



PROYECTO MICROCUENCA PLANTÓN-PACAYAS

Modelo Hidrológico SWAT como Herramienta para Procesos de Toma de Decisión

DOCUMENTO TECNICO Nº 14
AREA EVALUACIÓN DE TIERRAS

Elaborado:

Ing. Luis Arroyo Morales
Lic. Haline Heidinger
MSc Eddison José Araya Morales

San José, Costa Rica
Noviembre, 2010

CONTENIDO

1. Introducción.....	3
2. Antecedentes.....	3
3. Objetivos.....	4
3.1. General.....	4
3.2. Específico.....	4
4. Ubicación y características.....	4
4.1. Estaciones meteorológicas y red hídrica	4
4.2. Tipo de suelos y capacidad de uso.....	5
5. Metodología para identificar áreas críticas en la Microcuenca Plantón-Pacayas	5
6. Modelo Hidrológico SWAT-Descripción.....	6
6.1. Datos generales del modelo	6
6.1.1. Elementos del modelo.....	6
6.1.2. Requerimientos de equipos y programas	6
6.1.3. Ventajas del modelo	6
6.1.4. Limitaciones del modelo	6
6.1.5. Datos de entrada	6
6.2. Secuencia de etapas.....	7
6.2.1. Delimitación de cuencas	7
6.2.2. Delimitación de las Subcuencas	7
6.3. Uso de la tierra.....	7
7. Suelos.....	8
7.1. Procesamiento de la información de suelos con el modelo SWAT	8
7.2. Definición de los tipos de suelos	9
8. Procesamiento de la información meteorológica con el Modelo SWAT	9
9. Unidades de Respuesta Hidrológica.....	9
10. Manejo.....	10
11. Calibración del Modelo.....	10
12. Resultados	10
13. Conclusiones	12
14. Referencias.....	12
15. Anexos	12

1. Introducción

La principal función de un sistema de uso de la tierra es el desarrollo de cultivos sobre bases sostenibles sin la degradación ambiental, más aún, según Van Diepen et al. 1991, las cualidades de la tierra están directamente ligadas a los requerimientos de uso de la tierra tales como requerimientos de conservación. Además, todo aquel método que explique o pronostique el uso potencial de las tierras es una evaluación de tierras.

Para la evaluación de los recursos físicos de la tierra tales como suelos, clima, hidrología y topografía son utilizados desde métodos simples, basados en el conocimiento del experto, hasta aquellos más complejos basados en la simulación de modelos. En este sentido, según Van Lanen 1991, los métodos que usan el conocimiento de experto para descubrir cualidades de la tierra y sus aptitudes son descritos como métodos de evaluación cualitativa.

Por ser la evaluación de tierras un instrumento fundamental en la elaboración de planes, programas y proyectos de desarrollo agropecuario, al optimizar el uso de la tierra de acuerdo con su tipo de utilización, se hace indispensable crear y adaptar metodologías de evaluación cualitativa o cuantitativa.

En este estudio se aplicó y comprobó una metodología cualitativa para identificar los riesgos de degradación en la microcuenca Plantón-Pacayas, que tiene origen español (Carrera et al. 1990) y aplicada a condiciones tropicales por Sáenz et al. 1997.

El concepto de área crítica obedece a las zonas con incidencia en la cantidad, distribución e intensidad de agua, cuyos niveles de calidad dependen del origen del suelo, su fisiografía, el tipo de cobertura y su manejo, lo cual provoca la mayor o menor infiltración y la alta o baja escorrentía.

La intensidad de uso de hortalizas y tubérculos en la microcuenca Plantón-Pacayas puede mostrar la posibilidad, en el corto plazo, de una disminución del área de pastos, en suelos de origen volcánico y con pendientes mayores al 30%, reflejando la alta vulnerabilidad de las zonas de montaña en zonas de recarga hídrica. Esto implicó al proyecto la generación de una línea de base biofísica y técnica-productiva detallada y confiable.

La aplicación del modelo de simulación SWAT, Soil Water Assessment Tool, generado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, aplicado y validado en diferentes países latinoamericanos, permite cuantificar la producción de agua, sedimentos y el efecto de las prácticas agronómicas en la calidad del recurso agua por el uso de plaguicidas, pesticidas y fertilizantes.

Los componentes principales de SWAT incluyen: (a) el clima, (b) la escorrentía superficial, (c) los flujos de retorno, (d) la infiltración, (e) la evapotranspiración, (f) las pérdidas por transmisión, (g) el almacenamiento en reservorios, (h) el crecimiento de los cultivos, (i) la irrigación, (j) el flujo de aguas subterráneas, (k) el direccionamiento de las corrientes, (l) la recarga de nutrientes y pesticidas y (m) la transferencia de agua. SWAT divide la cuenca en subcuencas.

Cada subcuenca se divide, a su vez, en una serie de Unidades de Respuesta Hidrológica (URH). Cada URH es una combinación única de un tipo específico de suelo y uso de la tierra (tipo de vegetación, tipo de zona urbana, entre otros). SWAT simula la hidrología, el crecimiento de vegetación y las prácticas de manejo a nivel de cada URH, como también para cada subcuenca. La Figura 1 presenta un esquema general del funcionamiento del modelo SWAT.

2. Antecedentes

La herramienta SWAT presenta un gran potencial con respecto al análisis espacial territorial de variables físicas que aportan valiosa información para procesos de toma de decisiones, incorporando instrumentos y rutinas para áreas como agricultura, ordenamiento y zonificación agropecuaria, manejo de cuencas etc.

Según Matt Yarrow (s.f), el modelo ha sido aplicado exitosamente en lugares como:

Institución o País	Usos
EPA TMDL — Agencia de Protección Medioambiental, Estados Unidos	• Uso de agua municipal y agrícolas • Tendencias agrícolas como tipo de labranza • Escenarios de aplicación de fertilizantes y estiércol • Impacto de estructuras de control de inundación
NOAA	• Inventario de descarga de contaminación en zonas costeras • Simulación de ríos, reservorios y fuentes puntuales
Proyecto HUMUS	• 2150 Cuencas Modeladas • Evaluar efectos de manejo en la calidad y cantidad de agua
Kenya	• Cuenca del Río Sondu (3050 km²)
Río Mississippi	• Los escenarios indican que la precipitación y fertilización con CO₂, tendrían un mayor impacto en los caudales comparado con solo un aumento en temperatura

Por otra parte, para el lago Cocibolca en Nicaragua, el objetivo fue utilizar la herramienta SWAT para Evaluar Suelos y Aguas, a partir de la creación de escenarios que tomara en cuenta la cobertura de uso de la tierra y la modelización climática.

Desde el punto de vista de usos de la tierra, se realizaron los siguientes escenarios:

Escenario	T / Año		
	Sedimento	Total N	Total P
Reforestar toda la cuenca	98	51	86
Reforestar áreas con precipitación > 1,500 mm	95	30	68
Reforestar áreas con pendientes > 8%, instalar pequeñas represas etc.	82	25	61
Reforestar áreas con pendientes > 15%, labranza cero, fertilizar praderas, etc.	88	14	49

Con respecto a cambio climático, las variables físicas presentan resultados valiosos con respecto a los modelos de circulación general atmosférica, donde se evalúa la situación que ocurriría a la generación de escorrentía y sedimentos si la temperatura media anual se incrementa en 1, 7 °C, manteniendo las condiciones de precipitación sin variación y también con un aumento de precipitación del 20 % y una reducción del 50 %. Los resultados obtenidos fueron:

Cambio de precipitación	Modelización de escorrentía	Generación de sedimentos
0%	-10%	-2%
+20 %	+30%	+50%
-50%	-85%	-90%

El modelo SWAT ha sido ampliamente utilizado a nivel mundial, es una herramienta que permite interactuar de manera amigable con Sistemas de Información Geográfica y su potencial en lo referente a temas de cambio climático, ordenamiento territorial, zonificación, manejo de cuencas, planificación de cultivos, diagnóstico de áreas susceptibles a erosión, conservación de los recursos naturales y otros, demuestran que es un insumo elemental tecnológico para el proceso de toma de decisiones.

3. Objetivos

3.1. General

Mejorar los sistemas de producción agropecuario por medio de la incorporación de tecnologías que mitiguen la degradación de los suelos y la contaminación de aguas en la microcuenca Plantón - Pacayas, Cartago, Costa Rica.

3.2. Específico

Ubicar, cuantificar y predecir el impacto de las prácticas de manejo de tierras sobre la producción de agua, sedimentos, nutrientes y sustancias químicas producto de la actividad agrícola en la microcuenca Plantón-Pacayas.

4. Ubicación y características

La microcuenca se ubica en la provincia de Cartago, Costa Rica. Específicamente entre las coordenadas planas 552.500-557.000 y 215.500-210.000. Sus límites son al norte con el Parque Nacional Volcán Irazú, al este el río Birris, al oeste con el río Lajas y al sur con el pueblo de Pacayas. La microcuenca tiene una altitud entre los 1720-2900 msnm, con un promedio de temperatura de 14.1 °C y 16.7°C (Estaciones Meteorológicas Tierra Blanca y Pacayas), con una precipitación anual de 1772.8 mm y 2227.6 (Estaciones Meteorológicas Chicao y Pacayas, respectivamente). El área de intervención es de 561.48 has. (Gómez.O, 2004). Las principales características del área se resumen a continuación:

4.1. Estaciones Meteorológicas y Red Hídrica

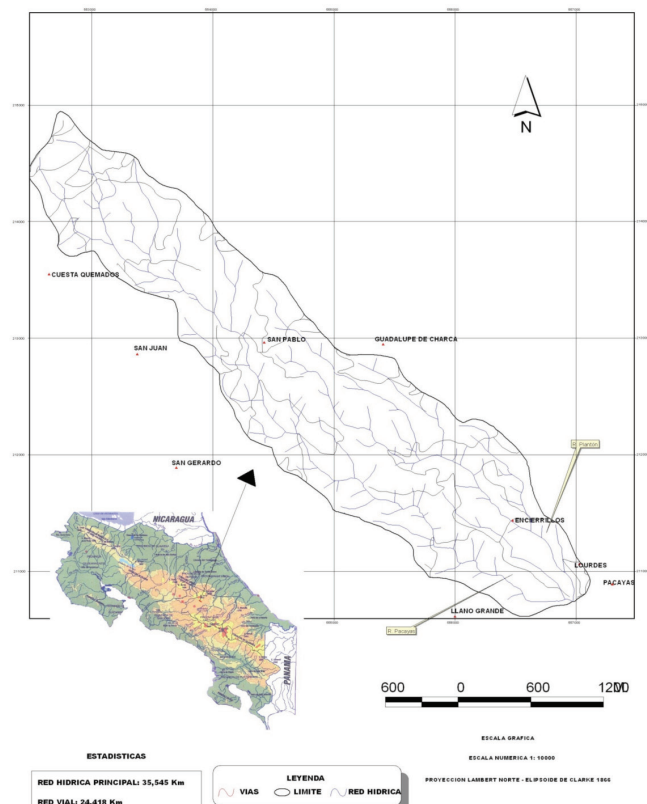
Estaciones Meteorológicas

Pacayas	Variables*	Chicao
1735	Altura (msnm)	3090
2227	Precipitación (mm)	1772
16.7	Temperatura °C	14.1
88	Humedad Relativa (%)	81
4.4	Brillo Solar (horas)	6.1

* Promedios anuales

Proyecto Plantón Pacayas

Mapa1. Red Hídrica y Vial



4.2. Tipo de Suelos y Capacidad de Uso

Según Gómez, 2004, los tipos de suelos del área de la microcuenca se caracterizan por:

- En el área de estudio se encontraron 2 unidades de mapeo, las cuales se dividieron en fases por pendiente; éstas se presentan de forma resumida en el cuadro 2 y en el mapa de suelos y de capacidad de uso.
- Los suelos encontrados varían de superficiales a muy profundos, de texturas livianas a moderadamente pesadas, bien estructuradas, muy permeables, de color negro, pardo oscuro, pardo amarillento oscuro, gris claro, de fertilidad baja. Ligeramente adherentes y ligeramente plásticos en mojado y friables en húmedo.
- Los problemas de fertilidad están asociados con las deficiencias de calcio, magnesio, fósforo, boro, zinc, manganeso y azufre, ocasionalmente. Además, presentan desequilibrio en las relaciones catiónicas.
- En el área estudiada casi no existen suelos que no presenten limitaciones por riesgo de erosión, debido a las fuertes pendientes y a las altas precipitaciones. Estas condiciones facilitan la escorrentía superficial, la cual contribuye al deterioro acelerado de los suelos, constituyéndose la erosión en uno de los problemas más graves para la producción agropecuaria, la sedimentación de embalses y el taponamiento de carreteras.

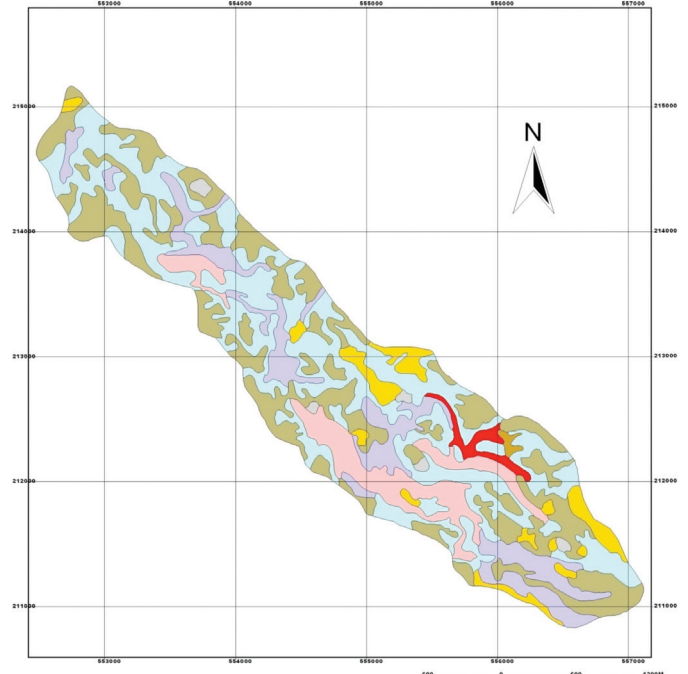
Cuadro 2. Distribución de unidades de mapeo.

UNIDAD DE MAPEO	UNIDAD TAXONOMICA	FASE	SIMBOL.	CAPACIDAD DE USO	AREA HA	%
		Ligeramente Ondulado	Cllo	Ile12s4c34	5.03	0.9
Consociación Irazú	Typic Hapludands	Moderadamente ondulada	Clmo	Ile12s4c34	32.35	5.76
		Ondulada	Clo	Ive12s4c34	171.80	30.60
		Fuertemente ondulada	Clfo	Vle12s4c34	211.16	37.61
		Escarpada	Cle	Vlle12c34	75.85	13.51
		Fuertemente escarpada	Clfe	Vlle12c34	55.13	9.82
Complejo Pacayas	Lithic Udorthens	Escarpada	CPep	Vlle12s13c34	1.92	0.34
	Lithic	Fuertemente				
	Hapludands	Escarpada	CPfep	Vlle12s13c34	8.26	1.47
TOTAL					561.48	100.0

Fuente: Gómez, O. 2004.

- Porcentualmente, los suelos de vocación agrícola intensiva (clases II, III, IV) representan 182.59 ha, equivalente al 32.5 %; 211.16 ha sea el 37.61 % son de vocación para cultivos perennes (clase VI) y 167.73 ha (29.87%) de las tierras deben dedicarse a áreas de protección con bosque o regeneración natural debido a que las limitantes inherentes (especialmente las pendientes, riesgo de erosión, pedregosidad, altas precipitaciones, en ciertas épocas del año) son prácticamente incorregibles. (Mapa 2).

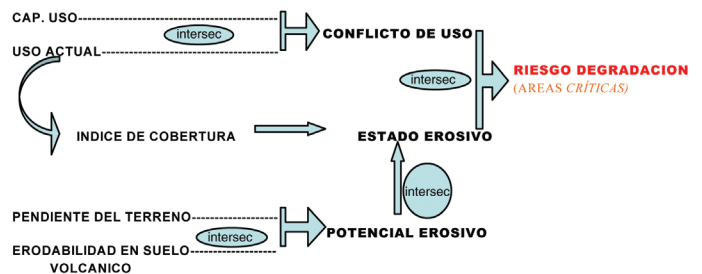
Proyecto Plantón Pacayas Mapa2. Estudio Detallado de Capacidad de uso de las tierras



ESTADÍSTICAS		
CAP. DE USO	HAS	%
Ile12s4c34	5.03	0.90
IIIe12s4c34	32.37	5.76
IVe12s4c34	171.91	30.59
Vle12s4c34	211.31	37.61
Vlle12c34	75.91	13.51
Vlle12s13d1c34	1.93	0.34
Vlle12c34	55.17	9.82
Vlle12s13d1c34	8.27	1.47
TOTAL	561.90	100.00

UNIDADES DE MANEJO	
Ile12s4c34	
IIIe12s4c34	
IVe12s4c34	
Vle12s4c34	
Vlle12c34	
Vlle12s13d1c34	
Vlle12c34	
Vlle12s13d1c34	

5. Metodología para identificar áreas críticas en la microcuenca Plantón-Pacayas



Fuente: Sáenz et al. 1997

Elaboró: Ing. Luis Arroyo M.
INTA, 2006.

Con la aplicación de la metodología de riesgo de degradación se delimitaron las fincas de los productores que representan la interrelación sobre los tipos de riesgo y en las cuales se inicia la medición de erosión, infiltración, caudales y las tecnologías de manejo integrado de cultivos.

En el siguiente mapa se visualiza la ubicación de las fincas, las cuales son representativas de la zona alta, media y baja de la microcuenca donde

estaciones climáticas dentro de la cuenca. Con dicha información se puede construir la tabla de datos estadísticos de clima (Anexo 1). Es ideal tener datos continuos de un período mayor a 5 años; los datos requeridos son:

- temperatura mínima y máxima diaria (°C)
 - precipitación diaria (mm H₂O/día)
 - radiación solar (opcional)
 - evapotranspiración (opcional)
 - velocidad del viento (opcional)
- Base de datos de cultivos y manejo. En caso de que el SWAT no disponga en su base de datos de cultivos y tipos de laboreo, algún tipo de cultivo o práctica de manejo específica para la cuenca en estudio, el usuario deberá construir dicha base de datos con datos de medidas en campo y/o revisión de literatura (p.ej., piña, café).
 - Prácticas de manejo (datos cuantitativos de aplicación de riego, empleo de fertilizantes y aplicación de pesticidas) y calendarios de cultivo.

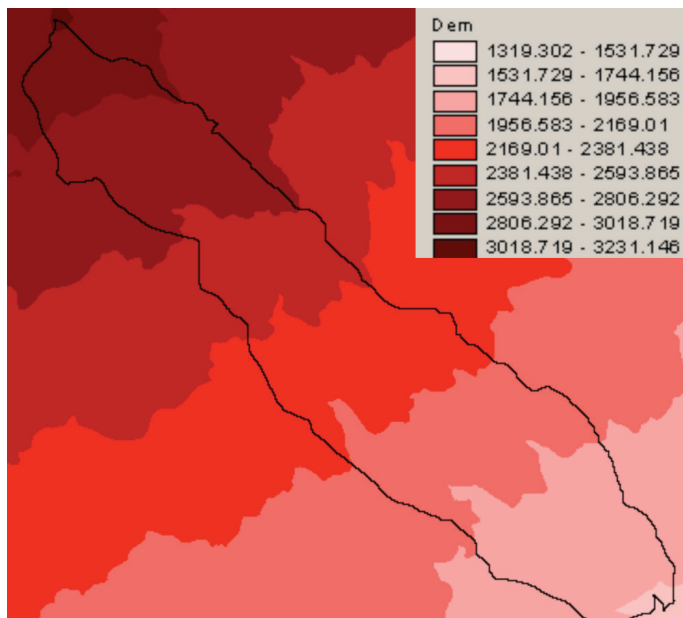
6.2. Secuencia de etapas

6.2.1. Delimitación de cuencas

El primer paso corresponde a la obtención del Modelo Digital de Elevación (MDE), el cual contiene para cada píxel la información de altitud, (Figura 2). A partir del MDE y los ríos digitalizados, el SWAT delimita las subcuencas. El usuario puede determinar el límite mínimo de área para las subcuencas (Figura 3).

En el estudio de caso, se generó el modelo con curvas de nivel con distancia en altitud de 5 metros y fotos aéreas con resolución de 1 metro. La interpolación se definió con 30 clases y el efecto visual se realizó en 3D- ARCVIEW, (Figura 2).

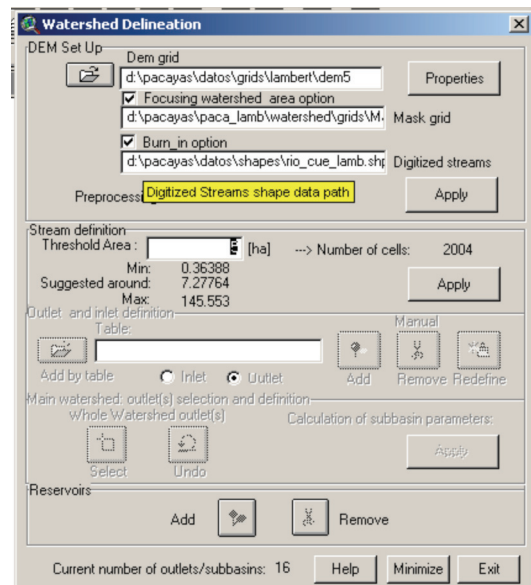
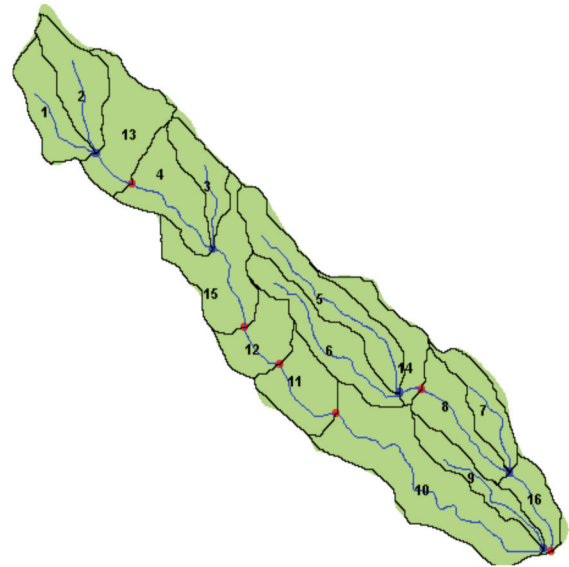
Figura 2. Modelo de Digital Elevación (msnm)



Con la extensión AVSWAT2000, se generó el mapa con 16 sub-cuencas correlacionando el DEM y la red hidrológica, (Figura 3).

6.2.2. Delimitación de las Subcuencas

Figura 3. Delimitación de subcuencas



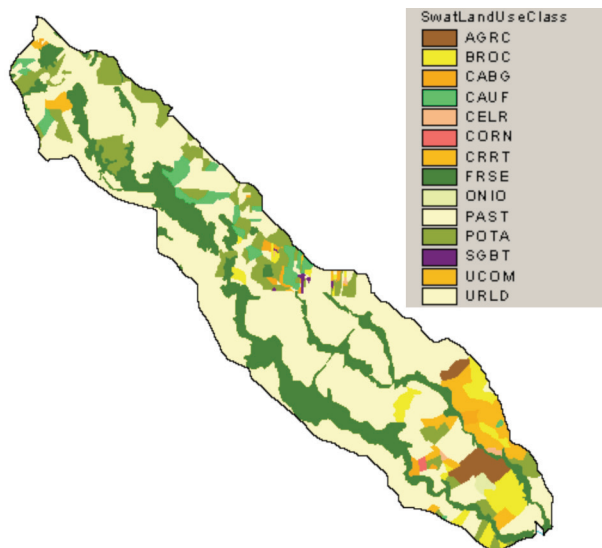
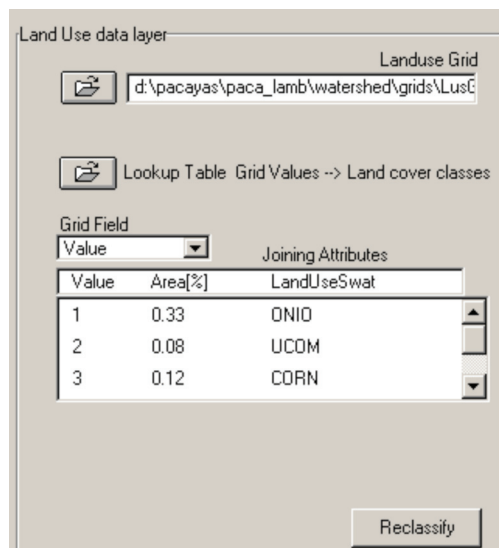
6.3. Uso de la tierra

Para el área de estudio, se realizó el levantamiento del uso actual por medio de la fotografía aérea Carta 2005 y verificada con GPS. De acuerdo a la simbología de SWAT, se ingreso al modelo los siguientes usos:

- FRSE = Bosque
- CELR = Apio
- AGRC = Limpio (presiembra)
- POTA = Papa
- CABG = Repollo
- CRRT = Zanahoria
- BROC = Brócoli
- UCOM = Comercial
- CORN = Maíz
- PAST = Pasto
- URLD = Urbano- baja densidad
- ONIO = Cebollino
- CAUF = Coliflor
- SGBT = Remolacha

El tipo de vegetación determina varios componentes del ciclo hidrológico: requerimiento total de agua, demanda de irrigación, consumo actual por evapotranspiración, escorrentía superficial, percolación y erosión. El siguiente paso es incluir los tipos de vegetación en formato grid y luego se transcriben dichas clases según la codificación estándar que maneja SWAT, (Figura 4).

Figura 4. Definición de coberturas de uso de la tierra



7. Suelos

Los suelos son un factor determinante para procesos hidrológicos como: escorrentía superficial, infiltración, percolación, flujo lateral sub-superficial, agua disponible para las plantas, etc. En esta etapa, se ingresan las clases de suelo en formato gris, (Figura 5). Cada clase de suelo debe tener por lo menos información de textura y materia orgánica del perfil del suelo a fin de poder construir la base de datos que se detalla en el Anexo. En la microcuenca se presentan suelos cuyo material matriz es ceniza volcánica, clasificados como Typic Hapludands que representan el 98,19%

(551,31 has) del área de estudio y 1,81% (10,18 has) clasificados como Lithic Hapludands (Gómez, 2004).

Las fases se derivan por pendientes ligeramente onduladas hasta fuertemente escarpada, aunque el 68% del área predominan pendientes entre 15 y 60 % en lomeríos.

7.1. Procesamiento de la información de suelos con el modelo SWAT

El formato para la entrada de datos se ordena por cada fase de suelo y para cada horizonte del perfil correspondiente.

Los parámetros son los siguientes:

SOL_ZMX: Máxima profundidad de raíces del perfil del suelo (mm).

ANION_EXCL: Fracción porosa, en la cual no son atraídos los aniones.

SOL_Z: Profundidad de cada horizonte del perfil (mm).

SOL_BD: Densidad en volumen húmedo (g/cc).

SOL_AWC: Capacidad de agua disponible por capa de suelo (mmH2O/mm de suelo).

SOL_K: Conductividad hidráulica de saturación (mm/hr). Resistencia al flujo de agua en la matriz del suelo.

SOL_CBN: Contenido de carbono orgánico (% peso de suelo).

SOL_ALB: Albedo en suelo húmedo (Refractancia por % granulométrico).

USLE_K: Factor erodabilidad suelo con la ecuación (datos textura y mo).

CLAY: Contenido de arcilla (% peso de suelo).

SILT: Contenido de limo (%).

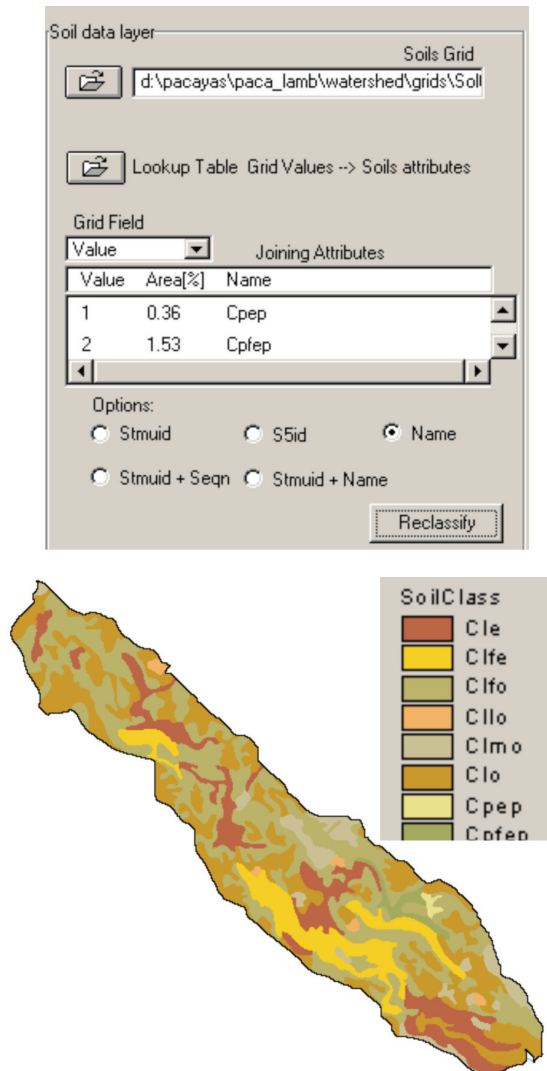
SAND: Contenido de arena (%).

ROCK: Contenido fragmentos de roca (%).

HYDGRP: Infiltración. Se define con el método del número de curva del U.S. Soil Conservation Service en base a la conductividad hidráulica saturada (0.5m) y aplicando las tablas de hidrología aplicada.

7.2. Definición de los tipos de suelos

Figura 5. Definición de tipos de suelos



8. Procesamiento de la información meteorológica con el Modelo SWAT

El generador de clima de SWAT necesita mínimo 3 estaciones meteorológicas dentro del área delimitada para correr el modelo. La tabla siguiente ubica las estaciones seleccionadas con criterio de proximidad para una serie histórica de 29 años (1 de enero de 1978 a 31 diciembre de 2006).

ID	Estación	X	Y	Elevación(msnm)
1	Pacayas	556459,64	211594,14	1735
2	S.J. Chicoá	552788,71	214917,45	2918
3	Coliblanco	554455,43	213668,48	2521

La tabla estadística de los datos climáticos que debe desarrollarse para el modelo es la siguiente:

- TMPMX:** Promedio mensual de la temperatura máxima diaria (°C).
- TMPMN:** Promedio mensual de la temperatura mínima diaria (°C).
- TMPSTDMX:** Desviación estándar mensual de la temperatura máxima diaria (°C).
- TMPSTDMN:** Desviación estándar mensual de la temperatura mínima diaria (°C).
- PCPMM:** Promedio mensual de la precipitación diaria (mm H₂O).
- PCPSTD:** Desviación estándar mensual de la precipitación diaria (mm H₂O/día).
- PCPSKW:** Coeficiente de asimetría mensual de la precipitación diaria.
- PR_W1:** Probabilidad mensual de ocurrencia de un día húmedo luego de un día seco.
- PR_W2:** Probabilidad mensual de ocurrencia de un día húmedo luego de un día húmedo.
- PCPD:** Promedio mensual del número de días de lluvia.
- RAINHHMX:** Máxima lluvia de media hora por mes (mm H₂O).
- SOLARAV:** Promedio mensual de la radiación solar diaria (MJ/m²/día).
- DEWPPT:** Promedio mensual de la temperatura del punto de rocío (MJ/m²/día).
- WNDNAV:** Promedio mensual de la velocidad de viento diaria (m/s).

Para calcular aquellos referidos a la temperatura (TMPMX, TMPMM, TMPSTDMX, TMPSTMN) se usó una hoja Excel convencional. Mientras que para el cálculo de aquellos referidos a la precipitación (PCPMM, PCPSTD, PCPSK, PR_W1, PR_W2, PCPD) se empleó el programa pcpstat.exe de SWAT.

9. Unidades de Respuesta Hidrológica

Es posible determinar el número de URH requeridos en cada subcuenca en base a valores límite, (Figura 6), los cuales representan el porcentaje del área de cobertura de uso o suelo sobre una subcuenca, que puede ser obviada. Valores límites mínimos resultarán en un mayor detalle, por ende mayor número de URH, (Figura 7).

Figura 6. Definición de límites para las URH

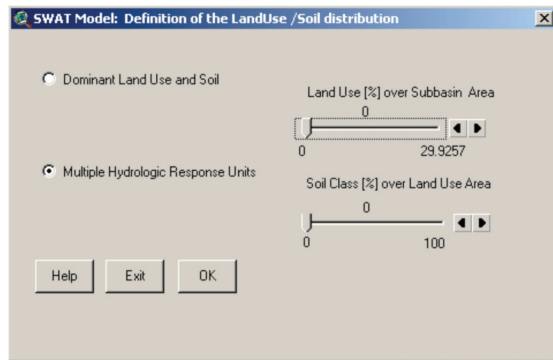
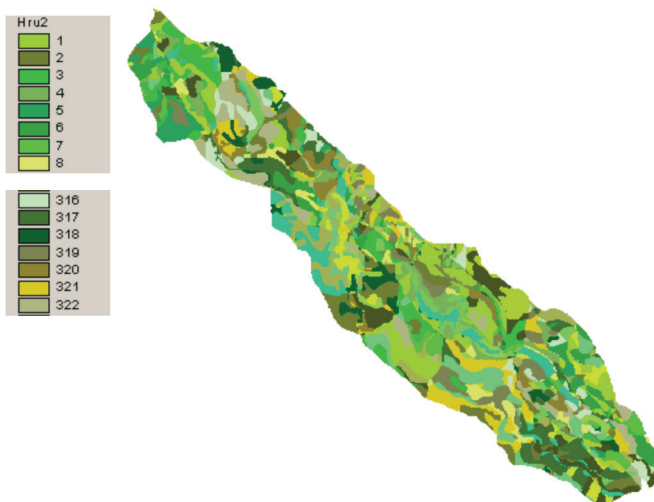


Figura 7. Unidades de Respuesta Hidrológica



10. Manejo

Se elabora el calendario de cultivos y se ingresan los datos que se dispongan con respecto a la siembra, la cosecha, la aplicación de riego, la aplicación de nutrientes, la aplicación de pesticidas y las operaciones de laboreo realizado para cada cobertura.

11. Calibración del Modelo

Se procede a comparar la producción de agua, de sedimentos y de nutrientes medidos en campo con los datos estimados por el SWAT. En resumen, los datos para la calibración del modelo son:

- Caudales en las salidas de las subcuencas
- Datos de calidad de agua en la cuenca (nutrientes y pesticidas)
- Producción de sedimentos por subcuencas

De haber variación entre los datos medidos y los simulados por el modelo, se realizan diferentes ajustes de una serie de parámetros hasta llegar a valores adecuados.

12. Resultados

Un gran número de archivos de salida son generados por SWAT. Existen 4 archivos de salida generados en cada simulación (Figura 8), estos son: salida estándar (.std), resultados por cada URH (.sbs, Anexo 3), resultados por subcuencas (.bsb, Anexo 4) y resultados por corriente de agua (.rch, Anexo 5). Además, se generaran archivos resumen sobre pesticidas (.pso), calidad del agua por corriente (.wqo), reservorios (.rsv) y calidad del agua de un lago (.lqo). Con herramientas de SIG, se pueden expresar de manera gráfica los resultados de la tabla .sbs (a nivel de URH) como se observa en las Figuras 9, 10, 11, 12, 13 y 14.

Figura 8. Visualización de resultados del modelo

Subbasin	Hru	Landuse	Soil	Date	Area	Prec
1	1	CAUF	Clo	1978	0.015	1E
1	2	CAUF	Clo	1978	0.009	1E
1	3	PAST	Clo	1978	0.101	1E
1	4	PAST	Clo	1978	0.045	1E
1	5	PAST	Cle	1978	0.011	1E
1	6	UCOM	Clo	1978	0.003	1E
1	7	FRSE	Clo	1978	0.004	1E
1	8	FRSE	Clo	1978	0.009	1E
1	9	FRSE	Cle	1978	0.010	1E
1	10	POTA	Clo	1978	0.026	1E
1	11	POTA	Cle	1978	0.022	1E

Subbasin	Date	Flow In	Flow Out	Evap
1	1978	0.00950	0.00950	0.00000
2	1978	0.01039	0.01039	0.00000
3	1978	0.00653	0.00653	0.00000
4	1978	0.04562	0.04562	0.00000
5	1978	0.01588	0.01588	0.00000
6	1978	0.01310	0.01309	0.00000
7	1978	0.00788	0.00788	0.00000
8	1978	0.04652	0.04652	0.00000
9	1978	0.00719	0.00718	0.00000
10	1978	0.11580	0.11580	0.00001
11	1978	0.00653	0.00653	0.00000

Subbasin	Date	Precip	Sincmet	Pot	Et	Sw	Pnc
1	1978	1871.067	0.000	1262.565	813.896	125.359	
2	1978	1871.067	0.000	1263.272	826.916	131.244	
3	1978	1871.067	0.000	1254.869	824.729	133.317	
4	1978	1871.067	0.000	1252.102	826.993	126.847	
5	1978	1871.067	0.000	1241.802	802.586	135.231	1
6	1978	1871.067	0.000	1239.643	829.034	131.302	
7	1978	1871.067	0.000	1227.167	753.057	136.567	
8	1978	1871.067	0.000	1225.786	780.094	112.843	2
9	1978	1871.067	0.000	1223.267	774.843	136.808	
10	1978	1871.067	0.000	1225.144	825.730	127.792	
11	1978	1871.067	0.000	1236.650	847.772	117.961	

Attributes of Muestreo_lamb.shp
Attributes of Rangages
Attributes of SoilClass
Attributes of Streams
Attributes of Subbasins
Attributes of Subbasins
Attributes of Suelos
Attributes of Tempgages
Attributes of Uso
Attributes of Watershed

Figura 9. Evapotranspiración actual (mmH₂O)

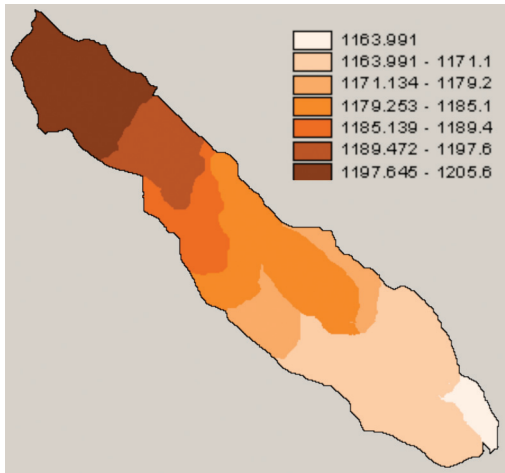


Figura 12. Producción de sedimentos (Tn/Ha)

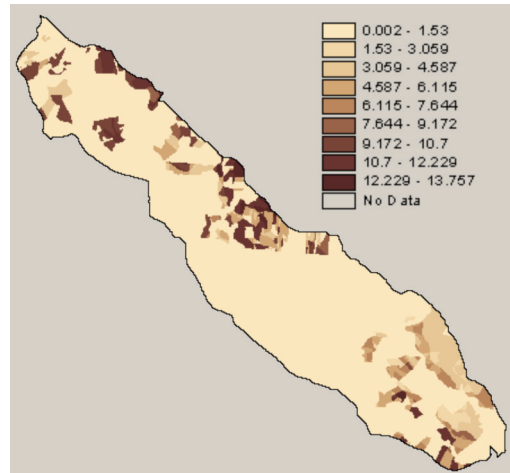


Figura 10. Contenido de agua del suelo (mmH₂O)

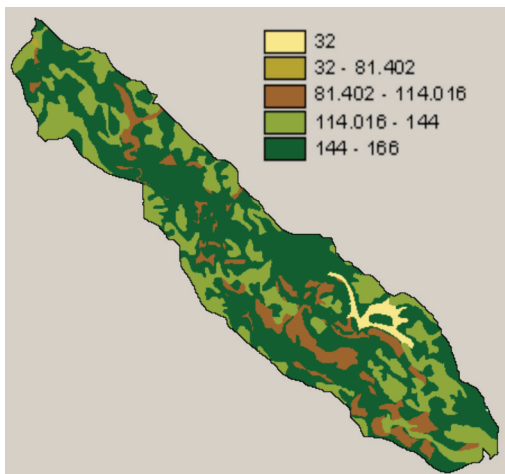


Figura 13. NO₃ en escorrentía superficial (Kg N/Ha)

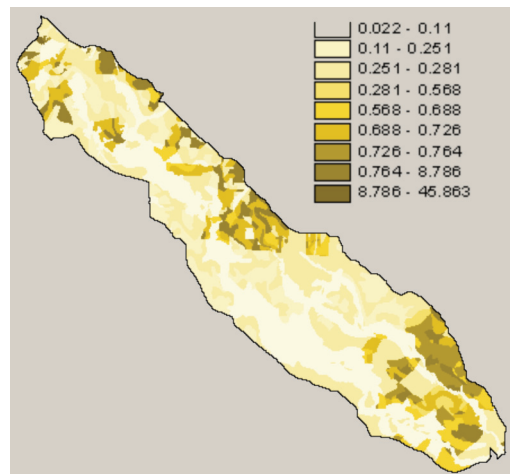


Figura11. Escorrentía superficial (mmH₂O)

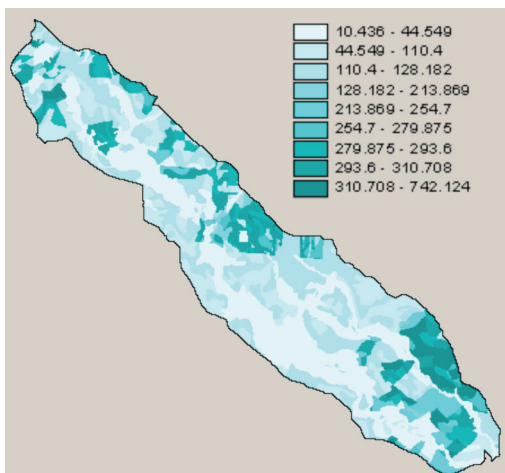
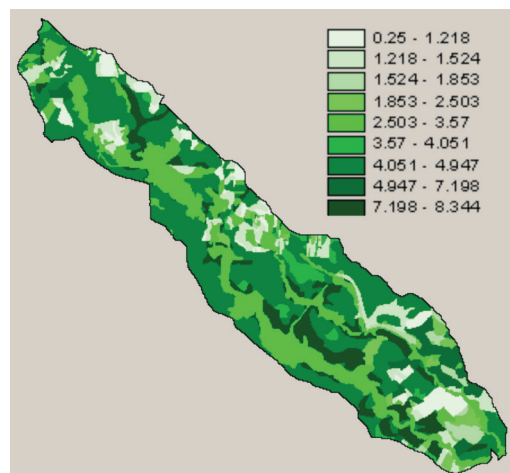


Figura 14. Biomasa (Tn/Ha)



13. Conclusiones

- Con el mapa generado de Riesgos de Degradación se determinaron las áreas críticas de muy alto, alto, medio y bajo riesgo. Esto ayudó a priorizar las fincas más representativas con los diferentes riesgos para iniciar el proceso de medición de índices de vulnerabilidad ambiental.
- Para obtener una mayor certeza de los resultados del modelo es necesario continuar con la Medición de Caudales de acuerdo a la definición de los 16 Subbasin generados para un mejor cálculo de Contaminación por Agroquímicos y Pesticidas de acuerdo al formato que genera el Modelo SWAT en su base de datos.
- Las mediciones para obtener los Indicadores de Erosión debe estar sujeta a dar continuidad a los diferentes Usos de la Tierra y en los diferentes Riesgos de Degradación como los son el Medio y Bajo. Un factor a medir junto con la erosión y en cada parcela es la escorrentía, lo que hace necesario modificar la metodología de medición.
- En cada Parcela MIC debe priorizarse la Tecnología de Mitigación que tenga mayor aproximación a la realidad para homologarse a los HRU más significativos en toda el área de estudio.
- La validación o calibración del Modelo SWAT debe enfocarse, además, hacia las posibilidades de adopción más generalizadas por parte de los productores, donde el Impacto Tecnológico reduzca costos, mejore la calidad del producto, evite daños ambientales y mejore la situación de los recursos naturales para beneficio de las futuras generaciones de la microcuenca.

14. Referencias

Carrera, et al. 1990. Primera aproximación para la elaboración de la metodología común de la cartografía de erosión hídrica en el mediterráneo. ICONA, FAO, UNEP, p.25-32.

Di Luzio M., Srinivasan R., Arnold J.G., Neitsch S.L. .2002. Soil and Water Assessment Tool, User's Guide. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Temple, TX. 351 p.

Arroyo L., Ugalde, M. y Araya, E. 2006. Línea base biofísica y técnico-productiva para la intervención y desarrollo de la actividad productiva en la microcuenca Plantón-Pacayas. Proyecto Microcuenca Plantón-Pacayas. Documento Técnico No.2. Área Evaluación de Tierras. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria. San José, Costa Rica. 53 p.

Gómez O. 2004. Estudio detallado de suelos de la microcuenca Plantón-Pacayas, Pacayas de Alvarado, Cartago. Documento Técnico No. 1. Área Suelos y Aguas. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria. San José. Costa Rica. 64 p.

Matt Yarrow (s.f). El Manejo Integrado de Cuencas. Aplicaciones del Modelo SWAT LME – Uchile,

Neitsch S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, and J.R. Williams. 2001. Soil and Water Assessment Tool User's Manual, Version 2000. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Temple, TX. 472 p.

Neitsch S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, and J.R. Williams. 2002. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation, Version 2000. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Temple, TX. 506 p.

Sáenz et al.1997. Uso de un sistema de Información Geográfica (SIG) en la identificación de degradación de tierras y recursos hídricos. Revista Forestal Centroamericana N° 18. p.18-22.

Van Diepen et al. C.A.1991. Land evaluation: from Intuition to quantification. Advance in Soil Science. New York. Vol 15. p.139-201.

Van Lanen et al.1994. Physical land evaluation methods on G.I.S. to explore crop growth potential and its effects within the European Communities Agricultural Systems Wageningen. The Netherlands. p.101-115.

15. Anexos

Anexo 1. Datos de entrada – Clima

TMPMX	Average or mean daily maximum air temperature for month (C)
TMPMN	Average or mean daily minimum air temperature for month (C)
TMPSTDMX	Standard deviation for daily maximum air temperature in month (C)
TMPSTDMN	Standard deviation for daily minimum air temperature in month (C)
PCPMM	Average or mean total monthly precipitation (mm H ₂ O)
PCPSTD	Standard deviation for daily precipitation in month (mm H ₂ O /day)
PCPSKW	Skew coefficient for daily precipitation in month
PR_W1	Probability of a wet day following a dry day in the month
PR_W2	Probability of a wet day following a wet day in the month
PCPD	Average number of days of precipitation in month
RAINHHMX	Maximum 0.5 hour rainfall in entire period of record for month (mm H ₂ O)
SOLARAV	Average daily solar radiation for month (MJ/m ² /day)
DEWPT	Average daily dew point temperature in month (MJ/m ² /day)
WNDAY	Average daily wind speed in month (m/s)

Anexo 2. Datos de entrada - Suelos

SOL_ZMX	Maximum rooting depth of soil profile (mm).
ANION_EXCL	Fraction of porosity (void space) from which anions are excluded.
SOL_CRK	Potential or maximum crack volume of the soil profile expressed as a fraction of the total soil volume.

SOL_Z	Depth from soil surface to bottom of layer (mm).
SOL_BD	Moist bulk density (Mg/m ³ or g/cm ³).
SOL_AWC	Available water capacity of the soil layer (mm H ₂ O /mm soil).
SOL_K	Saturated hydraulic conductivity (mm/hr).
SOL_CBN	Organic carbon content (% soil weight).
SOL_ALB	Moist soil albedo.
SOL_EC	Electrical conductivity (dS/m).
USLE_K	USLE equation soil erodibility factor
CLAY	Clay content (% soil weight).
SILT	Silt content (% soil weight).
SAND	Sand content (% soil weight).
ROCK	Rock fragment content (% total weight).

Anexo 3. Tabla de salida .sbs

AREA	Drainage area of the HRU (km ²).
PRECIP	Total amount of precipitation falling on the HRU during time step (mm H ₂ O).
SNOFALL	Amount of precipitation falling as snow, sleet or freezing rain during time step (water-equivalent mm H ₂ O).
SNOMELT	Amount of snow or ice melting during time step (water equivalent mm H ₂ O).
IRR	Irrigation (mm H ₂ O).
PET	Potential evapotranspiration (mm H ₂ O).
ET	Actual evapotranspiration from the HRU during the time step (mm H ₂ O).
SW	Soil water content (mm H ₂ O).
PERC	Water that percolates past the root zone during the time step (mm H ₂ O).
GW_RCHG	Recharge entering aquifers during time step (mm H ₂ O).
DA_RCHG	Deep aquifer recharge (mm H ₂ O).
REVAP	Water in the shallow aquifer returning to the root zone in response to a moisture deficit during the time step (mm H ₂ O).
SA_IRR	Irrigation from shallow aquifer (mm H ₂ O).
DA_IRR	Irrigation from deep aquifer (mm H ₂ O).
SA_ST	Shallow aquifer storage (mm H ₂ O).
DA_ST	Deep aquifer storage (mm H ₂ O).
SURQ	Surface runoff contribution to stream flow in the main channel during time step (mm H ₂ O).
TLOSS	Transmission losses (mm H ₂ O).
LATQ	Lateral flow contribution to stream flow (mm H ₂ O).
GW_Q	Groundwater contribution to stream flow (mm H ₂ O).
WYLD	Water yield (mm H ₂ O).
SYLD	Sediment yield (metric tons/ha).
USLE	Soil loss during the time step calculated with the USLE equation (metric tons/ha).
N_APP	Nitrogen fertilizer applied (kg N/ha).
P_APP	Phosphorus fertilizer applied (kg P/ha).
NAUTO	Nitrogen fertilizer auto-applied (kg N/ha).
PAUTO	Phosphorus fertilizer auto-applied (kg P/ha).
NGRZ	Nitrogen applied during grazing operation (kg N/ha).

PGRZ	Phosphorus applied during grazing operation (kg P/ha).
NRAIN	Nitrate added to soil profile by rain (kg N/ha).
NFIX	Nitrogen fixation (kg N/ha).
F-MN	Fresh organic to mineral N (kg N/ha).
A-MN	Active organic to mineral N (kg N/ha).
A-SN	Active organic to stable organic N (kg N/ha).
F-MP	Fresh organic to mineral P (kg P/ha).
AO-LP	Organic to labile mineral P (kg P/ha).
L-AP	Labile to active mineral P (kg P/ha).
A-SP	Active to stable P (kg P/ha).
DNIT	Denitrification (kg N/ha).
NUP	Plant uptake of nitrogen (kg N/ha).
PUP	Plant uptake of phosphorus (kg P/ha).
ORGN	Organic N yield (kg N/ha).
ORGP	Organic P yield (kg P/ha).
SEDP	Sediment P yield (kg P/ha).
NSURQ	NO ₃ in surface runoff (kg N/ha).
NLATQ	NO ₃ in lateral flow (kg N/ha).
NO3L	NO ₃ leached from the soil profile (kg N/ha).
NO3GW	NO ₃ transported into main channel in the groundwater loading from the HRU (kg N/ha).
SOLP	Soluble P yield (kg P/ha).
P_GW	Soluble phosphorus transported by groundwater flow into main channel during the time step (kg P/ha).
W_STRS	Water stress days during the time step (days).
TMP_STRS	Temperature stress days during the time step (days).
N_STRS	Nitrogen stress days during the time step (days).
P_STRS	Phosphorus stress days during the time step (days).
BIOM	Biomass (metric tons/ha).
LAI	Leaf area index at the end of the time period.
YLD	Harvested yield (metric tons/ha).
BACTP	Number of persistent bacteria in surface runoff entering reach (count).
BACTLP	Number of less persistent bacteria in surface runoff entering reach (count).

Anexo 4. Tabla de salida .bsb

AREA	Area of the subbasin (km ²).
PRECIP	Total amount of precipitation falling on the subbasin during time step (mm H ₂ O).
SNOMELT	Amount of snow or ice melting during time step (water equivalent mm H ₂ O).
PET	Potential evapotranspiration from the subbasin during the time step (mm H ₂ O).
ET	Actual evapotranspiration from the subbasin during the time step (mm).
SW	Soil water content (mm).
PERC	Water that percolates past the root zone during the time step (mm).
SURQ	Surface runoff contribution to stream flow during time step (mm H ₂ O).
GW_Q	Groundwater contribution to stream flow (mm).
WYLD	Water yield (mm H ₂ O).

SYLD	Sediment yield (metric tons/ha).
ORGN	Organic N yield (kg N/ha).
ORGP	Organic P yield (kg P/ha).
NSURQ	NO ₃ in surface runoff (kg N/ha).
SOLP	Soluble P yield (kg P/ha).
SEDP	Mineral P yield (kg P/ha).

Anexo 5. Tabla de salida .rch

AREA	Area drained by reach (km ²).
FLOW_IN	Average daily stream flow into reach during time step (m ³ /s).
FLOW_OUT	Average daily stream flow out of reach during time step (m ³ /s).
EVAP	Average daily rate of water loss from reach by evaporation during time step m ³ /s).
TLOSS	Average daily rate of water loss from reach by transmission through the streambed during time step (m ³ /s).
SED_IN	Sediment transported with water into reach during time step (metric tons).
SED_OUT	Sediment transported with water out of reach during time step (metric tons).
SEDCONC	Concentration of sediment in reach during time step (mg/L).
ORGN_IN	Organic nitrogen transported with water into reach during time step (kg N).
ORGN_OUT	Organic nitrogen transported with water out of reach during time step (kg N).
ORGP_IN	Organic phosphorus transported with water into reach during time step (kg P).
ORGP_OUT	Organic phosphorus transported with water out of reach during time step (kg P).
NO3_IN	Nitrate transported with water into reach during time step (kg N).
NO3_OUT	Nitrate transported with water out of reach during time step (kg N).
NH4_IN	Ammonium transported with water into reach during time step (kg N).
NH4_OUT	Ammonium transported with water out of reach during time step (kg N).
NO2_IN	Nitrite transported with water into reach during time step (kg N).
NO2_OUT	Nitrite transported with water out of reach during time step (kg N).
MINP_IN	Mineral phosphorus transported with water into reach during time step (kg P).
MINP_OUT	Mineral phosphorus transported with water out of reach during time step (kg P).
ALGAE_IN	Algal biomass transported with water into reach during time step (kg).
ALGAE_OUT	Algal biomass transported with water out of reach during time step (kg).
CBOD_IN	Carbonaceous biochemical oxygen demand of material transported into reach during time step (kg O ₂).

CBOD_OUT	Carbonaceous biochemical oxygen demand of material transported out of reach during time step (kg O ₂).
DISOX_IN	Amount of dissolved oxygen transported into reach during time step (kg O ₂).
DISOX_OUT	Amount of dissolved oxygen transported out of reach during time step (kg O ₂).
SOLPST_IN	Soluble pesticide transported with water into reach during time step (mg active ingredient).
SOLPST_OUT	Soluble pesticide transported with water out of reach during time step (mg active ingredient).
SORPST_IN	Pesticide sorbed to sediment transported with water into reach during time step (mg active ingredient).
SORPST_OUT	Pesticide sorbed to sediment transported with water out of reach during time step (mg active ingredient).
REACTPST	Loss of pesticide from water by reaction during time step (mg active ingredient).
VOLPST	Loss of pesticide from water by volatilization during time step (mg active ingredient).
SETTLPST	Transfer of pesticide from water to river bed sediment by settling during time step (mg active ingredient).
RESUSP_PST	Transfer of pesticide from river bed sediment to water by resuspension during time step (mg active ingredient).
DIFFUSEPST	Transfer of pesticide from water to river bed sediment by diffusion during time step (mg active ingredient).
REACBEDPST	Loss of pesticide from river bed sediment by reaction during time step (mg active ingredient).
BURYPST	Loss of pesticide from river bed sediment by burial during time step (mg active ingredient).
BED_PST	Pesticide in river bed sediment during time step (mg active ingredient).
BACTP_OUT	Number of persistent bacteria transported out of reach during time step.
BACTLP_OUT	Number of less persistent bacteria transported out of reach during time step.
CMETAL#1	Conservative metal #1 transported out of reach (kg).
CMETAL#2	Conservative metal #2 transported out of reach (kg).
CMETAL#3	Conservative metal #3 transported out of reach (kg).

