total es beneficiado, ya que presenta un incremento considerable (figura 37). Como era de esperar, la disminución de la escorrentía superficial, dada la mayor infiltración, produce un aumento del flujo subsuperficial.



**Figura 37.** Distribución de frecuencia acumulada del flujo subterráneo en los escenarios de uso mejorado y uso actual.

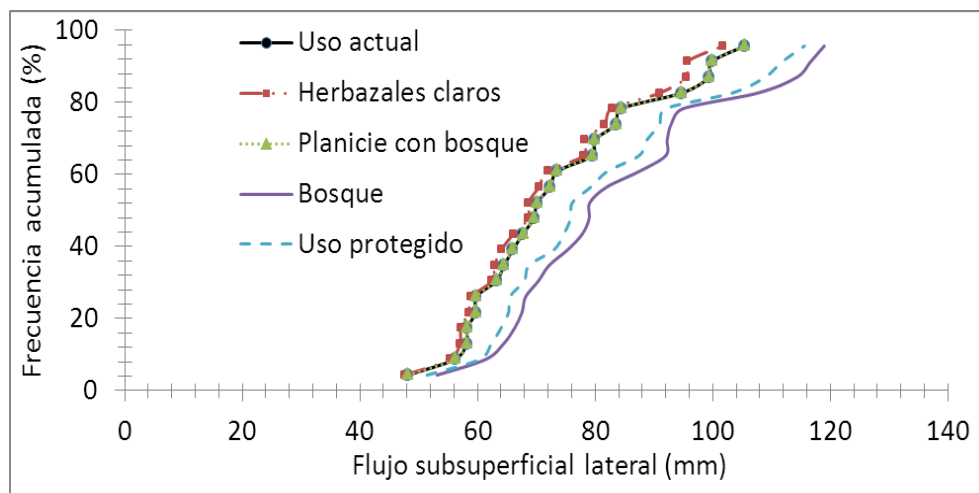
El flujo subsuperficial total es superior a lo largo del año, lo que demuestra que hay mayor infiltración de agua por parte de la vegetación protegida (Figura 38).



**Figura 38.** Producción de flujo subsuperficial total mensual en los escenarios de uso mejorado y uso actual.

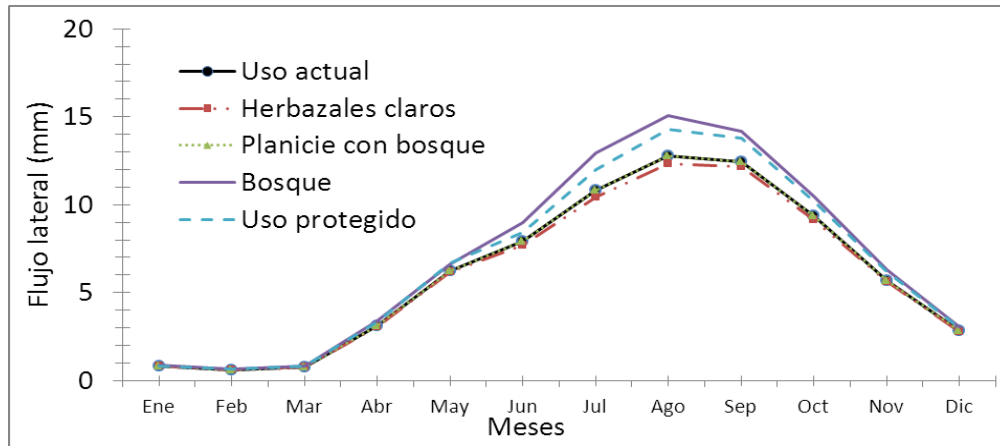
### 6.2.5 Efecto del cambio de vegetación en el flujo subsuperficial lateral.

La menor producción de flujo subsuperficial lateral la presentó el escenario de degradación de la cuenca, presentando valores ligeramente inferiores a los valores del escenario de uso actual, el cual presentó valores similares a los producidos por el escenario donde se reforesta la parte plana. Por otra parte, las mayores magnitudes de flujo lateral lo presentó el escenario de bosque, siendo superior en cada nivel de probabilidad (Figura 39).



**Figura 39.** Frecuencia acumulada del flujo subsuperficial lateral en los diferentes escenarios de cambio de vegetación.

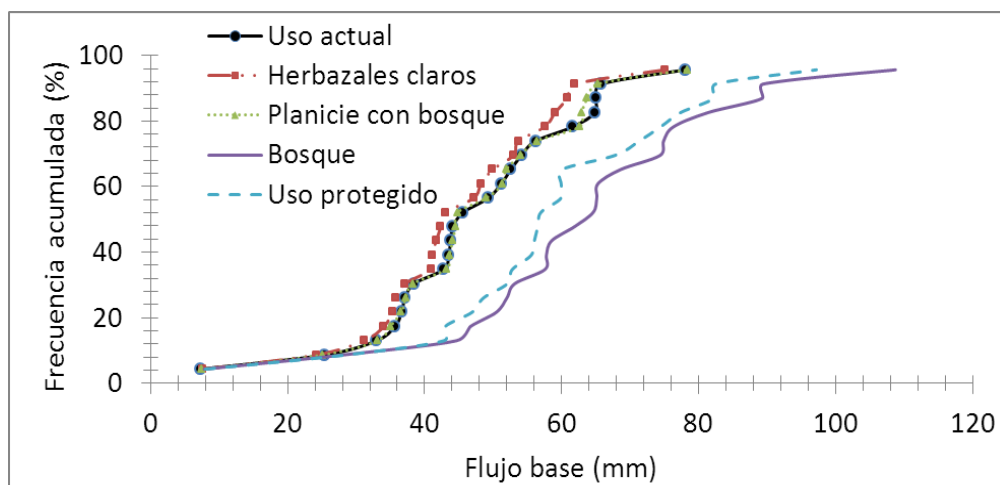
Al observar los promedios mensuales encontramos que las diferencias de flujo lateral entre los escenarios evaluados se ubican principalmente en los meses de lluvias. Mientras que en los meses secos son muy similares. El escenario de degradación de la cuenca a herbazales claros resultó con el menor flujo lateral, aunque con diferencias muy pequeñas en comparación con el uso actual. La reforestación de la planicie no genera cambios en el flujo lateral, los valores son similares a los de uso actual. El escenario que favorece en mayor medida el flujo lateral es el escenario de bosque, el cual obtuvo las mayores diferencias al ser comparado con el escenario de uso actual, seguido en menor medida por el escenario de protección de los herbazales en la parte alta de la cuenca (Figura 40).



**Figura 40.** Producción de flujo subsuperficial lateral mensual en los diferentes escenarios de cambio de vegetación.

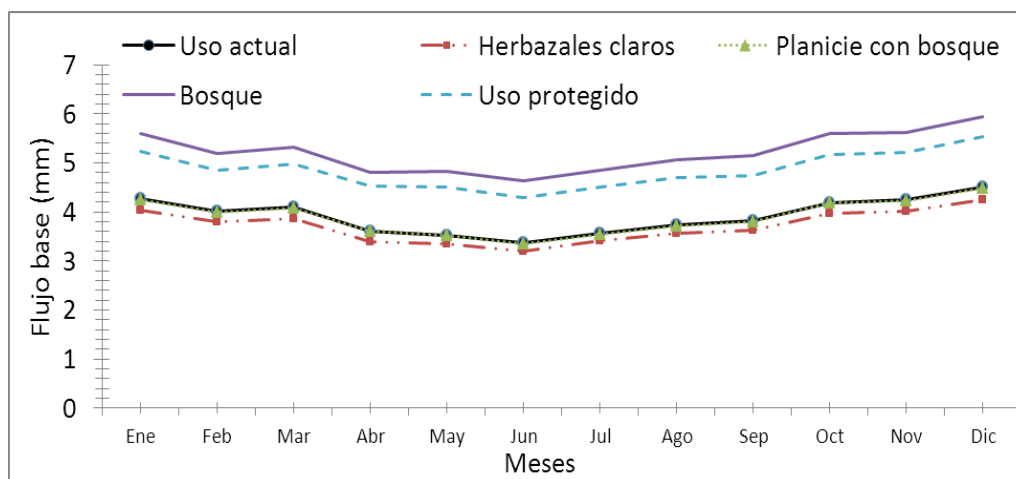
### 6.2.6 Efecto del cambio de vegetación en el flujo base.

La tendencia de las magnitudes es similar a las del flujo lateral evaluado anteriormente. La menor producción la obtuvo el escenario de degradación de la cuenca seguido por el uso actual y la reforestación de la planicie, los cuales mostraron poca diferencia en cuanto a las magnitudes del flujo base. Al igual que el flujo lateral, la mayor producción de flujo base la obtuvo el escenario de bosque, seguido en menor medida por el escenario de protección de los herbazales en la parte alta de la cuenca (Figura 41).



**Figura 41.** Frecuencia acumulada del flujo base en los diferentes escenarios de cambio de vegetación.

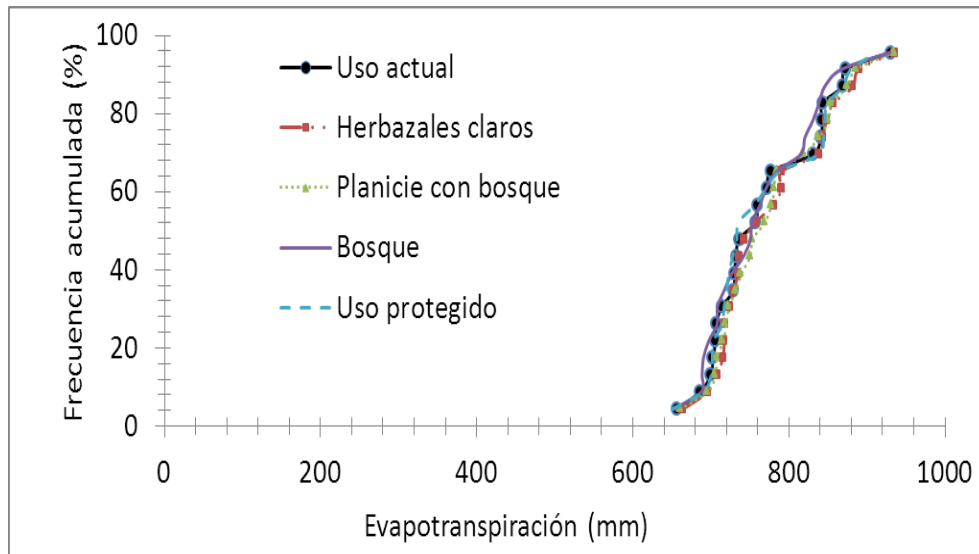
La tendencia del flujo base es similar entre los escenarios evaluados. Las diferencias se encuentran en las magnitudes a lo largo del año. El escenario de degradación obtuvo la menor producción, seguido por el uso actual y la reforestación de la planicie. Mientras que la mayor producción la generó el escenario de bosque, seguido por la protección de los herbazales de la parte alta (Figura 42).



**Figura 42.** Producción de flujo base mensual en los diferentes escenarios de cambio de vegetación.

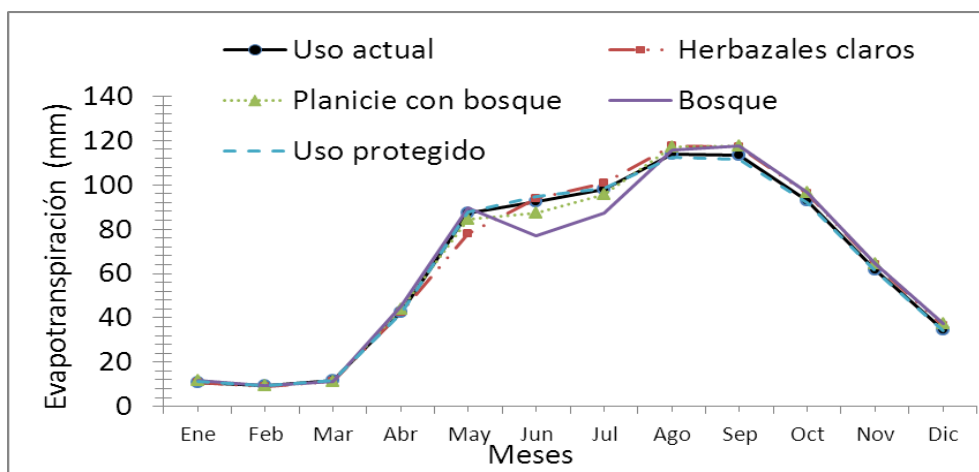
### 6.2.7 Efecto del cambio de vegetación en la evapotranspiración en la cuenca.

Resulta difícil establecer diferencias en cuanto a las magnitudes de la evapotranspiración ocurrida (Figura 43). Por tanto, se considera que las diferencias en la producción de agua pueden atribuirse, más que a las variaciones en la evapotranspiración, a los cambios en retención, infiltración y movimiento subterráneo causados por los cambios en la cobertura vegetal.



**Figura 43.** Distribución de frecuencia acumulada de la evapotranspiración (mm) de los escenarios de uso de la tierra.

La figura 44 muestra los valores de evapotranspiración mensual producida por los diferentes escenarios evaluados. En la época seca los escenarios muestran un comportamiento muy similar, las pocas diferencias se encuentran en la época de lluvias. En general, durante la mayoría de los meses, la evapotranspiración es ligeramente superior en el escenario de bosque en toda la cuenca.



**Figura 44.** Promedios mensuales de evapotranspiración (mm).

### 6.2.8 Efecto del cambio de vegetación en la recarga de los acuíferos.

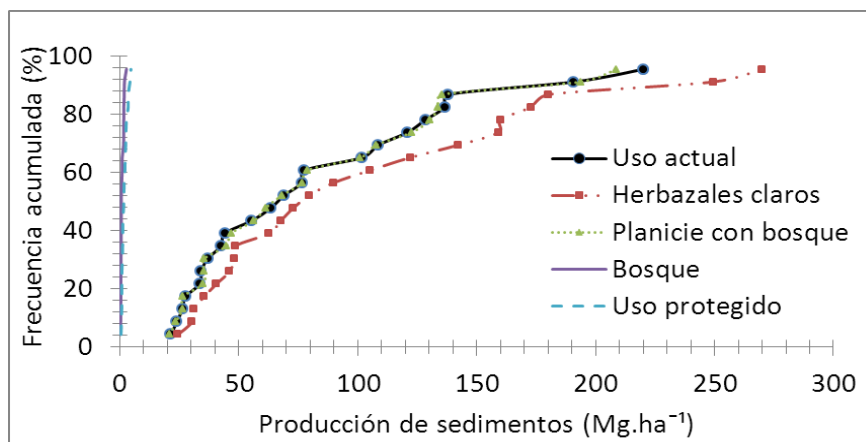
El escenario con menor recarga de acuíferos es el escenario de herbazales claros, considerado como el peor de los escenarios. Seguido del escenario de uso actual, planicie con bosque, uso protegido y de bosque en toda la cuenca. El escenario más adecuado en este sentido, es el escenario de bosque, pues produce la mayor recarga de acuíferos de los escenarios evaluados. El uso protegido también mejora considerablemente la recarga del acuífero con respecto al uso actual (Cuadro 9). Este comportamiento puede atribuirse a las tasas de escorrentía superficial. En los escenarios de menor cobertura, este flujo es mayor. Por lo tanto, es menor la cantidad de agua disponible para infiltrar y consecuentemente, contribuir a la recarga de los acuíferos.

**Cuadro 10.** Promedio anual de la recarga de los acuíferos (mm) de los escenarios de uso de la tierra.

Escenario	Recarga de acuíferos (mm)
Uso actual	474,72
Herbazal claro	438,04
Planicie con bosque	480,68
Bosque	566,46
Uso protegido	529,45

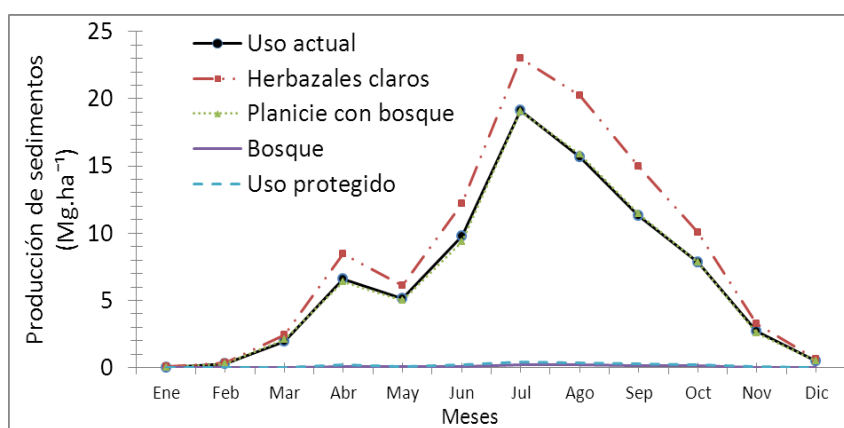
### 6.2.9 Producción de sedimentos.

Se puede observar que una cobertura vegetal más densa, disminuye considerablemente las pérdidas de suelo por erosión. Como era de esperarse, el escenario de herbazales claros produjo las mayores magnitudes de producción de sedimentos, siendo así el escenario más desfavorable de los que se evaluaron (Figura 46). Por otra parte, la reforestación de la parte plana no reduce de manera importante la producción de sedimentos en comparación con el escenario de uso actual, muy similar en cuanto a tendencia y magnitud.



**Figura 45.** Distribución de frecuencia acumulada de la producción de sedimentos (Mg.ha<sup>-1</sup>) de los escenarios de uso de la tierra.

La mayor producción de sedimentos ocurrió en el escenario de herbazales claros con valores promedios iguales a 101,79 Mg ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>. Los escenarios de planicie con bosque y uso actual también producen una alta cantidad de sedimentos si se comparan con la producción de escenario de todo pasto 80,44 y 80,85 Mg ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup> Mientras que la menor producción de sedimentos la obtuvo el escenario bosque con un promedio de 1 Mg ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup> seguido por el escenario de uso mejorado 1,94Mg ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>. (Figura 47).



**Figura 46.** Promedios mensuales de producción de sedimentos (Mg.ha<sup>-1</sup>).

Con respecto a la producción de sedimentos, los escenarios más adecuados son el de todo bosque y el de uso protegido, presentando valores inferiores a 10 Mg.ha.año<sup>-1</sup>.

## 6. CONCLUSIONES

Mediante los aforos efectuados, fue posible obtener una curva de gasto de la cuenca, la cual puede ser de mucha utilidad para estimaciones futuras de la producción de agua, bien sea con el empleo de las escalas dibujadas en los taludes de la canalización o de instalar algún instrumental que registre el nivel del agua.

El modelo de simulación SWAT resultó ser una herramienta útil para establecer tendencias cuantitativas de la dinámica hidrológica de la cuenca. A través de las simulaciones, se pudo establecer el impacto de cambios de cobertura vegetal sobre el régimen de escurrimiento, producción de agua y sedimentos de la cuenca. Sin embargo, es muy importante reunir la mayor cantidad y calidad de información requerida por el modelo. Una selección adecuada del Número de Curva y de los parámetros de agua subterránea es fundamental para la obtención de resultados razonables en la estimación de la producción de agua. La fase de calibración es imprescindible para que las salidas producidas por el modelo de simulación se ajusten al comportamiento natural de los procesos que ocurren en la cuenca. El empleo de los valores de referencia obtenidos a través de los aforos fue de gran utilidad para lograr una calibración exitosa.

La producción de agua en el escenario de uso actual, puede ser calificada de poco conveniente o adecuada, ya que las magnitudes y regímenes de los componentes del flujo, específicamente la escorrentía superficial, son muy parecidas al producido por el escenario con cobertura vegetal más pobre (herbazales claros). Por otra parte, también presenta una elevada producción de sedimentos, similar a la de este escenario degradado.

En general, con el incremento de la cobertura vegetal disminuye la producción de agua en la cuenca (debido a una mayor retención, más que a cambios en la evapotranspiración). Esta disminución en la producción de agua es acompañada por cambios deseables como disminución de la escorrentía superficial y de la producción de sedimentos, e incrementos en los flujos subsuperficiales (lateral y de base) y recarga de los acuíferos.

La reforestación de la parte plana no produce grandes beneficios en términos de mejoramiento de la hidrología de la cuenca, debido a que las mayores tasas de escorrentía superficial y de producción de sedimentos ocurren en la parte alta, donde la pendiente es más pronunciada y el

suelo está menos protegido. No obstante, este cambio de manejo puede ser positivo para la recarga de los acuíferos.

El escenario de uso más recomendable en cuanto a mayor producción de agua y menor producción de sedimentos en la cuenca, sería el de permitir el mejoramiento de la cobertura vegetal del sector montañoso norte evitando los incendios, de tal manera que el herbazal claro predominante en la actualidad evolucione a una formación vegetal más densa y protectora (herbazales densos, arbustales, matorrales). En este escenario, se disminuye la escorrentía superficial y producción de sedimentos, y se aumentan los flujos subterráneos y recarga de acuíferos a valores cercanos a los producidos por un escenario de bosques en toda la cuenca.

## **7. RECOMENDACIONES**

Dado el carácter de uso docente y de investigación de la cuenca, se hace necesario mejorar su instrumentación hidrológica y climatológica, así como la información de suelos y vegetación.

Es recomendable ampliar la información hidrológica mediante aforos de las secciones de la canalización con el fin de establecer el comportamiento del caudal a lo largo del año, y así aumentar la confiabilidad de las simulaciones.

Con el fin de mejorar la evaluación de la hidrología de la cuenca, así como de otros procesos ambientales, es necesario ampliar y mejorar la información de suelo del sector montañoso norte (Formación Las Brisas).

Es necesario mejorar la representatividad de la información climática en su parte alta. A pesar de las dificultades de instalación y manejo, sería conveniente la instalación de una o dos estaciones en esta área.

Para mejorar la producción de agua de la cuenca, es necesario elaborar y poner en ejecución un plan eficiente de control de incendios que permita la rehabilitación sucesional de la vegetación del sector montañoso norte.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acutis, M. y M. Donatelli. 2003. SOILPAR 2.00: software to estimate soil hydrological parameters functions. *Eur. J. Agron.*, 18, 373 - 377 p. [Documento en línea] Disponible [http://www.researchgate.net/publication/222406383\\_SOILPAR\\_2.00\\_software\\_to\\_estimate\\_soil\\_hydrological\\_parameters\\_and\\_functions](http://www.researchgate.net/publication/222406383_SOILPAR_2.00_software_to_estimate_soil_hydrological_parameters_and_functions) [Consulta: 2015, Junio 15]
- Aguerrevere S. E., G Zuloaga y M. Tello. 1937. Informe geológico sobre la región amiantífera de Tinaquillo, estado Cojedes. *Bol. Geol y Min. (Venezuela)*, 1(1): 5-36.
- Arnold, J.G., R. Srinivasan., R.S Muttiah & P.m Allen. 1999. Continental Scale Simulation of The Hydrology Balance. *Journal of the American Water Resources Association*. Vol. 35(5): 1037-1051.
- Barrios, A; L. Urribarri. 2010. Aplicación del modelo SWAT en los andes venezolanos: Cuenca del río Chama. *Revista Geográfica Venezolana (Venezuela)* 51(1):11-29.
- Carmona, A. 2007. Ajuste de la producción de agua simulada por el modelo SWAT y análisis de sensibilidad ante características hidrológicas del suelo en una cuenca pequeña de alta pendiente. Trabajo de grado. Maracay, Venezuela; Universidad Central de Venezuela. 122 p.
- Carvalho, E. 2006. Evaluación del efecto de los cambios de cobertura sobre la producción de agua y sedimentos en la microcuenca quebrada la Virgen, Los Teques, Estado Miranda. Trabajo de grado. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. 139 p.
- Carrera, N. 2012. Evaluación y adaptación de modelos de erosión y sedimentación en la región 25; Estudio del caso “Cuenca Potosí”. Seminario de posgrado. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. México. 7 p.
- Chiang, S. L. 1971. A runoff potential rating table for soils. *Journal of Hydrology* 13: 54- 62
- Comerma, J; L. Guenni; G. Medina. 1987. Validación del balance hídrico del modelo CERES-Maíz en la zona de Maracay, estado Aragua, Venezuela. *Agronomía Tropical*. 35(4-6): 115-132.

- Donatelli, M y M. Acutis. 2001. SOILPAR: Soil Parameter Estimate. V 2.0 alpha. Software. ISCI. Bologna Italia. [Documento en línea] Disponible <http://www.isci.it/> [Consulta: 2015, Septiembre 26].
- FAO, 1992. Manual de campo para la ordenación de cuencas hidrográficas. Estudio y planificación de cuencas hidrográficas. GUIA FAO CONSERVACION 13/6. FAO. Roma, Italia. 185 p.
- Frederic, F. 1975. Conservación de suelos. Madrid, España. Mundi Prensa. 254 p.
- Gassman, P; Reyes, M.; Green, C. & J. Arnold. 2007. The Soil and Water Assessment Tool: historical development, applications, and future research directions. Transactions of the ASABE, 50(4): 1211-1250.
- Jacome, A. 2002. Evaluación del efecto de cambio de cobertura y uso de la tierra sobre la producción de sedimentos en la cuenca del río Caramacate (subcuenca portante del embalse Camatagua). Trabajo de Ascenso. Facultad de Agronomía. UCV. 159 p.
- Leonard, R.; W. Knisel y D. Still. 1987. Gleams: Groundwater loading effects of agricultural management systems. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 30:1403 – 1418.
- Lugo, M. 1990. Composición y diversidad faunística del Río Güey (Aragua-Venezuela) con énfasis en los peces. (Tesis de maestría). Postgrado Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. 69 p.
- Machado, G. 2006. Predicción de características del suelo a partir de un modelo de elevación (MDE) de la cuenca del río Güey. (Tesis de Grado). Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. 109 p.
- Marco, F. 1987. Diferencias físicas, químicas y mineralógicas de suelos provenientes de fuentes geológicas distintas. (Tesis de Grado). Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. 96 p.
- Márquez, O. 1989. Caracterización mineralogía y génesis de suelos de dos ambientes geoquímicos en la cuenca del Río Güey. (Tesis de Maestría). Postgrado en Ciencia del Suelo. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. 172 p.
- Márquez, L. 2014. Estudio de la biología de especies vegetales de la selva decidua montano baja de la cuenca del río Güey (Maracay estado Aragua, Venezuela), como apoyo a su restauración ecológica. Tesis Doctoral, Facultad de ciencias-UCV. 271 p.

- Neitsch, S. L.; J. G. Arnold; J. R. Kiniry; J. R. Williams. 2005. SWAT: Herramienta para Evaluación de Suelo y Agua. Documentación Teórica. Version 2005. Texas Water Resources Institute Technical Report No. 406. Texas A&M University System. Disponible en Internet: <http://swat.tamu.edu/media/46964/swat2005-theo-doc-spanish.pdf> [Revisado Junio 03, 2015].
- Neitsch, S. L.; J. G. Arnold; J. R. Kiniry; J. R. Williams. 2011. SWAT: Soil and Water Assessment Tool. Thoretical Documentation. Version 2009. Texas Water Resources Institute Technical Report No. 406. Texas A&M University System. Disponible en Internet: <http://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf> [Revisado Junio 03, 2015].
- Negahban, B. 1991. Estimating models parameters and validation. Lab Report 1. AGE5646. 2-25-91. Mimeo. 7 p.
- Núñez, Y. 2007. Relación suelo-paisaje en un sector de la cuenca alta del río Güey, correspondiente a la formación geológica Las Brisas. Trabajo de grado. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. 136 p.
- Núñez; Y; Rivas, M; Salazar, Y; Hernández, F. 2012. Cuenca del río Güey. Guía técnica. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. 51p.
- Ostos, A, J. Vilorio (1993). Diagnostico de las propiedades del suelo que afectan el desarrollo de las plantas de cítricas en el lote "E" sector este del campo experimental de la Facultad de Agronomía. Trabajo de Grado. Facultad de Agronomía. Universidad central de Venezuela. Maracay. Venezuela. 87 p.
- Rodríguez, O. 2010. Conservación de Suelos y Agua: Una premisa del Desarrollo Sustentable. Universidad Central de Venezuela. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. Caracas, Venezuela. 469 p.
- Rojo, E. 2000. Simulación hidrológica en una cuenca hidrográfica hidrológica agrícola caso quebrada Guárico-estado Lara-Venezuela. Tesis para Optar al Grado de Magister Scientae en Recursos Hidráulicos. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. 59 p.
- Silva, O. 2002. Evaluación de los componentes de erosión de los modelos EPIC y WEPP y de producción de agua del modelo SWAT en condiciones de sabana y altas pendientes. Trabajo de Ascenso. Universidad Central de Venezuela. 132 p.

- Silva, O. 2003. Módulo 3: Modelos hidrológicos. Marco conceptual sobre modelos hidrológicos agroambientales. Extracto, con modificaciones del Trabajo para ascender a la categoría de profesor asistente en Noviembre de 2002. Universidad Central de Venezuela. 61 p.
- Silva, O. 2004. El modelo SWAT en una cuenca pequeña de altas pendientes: simulación de la producción de agua. *Agronomía Tropical (Venezuela)* 54(3): 275-291.
- Silva, O. 2009. Evaluación del modelo de simulación SWAT para la Producción de Agua en una Cuenca Hidrográfica Prioritaria de la Región Central de Venezuela. Caso: Cuenca Media del Rio Pao. Trabajo de ascenso. Universidad Central de Venezuela. 121 p.
- Silva, O. 2010. Evaluación del modelo hidrológico SWAT en la cuenca media del río Pao en Venezuela. *Rev. Fac. Agron. (Venezuela)*. 36 (3): 134-145.
- Silva, O. 2014. Conceptos y procedimientos para la evaluación y conservación de la cuenca del río Güey. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. 171 p. DOI: 10.13140/2.1.3530.2086
- Sucre, R; Granados, F; Meneses, L y Pérez, O. 1979. Estudio de la relación suelo – agua de un molisol ubicado en el campo experimental del ceniap. Trabajo presentado en la “x” reunión de la Asociación Latinoamericana de Ciencias Agrícolas Acapulco, México (22 al 28 de Abril. 1979). Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias. 30 p.
- Torres, E; Oropeza, J; Fernández, D. 2000. Aplicación del modelo SWAT en la cuenca “El Tejocote”, Atlacomulco, Estado de México. X Congreso Nacional de Irrigación. Simposio 4. Manejo Integral de Cuencas Hidrológicas. Instituto de Recursos Naturales, Colegios de Postgraduados, Montecillo, México. C.P. 56230. 22 p.
- Tripathi, M; R. Panda and N. Raghuwanshi. 2003. Identification an prioritization of critical sub-watersheds for soil conservation management using the SWAT model. *Biosystems Engineering* (2003) 25(3). 375-379
- Urbani, F. 2002. Nomenclatura de las unidades de rocas ígneas y metamórficas de la cordillera de la costa, Venezuela. Separata de GEOS, UCV, Caracas. 107 p
- Ven Te Chow; D. Maidment y L. Mays. 1994. Hidrología aplicada. Ed. McGraw Hill Interamericana, S. A: Santafé de Bogotá, Colombia. 584 p.

- Verea, C. 1993. Caracterización de la avifauna de las selvas deciduas y de galería del valle del río Güey, vertiente sur del Parque Nacional Henri Pittier. Trabajo de grado. Maracay, Venezuela; Universidad Central de Venezuela. 114 p.
- Viloria, J; Y. Nuñez; G. Machado; G. Elizalde; M. Pineda. 2009. Variación espacial del suelo y el paisaje en la cuenca alta del río Güey, estado Aragua, Venezuela. Rev. Fac. Agron. (Venezuela) 35(2):67-7.
- Williams, J. R. 1969. Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. Trans. ASAE 12(1):100-103.
- Wischmeierr, W. H; C.B Johnson, B. V Cross. 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and contructions sites. J. Soil and Water Conservation. 26:189-193.

## 9. ANEXOS

Anexo A. Estadísticas climáticas de cada una de las estaciones empleadas en SWAT.

Estadísticas correspondientes a la parte alta de la cuenca obtenidas con información de la estación INIA- Ceniap y Rancho Grande (de 1979 a 2000).

Mes	T MAX (°C) 1*	T MIN (°C) 2*	T CV (°C) 3*	RAD cal.cm <sup>-2</sup> .día <sup>-1</sup> 4**	PM 0.5 (mm) 5***	PW D 6***	PW  W 7***	DAYP (días) 8***	PMS (mm) 9***	SDRF (mm) 10***	SKRF 11***
Enero	26,1384	12,3684	0,058	454,39	16,8	0,178	0,424	7,33	2,15	3,52	3,53
Febrero	26,9584	13,4684	0,066	495,35	21,9	0,221	0,473	8,33	2,21	5,6	5,09
Marzo	27,3784	14,1984	0,069	516,52	40	0,223	0,419	8,61	3,65	8,94	5,89
Abril	27,2784	16,2484	0,07	460,04	33,5	0,313	0,548	12,28	6,47	9,21	2,52
Mayo	26,0084	16,4884	0,065	422,43	53	0,34	0,621	14,67	8,98	13,3	2,19
Junio	24,6484	15,3084	0,06	437,3	78,1	0,529	0,674	18,56	7,86	10,92	2,58
Julio	24,4884	14,6084	0,058	438,43	76	0,532	0,696	19,72	11,15	17,74	2,48
Agosto	24,5084	14,7284	0,06	441,09	59	0,561	0,717	20,61	14,16	18,36	2,92
Septiembre	25,0484	14,9684	0,051	45,83	59,1	0,622	0,689	20	14,57	18,62	3,46
Octubre	25,1984	14,9084	0,049	437,83	52	0,431	0,618	16,44	12,45	14,09	2,73
Noviembre	25,3984	14,2984	0,046	419,74	51,2	0,343	0,614	14,11	11,15	11,92	2,93
Diciembre	25,6284	13,0484	0,059	417,48	47,9	0,254	0,557	11,28	6,14	11,18	4,78

<sup>1</sup> Promedio mensual de la temperatura máxima diaria; <sup>2</sup> Promedio mensual de la temperatura mínima diaria; <sup>3</sup> Coeficiente de variación de la temperatura diaria; <sup>4</sup> Promedio mensual de la radiación solar diaria; <sup>5</sup> Precipitación máxima mensual de 0.5h; <sup>6</sup> Probabilidad mensual de día húmedo después de un día seco; <sup>7</sup> Probabilidad mensual de día húmedo después de un día húmedo; <sup>8</sup> Días mensuales de precipitación en el mes; <sup>9</sup> Promedio mensual de precipitación diaria; <sup>10</sup> Desviación estándar mensual de precipitación diaria; <sup>11</sup> Coeficiente de sesgo mensual de precipitación diaria.

\*Estimada a partir de gradiente altotérmico con información de la estación INIA-ceniap.

\*\*Obtenida a partir de información de la estación INIA-Ceniap.

\*\*\*Obtenida a partir de información de la estación Rancho Grande.

Estadísticas climáticas correspondientes a la parte baja de la cuenca obtenidas con información de la estación INIA- Ceniap (de 1979 a 2000).

Mes	T MAX (°C) 1	T MIN (°C) 2	T CV (°C) 3	RAD cal.cm <sup>-2</sup> .día <sup>-1</sup> . 4	PM 0.5 (mm) 5	PW D 6	PW W 7	DAYP (días) 8	PMS (mm) 9	SDRF (mm) 10	SKRF 11
Enero	32,08	18,31	0,06	454,4	44,3	0,025	0,071	0,82	1,59	1,88	1,23
Febrero	32,9	19,41	0,07	495,3	19,4	0,026	0,143	0,82	8,54	13,67	1,77
Marzo	33,32	20,14	0,07	516,5	8,8	0,026	0,278	1,06	9,34	1,23	2,25
Abril	33,22	22,19	0,07	460	38,9	0,14	0,402	5,71	11	17,86	3,12
Mayo	31,95	22,43	0,06	422,4	39	0,263	0,538	12	7,75	10,81	2,63
Junio	30,59	21,25	0,06	437,3	27,1	0,398	0,621	15,35	8,51	13,23	3,54
Julio	30,43	20,55	0,06	438,4	56,8	0,408	0,596	15,59	9,17	12,42	2,56
Agosto	30,45	20,67	0,06	441,1	52,9	0,432	0,655	17,24	10,34	13,65	2,2
Septiembre	30,99	20,91	0,05	453,9	31,2	0,472	0,561	15,53	9,6	13,49	2,52
Octubre	31,14	20,85	0,05	437,8	27	0,315	0,557	12,88	8,49	12,49	2,86
Noviembre	31,34	20,24	0,05	419,7	31,2	0,22	0,43	8,35	5,64	8,27	2,72
Diciembre	31,57	18,99	0,06	417,5	20,4	0,107	0,521	5,65	4,76	9,72	2,63

<sup>1</sup> Promedio mensual de la temperatura máxima diaria; <sup>2</sup> Promedio mensual de la temperatura mínima diaria; <sup>3</sup> Coeficiente de variación de la temperatura diaria; <sup>4</sup> Promedio mensual de la radiación solar diaria; <sup>5</sup> Precipitación máxima mensual de 0.5h; <sup>6</sup> Probabilidad mensual de día húmedo después de un día seco; <sup>7</sup> Probabilidad mensual de día húmedo después de un día húmedo; <sup>8</sup> Días mensuales de precipitación en el mes; <sup>9</sup> Promedio mensual de precipitación diaria; <sup>10</sup> Desviación estándar mensual de precipitación diaria; <sup>11</sup> Coeficiente de sesgo mensual de precipitación diaria.

#### Parámetros de las estaciones meteorológicas.

	Rancho Grande	INIA-ceniap
10-años de frecuencia 0,5 h precipitaciones	66,2	53,7
10-años de frecuencia 6,0 h precipitaciones	127,9	83,5
Años de registro de lluvia de 0,5 h.	30	15
Latitud de la estación climatológica	10,35	10,29
Altitud de la estación climatológica	1525	464

## Anexo B. Información de suelos empleada en SWAT.

Información de suelo empleada para representar la parte alta de la cuenca perteneciente a la formación Las Brisas (sector montañoso norte) asociado a los herbazales claros. Fuente: Núñez (2007).

Profundidad de la parte inferior (mm)	a <sup>1</sup> (%)	L <sup>2</sup> (%)	A <sup>3</sup> (%)	Da <sup>4</sup> (T/m <sup>3</sup> )	AA <sup>5</sup> (m.m <sup>-1</sup> )	CHS <sup>6</sup> (mm.h <sup>-1</sup> )	CO <sup>7</sup> (%)	Factor K <sup>8</sup> (USLE)
				*	**	**	***	****
50	8,4	33,6	58	1,5	0,12	9,99	1,07	0,19
100	8,4	33,6	58	1,5	0,12	9,99	1,07	

<sup>1</sup> Arcilla; <sup>2</sup> limo; <sup>3</sup> Arena; <sup>4</sup> Densidad aparente; <sup>5</sup> Agua aprovechable; <sup>6</sup> Conductividad hidráulica saturada; <sup>7</sup> Carbono orgánico; <sup>8</sup> Factor de erosionabilidad del suelo.

\*Estimada mediante la opción Baumer del sistema SoilPar (Donatelli y Acutis, 2001; Acutis y Donatelli, 2003).

\*\*Estimada mediante la opción Cambell del sistema SoilPar (Donatelli y Acutis, 2001; Acutis y Donatelli, 2003).

\*\*\*Estimado mediante la transformación de la materia orgánica a carbono orgánico mediante la relación: %MO= %CO\*1.724.

\*\*\*\* Estimado a través del empleo del nomograma propuesto por Wischmeier *et al* (1971) ajustado a unidades métricas; citado por Rodríguez (2010). El valor obtenido se dividió entre 0,13 para adaptarlo al requerimiento de unidades de SWAT (según indican Netisch *et al.* 2011).

Información de suelo empleada para representar la parte alta de la cuenca perteneciente a la formación Las Brisas (sector montañoso norte) asociado a los bosques de galería. Fuente: Núñez (2007).

Profundidad de la parte inferior (mm)	a <sup>1</sup> (%)	L <sup>2</sup> (%)	A <sup>3</sup> (%)	Da <sup>4</sup> (T.m <sup>-3</sup> )	AA <sup>5</sup> (m.m <sup>-1</sup> )	CHS <sup>6</sup> (mm.h <sup>-1</sup> )	CO <sup>7</sup> (%)	Factor K <sup>8</sup> (USLE)
				*	**	**	***	****
100	12	32,4	55,6	1,41	0,13	10,92	1,86	0,19
150	12	32,4	55,6	1,41	0,13	10,92	1,86	

<sup>1</sup> Arcilla; <sup>2</sup> limo; <sup>3</sup> Arena; <sup>4</sup> Densidad aparente; <sup>5</sup> Agua aprovechable; <sup>6</sup> Conductividad hidráulica saturada; <sup>7</sup> Carbono orgánico; <sup>8</sup> Factor de erosionabilidad del suelo.

\*Estimada mediante la opción Baumer del sistema SoilPar (Donatelli y Acutis, 2001; Acutis y Donatelli, 2003).

\*\*Estimada mediante la opción Cambell del sistema SoilPar (Donatelli y Acutis, 2001; Acutis y Donatelli, 2003).

\*\*\*Estimado mediante la transformación de la materia orgánica a carbono orgánico mediante la relación: %MO=%CO\*1.724

\*\*\*\* Estimado a través del empleo del nomograma propuesto por Wischmeier *et al* (1971) ajustado a unidades métricas; citado por Rodríguez (2010). El valor obtenido se dividió entre 0,13 para adaptarlo al requerimiento de unidades de SWAT (según indican Netisch *et al.* 2011).

Información de suelo empleada para representar la formación Las Mercedes (sector montañoso sur) asociada al bosque decido. Fuente: Silva y Márquez (Márquez, 2014).

Profundidad de la parte inferior (mm)	a <sup>1</sup> (%)	L <sup>2</sup> (%)	A <sup>3</sup> (%)	Da <sup>4</sup> (T/m <sup>3</sup> )	AA <sup>5</sup> (m.m <sup>-1</sup> )	CHS <sup>6</sup> (mm.h <sup>-1</sup> )	CO <sup>7</sup> (%)	Factor K <sup>8</sup> (USLE)
				*	**	**	***	****
100	5,19	50,81	44	1,46	0,12	7,48	6	0,3
180	5,19	50,81	44	1,46	0,12	7,48	6	

<sup>1</sup> Arcilla; <sup>2</sup> limo; <sup>3</sup> Arena; <sup>4</sup> Densidad aparente; <sup>5</sup> Agua aprovechable; <sup>6</sup> Conductividad hidráulica saturada; <sup>7</sup> Carbono orgánico; <sup>8</sup> Factor de erosionabilidad del suelo.

\*Estimada mediante la opción Baumer del sistema SoilPar (Donatelli y Acutis, 2001; Acutis y Donatelli, 2003).

\*\*Estimada mediante la opción Cambell del sistema SoilPar (Donatelli y Acutis, 2001; Acutis y Donatelli, 2003).

\*\*\*Estimado mediante la transformación de la materia orgánica a carbono orgánico mediante la relación: %MO=%CO\*1.724

\*\*\*\* Estimado a través del empleo del nomograma propuesto por Wischmeier *et al* (1971) ajustado a unidades métricas; citado por Rodríguez (2010). El valor obtenido se dividió entre 0,13 para adaptarlo al requerimiento de unidades de SWAT (según indican Netisch *et al.* 2011).

Información de suelo empleada para representar la formación Las Mercedes (sector montañoso sur) asociada al bosque decido. Fuente: Silva y Márquez (Márquez, 2014).

Profundidad de la parte inferior (mm)	a <sup>1</sup> (%)	L <sup>2</sup> (%)	A <sup>3</sup> (%)	Da <sup>4</sup> (T/m <sup>3</sup> )	AA <sup>5</sup> (m.m <sup>-1</sup> )	CHS <sup>6</sup> (mm.h <sup>-1</sup> )	CO <sup>7</sup> (%)	Factor K <sup>8</sup> (USLE)
				*	**	**	***	****
180	3,89	59,14	36,97	1,44	0,13	6,41	4,05	0,3
450	5,31	59,84	34,85	1,44	0,13	5,46	1,97	

<sup>1</sup> Arcilla; <sup>2</sup> limo; <sup>3</sup> Arena; <sup>4</sup> Densidad aparente; <sup>5</sup> Agua aprovechable; <sup>6</sup> Conductividad hidráulica saturada; <sup>7</sup> Carbono orgánico; <sup>8</sup> Factor de erosionabilidad del suelo.

\*Estimada mediante la opción Baumer del sistema SoilPar (Donatelli y Acutis, 2001; Acutis y Donatelli, 2003).

\*\*Estimada mediante la opción Cambell del sistema SoilPar (Donatelli y Acutis, 2001; Acutis y Donatelli, 2003).

\*\*\*Estimado mediante la transformación de la materia orgánica a carbono orgánico mediante la relación: %MO=%CO\*1.724

\*\*\*\* Estimado a través del empleo del nomograma propuesto por Wischmeier et al (1971) ajustado a unidades métricas; citado por Rodríguez (2010). El valor obtenido se dividió entre 0,13 para adaptarlo al requerimiento de unidades de SWAT (según indican Netisch et al. 2011).

Información de suelo empleada en el modelo para representar la parte plana de la cuenca asociada al campo experimental del INIA-ceniap. Sucre *et al.*, (1979).

Profundidad de la parte inferior (mm)	a <sup>1</sup> (%)	L <sup>2</sup> (%)	A <sup>3</sup> (%)	Da <sup>4</sup> (T/m <sup>3</sup> )	AA <sup>5</sup> (m.m <sup>-1</sup> )	CHS <sup>6</sup> (mm.h <sup>-1</sup> )	CO <sup>7</sup> (%)	Factor K <sup>8</sup> (USLE)
				*	**	**	***	****
300	21,4	49,7	28,9	1,46	0,12	9,15	2,24	0,33
600	20,6	50,6	28,8	1,57	0,11	2,9	2,02	
800	14,7	46,2	39,1	1,62	0,12	2,65	0,52	
1000	10,6	43,2	46,2	1,51	0,12	12,92	0,5	

<sup>1</sup> Arcilla; <sup>2</sup> limo; <sup>3</sup> Arena; <sup>4</sup> Densidad aparente; <sup>5</sup> Agua aprovechable; <sup>6</sup> Conductividad hidráulica saturada; <sup>7</sup> Carbono orgánico; <sup>8</sup> Factor de erosionabilidad del suelo.

\*Estimada mediante la opción Baumer del sistema SoilPar (Donatelli y Acutis, 2001; Acutis y Donatelli, 2003).

\*\*Estimada mediante la opción Cambell del sistema SoilPar (Donatelli y Acutis, 2001; Acutis y Donatelli, 2003).

\*\*\*Estimado mediante la transformación de la materia orgánica a carbono orgánico mediante la relación: %MO= %CO\*1.724

\*\*\*\* Estimado a través del empleo del nomograma propuesto por Wischmeier et al (1971) ajustado a unidades métricas; citado por Rodríguez (2010). El valor obtenido se dividió entre 0,13 para adaptarlo al requerimiento de unidades de SWAT (según indican Netisch et al. 2011).

Información de suelo empleada para representar la parte plana de la cuenca asociada al campo experimental de la Facultad de Agronomía. Fuente: Viloría y Ostos (Ostos, 1993).

Profundidad de la parte inferior (mm)	a <sup>1</sup> (%)	L <sup>2</sup> (%)	A <sup>3</sup> (%)	Da <sup>4</sup> (T/m <sup>3</sup> )	AA <sup>5</sup> (m.m <sup>-1</sup> )	CHS <sup>6</sup> (mm.h <sup>-1</sup> )	CO <sup>7</sup> (%)	Factor K <sup>8</sup> (USLE)
				*	**	**	***	****
150	17,89	57,72	24,39	1,54	0,12	4,19	2,4	0,33
250	17,29	56,51	26,2	1,54	0,12	4,43	1,22	
550	6,69	56,77	36,54	1,54	0,13	8,29	0,6	
800	10,5	66,82	22,68	1,52	0,13	8,24	0,5	

<sup>1</sup> Arcilla; <sup>2</sup> limo; <sup>3</sup> Arena; <sup>4</sup> Densidad aparente; <sup>5</sup> Agua aprovechable; <sup>6</sup> Conductividad hidráulica saturada; <sup>7</sup> Carbono orgánico; <sup>8</sup> Factor de erosionabilidad del suelo.

\*Estimada mediante la opción Baumer del sistema SoilPar (Donatelli y Acutis, 2001; Acutis y Donatelli, 2003).

\*\*Estimada mediante la opción Cambell del sistema SoilPar (Donatelli y Acutis, 2001; Acutis y Donatelli, 2003).

\*\*\*Estimado mediante la transformación de la materia orgánica a carbono orgánico mediante la relación: %MO=%CO\*1.724

\*\*\*\* Estimado a través del empleo del nomograma propuesto por Wischmeier et al (1971) ajustado a unidades métricas; citado por Rodríguez (2010). El valor obtenido se dividió entre 0,13 para adaptarlo al requerimiento de unidades de SWAT (según indican Netisch et al. 2011).