



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

**EROSIÓN HÍDRICA EN UNA MICROCUENCA DE MONTAÑA EN LA COSTA
DE CHIAPAS, MÉXICO.**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

PRESENTA:

EFRAÍN ALBERTO ZELEDÓN VÍLCHEZ



DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
ORIGINA DE EXAMENES PROFESIONALES



Octubre de 2012.

Chapingo, Estado de México.

**EROSIÓN HÍDRICA EN UNA MICROCUENCA DE MONTAÑA EN LA COSTA
DE CHIAPAS, MÉXICO.**

Tesis realizada por Efraín Alberto Zeledón Vélchez bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA**

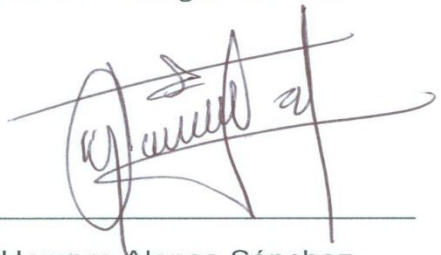
DIRECTOR: _____


Dra. Laura Alicia Ibáñez Castillo

ASESOR: _____


Dr. Ramón Arteaga Ramírez

ASESOR: _____


M.I. Homero Alonso Sánchez

EROSIÓN HÍDRICA EN UNA MICROCUENCA DE MONTAÑA EN LA COSTA DE CHIAPAS, MÉXICO.

El jurado que revisó y aprobó el examen de grado de Efraín Alberto Zeledón Vélchez, autor de la presente tesis de Maestría en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua estuvo constituido por:

DIRECTOR: _____


Dra. Laura Alicia Ibáñez Castillo

ASESOR: _____


Dr. Ramón Arteaga Ramírez

ASESOR: _____


M.I. Homero Alonso Sánchez

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma Chapingo por brindarme la oportunidad de mis estudios de maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo financiero brindado durante mis estudios de especialización.

Al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua por haberme dado la oportunidad de formar parte de sus generaciones.

A la Dra. Laura Alicia Ibáñez Castillo por todo el apoyo brindado durante mis estudios y en especial para la elaboración de esta tesis.

Al Dr. Ramón Arteaga Ramírez por la gestión asistida durante el ingreso al posgrado y conclusión del mismo.

Al M.I. Homero Alonso Sánchez por el tiempo proporcionado para la visita de campo y revisión de datos.

Al Dr. Eugenio Romantchik Kriuchkova por el apoyo brindado para la culminación de mis estudios de posgrado.

A mi familia, por el enorme apoyo y palabras de aliento brindadas durante esta etapa crucial de mi vida.

Muchas Gracias.

Dedicatorias

A Dios nuestro señor por haberme brindado la oportunidad de cumplir mis sueños.

A mis padres Efraín y Marlene por el enorme e incondicional apoyo brindado durante mis estudios universitarios y de maestría.

A mi esposa Gilma y mi hija Anamarie por el inmenso cariño y comprensión a través de la distancia, gracias por esperar.

Biografía del autor

El autor de esta investigación es originario de Nicaragua, del departamento de Jinotega, nacido el 08 de Enero del año 1984.

Realizó su formación universitaria en la Universidad Nacional Agraria en la ciudad capital del 2001 hasta el 2006. Laboro para el Proyecto de Actividades de Desarrollo (DAP-Agricultura) a partir del 2007 hasta inicios del 2008. Posteriormente formó parte del equipo del proyecto Manejo Integrado en Cuencas Hidrográficas en América Central, como parte de la Iniciativa Global del Agua. A partir del año 2010 ingreso al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua hasta la fecha de culminación de tesis de maestría.

RESUMEN

Las cuencas costeras del estado de Chiapas en México generan grandes cantidades de escurrimientos y sedimentos. La combinación de áreas con pendientes pronunciadas, grandes intensidades de lluvia y malas prácticas de manejo, generan vulnerabilidad a la erosión hídrica. Las cuencas montañosas significan un gran reto para la modelación; la mayoría del software para estimar erosión hídrica, caso SWAT, han sido desarrollados para zonas con pendientes media de cuenca menor al 25% por lo que, al momento de extrapolar estas metodologías se encuentran debilidades al estimar los factores longitud y pendiente de las ecuaciones manejadas para estimar la erosión. Este estudio fue desarrollado con el modelo WEPP (2010.1) y tiene como objetivo principal desarrollar una alternativa para estimar la erosión hídrica en una cuenca de montaña en el estado de Chiapas, generada por diez eventos de tormentas ocurridos durante el 2011. La información correspondiente a precipitaciones y escurrimientos fue extraída de estaciones de medición localizadas en la cuenca. Los datos de suelos fueron obtenidos por muestreos in situ y posterior análisis. Los datos de cobertura vegetal y prácticas de manejo fueron obtenidos también in situ. Se identificaron dos tipos de usos de suelo: Acahual y Café (*Coffea arabica*). Los archivos de perfiles de ladera se elaboraron con levantamiento topográfico disponible. WEPP se calibró para escurrimientos; no se calibró para sedimentos ya que no se dispuso de información disponible de calidad. En lo general se encontró que el modelo WEPP en su versión de simulación de evento único subestima los escurrimientos calculados con la ecuación de Green-Ampt. Se recomienda pasar a una etapa de calibración por sedimentos.

Palabras claves: Erosión hídrica en cuencas de montaña, modelación, WEPP.

ABSTRACT

The coastal watersheds in the state of Chiapas in Mexico produce large amounts of runoff and sediment yield. The combination of areas with steep slopes, poor management practices and rainfall intensities, generate vulnerability to water erosion. Hilly basins represent a major challenge for modeling, most programs to calculate water erosion, SWAT for instance, has been developed for areas with average slope less than 25%, when extrapolating these methodologies we found weaknesses in the length and degree of slope factor. This research was developed with WEPP (2010.1) model and the main objective is to operate the WEPP model as an alternative to calculate the water erosion in a small hilly catchment in the Chiapas State produced by ten storm water during 2011. The information about rainfall and runoff was obtained from rain gage located in the basin. Soil data were obtained by soil sampling and subsequent analysis. The management data were obtained in the basin. Two types of land use were identifying: Acahual and Coffee (*Coffea arabica*). The hillslope profiles were built with survey. WEPP was calibrated for runoff; sediment yield was not calibrated because quality information was not available. In general it was found that the WEPP model in single storm simulation underestimates runoff calculated by Green-Ampt equation. It is recommended to spend a calibration by sediment yield.

Keywords: Water erosion in hilly watersheds, modeling, WEPP.

CONTENIDO

Resumen	vii
Contenido	viii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	4
3. REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
3.1. El proceso de la erosión del suelo.....	5
3.2. Modelos de erosión del suelo.....	9
3.3. Modelación de los sistemas hidrológicos.....	11
3.4. Modelos empleados en el cálculo de la erosión hídrica.....	12
3.4.1. Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE).....	12
3.4.2. Producción de sedimentos.....	14
3.4.3. El modelo SWAT.....	17
3.5. El modelo WEPP.....	18
3.5.1. Proceso de erosión en y entre canalillos.....	22
3.5.2. Erosión entre canalillos.....	22
3.5.3. Erosión en canalillos.....	23
3.6. Ecuaciones principales del modelo.....	24
3.7. Componentes del modelo.....	28

3.7.1. Clima.....	28
3.7.2. Riego.....	30
3.7.3. Hidrología.....	31
3.7.4. Infiltración.....	31
3.7.5. Escurrimiento superficial.....	32
3.7.6. Balance hídrico.....	32
3.7.7. Componente de crecimiento de plantas.....	33
3.7.8. Componente de suelo.....	33
3.7.9. Descomposición de residuos.....	36
3.8. Experiencias de aplicación del modelo WEPP.....	36
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	38
4.1. Descripción del área de estudio.....	38
4.1.1. Ubicación.....	38
4.1.2. Características fisiográficas de la microcuenca.....	39
4.1.3. Suelo.....	40
4.1.4. Clima.....	40
4.2. Prácticas de cultivo y manejo.....	41
4.3. Materiales.....	42
4.4. Métodos.....	44
4.4.1. Elaboración de las bases de datos de entrada al modelo..	44

4.4.2. Topografía.....	44
4.4.3. Clima.....	47
4.4.4. Suelo.....	49
4.4.5. Manejo.....	51
4.5. Calibración del modelo WEPP.....	54
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	55
5.1. Resultados del muestreo en campo.....	55
5.2. Estructura de la microcuenca, laderas y cauces.....	55
5.3. Estimación de escurrimientos.....	57
5.4. Aspectos a mejorar en trabajos próximos.....	71
5.5. Prácticas de conservación de suelos.....	72
5.6. Sensibilidad del modelo WEPP.....	72
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	74
7. LITERATURA CITADA.....	77
ANEXOS.....	83

ÍNDICE DE CUADROS

1. Clasificación de los modelos de erosión del suelo.....	11
2. Datos climáticos de eventos simulados.....	49
3. Parámetros de entrada para manejo acahual.....	53
4. Parámetros de entrada para manejo café.....	53
5. Características físicas y químicas del suelo.....	55
6. Resultados de simulación.....	58
7. Escurrimientos y producción de sedimentos por laderas.....	65
8. Información climática de entrada al modelo, evento 02/08/2011.	66
9. Escurrimientos y producción de sedimentos por laderas.....	71

ÍNDICE DE FIGURAS

1. Proceso de erosión del suelo.....	16
2. Esquema de cuencas del modelo WEPP.....	21
3. Diagrama de flujo del modelo WEPP.....	35
4. Ubicación de la microcuenca Chanjalé.....	38
5. Cauce de la microcuenca.....	39
6. Salida de la microcuenca.....	40
7. Vegetación acahual.....	42
8. Estructura de la microcuenca en el modelo WEPP.....	44
9. Perfil de ladera No.1.....	45
10. Perfil de ladera No.2.....	45
11. Perfil de ladera No.3.....	46
12. Perfil de ladera No.4.....	46
13. Perfil de ladera No.5.....	47
14. Muestreo de suelos.....	50
15. Estructura de la microcuenca, laderas y cauces.....	56
16. Usos de suelo de perfiles de ladera.....	57
17. Perfil de ladera No.1. Manejo acahual + café.....	59
18. Perfil de ladera No.2. Manejo acahual.....	60
19. Perfil de ladera No.3 Manejo café + acahual.....	60

20. Erosión en perfil de ladera No. 3.....	61
21. Perfil de ladera No. 4. Manejo café + acahual.....	62
22. Erosión en perfil de ladera No.4.....	62
23. Perfil de ladera No.5. Manejo café + acahual.....	63
24. Erosión en perfil de ladera No.5.....	64
25. Escurrimientos superficiales por cada perfil de laderas.....	65
26. Escurrimientos superficiales, evento 02 de Agosto.....	66
27. Perfil de ladera No. 1.....	67
28. Perfil de ladera No.2.....	67
29. Perfil de ladera No.3.....	68
30. Erosión en ladera No.3.....	68
31. Perfil de ladera No.4.....	69
32. Erosión en perfil de ladera No.4.....	69
33. Perfil de ladera No.5.....	70
34. Erosión en perfil ladera No.5.....	70

ÍNDICE DE ANEXOS

1. Localización y delimitación de la Microcuenca Chanjalé.....	84
2. Curvas de nivel de la Microcuenca Chanjalé.....	85
3. Usos de suelo de la Microcuenca Chanjalé.....	86
4. Zonas de desprendimiento de la Microcuenca Chanjalé.....	87
5. Guía rápida del usuario WEPP.....	88

1. INTRODUCCIÓN

La erosión del suelo en la actualidad es un problema que ha generado impacto en todo el mundo. Los procesos de erosión hídrica representan una problemática en la conservación de los recursos naturales.

Los sedimentos son los mayores contaminantes de los cuerpos de agua, reducen la navegabilidad de los ríos y la capacidad de almacenamiento de presas, aumentando el riesgo de inundaciones y representan altos costos de mantenimiento, esto sumado al riesgo de transportar químicos peligrosos generados por la agricultura en laderas.

La identificación de los sitios así como las prácticas de manejo de cultivos que son susceptibles a los procesos de erosión puede resultar difícil. La erosión es un proceso dinámico en el que intervienen una serie de factores naturales y/o antropogénicos.

El proceso de degradación en México ha sido una de las más aceleradas en comparación con otros países de Latinoamérica. Esto favorecido por la diversidad climática y de relieve, en algunos casos extrema principalmente en las zonas costeras del suroeste del país.

La degradación del suelo por erosión hídrica en los sistemas de producción localizados en las cuencas costeras del estado de Chiapas es severa. Pérez *et al.* (2012) demostraron que para noviembre del 2005, las cuencas de los ríos Huixtla y Huehuetan se encontraban dentro del rango de erosión hídrica severa

(50 a 200 t ha⁻¹ año⁻¹) con 39.08 % y 20.36 % de su área total respectivamente, mientras que para la cuenca del río Coatan el mayor porcentaje corresponde al rango de muy severa (200 a 500 t ha⁻¹ año⁻¹) para el 29.87 % de su territorio. La combinación de un alto potencial erosivo de las lluvias, relieve accidentado, la susceptibilidad del suelo a la erosión y las prácticas de manejo inadecuadas en terrenos de cultivo, hacen esta región muy propensa a los daños ocasionados por el impacto de la lluvia.

Por su parte, los modelos de erosión hídrica representan un avance importante en la ciencia de la conservación. Representan una herramienta de gran utilidad para los tomadores de decisión ya que generalmente se encuentran disponibles sin costo alguno, por otro lado brindan panoramas útiles para entender los procesos de erosión así como su distribución en el tiempo y espacio.

Los modelos de erosión brindan facilidades para el análisis de las diversas prácticas de manejo de cultivos y usos de suelo. Tienen la facilidad de brindar información para identificar los puntos de mayor vulnerabilidad y de esta manera realizar estrategias más oportunas y precisas.

Por su parte, el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) ha sido ampliamente utilizado en México lo que ha generado una cantidad importante de información. Sin embargo las últimas investigaciones al respecto demostraron que presenta serias limitantes al aplicarse en cuencas de montaña, principalmente aquellas con una pendiente media mayor de 25%, tales como las cuencas costeras de Chiapas (Rivera et al. 2012).

Water Erosion Prediction Project (WEPP), es el resultado del esfuerzo conjunto de agencias federales en los Estados Unidos de América involucradas en el manejo del suelo y el agua así como en la evaluación de la planeación ambiental. El modelo representa la nueva generación de tecnologías de estimación de erosión. Se basa en la hidrología moderna y la ciencia de la erosión. Es una metodología basada en procesos, y conceptualmente una mejora significativa de la ya conocida Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE) (Flanagan *et al.* 2007).

El modelo WEPP posee una amplia base de datos generada como resultado de una extensiva recolección de información en zonas agrícolas, pastizales y áreas forestales de los E.E.U.U. Está destinado para la estimación de la erosión hídrica en pequeñas cuencas montañosas (Larose *et al.* 2004). Por lo tanto, tratando de encontrar un software alternativo para estimar pérdida de suelo en cuencas de montaña en este trabajo se aplica el software WEPP a una microcuenca de montaña en la Costa de Chiapas con pendiente media del 80%.

2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1. Objetivos

2.1.1. Objetivo general

Operar el modelo WEPP (2010.1) como una alternativa para determinar erosión hídrica en una microcuenca de montaña en la costa de Chiapas, México.

2.1.2. Objetivos específicos

- Determinar la erosión hídrica y producción de sedimentos generados por diez eventos de tormenta ocurridos durante el 2011 en la microcuenca Chanjalé, en la cuenca del río Coatan, Chiapas.
- Calibrar el modelo WEPP para la estimación de escurrimientos y producción de sedimentos.
- Determinar las áreas de desprendimiento, transporte y deposición de sedimentos por cada perfil de ladera.
- Identificar los parámetros claves del modelo para una acertada simulación.

2.2. Hipótesis

La interface de pequeñas cuencas del modelo WEPP operada bajo modo de simulación de eventos independientes, es capaz de estimar adecuadamente la erosión hídrica producida por diez eventos de tormenta en la microcuenca Chanjalé.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. El proceso de la erosión de suelo

La palabra erosión desde el punto de vista edáfico se define como el proceso físico que consiste en el desprendimiento, arrastre y deposición de las partículas individuales de la superficie del suelo por la acción de los principales agentes de interperismo, el agua, el viento y la acción biológica de los microorganismos del suelo (Oropeza, 2011).

Morris y Jan (2010) citados por Oropeza (2011), definen la erosión como el proceso mediante el cual el material superficial o la roca se pierde o es disuelto y retirado de cualquier parte de la superficie terrestre.

Por otra parte el término sedimento se refiere al material sólido que es separado o desprendido de la masa del suelo por agentes erosivos y transportados desde su lugar original por suspensión en agua, aire o por gravedad (Lal, 1990).

Desde que la tierra se cultivó por primera vez, la erosión del suelo por el agua y el viento ha sido un problema constante. Las consecuencias de la erosión del suelo se manifiestan tanto en el lugar donde se produce como fuera de él (erosión difusa). Los efectos *in situ* son particularmente importantes en las tierras de uso agrícola, donde la redistribución y pérdida del suelo, la degradación de su estructura y el arrastre de materia orgánica y nutrientes, llevan a la pérdida de espesor del perfil cultural y al descenso de la fertilidad.

La erosión reduce también la humedad disponible en el suelo acentuando las condiciones de aridez.

El efecto resultante es una pérdida de productividad que, en principio, limita las especies que pueden cultivarse y obliga a aumentar de los fertilizantes a aplicar para mantener los rendimientos de las cosechas y producción de alimentos y, finalmente, lleva a la devaluación y abandono de la tierra (Morgan, 1997).

Existen principalmente dos tipos de erosión: geológica y erosión acelerada. La primera es un proceso natural de interperismo que generalmente ocurre a bajas velocidades en todos los suelos como parte del proceso natural de formación del suelo. Esto ocurre a través de largos periodos geológicos y no está influenciado por las actividades humanas. El desgaste de las rocas y la formación de los perfiles del suelo son procesos afectados por la erosión geológica. De hecho, las bajas tasas de erosión son esenciales para la formación del suelo.

Por el contrario, la erosión se convierte en una preocupación importante cuando las tasas de erosión superan un cierto umbral y se vuelve rápida, conocida como erosión acelerada. Este tipo de erosión está provocada por causas antropogénicas como la deforestación, tala, quema; agricultura y labranza intensiva, pastoreo intensivo y descontrolado así como la quema de biomasa (Oropeza, 2011).

La erosión del suelo es un proceso con dos fases consistentes en el desprendimiento de partículas individuales de la masa del suelo y su transporte

por los agentes erosivos, como las corrientes de agua y el viento. Cuando la energía de estos agentes no es suficiente para transportar las partículas, se produce una tercera fase: su deposición.

La salpicadura es el agente más importante para el desprendimiento. Como resultado del golpeteo de las gotas de lluvia sobre la superficie de un suelo desnudo, las partículas del mismo pueden ser lanzadas por los aires a varios centímetros de distancia. La exposición continua a lluvias intensas debilita considerablemente el suelo (Morgan, 1997).

El análisis de la erosión en su contexto global, permite entender la importancia de las tasas de erosión en una escala de tiempo geológico y la determinación de tasas tolerables de erosión a largo plazo. El estudio de la erosión a un nivel medio, permite entender los controles impuestos por el clima y la vegetación a nivel regional en las tasas erosivas. También es conveniente evaluar la erosión a través de su distribución en el tiempo y el espacio (Figueroa *et al.* 1991).

La estimación de la erosión se remonta a 1940 a las estimaciones realizadas por Zingg, quien fue el que desarrollo la primera ecuación utilizada para evaluar los problemas de erosión y de igual manera seleccionar prácticas de manejo para reducir erosión excesiva. La ecuación de Zingg fue una simple expresión que relaciona la erosión del suelo con la inclinación y la longitud de la pendiente (Renard *et al.* 1997). Smith y Whitt (1948) citado por Renard *et al.* (1997) agregaron términos a la ecuación desarrollada por Zingg para expresar la influencia de la cobertura y manejo y su efecto en la erosión del suelo.

Tengberg *et al.* (1997) consideran que la erosión de los suelos es la principal amenaza para la sostenibilidad agrícola, y afecta las características del mismo ya sea in situ o su potencial productivo.

Sin embargo los suelos varían en su capacidad de recuperación y existen algunos datos en los que se puede apreciar el grado y tipo de impacto en el suelo causado por la erosión.

El juicio sobre la gravedad de la erosión en muchos casos es de manera subjetiva y depende principalmente de la forma de ver el problema. No obstante, es evidente que la erosión por el agua afecta perjudicialmente la productividad de los suelos, tanto en la fuente como en el destino de los sedimentos. Cuando es más grave, la erosión puede resultar en la pérdida total del suelo como recurso, así como de la vegetación valiosa asociada. Otros efectos negativos incluyen el deterioro de la capacidad y producción de peces en cuerpos de agua así como menor expectativa de vida de embalses y estructuras de almacenamiento de agua y pérdidas del recurso hídrico a través de las destructivas inundaciones y escorrentías incontroladas (Montgomery, 2007).

Larose *et al.* (2004) mencionan que la erosión hídrica del suelo es reconocida ampliamente como el principal obstáculo para alcanzar la sustentabilidad agrícola, debido a que reduce el potencial agrícola productivo de todo el planeta.

México ha sido reportado como uno de los países latinoamericanos con erosión más severa (Lal, 1979, citado por Becerra 1999), la cual ha sido favorecida por condiciones naturales como su contrastante distribución climática y accidentado relieve, pero sin duda acelerada por la inadecuada explotación de la tierra por la creciente población nacional, la cual se ha sextuplicado en el último siglo, con consecuencias como: deforestación excesiva de bosques y selvas, la práctica agrícola en terrenos con fuertes pendientes, y, sobre todo, la introducción de la ganadería de gran parte del país, desde áreas semidesérticas del norte hasta las cálido-húmedas del trópico, con sobre pastoreo en muchos casos (Becerra, 1999).

Uribe *et al.* (2002) mencionan que la erosión es el principal problema edáfico en gran parte de los terrenos agrícolas de México, donde las características de su clima tropical, la baja estabilidad de sus diferentes tipos de suelos y la marginación y pobreza de sus habitantes aceleran la pérdida de suelo.

3.2. Modelos de erosión del suelo

En general, los modelos son representaciones de sistemas o procesos. Algunos de las más antiguas formas de los modelos son en la actualidad pequeñas representaciones físicas de sistemas naturales. Los modelos matemáticos también son representaciones de sistemas pero utilizan una serie de ecuaciones matemáticas. El número, la forma, y las interconexiones de estas ecuaciones en un modelo puede variar desde muy simple hasta altamente sofisticado (U.S Environmental Protection Agency, 2012).

Los modelos de erosión del suelo juegan un papel importante para planificar medidas anti erosivas del suelo, para conservar el recurso agua y en las evaluaciones de las fuentes no puntuales, incluyen las evaluaciones e inventarios de la carga de sedimentos, planificar y diseñar obras de conservación para el control de los sedimentos, y para el avance de estudios científicos. Los monitoreos y mediciones de la erosión de suelo in-situ resultan demasiado caros y demandan de mucho tiempo.

Además, los eventos de erosión son intermitentes, y se necesitaría registro de datos por largos periodos de tiempo para poder medir la erosión de un sitio específico (Larose, 2003).

Por lo que, los modelos matemáticos de erosión son en muchos casos la única herramienta para evaluar la erosión. Los modelos matemáticos de erosión hídrica permiten obtener respuestas cuantitativas del fenómeno físico, sirven como herramienta para experimentar sin destruir, ayudan a interpolar, simular diversidad de escenarios y predecir el proceso erosivo, proporcionan además, una idea del comportamiento del fenómeno de erosión, proporcionan además, una idea del comportamiento del mecanismo erosivo cuando no se cuenta con información, ayudan a definir y entender metodologías, categorizan la influencia de las variables que participan en él, ayudan a sugerir prioridades en la investigación, sirven para entrenar e instruir y estimular la participación y comunicación del equipo de trabajo entre otras (Larose, 2003).

De manera global, los modelos de erosión se clasifican en: 1) modelos paramétricos; 2) modelos de solución analítica (físicos) y 3) modelos de solución numérica. En el cuadro 1 se muestra la clasificación de los modelos y la agrupación de los diferentes modelos existentes.

Cuadro 1. Clasificación de los modelos de erosión del suelo.

Modelos paramétricos	
Erosión laminar y en surcos:	USLE (Wischmeier y Smith, 1978); RUSLE (Renard et al. 1997)
Erosión en cárcavas	Servicio de conservación de suelos, USA, (Thompson, 1964)
Erosión en zonas inundadas:	MUSLE (Williams, 1975)
Modelos de solución analítica	
Erosión laminar y en surcos:	Ecuación de continuidad o de conservación de masa del sedimento (Meyer y Wischmeier, 1969); (Foster y Meyer, 1975)
	GUESS: Ecuaciones de Saint-Venant (Rose et al., 1983). Simplificando ecuaciones de Saint-Venant en la aproximación de la onda cinemática, presentando una forma de integración de dichas ecuaciones utilizando la formula de Chezy.
	WEPP (Nearing et al. 1989)
	EUROSEM (Morgan et al. 1992)
Modelos de solución numérica	
KINEROS (Woolhiser et al. 1990)	

Fuente. Larose (2003).

3.3. Modelación de los sistemas hidrológicos

El objetivo del análisis de un sistema hidrológico es el estudio de la operación del sistema y predecir su salida o respuesta. Un modelo de un sistema hidrológico es una aproximación al sistema real; sus entradas y salidas son variables hidrológicas medibles, su estructura es una serie de ecuaciones que relacionan excitaciones y respuestas; la porción fundamental de esta estructura

es la función de transferencia entre entradas y salidas. Los modelos hidrológicos se dividen en dos grupos: físicos y matemáticos. Los modelos físicos incluyen los modelos a escala o reducidos y los analógicos. Los modelos matemáticos pueden ser determinísticos, estocásticos y probabilísticos (Campos 2007).

Las evaluaciones del impacto de cambios climáticos en los recursos naturales de una nación así como en la productividad agrícola se hacen posibles a través del uso de modelos de cuencas. Los modelos aplicados a cuencas hidrográficas se han transformado en una herramienta esencial para la planeación, desarrollo y manejo de los recursos naturales (Singh y Woolhiser 2002)

3.4. Modelos empleados en el cálculo de la erosión hídrica

3.4.1. Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo

El Servicio de Investigación Agrícola de los Estados Unidos (ARS) estableció en 1954 el Centro Nacional para Colecta de Datos de Escurrimiento y Erosión en la Universidad de Purdue.

Como resultado de las actividades de este centro en 1965, Wischmeier y Smith desarrollaron la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), por sus siglas en inglés) la cual cuantifica la erosión a través del producto de seis factores (Figuerola *et al.* 1991).

La relación paramétrica de la ecuación básica de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) es:

$$A = R K L S C P \quad (1)$$

Donde A es el Promedio anual de pérdida de suelo ($t\ ha^{-1}$), R representa el factor de erosividad de la lluvia ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}$), K es el factor de erosionabilidad del suelo ($t\ ha\ h\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$); L es el factor del grado de longitud (adimensional), S representa el factor del grado de pendiente (adimensional), C es el factor del manejo del cultivo (adimensional), y P representa el factor de prácticas mecánicas (adimensional).

La EUPS permite a los planificadores predecir la velocidad media de erosión del suelo para cada combinación adecuada de sistema de cultivo y prácticas de manejo asociado a un tipo de suelo, patrón de precipitación y topografía específicas.

Es una ecuación empírica para determinar la pérdida media anual del suelo para un año determinado. Quizás por ser una simple ecuación de regresión, ha resultado ser un modelo práctico y accesible que ha sido utilizado a diferentes escalas en todo el mundo.

Figuerola et al. (1991) comentan que la EUPS se desarrolló como un método para predecir la pérdida de suelo anual promedio para erosión en y entre canalillos. Con los parámetros disponibles, se pueden diseñar alternativas de manejo y de cultivos para una región dada.

Por su parte, Gronsten y Lundekvam (2005) mencionan que los modelos empíricos, usualmente se derivan de grandes bases de datos a nivel regional, y a menudo tienen muy limitada la habilidad de transferencia hacia otras regiones

y aportan muy poco para mejorar nuestra comprensión sobre los procesos actuales del control de la erosión del suelo. Por otro lado, la USLE tiene muy reducida resolución temporal y espacial y no toma en cuenta el proceso de deposición sobre el área.

La cuantificación de la erosión es fundamental en la conservación de suelos debido a que permite comprobar la efectividad de cualquier tratamiento; además cuando esto último se combina con los costos, ayuda a identificar y seleccionar las alternativas más económicas en la reducción de la erosión. La clave para la modelación de la erosión es la capacidad para extrapolar mediciones de erosión en sitios de investigación a terrenos de cultivos y naturales, así como a pequeñas cuencas tanto rurales como urbanas (Oropeza 2011).

3.4.2. Producción de sedimentos

Es la cantidad de sedimento erosionado descargado por una corriente en cualquier punto dado. Representa la cantidad total de sedimento exportado por el afluente de la cuenca a un punto de medición (Morris y Jan, citado por Oropeza, 2011).

Figuerola *et al.* (1991) definen los sedimentos como partículas sólidas de suelo que se originan por los diferentes tipos de erosión que ocurre en los terrenos de ladera y en los sistemas de drenaje de la zona de aportación. El problema principal que este proceso ocasiona, es el desgaste del suelo por el desprendimiento de las partículas y su depositación en las zonas de cultivo y

obras hidráulicas, lo que origina que los terrenos de cultivo cambien su condición de fertilidad y los embalses disminuyan su capacidad de almacenamiento.

Los modelos para predecir la erosión del suelo están recibiendo una atención creciente en los proyectos de manejo de los recursos suelo y agua. Hasta hace muy poco, la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) se usó de manera generalizada como un modelo para la erosión a nivel de campo, pero recientemente se han desarrollado modelos de erosión más sustentados en el proceso, como el modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project). Esta nueva tecnología representa el “estado del arte” cuando se trata de modelar los efectos de los cambios en las características de los suelos asociadas con la erosión (Larose, *et al.* 2004).

Zhang et al. (1990) consideran que la modelación hidrológica exitosa requiere datos precios y representativos. La recopilación, almacenamiento y manipulación de los datos requeridos por los modelos pueden ser un impedimento en el desarrollo de nuevos modelos hidrológicos o la aplicación de modelos ya establecidos.

Este problema generalmente se debe a tres fuentes: la naturaleza espacial de los datos hidrológicos, gran volumen y organización de los mismos.

Meyer y Wischmeier (1969) consideraron que la erosión hídrica podría separarse en cuatro procesos, que son: 1) remoción por lluvia, 2) remoción por

escurrimiento, 3) transporte por lluvia, 4) transporte por escurrimiento como se muestra en la siguiente figura 1.

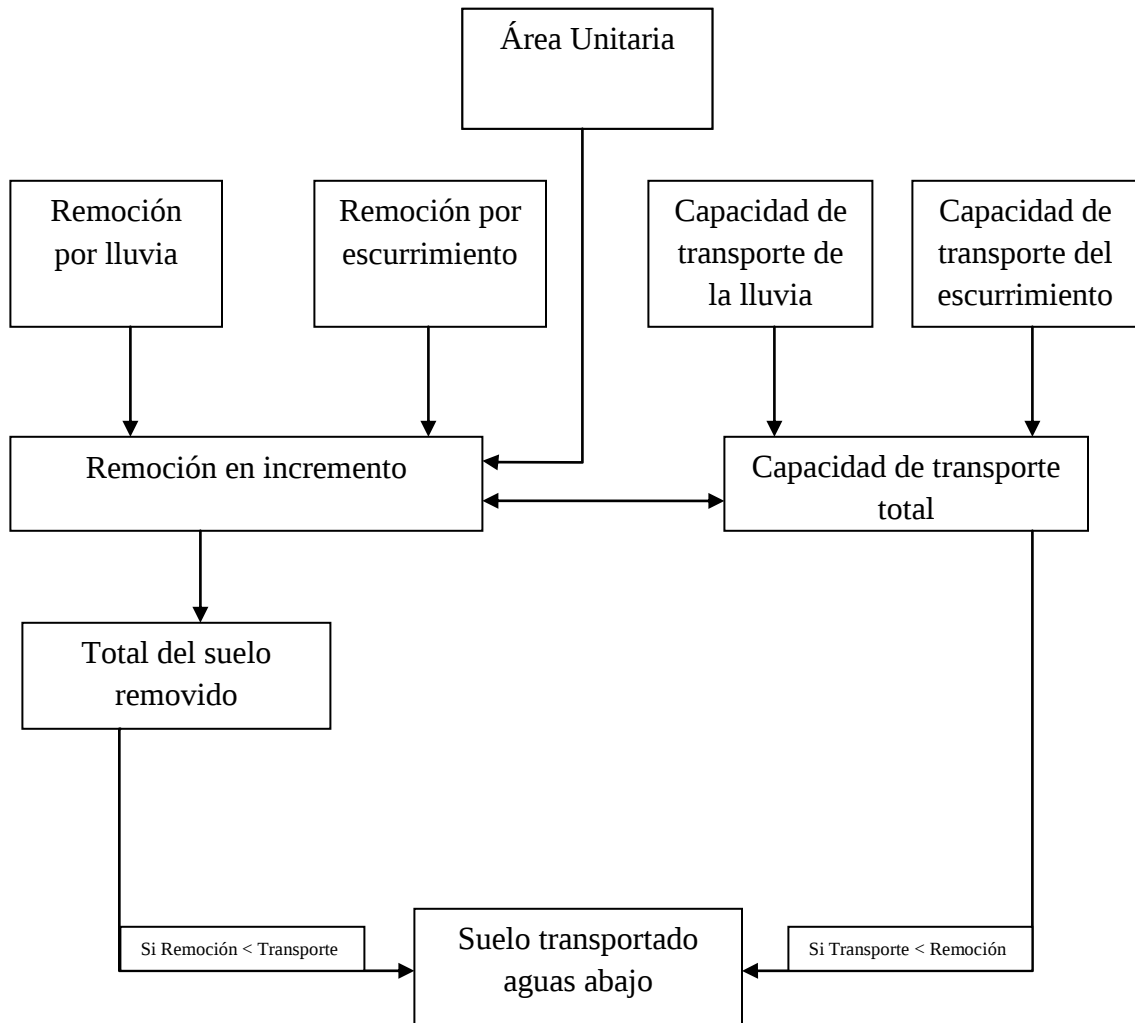


Figura 1. Proceso de erosión del suelo (Meyer y Wischmeier 1969).

Los monitoreos y mediciones de la erosión de suelo in-situ son caros y demandan de mucho tiempo. Además, los eventos de erosión son intermitentes, y se necesitaría registro de datos por largos periodos de tiempo para poder medir la erosión de un sitio específico. Por lo que, los modelos matemáticos de

erosión son en muchos de los casos la única herramienta para evaluar la erosión (Larose, 2003).

La pérdida media de suelo por hectárea debida a la erosión se estima en unas 2.7 toneladas por año, la cual supera dramáticamente la tasa media de formación de suelo (aproximadamente 0.2 toneladas por hectárea por año). Además, el problema de erosión en México va en aumento, así como el riesgo de desertificación de sus áreas más vulnerables (suelos de montaña) (Oropeza, 2010).

3.4.3. El modelo SWAT

El Soil and Water Assessment Tool (SWAT) es un programa de modelación hidrológica desarrollado por el Dr. Jeff Arnold de la Universidad de Texas para el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos Americanos (USDA-ARS). Este modelo permite simular la producción de agua y sedimentos en cuencas hidrográficas, así como el efecto que ejercen las prácticas agronómicas por el uso de pesticidas y fertilizantes sobre la calidad del agua (Guzmán y Matamoros, 2004).

El SWAT fue aplicado en cuencas costeras del estado de Chiapas, México por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) para estimar la erosión hídrica y producción de sedimentos causada por el huracán Stan en 2005, y obtuvieron valores de erosión bajos, en comparación con la erosión estimada mediante la técnica álgebra de mapas (Rivera, 2010).

Por su parte, Rivera et al. (2010) aplicaron el modelo SWAT en la Cuenca Ixtapan del Oro, en el estado de México y realizó una comparación de la erosión hídrica estimada con dicho modelo y la EUPS mediante la técnica de álgebra de mapas.

Como resultado de dicha investigación, se determinó que el modelo SWAT presenta serias limitaciones al estimar el factor topográfico (LS), y en particular el subfactor longitud de pendiente (L_h). SWAT estima de forma errónea la longitud de pendiente cuando esta es mayor del 25%, y les asigna por defecto un valor de 0.05, lo que implica una subestimación del factor topográfico y por consiguiente una subestimación de los valores de erosión hídrica.

3.5. El modelo WEPP

El modelo Water Erosion Prediction Project (WEPP), fue iniciado en Agosto de 1985 para desarrollar una nueva generación de tecnología de predicción de la erosión para el uso por agencias federales de los E.E.U.U involucradas en la conservación del suelo y el agua así como en la planeación y evaluación ambiental. Se desarrollo por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en conjunto con el Servicio de Investigación Agrícola (USDA-ARS por sus siglas en inglés) para reemplazar a las tecnologías empíricas de estimación de la erosión, el modelo WEPP simula muchos de los procesos físicos importantes que se llevan a cabo en la erosión, incluyendo la infiltración, escurrimiento, impacto por la lluvia, desprendimiento por flujo superficial,

transporte de sedimentos; deposición, crecimiento de plantas y descomposición de residuos (Flanagan, et al. 2007).

Foster and Lane (1987) mencionan que el objetivo del modelo es transformar el conocimiento fundamental y disponible sobre la ciencia de la erosión a una forma que el usuario pueda convenientemente aplicar como una alternativa a la ecuación USLE.

Nearing *et al.* (1989) comentan que el modelo tiene la capacidad para estimar la distribución espacial de las pérdidas netas del suelo y está diseñado para acomodar la variabilidad espacial en la topografía, rugosidad superficial, propiedades del suelo, hidrología y el uso de suelo en laderas.

La ventaja que presenta el modelo WEPP sobre los modelos empíricos como USLE y RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation por sus siglas en inglés) es que proporcionan diversas utilidades en la estimación de la erosión, incluyendo las más notables: a) tiene la capacidad de estimar la distribución espacial y temporal de las pérdidas netas del suelo; y b) al ser un modelo basado en procesos, puede ser extrapolado a un amplio rango de condiciones en las cuales no resultaría ni práctico ni económicamente viable realizar pruebas de campo (Lane *et al.* 1992).

La ventaja del WEPP sobre los modelos empíricos como RUSLE, es que proporciona varias ventajas principalmente en términos de aumento de su funcionalidad, ya que mejora la precisión en la estimación de las pérdidas

promedio de suelo bajo condiciones homogéneas, de cultivo y manejo agrícola (Nearing et al. 1995).

Por su parte Domínguez y Ventura (2001) comentan que el modelo WEPP se basa en los fundamentos de hidrología así como la ciencia de la erosión, y tiene el objetivo de mejorar el modelo empírico USLE para la evaluación de suelo y producción de sedimentos y resulta una alternativa de evaluación de prácticas de conservación.

Sin embargo WEPP no ha sido extensamente evaluado debido a su complejidad así como la necesidad de una base de datos de entrada demasiado amplia.

La aplicabilidad del modelo WEPP se ve limitada debido a la escasez en gran medida de los numerosos datos de entrada requeridos por este incluyendo datos de lluvia, precisión y actualización de datos de cobertura de suelo, prácticas de manejo, propiedades del suelo así como su variabilidad espacial, hidráulica de los canales (corrientes, manantiales, arroyos) y sus características entre otros datos necesarios.

Por su parte Ella (2002) comenta que existen casos de especies vegetales nativas de igual manera que prácticas de labranza a nivel local que no se encuentran soportados por las versiones del modelo. De igual manera, la validación del modelo se encuentra seriamente limitada por la disponibilidad y precisión de datos de mediciones de erosión y producción de sedimentos. Sin embargo, la ejecución de pruebas indica un gran potencial de la aplicabilidad

Aunque inicialmente el modelo se desarrollo para su aplicación en U.S, la meta de sus creadores es aplicarlo en todo el mundo (Flanagan y Nearing, 1995).



21

3.5.1. Proceso de erosión en y entre canalillos

Por su parte Larose (2003) refiere que en general, el escurrimiento superficial sobre una superficie erosionable se concentra en pequeños canales, llamados canalillos. La erosión en canalillos es la que ocurre en el fondo del surco y la erosión entre canalillos es la que ocurre entre éstos o sea en los taludes de los mismos. Este concepto es útil en términos matemáticos de la erosión, y sirve de base para varios modelos de simulación de la erosión basados en procesos físicos.

La mayoría de suelo erosionado de las partes altas proviene de pequeños canales llamados canalillos así como áreas entre canalillos.

La erosión en canalillos de manera inicial, resulta del desprendimiento producto de los escurrimientos sobre un área limitada de la superficie del suelo. La erosión entre canalillos se genera inicialmente por el impacto de la gota de lluvia y su efecto sobre la superficie del suelo expuesto (Meyer *et al.* 1974).

3.5.2. Erosión entre canalillos

Las áreas entre canalillos son principalmente afectados por el impacto de la gota de lluvia y el flujo superficial (Flanagan y Nearing, 1995).

Este tipo de erosión es conceptualizada como el proceso de entrega de sedimentos hacia canales de flujo concentrado.

Por su parte Bradford y Chi-hua (1995), consideran que la erosión hídrica ocurre debido a complejas interacciones de subprocesos de desprendimiento y

transporte de los materiales del suelo por el impacto de la gota de lluvia y el flujo superficial así como deposición. Los subprocesos dominantes varían de acuerdo si el área de origen es en canalillos o entre canalillos.

La erosión entre canalillos ocurre en un área donde todo el desprendimiento es debido a las fuerzas de impacto de la gota de lluvia y se transportan principalmente por el flujo superficial.

Los parámetros de suelo más importantes que influyen en el desprendimiento de suelo entre canalillos y su transporte son la fuerza del suelo, la cual se manifiesta por su textura (tamaño de distribución y contenido de arcilla), matriz inicial y las características de los poros (Dap, contenido de agua, estabilidad de los agregados) y subsecuentemente cambios en la fuerza del suelo provocada por un aumento en la precipitación (Flanagan y Nearing, 1995).

3.5.3. Erosión en canalillos

Flanagan y Nearing (1995) definen los canalillos como pequeños canales en los cuales se concentra el flujo superficial en las laderas. Los canalillos son la principal ruta para la escorrentía y movimiento de los sedimentos ladera abajo, el desprendimiento del suelo en canalillos es principalmente una función del esfuerzo cortante del flujo en exceso.

Oropeza (2011) define los canalillos como pequeños e intermitentes cursos de agua que no representan obstáculos o impedimentos a las operaciones de labranza utilizando equipos convencionales. Estos pueden formarse de forma natural en respuesta a las características en pequeña escala de la topografía y

la vegetación, así como podrían resultar de las condiciones de manejo y prácticas de cultivo.

Por su parte Lal (1990) comenta que los canalillos se forman como resultado de variaciones en la topografía que conducen el flujo laminar en canales pequeños y estrechamente espaciados.

3.6. Ecuaciones principales del modelo

3.6.1. Ecuación de continuidad de sedimentos

El modelo WEPP utiliza una ecuación de continuidad de sedimentos uniforme para describir el movimiento de sedimentos en canalillos:

$$\frac{dG}{dx} = D_r + D_i \quad (2)$$

Donde x representa la distancia en dirección de la pendiente (m), G es carga de sedimentos por unidad de ancho ($\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-1}$), D_r es la tasa de erosión en canalillos ($\text{kg. s}^{-1}.\text{m}^{-2}$); D_i es la tasa de erosión entre canalillos ($\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$).

La erosión en canalillos D_r , se considera positivo para el desprendimiento y negativo para la deposición.

Para propósitos de cálculo, D_r y D_i se calculan por unidad de área de canalillos, por lo tanto G se resuelve por unidad de ancho de canalillos. Después de realizar todos los cálculos, la erosión se expresa en términos de pérdidas de suelo por unidad de área.

Para fines de cálculo, la erosión entre canalillos se conceptualiza como un proceso de entrega de sedimentos a canales de flujo concentrado, o canalillos, por el cual los sedimentos entre éstos son posteriormente llevados fuera de la ladera por el flujo en canalillos o depositados en los mismos (Foster y Lane, 1987).

Por otro lado, la entrega de sedimentos proveniente de áreas entre canalillos es considerado que es proporcional al producto de la intensidad de la lluvia y la tasa del escurrimiento entre canalillos, con la constante de proporcionalidad siendo el parámetro de erodabilidad entre canalillos K_i .

El desprendimiento neto del suelo en canalillos se calcula cuando el esfuerzo hidráulico cortante excede el esfuerzo cortante crítico del suelo y cuando la carga de sedimentos es menor que la capacidad de transporte. Para el desprendimiento en canalillos se calcula con la ecuación siguiente:

$$D_r = D_c \left(1 - \frac{G}{T_c}\right) \quad (3)$$

Donde D_c es capacidad de desprendimiento por el flujo en canalillos

($\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$), T_c es la capacidad de transporte de sedimentos en canalillos ($\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-1}$).

Cuando el esfuerzo hidráulico cortante del flujo en canalillos sobrepasa el esfuerzo cortante crítico del suelo, la capacidad de desprendimiento, D_c , se expresa:

$$D_c = K_r(\tau_f - \tau_c) \quad (4)$$

Donde K_r es el parámetro de erodabilidad en canalillos ($s.m^{-1}$) y es una medida de la susceptibilidad al desprendimiento a causa del flujo concentrado, τ_f es el esfuerzo cortante del flujo que actúa sobre la partícula de suelo (Pa); τ_c es el parámetro límite del desprendimiento en canalillos, o esfuerzo cortante crítico del suelo (Pa), este término es muy importante en la ecuación del desprendimiento en canalillos, y representa el esfuerzo cortante bajo el cual el desprendimiento del suelo no ocurre.

Por otro lado, la deposición neta en canalillos se calcula cuando la carga de sedimentos, G , es mayor que la capacidad de transporte de sedimentos, T_c y se describe con la siguiente ecuación:

$$D_r = \frac{\beta V_f}{q} (T_c - G) \quad (5)$$

Donde V_f es la velocidad efectiva de caída de los sedimentos ($m.s^{-1}$), q es el flujo descargado por unidad de área ($m^2.s^{-1}$), y β es el coeficiente de turbulencia inducido por la gota de lluvia y a este se le asigna un valor de 0.5.

La capacidad de transporte, así como la carga de sedimentos, se calcula por unidad de ancho del canalillo. La capacidad de transporte como una función del esfuerzo cortante del flujo se calcula utilizando una ecuación de transporte simplificada de la siguiente manera:

$$T_c = k_t \tau_f^{1.5} \quad (6)$$

Donde τ_f es el esfuerzo hidráulico cortante que actúa sobre el suelo (Pa), y k_t es el coeficiente de transporte ($m^{0.5}.s^2.kg^{0.5}$).

La capacidad de transporte al final de cada perfil de laderas se calcula utilizando una modificación de la ecuación de Yalin, citado por Flanagan y Nearing (1995).

El esfuerzo cortante que actúa sobre el suelo al final de cada perfil de ladera se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$\tau_{fe} = \gamma R \sin(\alpha) \left(\frac{f_s}{f_t} \right) \quad (7)$$

Donde τ_{fe} es el esfuerzo cortante que actúa sobre el suelo (Pa), γ es el peso específico del agua ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-2}$), α representa el promedio del ángulo de pendiente, f_s es el factor de fricción del suelo; y f_t es el factor de fricción total en canalillos.

El modelo WEPP es capaz de: 1) identificar zonas de deposición de sedimentos y desprendimiento dentro de corrientes permanentes o cárcavas efímeras, 2) tomar en cuenta los efectos del agua estancada en el desprendimiento de los sedimentos, transporte, y deposición dentro de las corrientes; 3) representar espacial y temporalmente la variabilidad de los procesos de erosión y deposición como resultado de prácticas de manejo; y 4) mejorar las estimaciones de producción de sedimentos a través de una modelación precisa de los efectos de sedimentación en embalses.

3.7. Componentes del modelo

3.7.1. Clima

El modelo WEPP está diseñado para aceptar dos tipos de entrada de clima: CLIGEN (Climate Generator) desarrollado por Nicks y colaboradores (1995) y el generador BPCDG (Breakpoint Climate Data Generator) (Gete y Flanagan, 1999).

Cuando se corre WEPP con el generador climático (CLIGEN), este permite una variedad de opciones para el ingreso de datos climáticos las cuales varían desde permitir el ingreso de estaciones de medición que están dentro de una base de datos del Agricultural Research Service (ARS) hasta permitir el ingreso de datos climáticos de un periodo de quince minutos.

El CLIGEN es un generador climático utilizado para generar datos meteorológicos diarios basados en datos estadísticos medios mensuales observados para el período en consideración, incluyendo medias, desviación estándar, y coeficientes de sesgo de la precipitación. CLIGEN genera salidas de diez parámetros meteorológicos diarios, tales como temperatura máxima y mínima, temperatura a punto de rocío, duración y cantidad de precipitación, la relación de tiempo con la intensidad al pico (tiempo del inicio de la tormenta al punto medio del intervalo pico en 15 minutos) respecto a la duración de la precipitación, radiación solar, dirección y velocidad del viento (O'Neal, 2002).

Por otro lado, el BPCDG es un programa simple creado con el propósito de resolver el problema de que CLIGEN requiere de una serie de datos

estadísticos mensuales, los cuales no están disponibles fuera de los Estados Unidos de Norteamérica. BPCDG es un programa independiente, el cual ayuda a crear el archivo de clima para el modelo WEPP con datos diarios de lluvia y de otros parámetros de clima provenientes de cualquier estación meteorológica. Este programa fue diseñado para utilizar valores actuales medidos de precipitación, en lugar de datos de tormentas generados utilizando diferentes funciones probabilísticas. Este programa tiene ciertas ventajas: 1) utiliza datos diarios observados de lluvia y otros parámetros meteorológicos de temperatura (máxima y mínima), dirección y velocidad del viento; 2) es fácil de usar y los archivos de entrada pueden ser creados desde cualquier editor de texto; 3) no requiere de varios procedimientos estadísticos; 4) la información para crear dichos archivos de entrada puede ser encontrada en cualquier estación meteorológica, y sobre todo no hay necesidad de información especial tal como datos de precipitación en 15 minutos registrados en las estaciones de Estados Unidos (Gete y Flanagan, 1999).

El programa WEPP también puede ser utilizado en modo de eventos individuales. Para este tipo de simulación, el usuario debe ingresar todos los parámetros requeridos para correr los componentes hidrológicos y de erosión del modelo para un día u evento de simulación. Las simulaciones de eventos individuales o independientes pueden ser bastante útiles cuando el propósito de la simulación es entender una parte de los procesos hidrológicos y de erosión, y ha sido utilizado ampliamente en la validación de diversas partes del modelo WEPP. Sin embargo, las simulaciones de eventos individuales tienen limitantes

cuando se trata de estimar desprendimientos del suelo a largo plazo (Flanagan and Livingston, 1995).

Bajo la función de tormentas individuales, las entradas proporcionadas por el usuario tienen una mayor influencia sobre los resultados. Con esta opción, se requiere más conocimiento por parte del usuario al momento de interpretar y utilizar los resultados en la planeación, evaluación y diseño con propósitos de conservación. El modo de tormentas individuales ayuda a entender y evaluar los factores que influyen en la erosión que ocurre en cada ladera (Lane *et al.* 1992).

Lane *et al.* (1992) comentan que los cálculos del modelo WEPP tienen dos tipos de salidas, una para los efectos de la erosión en el sitio, y la segunda fuera del sitio.

Los resultados dentro del sitio muestran las pérdidas de suelo por cada perfil de ladera que conforma la cuenca así como su efecto en la reducción de la productividad de la misma. La sección fuera del sitio, por otro lado, refleja la carga de sedimentos salientes de cada perfil. Dicha carga de sedimentos representan un problema potencial en términos de entrega hacia las corrientes o ríos circundantes, así como la entrega de contaminantes de origen agrícola.

3.7.2. Riego

El componente de riego permite la simulación del riego por aspersión y en surcos. El riego por aspersión es simulado como un evento de precipitación con intensidad uniforme, y considera el mismo proceso para calcular la infiltración,

escurrimiento y pérdidas de suelo. Supone que el agua se aplica por medio de boquillas desde arriba a una tasa uniforme a través de un solo elemento de flujo superficial (OFE), y considera tres tipos de operación: estacionario, nivel de agotamiento, y una combinación de ambos. En el nivel de agotamiento el modelo verifica continuamente el nivel de humedad del suelo, y si éste es demasiado seco, inicia el riego (Flanagan and Nearing, 1995).

3.7.3. Hidrología

El componente de hidrología calcula la infiltración, escorrentía, evaporación del suelo; transpiración por las plantas, percolación del agua en el suelo; intercepción vegetal, almacenamiento en depresiones, y el perfil del suelo drenado.

Los cuatro parámetros principales requeridos por el componente hidrológico para estimar la erosión son: duración de lluvia en exceso, intensidad de precipitación efectiva, lámina de escurrimiento, y tasa de escurrimiento pico (Flanagan and Nearing, 1995).

3.7.4. Infiltración

Para el cálculo de la infiltración, WEPP utiliza la ecuación de infiltración de Green y Ampt y Mein-Larson (1973) modificada por Chu (1978) citados por Chow et al. (1994). La infiltración se divide en dos estados: 1) un estado donde la superficie del suelo es inundada, 2) un estado sin inundación. El almacenamiento en depresiones se estima como una función aleatoria de la rugosidad y el grado de pendiente.

La forma de la ecuación de Green y Ampt para la infiltración acumulada, la cual calcula el parámetro de conductividad hidráulica efectiva es:

$$K_s t = F - N_s \ln \left(1 + \frac{F}{N_s} \right) \quad (8)$$

Donde K_s es la conductividad hidráulica del suelo (mm.h^{-1}), t es el tiempo (h); N_s es el potencial matricial efectivo (mm), y F es la infiltración acumulada (mm).

3.7.5. Escurrimiento superficial

Los escurrimientos se calculan utilizando la ecuación de la onda cinemática o una aproximación de la solución del modelo de onda cinemática obtenida para un amplio rango de intensidades de precipitación, rugosidad hidráulica, e infiltración.

La tasa de escurrimiento pico es muy importante dentro del modelo, la cual se considera en el cálculo de la profundidad de flujo y este a su vez para el esfuerzo cortante (Larose, 2003).

3.7.6. Balance hídrico

El componente de balance hídrico y percolación en laderas está basado en el componente de balance hídrico del modelo SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) (Williams and Nicks, citado por Larose, 2003), con ciertas modificaciones para mejorar los cálculos de la percolación. Este componente mantiene un balance de la humedad del suelo dentro de la zona de raíces de manera continua en una base diaria.

El componente de balance hídrico utiliza la información generada por el componente climático (precipitación diaria, temperatura, y radiación solar) así como el componente de infiltración y el componente de crecimiento de plantas para calcular la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas.

3.7.7. Componente de crecimiento de plantas

Simula el crecimiento de plantas en condiciones de áreas agrícolas y pastizales. El propósito de este componente es simular cambios temporales en las variables de cultivos y las influencias que ejercen sobre los escurrimientos y el proceso de erosión. El componente de crecimiento de plantas se basa en el modelo EPIC (Flanagan y Nearing, 1995) y estima la acumulación de biomasa como una función de unidades de calor y la actividad de radiación fotosintética. El potencial de crecimiento se ve reducido por el estrés hídrico y de temperatura.

3.7.8. Componente de suelo

Este componente es el responsable de la estimación de los parámetros de infiltración y de erosionabilidad del suelo (Flanagan et al. 2001 citado por Larose 2003). Los parámetros estimados dentro de este componente son: 1) rugosidad aleatoria, 2) rugosidad orientada, 3) densidad aparente; 4) frente húmedo de succión; 5) conductividad hidráulica; 6) erodabilidad entre canalillos; 7) erodabilidad en canalillos, y 8) esfuerzo cortante crítico.

Cuando se utiliza el modelo para simulación en la interface de cuencas pequeñas, el modelo WEPP puede ser sub-dividido en tres componentes

principales: laderas, canales o corrientes y embalses. El componente de canales o corrientes puede ser adicionalmente dividido en componentes hidrológico y de erosión. El componente de hidrología de canales calcula la infiltración, evapotranspiración, percolación del agua en el suelo, intercepción vegetal, y almacenamiento en depresiones de la misma manera que lo realiza el componente de hidrología de laderas. El componente de embalses determina los hidrogramas de salida y concentración de sedimentos de diferentes tipos de estructuras tanto para almacenamientos grandes (por ejemplo estanques en granjas) o pequeños (terrazas, filtros, y vertederos de emergencia).

Componentes del modelo.

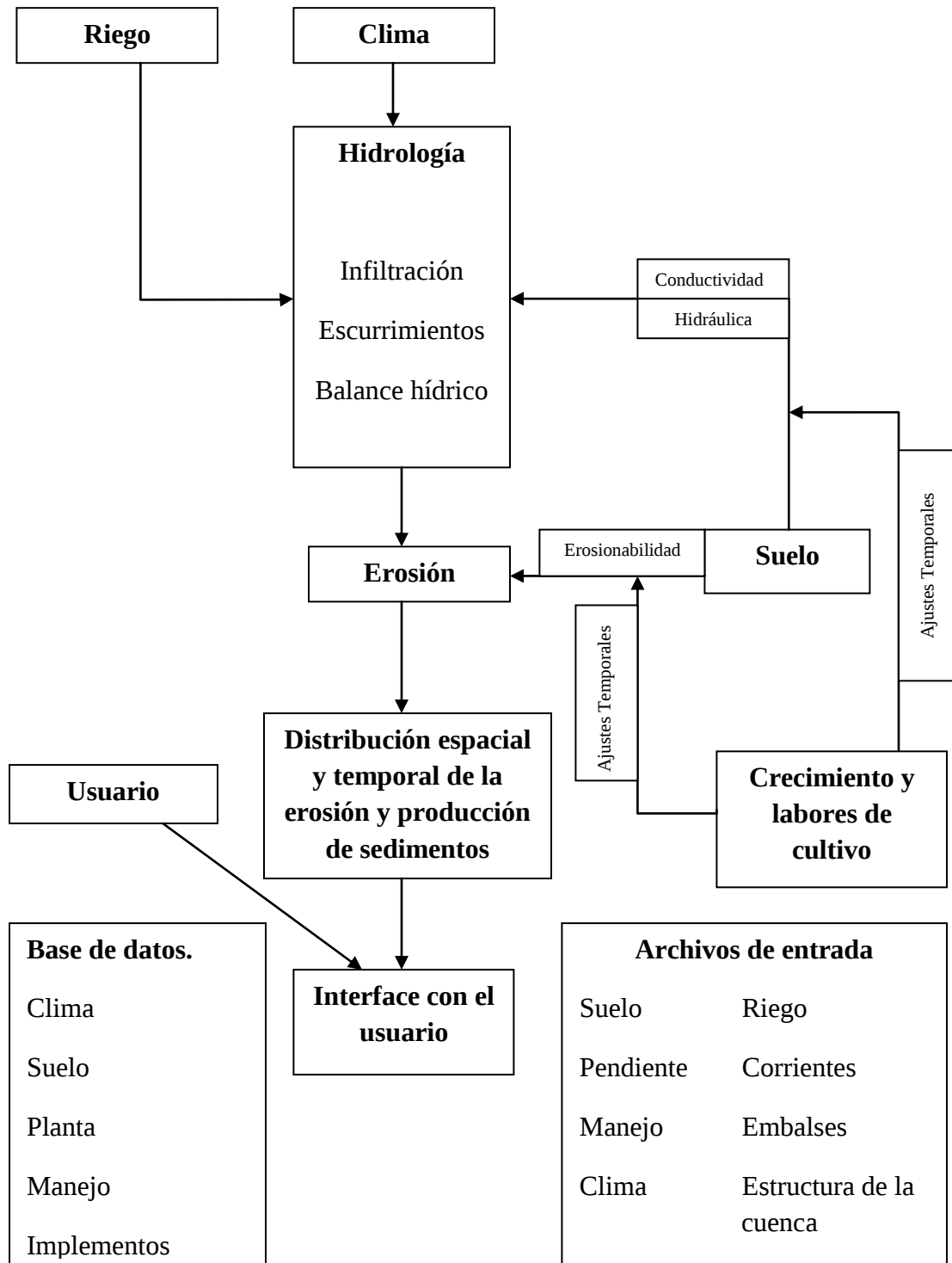


Figura 3. Diagrama de flujo del modelo WEPP (Flanagan et al. 1995).

La estructura del modelo WEPP (Figura 3) está conformada por los componentes de entrada: suelo, pendientes (laderas); manejo de cultivo y clima y produce como salida resultados de erosión así como su distribución en el tiempo y espacio.

3.7.9. Descomposición de residuos

En terrenos agrícolas, se basa en la aproximación de descomposición de residuos de cosecha en pie, y es similar a los grados días de desarrollo utilizados en muchos modelos de crecimiento. Cada tipo de residuo tiene una tasa óptima de descomposición. Los factores ambientales como temperatura y humedad actúa para reducir tasa de descomposición. El modelo WEPP toma en consideración la cantidad y el tipo de residuos de los tres días previos a la cosecha. Además permite muchos tipos de manejo de los residuos, incluyendo residuos removidos, triturados, quemados así como la aplicación de herbicidas (Flanagan y Livingston, 1995).

3.8. Experiencias de aplicación del modelo WEPP

En la Republica Mexicana la aplicación del modelo WEPP ha sido reducida. Hasta el momento únicamente se han encontrado dos experiencias, ambas desarrolladas en laderas. Aun no se han desarrollado trabajos a nivel de cuencas.

La primera experiencia de aplicación del modelo WEPP fue realizada por Tapia en el 1999, quien estableció parcelas de escurrimiento (25 m x 4 m) para registrar los datos de escurrimiento y producción de sedimentos en la Cuenca

del Lago de Patzcuaro y evaluar la eficiencia de diferentes prácticas mecánicas de conservación de suelos.

La segunda investigación con respecto a la aplicación del modelo WEPP fue desarrollada por Larose et al. (2003) para estimar la erosión de suelos de laderas en zonas de montaña de los Tuxtlas, Veracruz. Dicha investigación se desarrollo de igual manera en lotes de escurrimiento para determinar la eficiencia de prácticas mecánicas de conservación las definidas como terraza de muro vivo con tracción animal y otra con labranza tradicional.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Descripción del área de estudio

4.1.1. Ubicación

La microcuenca Chanjalé se ubica al noroeste de la Cuenca Coatan en el estado de Chiapas, se encuentra entre las coordenadas $15^{\circ}10'23''$ y $15^{\circ}10'19''$ de latitud norte y $92^{\circ}11'24''$ y $92^{\circ}11'20''$ de longitud oeste; está ubicada dentro de la Región Hidrológica No. 23 Costa de Chiapas (SRH, 1971).

La microcuenca posee un área de 1.03 ha. (Figura 4) y posee un drenaje exorreico.

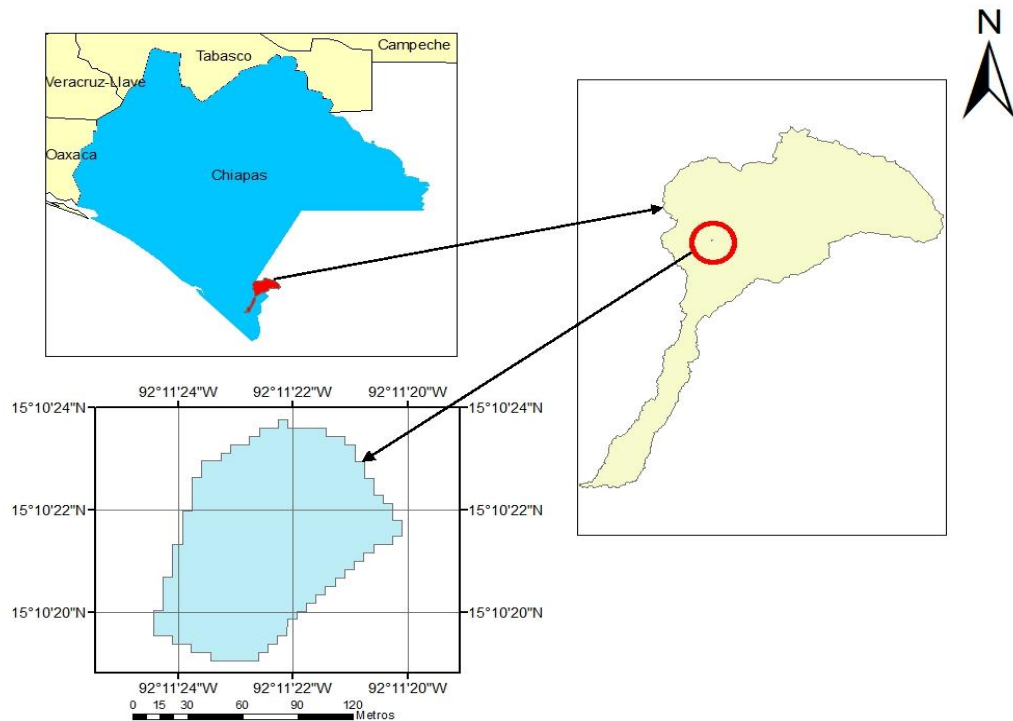


Figura 4. Ubicación de la microcuenca Chanjalé.

4.1.2. Características fisiográficas de la microcuenca

La microcuenca Chanjalé se extiende desde los 1551 msnm en la parte más alta hasta los 1455 msnm en la parte más baja. Posee una pendiente media del 80%. En ella se ubica una corriente permanente con una longitud de 136 m que se origina aproximadamente a los 1518 msnm y finaliza hasta los 1455 msnm y registra una pendiente media de 45.8 %.

El cauce (Figura 5) tiene un ancho promedio aproximado de 1 m el cual se mantiene constante desde el inicio hasta la salida al aforador (Figura 6).



Figura 5. Cauce de la microcuenca Chanjalé.



Figura 6. Salida de la microcuenca, aforador tipo H.

4.1.3. Suelo

El suelo que se encuentra en la microcuenca Chanjalé es Acrisol de acuerdo a la clasificación FAO/UNESCO (INEGI, 2000).

CONAGUA (2010) describe el suelo de la microcuenca como Migajón.

4.1.4. Clima

La microcuenca Chanjalé presenta un clima C (m) (w) definido como un clima templado húmedo con lluvias en verano. En los meses de mayo a octubre, la temperatura mínima promedio varía de los 9°C a los 22.5°C, mientras que la máxima promedio oscila entre 18°C y 34.5°C. Por otro lado durante el periodo de noviembre hasta el mes de abril, la temperatura mínima promedio varía de

9°C a 19.5°C, y la máxima promedio fluctúa entre 18°C y por encima de los 34.5°C.

Con respecto a las precipitaciones, en los meses de mayo a octubre, las medias varían desde los 1200 mm hasta los 3000 mm, y descienden posteriormente en el periodo de noviembre hasta abril con variaciones de 75 mm hasta los 800 mm (<http://www.ceieg.chiapas.gob.mx>). En la microcuenca Chanjalé, para los años 2010-2011 se presentó una precipitación anual promedio de 2,313.1 mm.

4.2. Prácticas de cultivo y manejo

Dentro del área de estudio se encuentra presente un único cultivo café (*Coffea arabica*) variedad árabe en su mayoría y algunas plantas de la variedad bourbon. El cultivo cuenta con árboles de sombra de guaba (*Inga edulis*) de manera muy dispersa. Es importante mencionar que el productor propietario del área no realiza mayores labores de cultivo, lleva a cabo control de sombra en el mes de abril y manejo de malezas en el mes de junio. La labor de mayor relevancia es la cosecha del café. Debido a lo anterior, se encuentra una masa significativa de mulch o mantillo.

Acahual (Figura 7) es una vegetación forestal que surge de manera espontánea en terrenos que estuvieron bajo un uso agrícola o pecuario en zonas tropicales y que cuentan con menos de veinte árboles por hectárea, con un diámetro normal mayor a veinticinco centímetros, o bien que teniendo árboles con diámetros normales de quince centímetros, cuentan con un área basal por

hectárea de menos de cuarenta metros cuadrados. Se trata de vegetación secundaria cuya característica depende del tiempo de formación y de las características propias de la región, por lo general alcanzan una altura menor a los 2 m.

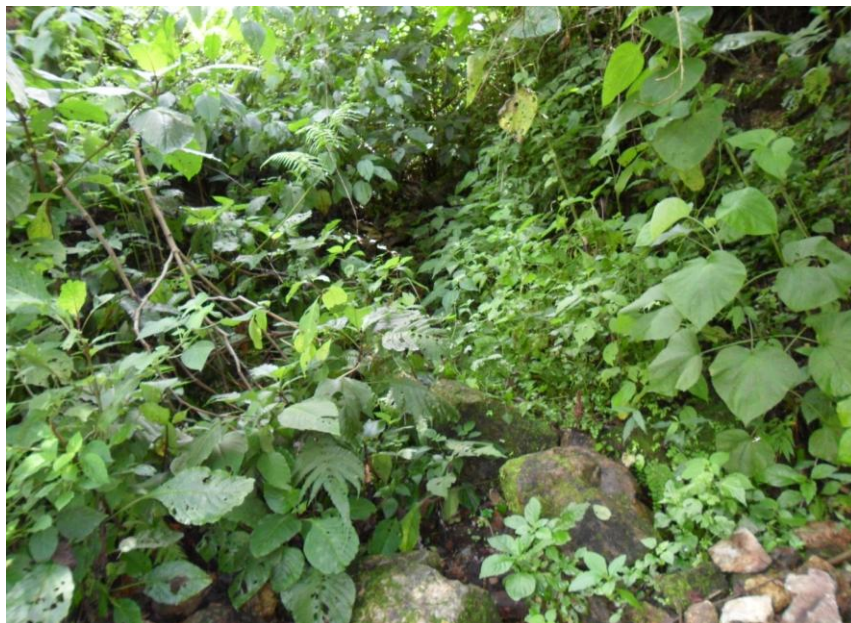


Figura 7. Vegetación acahual.

4.3. Materiales

4.3.1. Software

Los programas de cómputo utilizados para esta investigación se enlistan a continuación:

- Modelo WEPP interface de cuencas pequeñas, componente climático de eventos independientes con la versión 2010.100 liberada en Enero del año 2010.
- ArcGis versión 9.3
- AutoCad versión 2011
- Office 2007

4.3.2. Cartografía y base de datos utilizados

Para la ubicación de la microcuenca Chanjalé dentro de la cuenca del río Coatán se utilizó la información del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) obtenido del INEGI y de la facultad de Ingeniería de la UNAM (CONAGUA, 2006).

La información de precipitación, escurrimientos y sedimentos se obtuvo de bases de datos hidrológicos 2011 (CONAGUA, 2010).

Para la configuración de la microcuenca Chanjalé dentro del modelo WEPP se utilizó el levantamiento topográfico elaborado por Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2010; ver Anexo 1).

4.4 Métodos

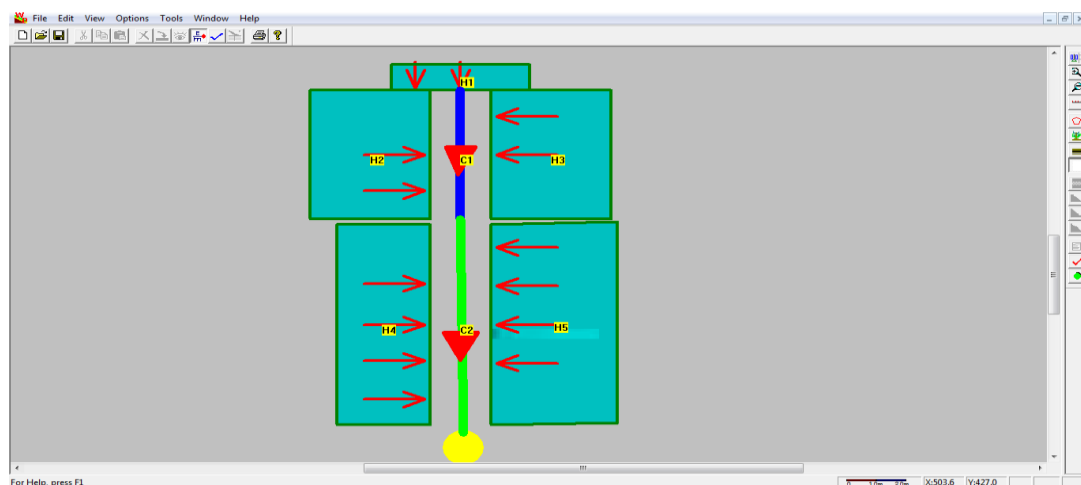
4.4.1. Elaboración de las bases de datos de entrada al modelo

Para este trabajo se utilizó en modo de simulación de eventos independientes dentro del componente climático (Single-Storm).

El modelo opera a través de cuatro archivos de entrada:

4.4.2. Topografía

Para la elaboración del archivo topográfico, se dividió el área total en cinco perfiles de ladera y dos perfiles de canales (Figura 8) representando estos últimos a la corriente principal. En las figuras 9, 10, 11; 12, 13 se grafican las distancias y desniveles para cada perfil de laderas que conforman la microcuenca.



H: Ladera (Hillslope), C: cauces (channel).

Figura 8. Estructura de la microcuenca en el modelo WEPP.

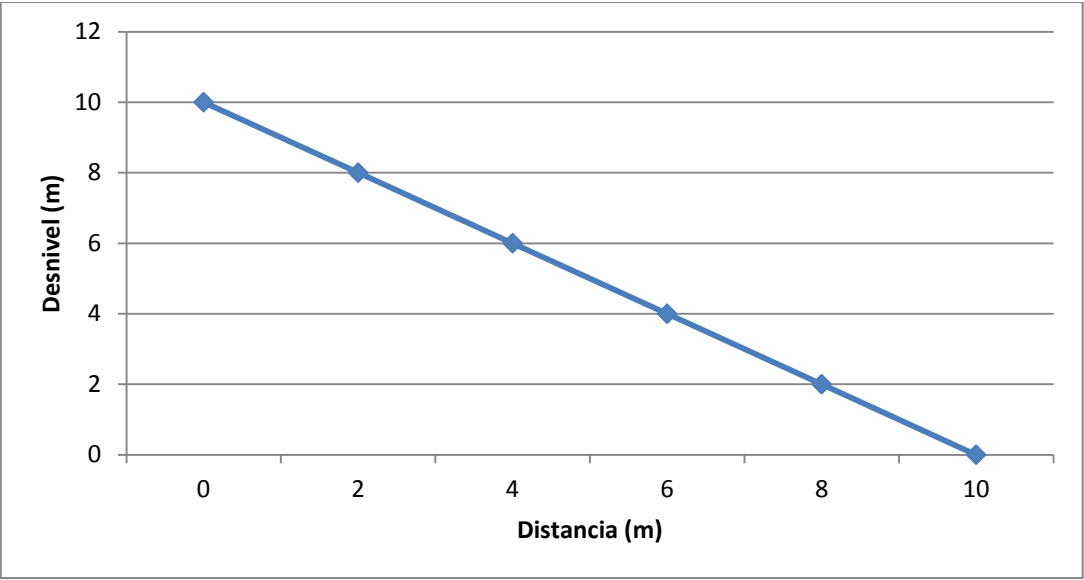


Figura 9. Perfil de ladera No.1

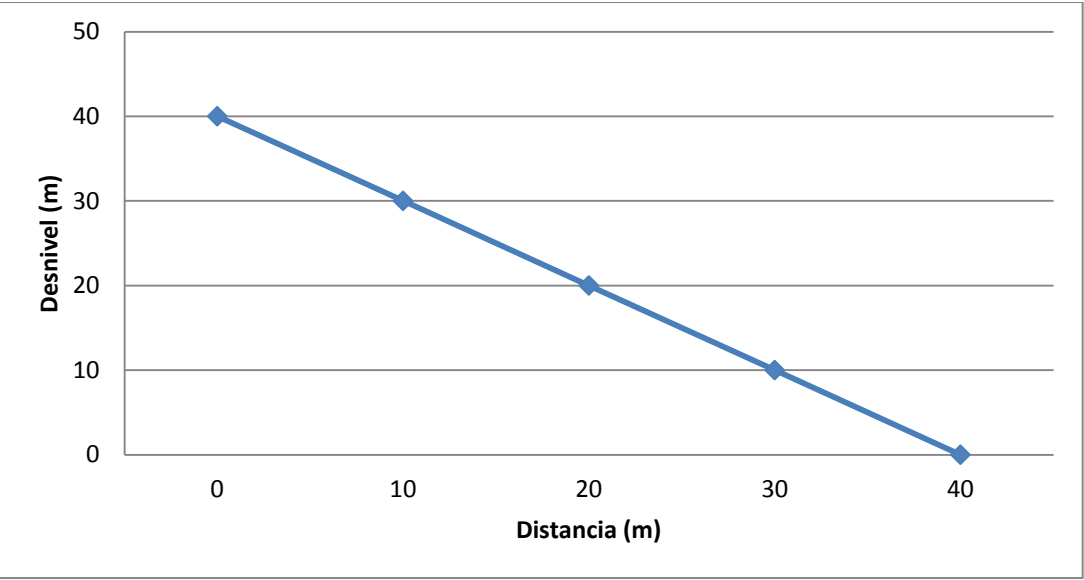


Figura 10. Perfil de ladera No. 2.

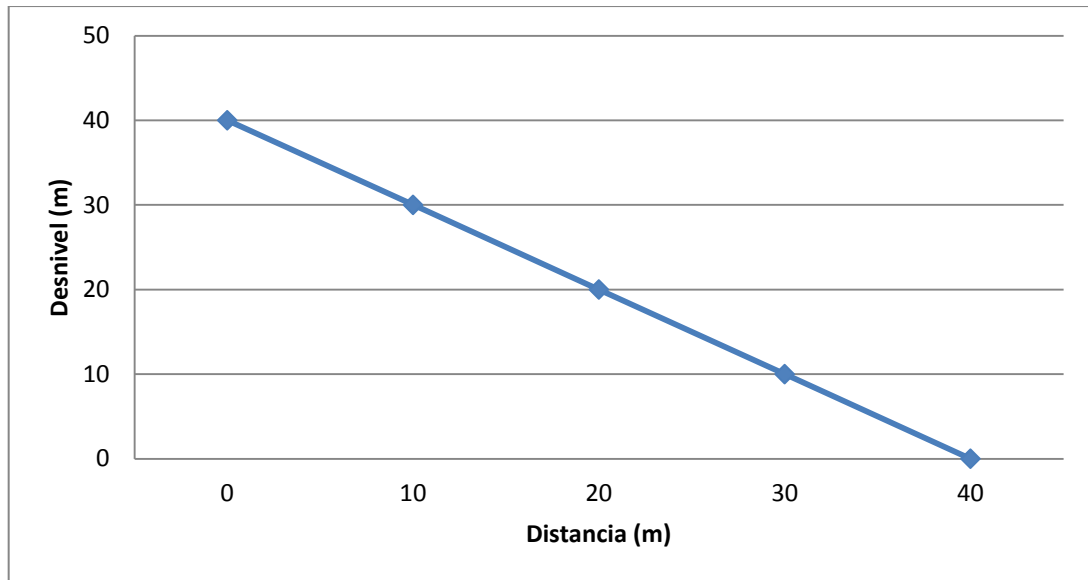


Figura 11. Perfil de ladera No. 3.

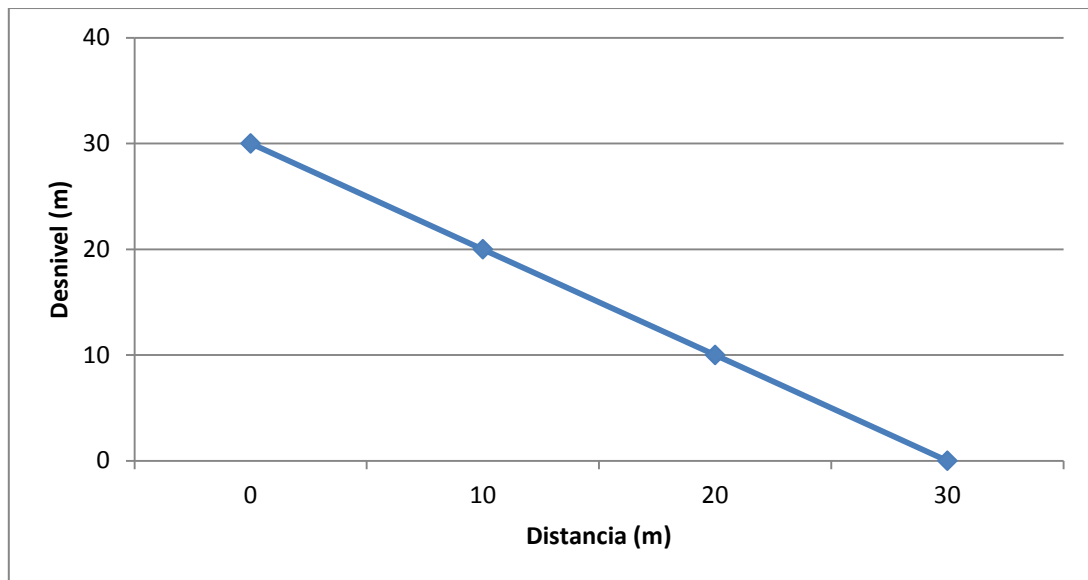


Figura 12. Perfil de ladera No. 4.

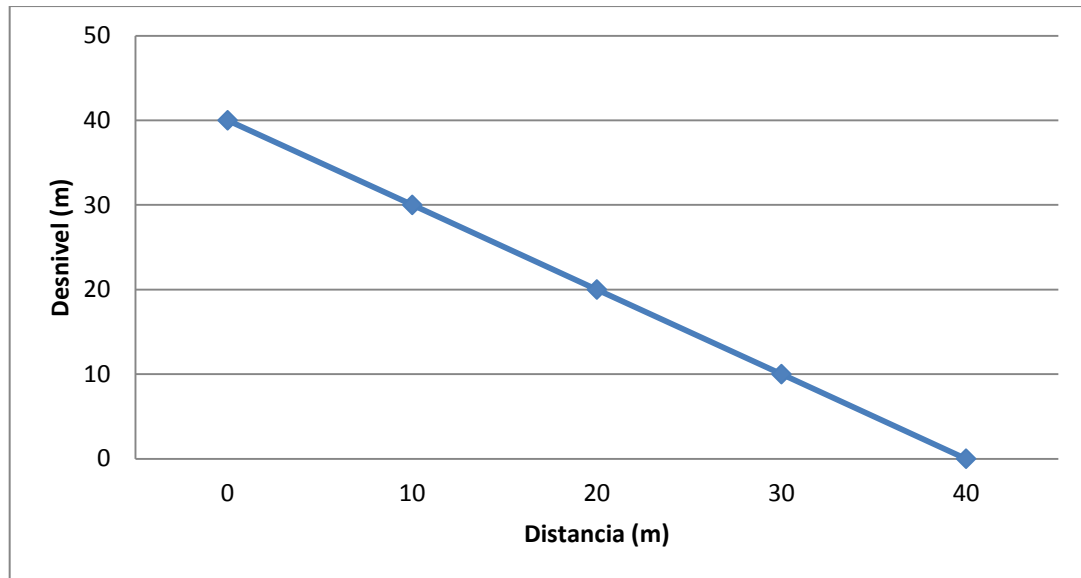


Figura 13. Perfil de ladera No. 5.

4.4.3. Clima

El modelo WEPP puede simular bajo dos modalidades climáticas: simulación continua y simulación de eventos individuales. Cuando se trabaja en modo de simulación continua la interface climática exige datos meteorológicos a gran detalle tales como precipitación, temperatura; radiación solar y punto de rocío. Debido a la ausencia de esta información climática del área de estudio, el presente trabajo se llevo a cabo bajo la simulación de eventos independientes (Single-Storm). En esta investigación, todos los eventos de tormenta seleccionados se consideraron con una distribución uniforme en la superficie de la microcuenca. Se seleccionaron diez eventos de tormentas reportados de manera diaria, los eventos fueron los siguientes:

21, y 23 de Julio del 2011, 02; 07 y 26 de Agosto del 2011, 01, 09, 13; 14 y 19 de Septiembre del 2011. Los criterios de selección de los eventos simulados fueron con base a la disponibilidad de información con la que se contó por cada evento.

Para generar el archivo del clima, el componente climático del WEPP necesita cinco datos de entrada. Estos son:

- Fecha: se ubica la fecha en que se desarrollo la tormenta en formato mm/dd/aaaa
- Duración de la tormenta: este dato representa la duración en horas del evento en estudio.
- Cantidad de la tormenta: se ingresa el valor total en milímetros precipitados de la tormenta.
- Intensidad máxima: aquí se refleja la intensidad máxima lograda durante todo el evento de precipitación expresada en milímetros por hora.
- Porcentaje de duración a la intensidad máxima: representa el tiempo en el cual se alcanza la intensidad máxima, expresado en porcentaje de la duración total de la tormenta.

En el cuadro 2 se muestran los datos de entrada del clima para los eventos simulados (CONAGUA, 2010).

Cuadro 2. Datos climáticos de entrada para los eventos simulados

Fecha	Lámina precipitada (mm)	Duración de la tormenta (h)	Cantidad de la tormenta (mm)	Intensidad máxima (mm h ⁻¹)	Porcentaje de duración a intensidad máxima (%)
21/07/2011	45.4	4.75	45.4	54.5	44
23/07/2011	12.7	2.1	12.7	50	45
02/08/2011	39.0	5.8	39	60	74
07/08/2011	29.3	8.3	29.3	25	40
26/08/2011	28.2	5.8	28.2	12.6	16
01/09/2011	23.2	3.3	23.2	15.7	40
09/09/2011	37.8	4.5	37.8	65.1	7
13/09/2011	24.8	8.8	24.8	9	45
14/09/2011	40.6	8.1	40.6	26.1	30
19/09/2011	27.1	8.8	27.1	25.8	18

4.4.4 Suelo

La información de suelo (Cuadro 5) se obtuvo mediante muestreo de suelos (Figura 14) y posteriormente su análisis en laboratorio para obtener cada parámetro de entrada al modelo. Se realizó un perfil por cada uso de suelo. Para la vegetación acahual se muestrearon horizontes a profundidades de 0-30 cm, 30-60 cm y 60-90 cm, no se encontraron diferencias de coloración entre ninguna de las anteriores. En el cultivo de café se determinaron diferencias de coloración en los diferentes horizontes y se realizaron los muestreos a profundidades de 0-40 cm, 40-70 cm y 70-90 cm. Para realizar el análisis de las muestras se realizaron los procedimientos recomendados por la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Dichos procedimientos se mencionan brevemente a continuación: la textura del

suelo se determinó por el método AS-09 (hidrómetro de Bouyoucos); densidad aparente con el método AS-03 (método del terrón parafinado), la estimación de la capacidad de intercambio catiónico se realizó con el método AS-12 (acetato de amonio), el contenido de materia orgánica se estimó a través del método AS-07 (método de Walkley y Black) y los datos correspondientes a pedregosidad se estimaron de manera cualitativa en inspección de campo.



Figura 14. Muestreos de suelo.

Albedo. El albedo del suelo representa el porcentaje de la radiación solar reflejada hacia la atmósfera. Este parámetro es utilizado para estimar la radiación neta solar que alcanza la superficie del suelo, la cual posteriormente es usada en los cálculos de la evapotranspiración dentro de la rutina de balance hídrico.

Para el cálculo de este valor se utilizó la siguiente ecuación recomendada por el manual del usuario de WEPP

$$SALB = 0.6/\exp (0.4 * M.O) \quad (9)$$

Donde SALB representa el albedo del suelo (%) y M.O es el porcentaje de materia orgánica existente en la superficie del suelo.

Nivel de saturación inicial. Representa el porcentaje de poros llenos de agua al principio de la simulación. El manual de usuario recomienda un valor que oscila entre 70% - 75%, que es la capacidad de campo para la mayoría de los suelos. En este ensayo se utilizó un valor de 70% en todas las simulaciones.

Los parámetros correspondientes a la erodabilidad en canalillos, erodabilidad entre canalillos, esfuerzo cortante crítico así como la conductividad hidráulica efectiva fueron calculados por el modelo.

4.4.5 Manejo

Para la alimentación del modelo, se elaboraron archivos de entrada para cada uso de suelo con información obtenida a través de entrevista con el productor e inspección en campo. Cabe mencionar que algunos parámetros se utilizaron como se recomienda en el manual del usuario para áreas forestales debido a que no se cuenta con toda la información. Por lo que, en los Cuadro 3 y 4 se presentan los valores utilizados en cada uno de los usos de suelo.

Plantación inicial indica el tipo de uso de suelo de cada parcela, en ambos casos se utilizó forestal perenne debido a las características del café como cultivo permanente. La densidad aparente utilizada en el modelo se refiere a la capa superficial del suelo los valores utilizados fueron 1.04 g cm^{-3} y 1.02 g cm^{-3}

para acahual y café respectivamente. La cobertura inicial del dosel representa el porcentaje de cobertura de la superficie del suelo cubierto por plantas. Su valor varía de 0 a 100 %. Se utilizaron valores de 70% y 60% para acahual y café respectivamente.

La cobertura inicial en y entre canalillos es el porcentaje de la superficie de suelo cubierta por residuos. Su valor varía de 0 a 100 %. Para ambos casos se utilizó un valor de 100 % ya que no existen espacios sin cobertura vegetal. La altura inicial de surcos es la altura después de realizada la labranza. Se utiliza para determinar la pendiente entre canalillos, que es importante en la estimación del desprendimiento entre canalillos y de la entrega de sedimentos en canalillos. Como recomienda el manual del modelo, se utilizó un valor de 10 cm para ambos usos de suelo.

El valor de rugosidad inicial se refiere a la rugosidad de los terrones después de la última labranza. Es utilizado para determinar el almacenamiento en depresiones y entrega de sedimentos entre canalillos. Se utilizó un valor de 10 cm para acahual y café debido a la ausencia de labranza como recomienda el manual del modelo para áreas forestales. Para la información de la profundidad de la primer y segunda capa de labranza se utilizó un valor de 30 cm para los dos usos de suelo como recomienda el manual del usuario para áreas forestales.

Cuadro 3. Parámetros de entrada para manejo acahual.

Parámetro	Unidad	Valor
Plantación inicial		Forestal perenne
Densidad aparente	(g cm ⁻³)	1.04
Cobertura inicial del dosel (0-100)	(%)	70
Días después de la última labranza	(días)	1000
Días después de la última cosecha	(días)	1000
Cobertura inicial entre canalillos	(%)	100
Residuos iniciales del sistema de cultivo		Perenne
Precipitación acumulada después de ultima labranza	(mm)	1000
Altura del surco después de ultima labranza	(cm)	10
Cobertura inicial en canalillos	(%)	100
Rugosidad inicial después de ultima labranza	(cm)	10
Distancia entre surcos	(cm)	0
Ancho de surcos		Permanente
Profundidad de cobertura de nieve	(cm)	0
Profundidad de segunda capa de labranza	(cm)	30
Profundidad de primer capa de labranza	(cm)	30
Ancho inicial de surcos	(cm)	0
Masa inicial de raíces muertas	Kg m ⁻²	0.5
Biomasa inicial sub emergida	Kg m ⁻²	0.5

Cuadro 4. Parámetros de entrada para manejo café.

Parámetro	Unidad	Valor
Plantación inicial		Forestal perenne
Densidad aparente	(g cm ⁻³)	1.02
Cobertura inicial del dosel (0-100)	(%)	60
Días después de la última labranza	(días)	1000
Días después de la última cosecha	(días)	1000
Cobertura inicial entre canalillos	(%)	100
Residuos iniciales del sistema de cultivo		Perenne
Precipitación acumulada después de ultima labranza	(mm)	1000
Altura del surco después de ultima labranza	(cm)	10
Cobertura inicial en canalillos	(%)	100
Rugosidad inicial después de ultima labranza	(cm)	10
Distancia entre surcos	(cm)	60
Ancho de surcos		Permanente
Profundidad de cobertura de nieve	(cm)	0
Profundidad de segunda capa de labranza	(cm)	30
Profundidad de primer capa de labranza	(cm)	30
Ancho inicial de surcos	(cm)	0
Masa inicial de raíces muertas	Kg m ⁻²	0.5
Biomasa inicial sub emergida	Kg m ⁻²	0.5

4.5. Calibración del modelo WEPP

Al momento de aplicar modelos de simulación por lo general se recurre aquellos desarrollados en otros países y regiones, bajo condiciones climáticas, edafológicas, de cultivo etc. completamente diferentes. Por esto, resulta complicado identificar los parámetros sensibles y fijarlos para las condiciones existentes en el sitio de estudio con el fin de representar las características de manera aceptable. Esto se torna más complejo ya que muchas de las variables necesarias para el modelo no se encuentran disponibles.

Para la calibración del modelo WEPP en la estimación de erosión hídrica en la microcuenca Chanjalé se realizó una modificación de los valores del componente de suelos y clima. Lo anterior con el fin de determinar la sensibilidad de cada parámetro.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Resultados del muestreo en campo

En el Cuadro 5 se muestra el estudio de suelos realizado en la microcuenca.

Cuadro 5. Características físicas y químicas del suelo.

Cultivo	Profundidad cm	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Textura	Dap (g cm ⁻³)	M.O (%)	CIC (meq/100 g)
Acahual	0-30	49.64	44.00	6.36	Franco	1.04	6.48	12.5
Acahual	30-60	39.64	50.00	10.36	Franco-limoso	1.05	6.07	12.0
Acahual	60-90	33.28	50.00	16.72	Franco-limoso	1.1	5.08	12.7
Café	0-40	33.64	50.00	16.36	Franco-limoso	1.02	5.25	13.2
Café	40-70	27.64	52.00	20.36	Franco-limoso	1.1	1.15	12.3
Café	70-90	29.64	52.00	18.36	Franco-limoso	1.1	0.82	13.7

Dap: Densidad aparente; M.O: Materia Orgánica; CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico

Se observa la predominancia de suelos franco-limosos con altos contenidos de materia orgánica. Sin embargo, para las profundidades de 40-70 cm y 70-90 cm en el cultivo de café, se determinaron contenidos significativamente bajos en comparación con las mismas profundidades en acahual. Esto se atribuye al efecto que ejerce el cambio de la cobertura vegetal sobre la distribución espacial de la materia orgánica sobre los horizontes del suelo como encontraron Jobbágy and Jackson (2000).

5.2. Estructura de la microcuenca, laderas y cauces

Para la forma de la estructura de la microcuenca se muestra en la Figura 15, así como la división de la misma en cinco perfiles de laderas y dos cauces que representan la corriente permanente.

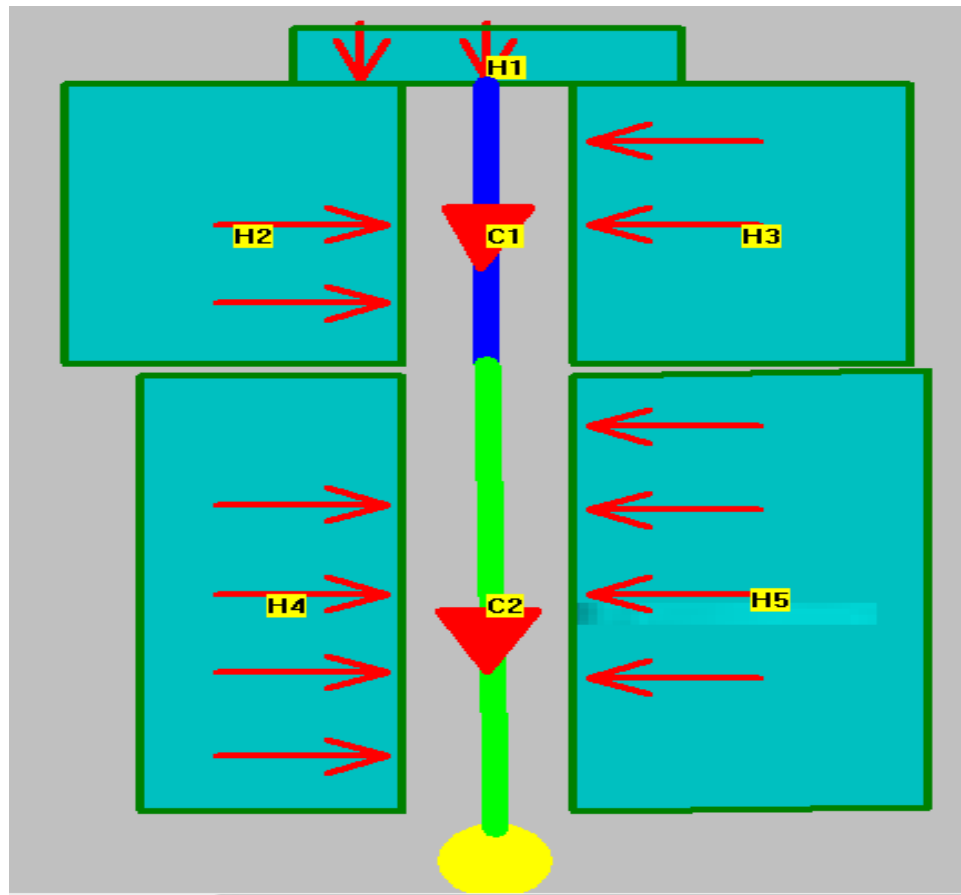


Figura 15. Estructura de la microcuenca, laderas y cauces.

La subdivisión de la microcuenca se realizó con base al área total, así como áreas de cultivo de manera que coincidiera en la medida de lo posible con el levantamiento topográfico (Anexo 1). En esta etapa de la investigación se logra coincidir con las opiniones de los creadores del modelo que mencionan que debido a que el modelo únicamente acepta perfiles de ladera rectangulares, al momento de ingresar las áreas de parcelas en campo se torna complejo debido a su forma irregular. De igual manera, se configuraron los perfiles en uno de cabecera dos en la margen derecha y dos en la margen izquierda del cauce como se muestra en la Figura 15.

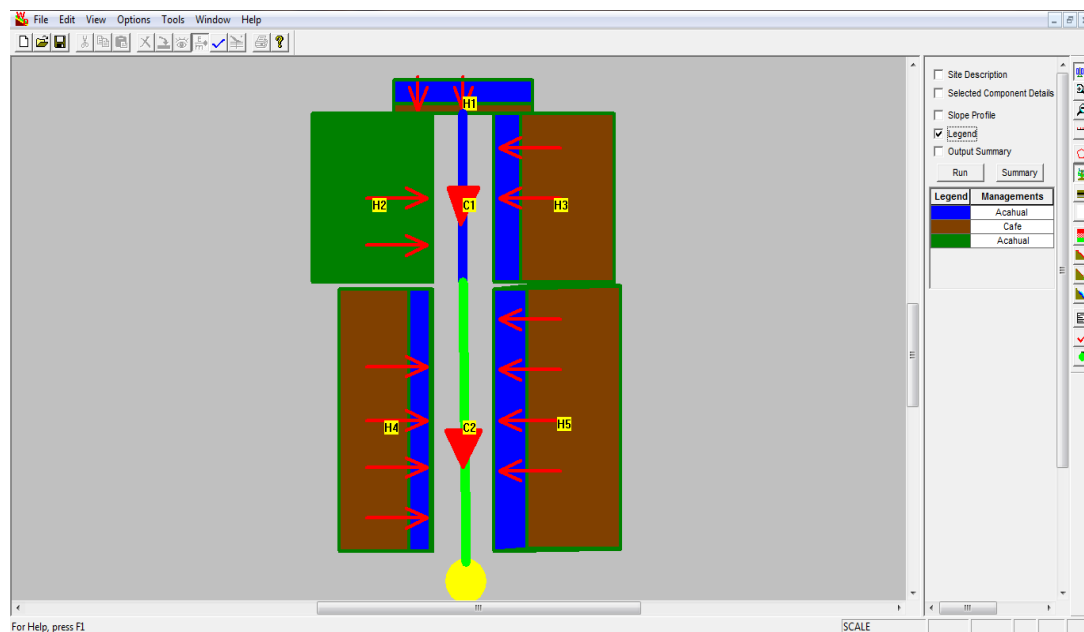


Figura 16. Usos de suelo de perfiles de ladera.

Para el uso de suelos en el modelo WEPP (Figura 16), se subdividieron los perfiles de ladera 1,3; 4 y 5 para usos acahual y café, para el perfil de ladera 2 únicamente se asignó el uso acahual, configurando un total de 0.42 ha para manejo acahual y 0.61 ha para manejo bajo café. Lo anterior se realizó con base al mapa de usos de suelo de la microcuenca (Anexo 3).

5.3. Estimación de escurrimientos

Los resultados de la modelación de los escurrimientos para los diez eventos de tormentas seleccionados se muestran en el Cuadro 6, se reporta la fecha de monitoreo, escurrimiento superficial monitoreado en campo; así como los valores simulados por WEPP. Para la mayoría de eventos medidos, el modelo

no estima volúmenes de escurrimientos y por consiguiente la cantidad de sedimentos es nula.

Por otro lado en el primer evento simulado, los resultados del WEPP expresan tanto escurrimientos como sedimentos con una diferencia mínima en los escurrimientos en comparación con las mediciones de campo. Aunque se puede observar que algunas ocasiones WEPP estima cero escurrimientos mientras que en campo se encontraron valores de escurrimientos. Esto se puede atribuir a que los escurrimientos medidos en campo fueron muy pequeños (0.5 m^3 - 3.1 m^3) y el modelo no es tan preciso como para detectar estas diferencias.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la simulación de los eventos seleccionados:

Cuadro 6. Resultados de simulación.

Evento	Escurrecimiento medido (m^3)	Escurrecimiento estimado (m^3)	Sedimentos estimados (kg)
21/07/2011	31.08	33	13.1
23/07/2011	1.07	0	0
02/08/2011	Sin registro	44	60.7
07/08/2011	2.60	0	0
26/08/2011	0.50	0	0
01/09/2011	2.21	0	0
09/09/2011	3.18	0	0
13/09/2011	2.31	0	0
14/09/2011	7.39	0	0
19/09/2011	2.31	0	0

Los resultados obtenidos a través de la modelación con WEPP para el evento del 21 de Julio del 2011 se representan por cada perfil de ladera en las figuras 17 a 24.

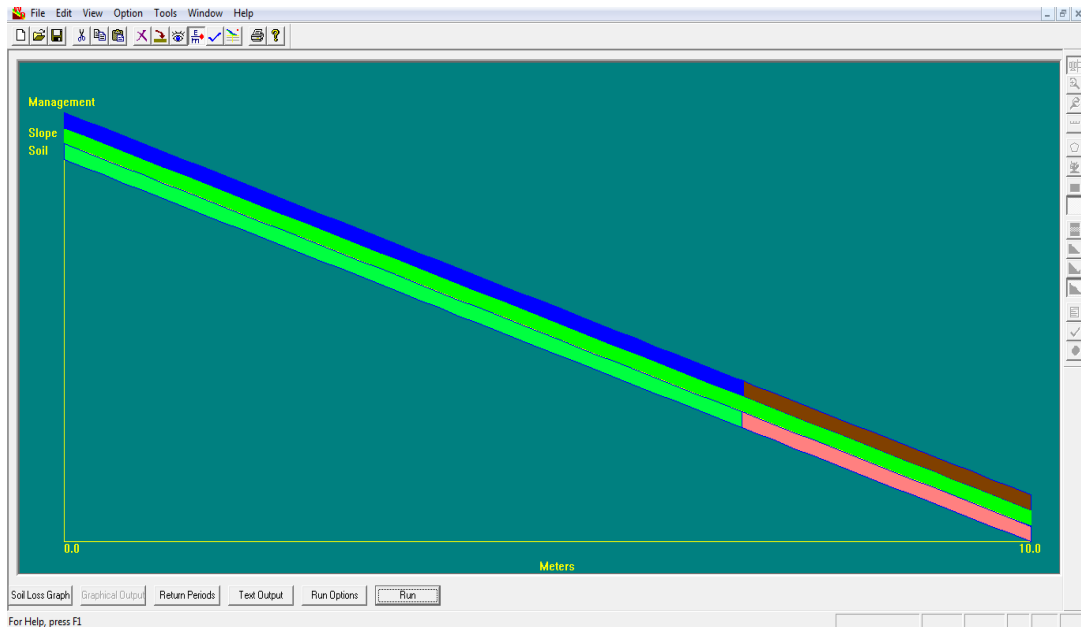


Figura 17. Perfil de ladera No. 1. Manejo Acahual + Café.

El perfil de ladera No.1 se subdividió en acahual y café para una dimensión de 7 m x 47 m para acahual y 3 m x 47 m para el cultivo de café.

Para esta ladera el modelo estima cero sedimentos, esto debido al área reducida del perfil.

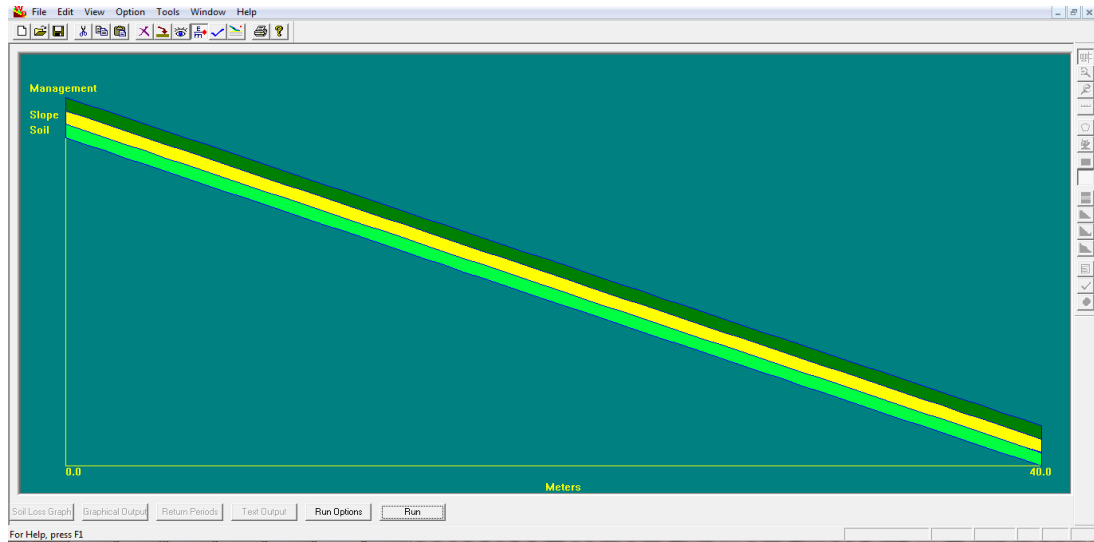


Figura 18. Perfil de ladera No. 2. Manejo Acahual.

Para el perfil de ladera No.2 se asignó únicamente acahual como manejo con dimensiones de 40 m x 50 m y se estima cero desprendimientos, arrastre ni deposición de sedimentos. Esto se puede atribuir al uso uniforme del suelo con acahual ya que este brinda una cobertura del 100%.

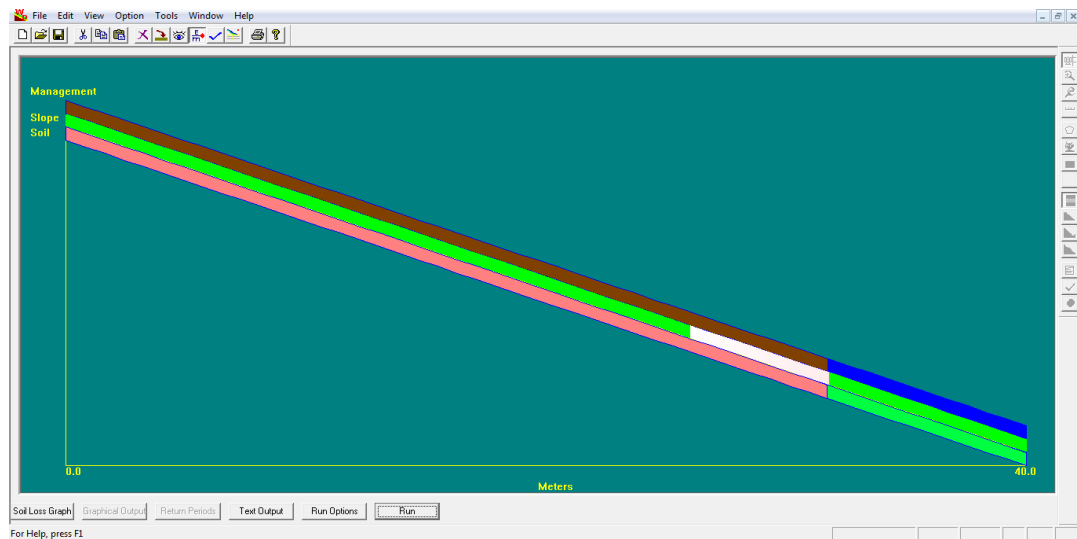


Figura 19. Perfil de ladera No. 3. Manejo Café + Acahual.

El perfil de ladera No.3 se subdividió en café con dimensiones de 32 m x 50 m mientras que para el acahual fue de 8 m x 50 m.



Figura 20. Erosión en perfil de ladera No. 3.

La Figura 20 demuestra que WEPP si estima desprendimiento, transporte y deposición de sedimentos para el perfil No.3. Esto debido a la combinación de usos de suelo además de presentar un área mayor en comparación al perfil de ladera No.2. El desprendimiento en este perfil inicia a los 26 m en dirección de la ladera y finaliza a los 32 m cuando existe un cambio en uso de suelo de café a uso acahual. Se logra apreciar que el sedimento desprendido en este perfil de ladera logra ser transportado hacia el cauce.

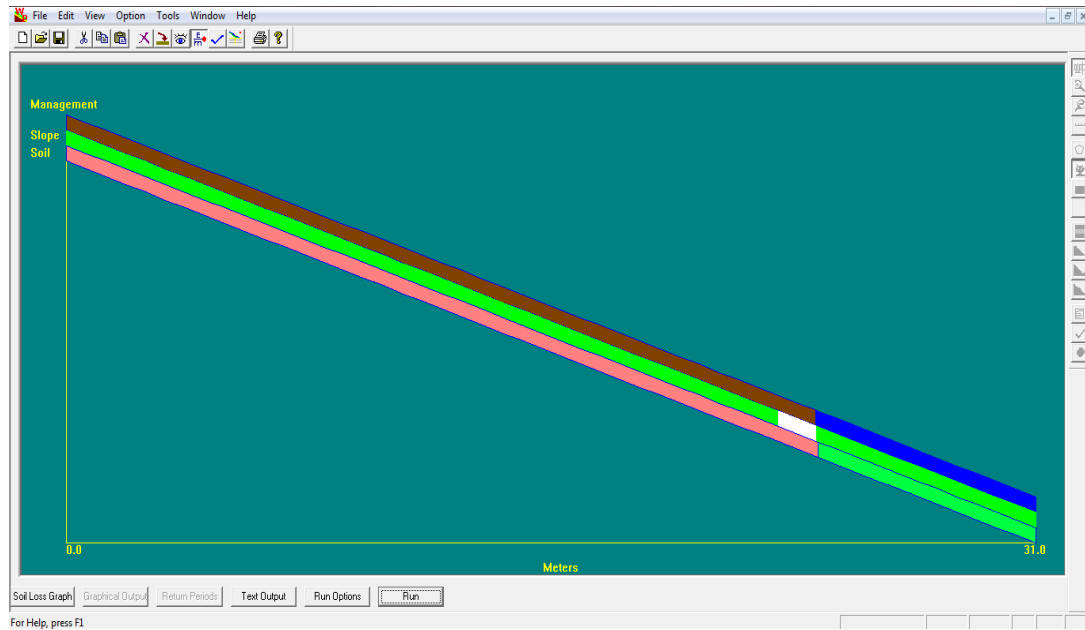


Figura 21. Perfil de ladera No. 4. Manejo Café + Acahual.

Se subdividió el perfil de ladera No.4 en usos café y acahual con dimensiones 24 m x 78 m y 7 m x 78 m respectivamente.

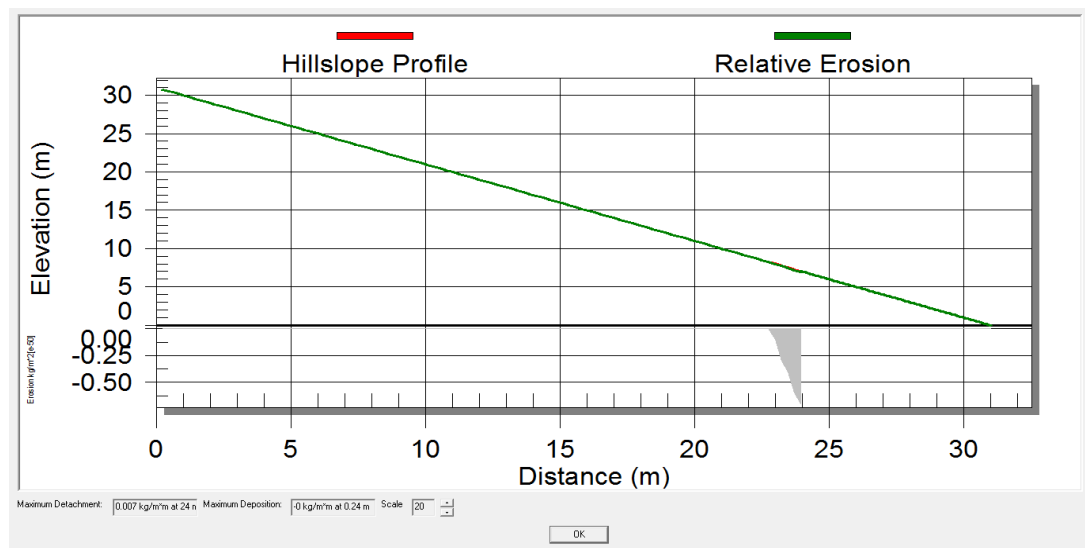


Figura 22. Erosión en perfil de ladera No. 4.

En la Figura 22 se aprecia que ocurre desprendimiento que se inicia a los 22.8 m y finaliza a los 24 m cuando existe cambio de usos de café a acahual. Se puede observar un comportamiento igual que en el perfil de ladera No.3.

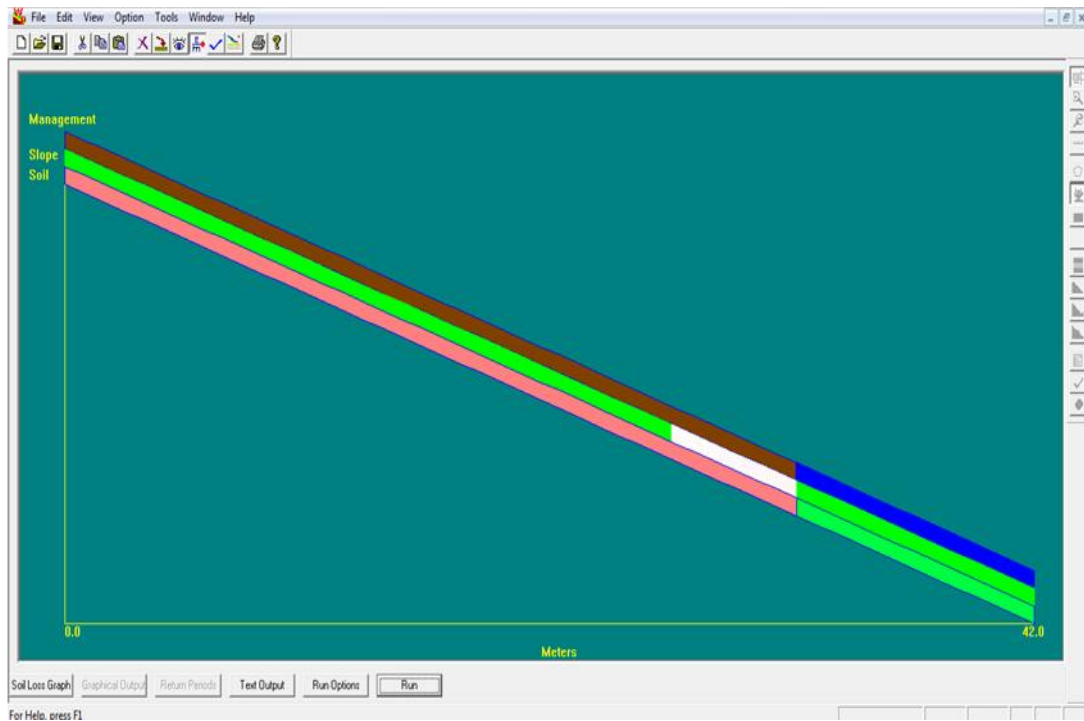


Figura 23. Perfil de ladera No. 5. Manejo Café +Acahual.

La ladera No.5 se subdividió en manejo café con dimensiones de 32 m x 78 m y 10 m x 78 m para acahual.

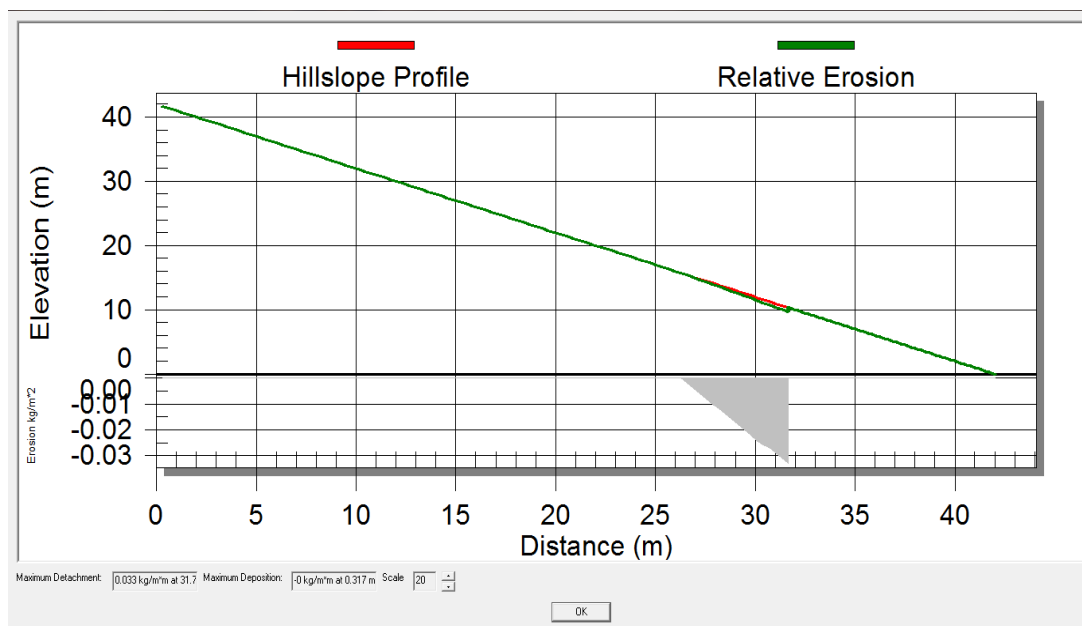


Figura 24. Erosión en perfil de ladera No. 5.

Se logra apreciar en la ladera No. 5 un comportamiento similar a los perfiles No 3 y 4 con respecto al desprendimiento de sedimentos que inicia a los 26.3 m y finaliza a los 32 m en sentido de la pendiente cuando inicia el acahual. Los sedimentos logran llegar al cauce del río.

Los resultados de los escurrimientos superficiales y pérdidas de suelo por laderas se expresan en el cuadro 7.

En las Figuras 19, 21 y 23 en la capa correspondiente a la ladera se pueden notar espacios remarcados de color blanco, que es donde se produce el desprendimiento identificado por WEPP.

Cuadro 7. Esguerrimientos y producción de sedimentos por laderas.

Laderas	Volumen esguerrido (m ³)	Pérdida de suelo (kg)	Deposición de sedimentos (kg)
H1- Acahual + Café	1.5	0	0
H2- Acahual	4.6	0	0
H3-Café + Acahual	10.2	5.2	0
H4-Café + Acahual	12.1	0.4	0
H5-Café + Acahual	16	7.5	0
Total	44.4	13.1	0

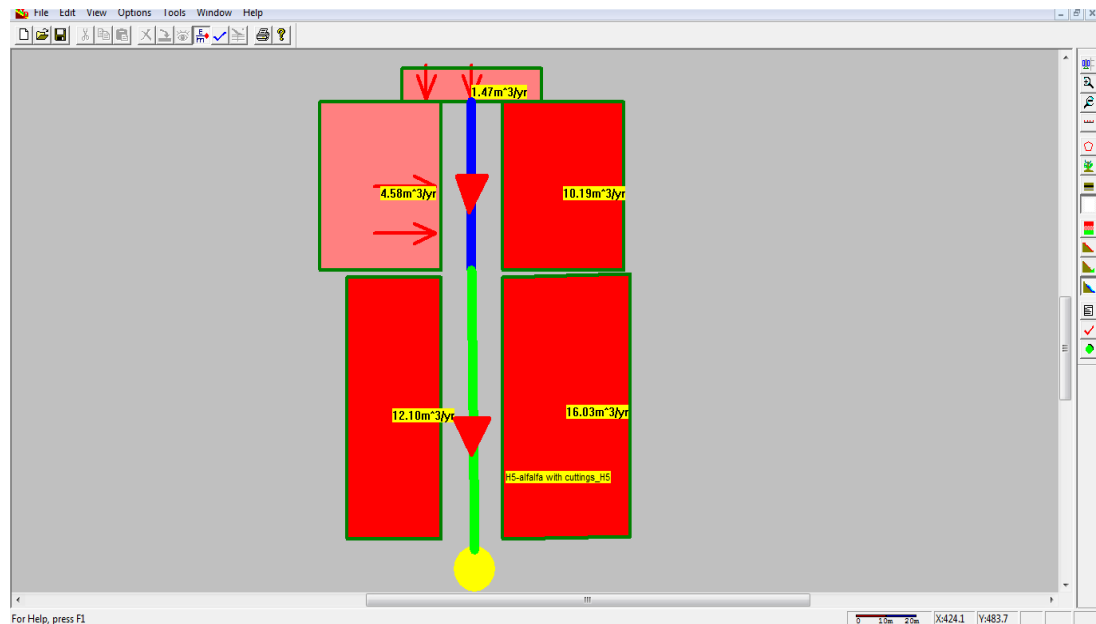


Figura 25. Esguerrimientos superficiales por cada perfil de ladera.

Para la simulación del evento ocurrido el 21 de Julio del 2011(Cuadro 7), WEPP estima esguerrimientos para todos los perfiles de laderas, sin embargo los mayores volúmenes de esguerrimientos son estimados para el perfil de ladera No.5. Esto se atribuye a que presenta mayor área (0.33 ha) en comparación con el resto.

Para evaluar el desempeño de WEPP se seleccionó un evento diferente con respecto a lámina precipitada e intensidad máxima, para ser modelado y

estimar los escurrimientos y sedimentos producidos por la microcuenca. Se modeló el evento ocurrido el 02 de Agosto del 2011. Los resultados de la estimación de escurrimientos se presentan en la Figura 26. La información climática de este evento se muestra en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Información climática de entrada al modelo, evento 02/08/2011

Fecha	Duración de la tormenta (h)	Cantidad de la tormenta (mm)	Intensidad máxima (mm h^{-1})	Porcentaje de duración a intensidad máxima (%)
02/08/2011	5.8	39	60	74

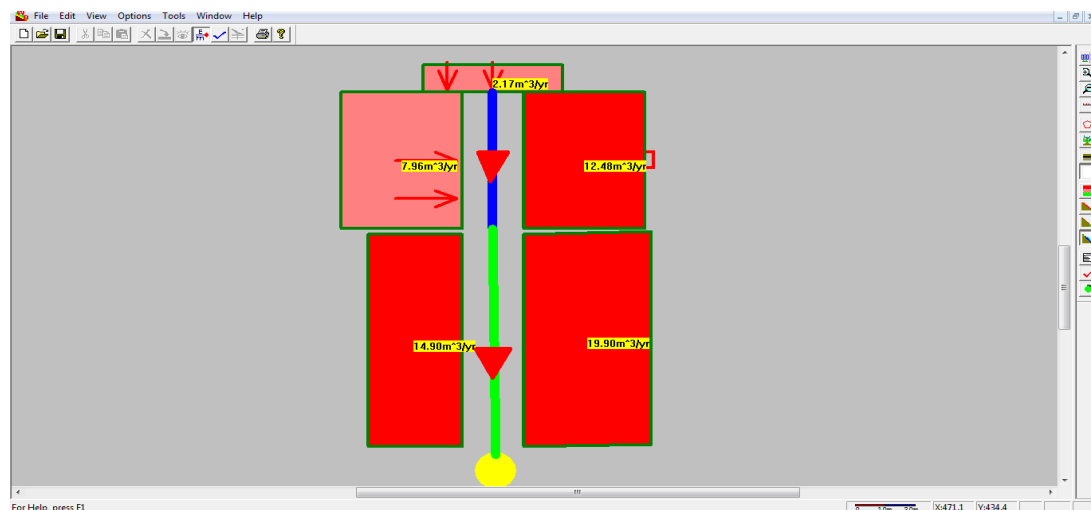


Figura 26. Escurrimientos superficiales, evento 02 de Agosto del 2011.

La Figura 26 demuestra que la mayor cantidad de escurrimientos son generados por el perfil No.5 al igual que en la modelación del evento del 21 de Julio del 2011.

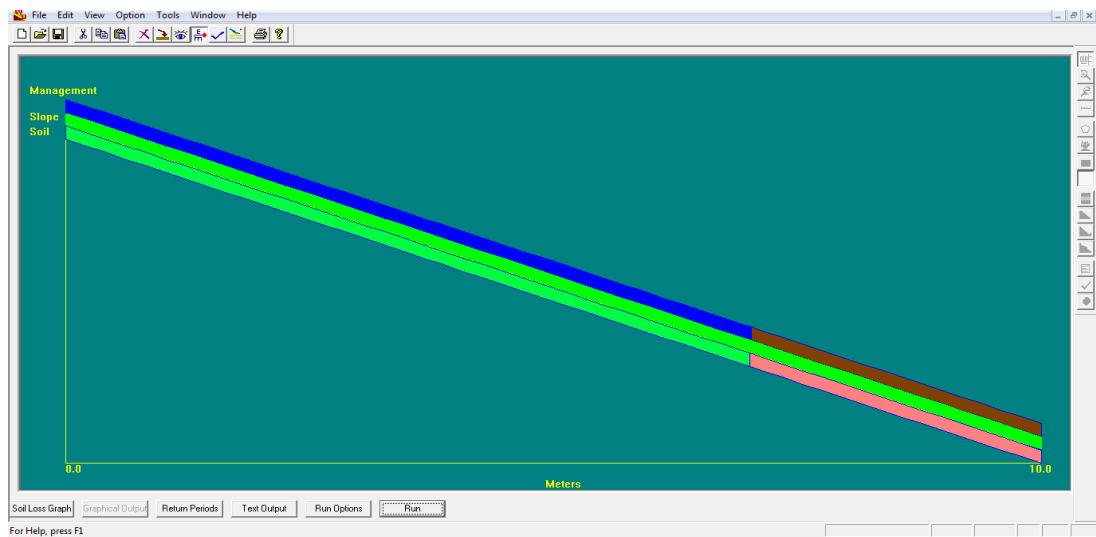


Figura 27. Perfil de ladera No. 1.

Para la ladera No.1 WEPP no estima desprendimiento por consiguiente no ocurre transporte ni deposición. Esto debido al área de la ladera, comportamiento similar a la primera modelación.

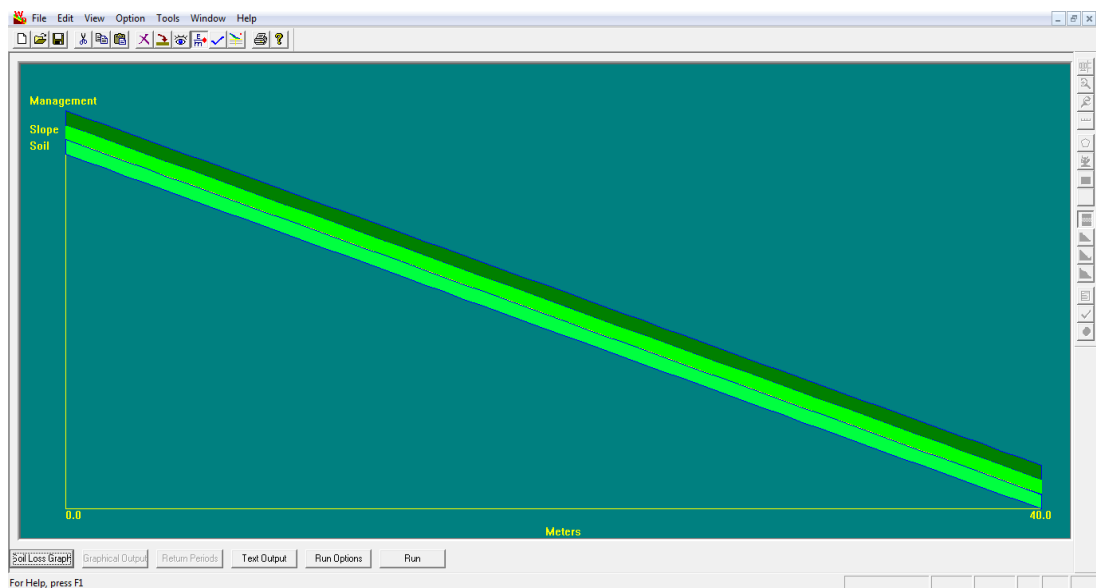


Figura 28. Perfil de ladera No. 2

En el 2do perfil de ladera de igual manera no ocurre desprendimiento, transporte o deposición debido a la cobertura de acahual.

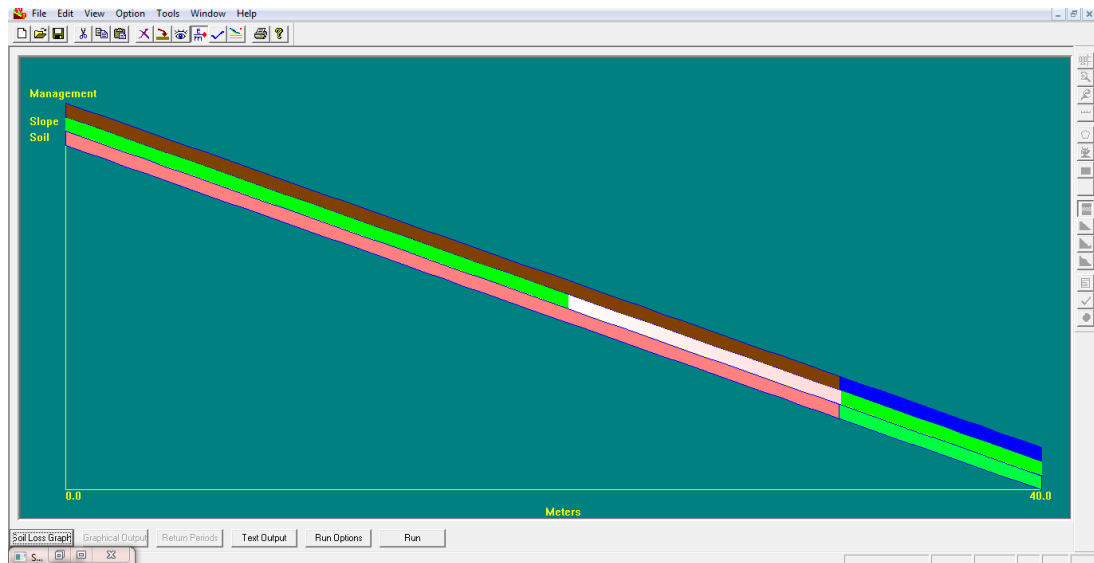


Figura 29. Perfil de ladera No. 3

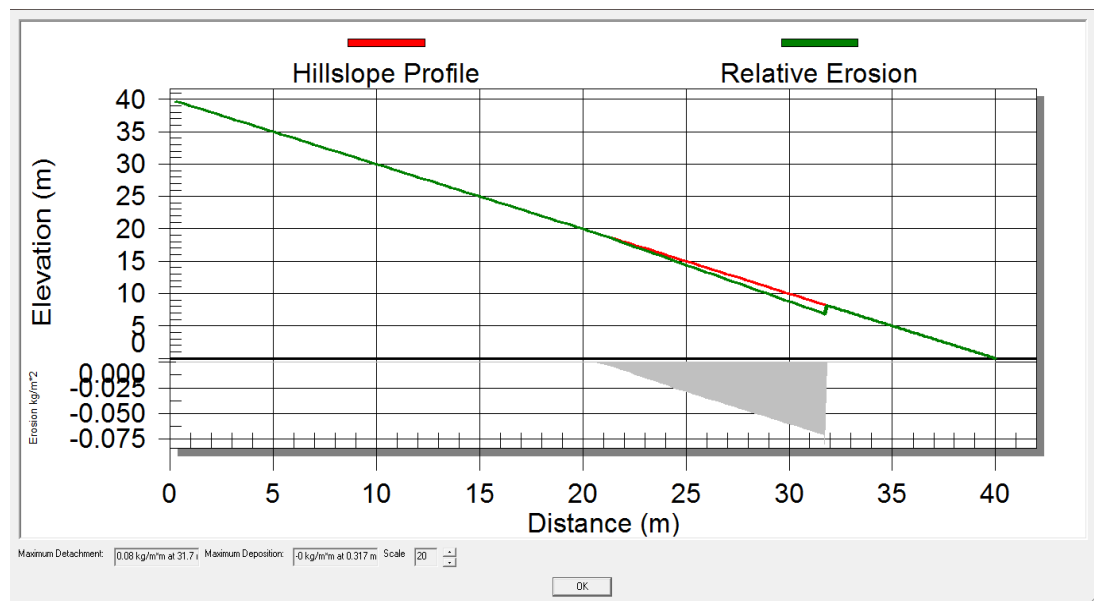


Figura 30. Erosión en perfil de ladera No 3

En el perfil 3 (Figura 30) se aprecia un desprendimiento de las partículas de suelo que inicia a los 20.6 m en dirección de la pendiente y finaliza a los 32 m donde inicia la cobertura de acahual.

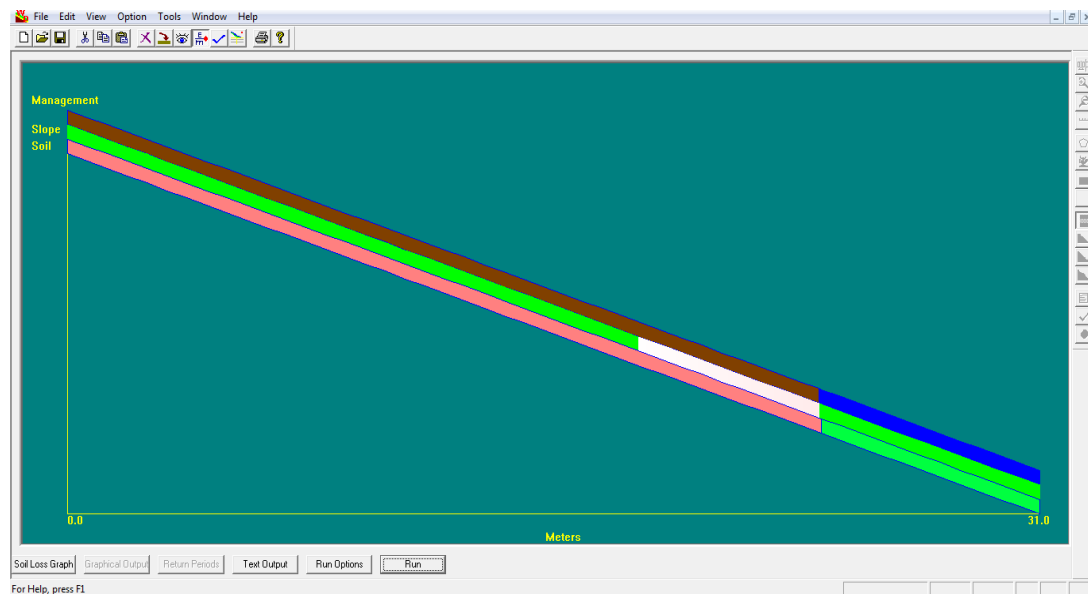


Figura 31. Perfil de ladera No. 4

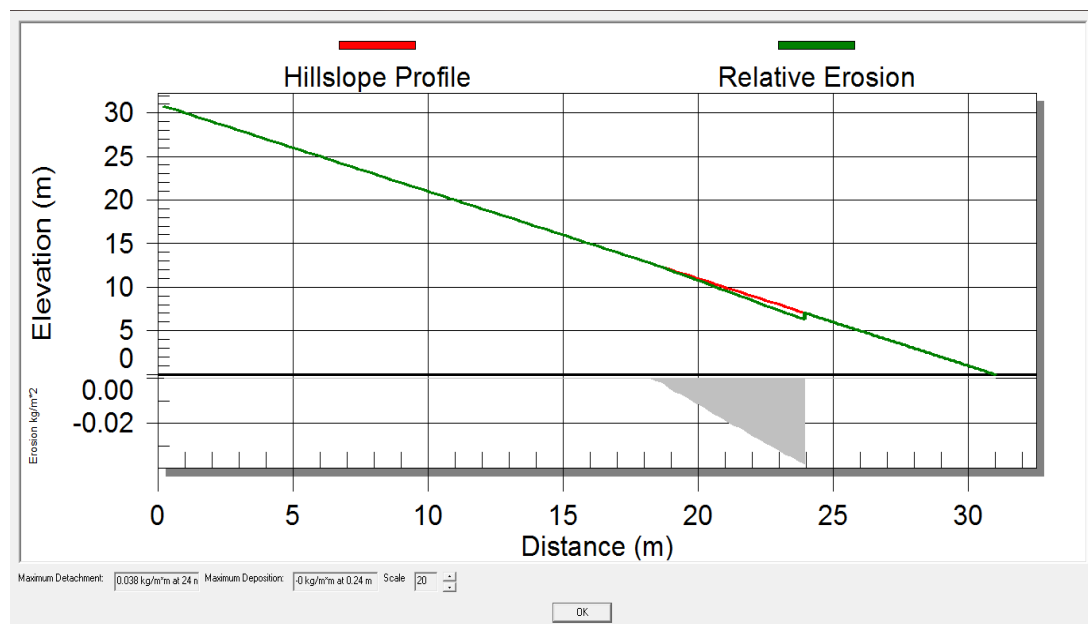


Figura 32. Erosión en perfil de ladera No. 4

El perfil No.4 se manifiesta un inicio de desprendimiento a los 18.2 m y finaliza a los 24 m al ocurrir un cambio en el uso de suelo.

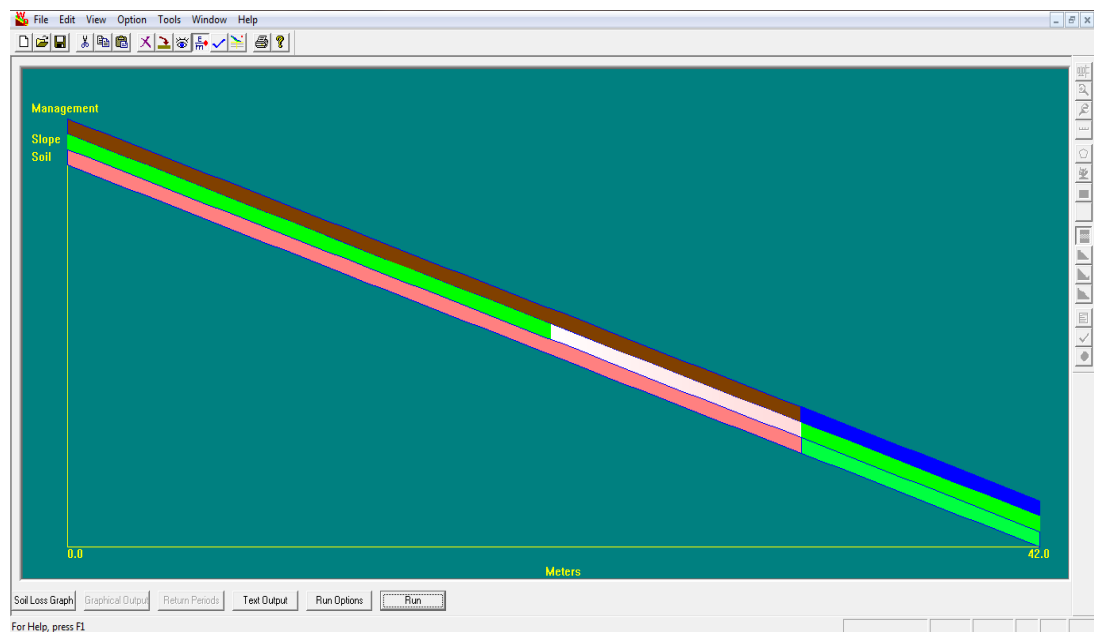


Figura 33. Perfil de ladera No. 5



Figura 34. Erosión en perfil de ladera No. 5

El desprendimiento en la ladera 5 inicia a los 21 m y finaliza a los 32 m cuando alcanza el acahual.

El resumen de los resultados de escurrimientos y desprendimientos del evento del 02 de Agosto de 2011 se presenta en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Escurrimientos y producción de sedimentos por laderas.

Laderas	Volumen escurrido (m ³)	Pérdida de suelo (kg)	Deposición de sedimentos (kg)
H1- Acahual + Café	2.2	0	0
H2- Acahual	8.0	0	0
H3-Café + Acahual	12.5	20.5	0
H4-Café + Acahual	14.9	8.9	0
H5-Café + Acahual	19.9	31.3	0
Total	57	13.1	0

5.4. Aspectos a mejorar en trabajos próximos sobre WEPP en México

Debido a que el modelo define la humedad antecedente bajo el concepto de porcentaje de saturación inicial, se deberán realizar mediciones de humedad antecedente para próximas modelaciones. Esto con el fin de tener un valor preciso de este factor y no determinarlo de manera arbitraria.

De igual manera se deberá determinar los valores de capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

Disponer de información confiable de precipitaciones anteriores a eventos máximos, así como escurrimientos y sedimentos en las cuencas costeras de Chiapas, principalmente para la microcuenca Finca Argovia que presenta condiciones más adecuadas para la modelación de eventos a través de WEPP.

5.6. Prácticas de conservación de suelos

A través de esta investigación se logró identificar las áreas de desprendimiento de suelos que se concentran principalmente en los perfiles de ladera 3,4 y 5 en los últimos metros de cada perfil y finalizan al iniciar el cambio de uso de suelo de café a acahual. El material desprendido de la superficie del suelo no se deposita en los usos de acahual sino que logra alcanzar el cauce de la microcuenca lo que significa mayor vulnerabilidad, ya que llegan hasta el punto de salida de la microcuenca Chanjalé. Esto significa una pérdida de la capa arable, y por consiguiente una reducción de la capacidad productiva de las laderas. Por lo tanto, en las áreas de desprendimiento (ver Anexo 4) se deberán implementar prácticas de conservación de suelos como barreras vivas o muertas.

5.7 Sensibilidad del modelo WEPP

El modelo demostró una marcada sensibilidad esencialmente a parámetros climáticos, principalmente a los valores de intensidad de la lluvia y porcentaje de duración a intensidad máxima.

Con respecto a los valores de suelo, el modelo WEPP es sensible al porcentaje de saturación inicial que representa la cantidad de los espacios porosos llenos de agua, o humedad antecedente como lo expresan otros modelos de erosión.

Debido a las diferencias de aplicación de esta investigación que se realizó a nivel de pequeñas cuencas, no se puede comparar con las investigaciones

hechas por Tapia (1999) y Larose (2003) ya que éstas se desarrollaron en parcelas experimentales y lotes de escurrimiento. Además los parámetros de erodabilidad en y entre canalillos, esfuerzo cortante crítico y conductividad hidráulica efectiva se obtuvieron a través de lluvia simulada.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

En este estudio se operó el modelo WEPP en la microcuenca Chanjalé, dentro de la cuenca del río Coatan, Chiapas, bajo la versión de eventos individuales; la microcuenca está cubierta por café y acahual y tiene pendiente media del 80%. El área de estudio se encuentra instrumentada y a pesar de contar con alguna información referente a lluvia, escurrimiento y sedimentos, el modelo solo fue calibrado por escurrimientos, pero no por sedimentos.

WEPP fue aplicado en diez distintos eventos reportados durante el año 2011. Sin embargo únicamente para dos de estos el modelo estima tanto escurrimientos como sedimentos, en los ocho restantes los valores de escurrimiento y sedimento fueron cero. Aunque en la realidad para estos últimos eventos medidos, los valores de escurrimiento fueron muy pequeños (menor de 10 m^3). Por lo anterior se concluye que el modelo WEPP fue capaz de estimar la erosión hídrica generada por los eventos simulados en esta investigación.

Se encontró que en la microcuenca Chanjalé, el área en la cual, de manera prioritaria, se deben hacer prácticas de conservación es en las márgenes izquierda y derecha del cauce (1 metro a cada lado del cauce).

En lo general se encontró que el modelo WEPP en su versión de simulación de evento único subestima los escurrimientos calculados con la ecuación de Green-Ampt.

6.2. Recomendaciones

1. Resulta sumamente necesario modelar a través de WEPP microcuencas con un área de drenaje mayor a 10 ha, así como diferencias entre cobertura vegetal más pronunciadas con el propósito de validar sus efectos en la reducción de los escurrimientos superficiales y sedimentos.
2. Es recomendable correr WEPP con información completa y confiable con respecto a datos de precipitación, escurrimientos y sedimentos con el fin de calibrar el modelo de manera más completa.
3. Se recomienda modelar eventos de precipitación con mayores valores de lámina precipitada e intensidades máximas.
4. Se recomienda en investigaciones posteriores realizar mediciones de humedad antecedente para incrementar la precisión de la información climática de entrada al modelo.

5. Es recomendable utilizar WEPP en modo de simulación continua con el propósito que el modelo se estabilice con respecto a todas las variables e información de entrada.
6. Se recomienda para próximas modelaciones realizar muestreos y análisis del suelo de los cauces para reducir los errores con respecto a la infiltración en dichas secciones.
7. Se debe modelar con WEPP eventos con diferentes características de la precipitación tales como mayores duraciones e intensidades de lluvia.
8. Se recomienda para próximos trabajos avanzar hacia GeoWEPP ya que con esta herramienta se mejoraría en gran medida la configuración de la estructura de la cuenca, por consiguiente las estimaciones de escurrimientos y sedimentos.

7. LITERATURA CITADA

- Becerra M. A. 1999. Escorrentía erosión y conservación de suelo. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Edo de México. pp: 29-52.
- Bradfor C, and H Chi-hua.1995. Splash and detachment by waterdrops. In: Agassi M., (eds). Soil erosion, conservation, and rehabilitation. pp: 61-76.
- Campos A, D. F. 2007. Estimación y aprovechamiento del escurrimiento. Primera Edición. San Luís Potosí, S.L.P., México. pp: 20-52.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2010. Monitoreo de procesos hidrológicos y erosión hídrica en el área de influencia de las cuencas de los ríos Huixtla, Huehuetan y Coatán en la costa de Chiapas. Convenio de Colaboración Específico No. SGIH-OCFS-CHS-09-TT-193-RF-CC.
- Chow V., D. R. Maidment, L. W. Mays. 1994. Hidrología aplicada. Primera edición. Editorial McGraw-Hill. Pp: 112-119.
- Domínguez C, M. A., E. Ventura. 2001. Estimating the risk of soil erosion in a semiarid watershed of Central Mexico using a geographical information system. Soil Erosion Research for the 21st Century. Proceeding International Symposium. pp: 703-706.
- Ella V, B. 2002. Testing the applicability of the WEPP model for predicting soil erosion and sediment yield in small Philippine watersheds. Paper No. 022162. Written for presentation at the 2002 ASAE Annual international Meeting. Paper Number 022162.

- Figueroa, S. B., A. A. Orozco, H. G. Cortes, J. Pimentel, E. S. Osuna, J. M. Rodríguez, F. J. Morales. 1991. Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo de México. 150 p.
- Flanagan D. C., J. E. Gilley, T. G. Franti. 2007. Water Erosion Prediction Project (WEPP): Development History, Model Capabilities, and future enhancements. Transactions of the ASABE 50: 1603-1612.
- Flanagan D. C. and S. J. Livingston. 1995. WEPP user summary. USDA-ARS. Report No.11. NSERL West Lafayette, IN, USA. Pp 4-19.
- Flanagan D. C. and M. A. Nearing. 1995. Technical documentation: USDA – Water Erosion Prediction Project (WEPP). NSERL Report No. 10. West Lafayette, IN. U.S.A. 256 p.
- Foster G, R., L. J. Lane. 1987. User requirements, USDA- water erosion prediction project (WEPP). NSERL Report No. 1, National Soil Erosion Laboratory, West Lafayette, IN. U.S. 131 p.
- Gede Z., D. C. Flanagan. 1999. Breakpoint climate data generator for WEPP using observed standard weather data sets. Center for Development and Environment, Institute of Geography. University of Bern, Bern, Switzerland. 17 p.
- Gronsten H. and A. H. Lundekvam. 2005. Prediction of surface runoff and soil loss in southeastern Norway using the Wepp hillslope model. Transaction of ELSEVIER 85:186-199.

- Guzmán E., T. B. Matamoros. 2004. Aplicación del modelo hidrológico SWAT (Soil & Water Assessment Tool) para la predicción de caudales y sedimentos en una cuenca hidrográfica caso de estudio: Cuenca del río Chaguana. *Revista Tecnológica* 17(1): 152-161.
- INEGI. 2000. Carta edafológica, D1502e, serie 1. Huixtla, escala 1:250,000. Chiapas, México.
- Jobbágy E. G. and R. B. Jackson. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Society of America* 10: 423-436.
- Larose M., J.L. Oropeza M, D. A. Norton, A. Turrent, M. Martínez M, J.L. Pedraza O., N. Francisco. 2004. Application of the WEPP model to hillside lands in the Tuxtlas, Veracruz, México. *Agrociencia* 38: 155-163.
- Larose M. 2003. Validación del modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project) en terrenos de ladera de los Tuxtlas, Veracruz. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Lal R.1990. Soil erosion in the tropics. Principles and management. Department of agronomy The Ohio State University. U.S.A.
- Lane L., J., M. A. Nearing, J. M. Laflen, G. R. Foster, and M. H. Nichols. 1992. Description of the US department of agriculture water erosion prediction project (WEPP) model. In: A.J. Parson and A.D Abrahams (eds). *Overland flow-hydraulics and erosion mechanics*. UCL Press Ltd. University College London. 438 pp.

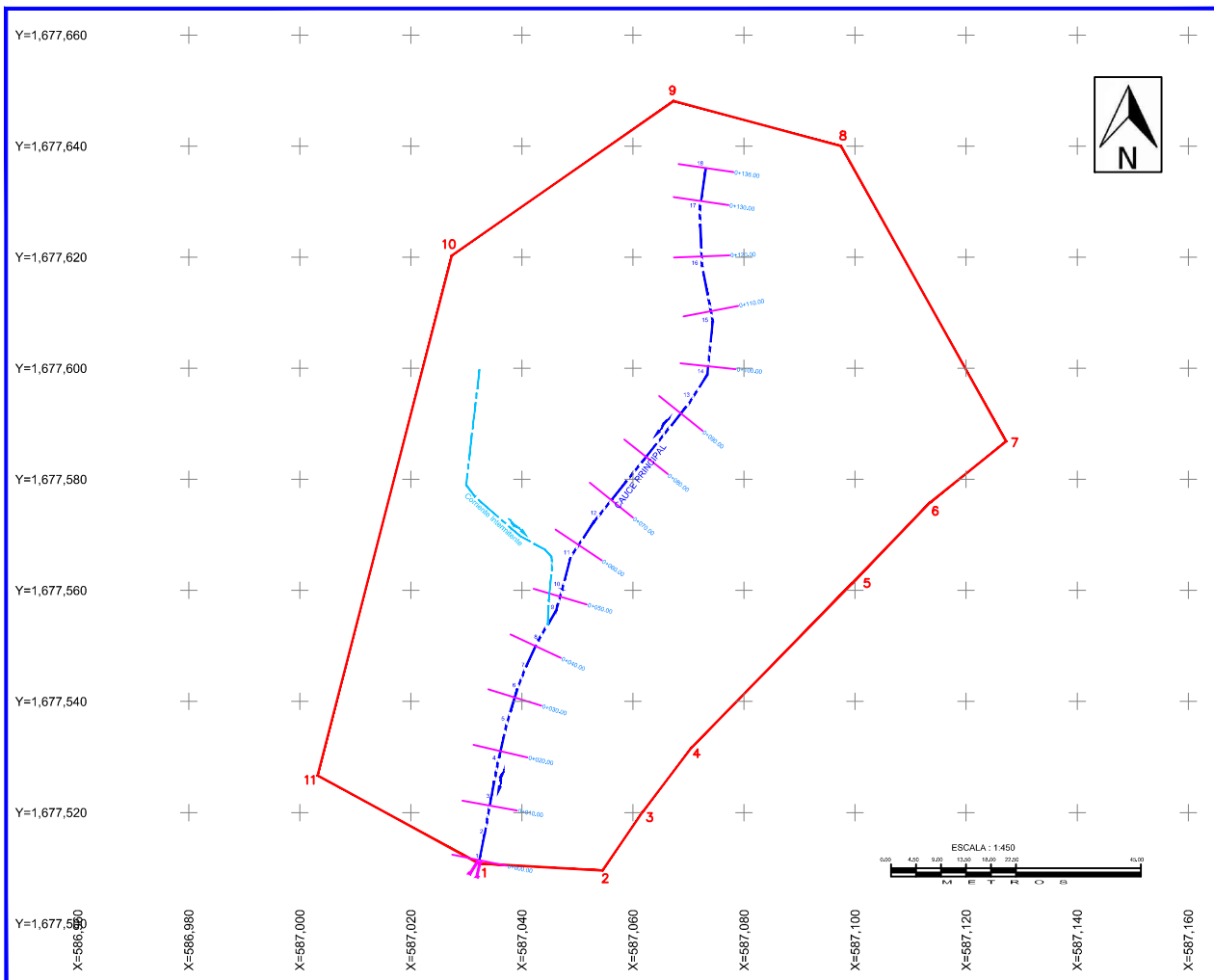
- Meyer, L. D., G. R. Forster, S. Nikolov. 1974. Effect of flow rate and canopy on rill erosion. Transactions of the ASAE. Paper No. 74 - 2035.
- Meyer, L. D., W. H. Wischmeier. 1969. Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. Transactions of ASAE 12: 754-758.
- Montgomery, R. D. 2007. Soil erosion and agricultural sustainability. Department of Earth and Space Science, University of Washington, Seattle. U.S.A. Volume 104. No.33.
- Morgan, R. P. C. 1997. Erosión y conservación del suelo. Editorial Mundi-Prensa. España.
- Nearing M., A., X. Zhang, C.B. Liu, Y. C. Baffaunt, L. M. Risse. 1995. Comparison of WEPP and RUSLE technologies for soil loss on uniform slopes. ASAE. Paper No. 95 - 2578.
- Nicks, A. D., L. J. Lane, G. A. Gander. 1995. Weather Generator In: Technical documentation. Flanagan, D. C. and M. A. Nearing (eds). NSERL West Lafayette, IN, U.S.A. Report No. 10. pp: 2.1- 2.22.
- Nearing M. A., G. R. Foster, L. J. Lane, S. C. Finkner. 1989. A process-based soil erosion model for USDA-water erosion prediction project technology. Transactions of the ASAE 32: 1587-1593.
- O'Neal, M. R., D. C. Flanagan, and C.R. Meyer. 2002. Evaluation of the WEPP model in response to changes in the CLIGEN stochastic weather generator. ASAE meeting Paper No. 02-2225.
- Oropeza, M., J. L. 2011. Curso de Conservación de Suelos y Aguas. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Edo de México.

- Pérez N, S., J. L., Arellano M., L. A., Ibáñez C., F. R., Hernández S. 2012. Estimación de la erosión hídrica provocada por el huracán Stan en las cuencas costeras de Chiapas, México. *Terra Latinoamericana* 30.
- Renard, K. G., G. R. Foster, G. A. Weesies, D. K. McCool, D. C. Yoder. 1997. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agricultural handbook # 703*. Tucson, Arizona, U.S.A: USDA-ARS Southwest Watershed Research Center. Pp: 1-152.
- Rivera T, F., S. Pérez N., L. A. Ibáñez C., F. R. Hernández S. 2012. Aplicabilidad del modelo SWAT para la estimación de la erosión hídrica en las cuencas de México. *Agrociencia* 46: 101-105.
- Rivera T, F. 2010. Aplicabilidad del modelo SWAT para la estimación de la erosión hídrica en las cuencas de México. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Chapingo. Estado de México. México. 130 p.
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2000. Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Segunda edición. Diario Oficial de la Federación. pp: 16-38.
- Singh V. P., D. A. Woolhisher. 2002. Mathematical modeling of watershed hydrology. *Jurnal of Hydrologic Engineering* 7: 4(270).
- Tapia V., L. M. 1999. Esgurrimiento y producción de sedimentos en sistemas de manejo agrícola en la Cuenca del Lago de Patzcuaro. Tesis

de doctorado. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. Pp. 80-125.

- Tengberg, A., M. Stocking, S. Falci. 1997. The impact of erosion on soil productivity-an experimental design applied in Sao Paulo State, Brazil. Department of Earth and Space Science, University of Washington, Seattle. U.S.A. Volume 79. No.1½.
- Uribe G., S., N. Nicolás F., A. Turrent F. 2002. Pérdida de suelo y nutrimentos en un entisol con prácticas de conservación en los Tuxtlas, Veracruz, México. Agrociencia 36: 161-168.
- Uribe G., M. C. Gutiérrez C., C. Tavaréz E., y A Turrent F. 2000. Caracterización y clasificación de los suelos de ladera manejados con terrazas de muro vivo en Los Tuxtlas, Veracruz, México. Agrociencia 34: 403-412.
- U.S. Environmental Protection Agency. 2012. Watershed Modeling. Distance learning modules on watershed modeling.
- Wishmeier W., H., y D. D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses. Agriculture Handbook 537. U. S. Department of Agriculture. Washington, D.C. 67 p.
- Zhang, H., C. T. Haan, D. L. Nofziger. 1990. Hydrologic modeling with gis: An Overview. ASAE 6 (4).

ANEXOS



CUADRO DE CONSTRUCCION DEL POLIGONO							
LADO EST-PV	AZIMUT	DISTANCIA (MTS.)	COORDENADAS UTM NORTE (Y)		CONVERGENCIA	FACTOR DE ESC. LINEAL	LATITUD
3-2	93°16'5.48"	22.31	587,032.23	1,677,510.84	-0°12'43.380160"	0.99969368	15°10'19.189809" N
2-3	34°24'7.89"	12.80	587,054.50	1,677,509.57	-0°12'43.574913"	0.99969373	15°10'19.145729" N
3-4	37°25'14.94"	14.56	587,061.74	1,677,520.13	-0°12'43.643399"	0.99969374	15°10'19.488692" N
4-5	44°18'48.17"	41.36	587,070.59	1,677,531.70	-0°12'43.726533"	0.99969376	15°10'19.864069" N
5-6	43°56'16.70"	20.14	587,099.48	1,677,561.29	-0°12'43.994074"	0.99969382	15°10'20.823811" N
6-7	51°11'8.28"	17.61	587,113.46	1,677,575.80	-0°12'44.123577"	0.99969385	15°10'21.294186" N
7-8	330°48'11.59"	60.88	587,127.18	1,677,586.84	-0°12'44.249198"	0.99969388	15°10'21.651791" N
8-9	285°8'45.51"	31.21	587,097.49	1,677,639.98	-0°12'44.014093"	0.99969382	15°10'23.384892" N
9-10	235°10'45.16"	48.69	587,067.36	1,677,648.14	-0°12'43.753769"	0.99969375	15°10'23.653894" N
10-11	194°29'52.09"	96.71	587,027.39	1,677,620.33	-0°12'43.389953"	0.99969367	15°10'22.753934" N
11-3	118°39'16.52"	33.10	587,003.18	1,677,526.71	-0°12'43.133008"	0.99969362	15°10'19.709823" N
AREA = 10,325.98 m ²		PERIMETRO = 399.38 m					



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA



MAPA Localización y delimitación de la microcuenca Chanjalé

ESCALA:

LA INDICADA

FECHA:

OCTUBRE DEL 2012

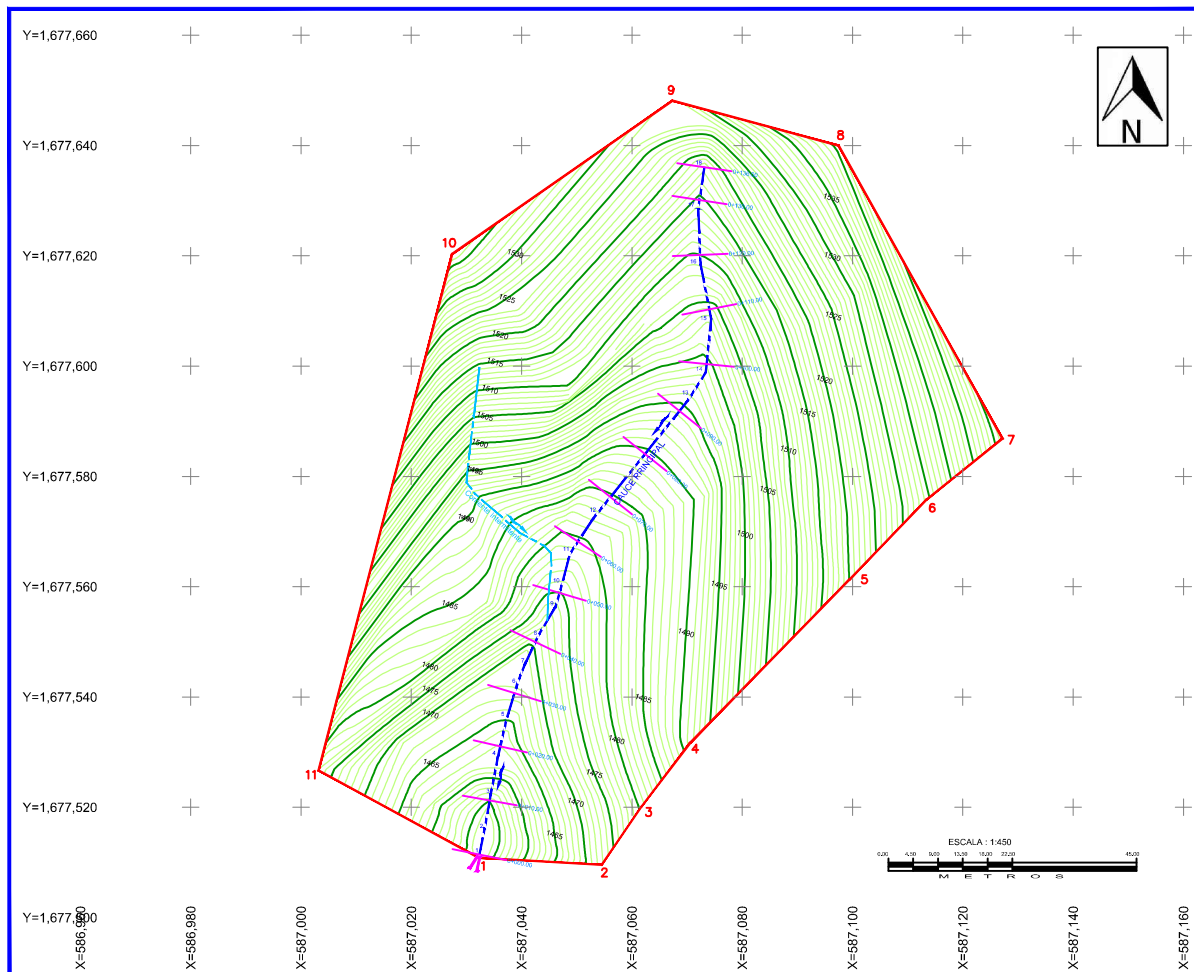
PLANO:

1 DE 4

CUADRO DE CONSTRUCCION DEL CAUCE PRINCIPAL

LADO EST-PV	AZIMUT	DISTANCIA (MTS.)	COORDENADAS UTM NORTE (Y)	
1-2	11°36'4.49"	4.71	587,032.33	1,677,511.42
2-3	10°10'31.32"	6.60	587,033.28	1,677,516.03
3-4	10°45'35.27"	6.75	587,034.44	1,677,522.53
4-5	12°53'34.26"	7.12	587,035.70	1,677,529.16
5-6	17°5'18.38"	6.76	587,037.29	1,677,536.10
6-7	21°12'51.00"	3.59	587,039.28	1,677,542.56
7-8	25°8'41.49"	5.72	587,040.58	1,677,545.91
8-9	30°44'17.99"	6.15	587,043.01	1,677,551.09
9-10	16°15'46.48"	4.01	587,046.15	1,677,556.37
10-11	14°34'20.50"	6.03	587,047.28	1,677,560.22
11-12	33°38'43.58"	7.60	587,048.79	1,677,566.06
12-13	38°43'3.63"	27.33	587,053.00	1,677,572.39
13-14	32°40'57.34"	6.07	587,070.10	1,677,593.71
14-15	05°51'56.02"	9.76	587,073.38	1,677,598.82
15-16	348°59'27.38"	10.21	587,074.38	1,677,608.53
16-17	357°39'0.17"	9.96	587,072.43	1,677,618.55
17-18	08°25'55.51"	7.64	587,072.02	1,677,628.50

LONGITUD = 136.00 m



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA



MAPA Curvas de nivel de la microcuenca Chanjalé

ESCALA:

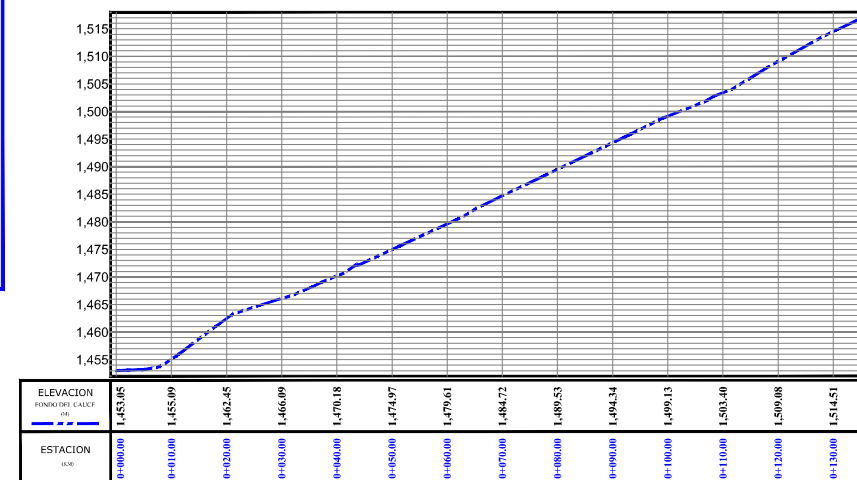
LA INDICADA

FECHA:

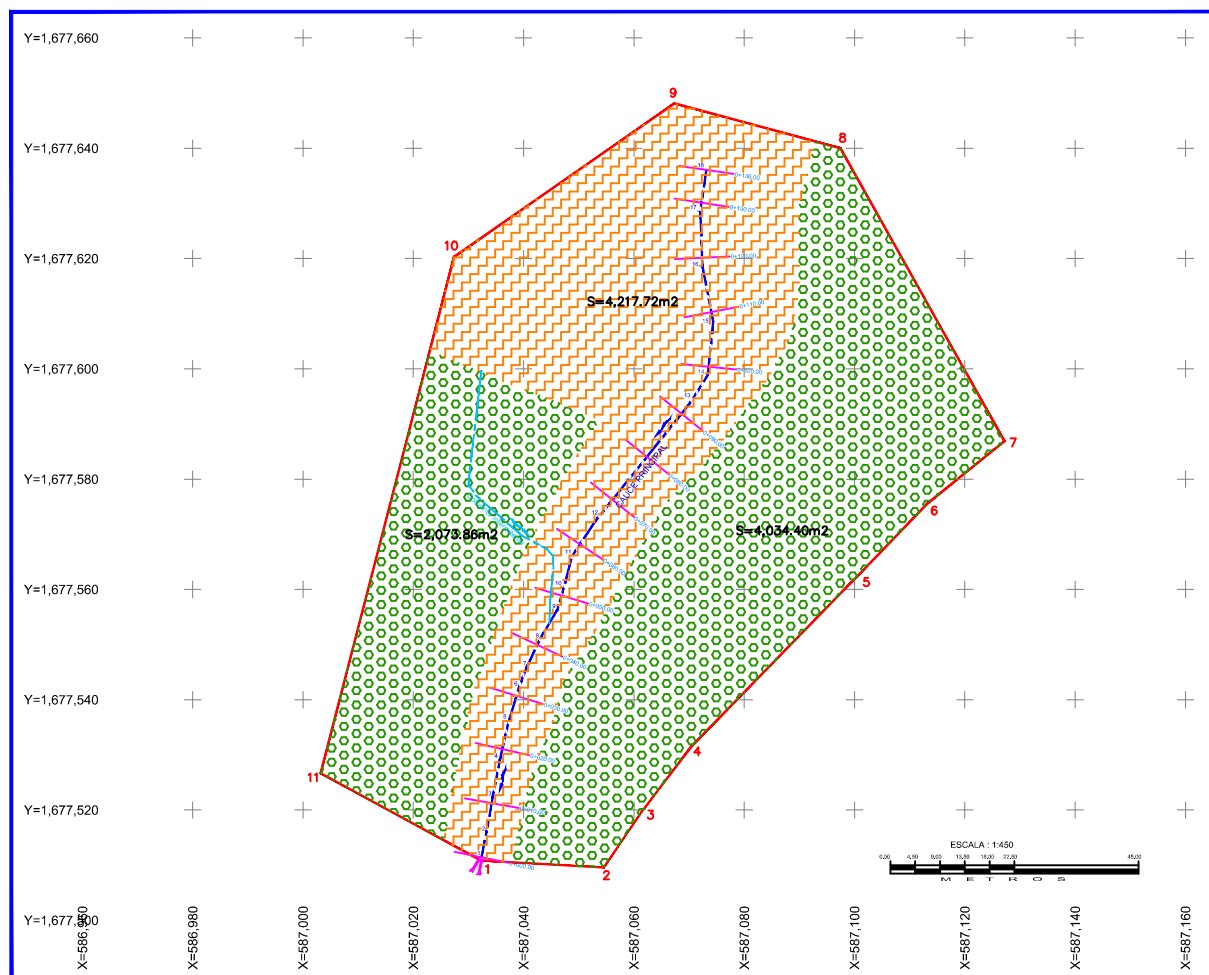
OCTUBRE DEL 2012

PLANO :

2 DE 4



PERFIL DEL CAUCE PRINCIPAL





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA



MAPA

Usos de suelo de la microcuenca Chanjalé

ESCALA:

LA INDICADA

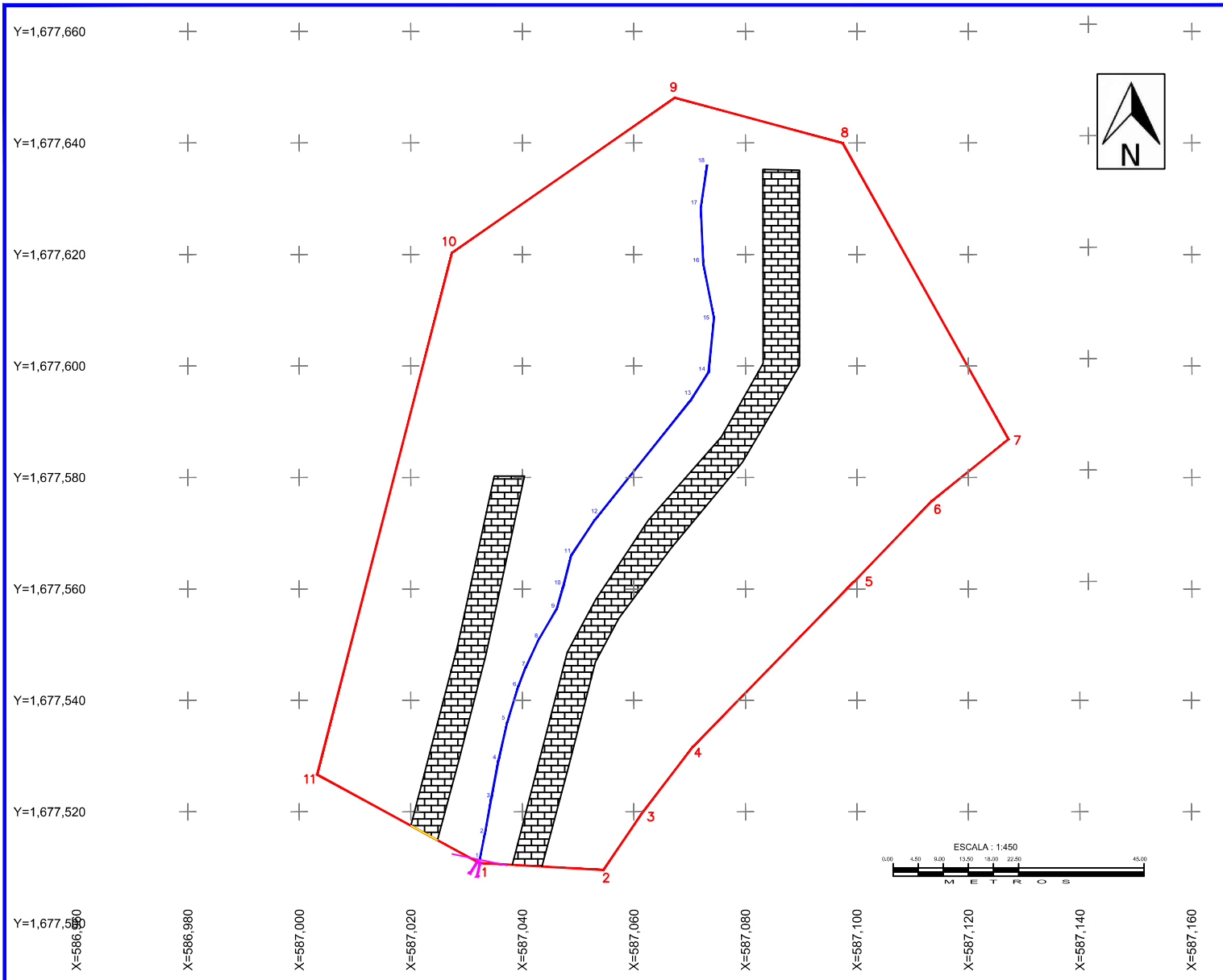
FECHA:

OCTUBRE DEL 2012

PLANO :

3 DE 4

USO DEL SUELO		SUPERFICIE
ACAHUAL		S = 4,217.72m ²
CAFE		S = 6,108.26m ²



  UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA		
MAPA Zonas de desprendimiento de suelos de la microcuenca Chanjalé		
Simbología Zonas de desprendimiento 		
ESCALA: LA INDICADA	FECHA: OCTUBRE DEL 2012	PLANO: 4 DE 4

Anexo 5. Guía rápida del usuario WEPP

El modelo WEPP está diseñado para trabajar con computadoras personales. La última versión (2010.1) se desempeña sin inconveniente con sistemas operativos Windows Vista y Windows 7 de 64 bits.

Instalación del modelo WEPP

Para los usuarios que deseen trabajar por primera ocasión el modelo es necesario descargar el programa. Como se desarrollo como resultado de un trabajo conjunto de agencias federales de investigación en conservación del suelo y el agua, es un programa gratuito y se encuentra disponible en:

(<http://topsoil.nserl.purdue.edu/nserlweb/weppmain/wepp.html>).

De igual manera en esta dirección se podrá acceder a la última versión del modelo, manuales del programa y publicaciones con respecto a diversos trabajos y experiencias.

Inicio del WEPP

Al finalizar la instalación del modelo, se instalara un acceso directo al escritorio. Para iniciar la simulación se selecciona el ícono WEPP. Esto nos direccionara a la pantalla principal del programa, y desplegara la ventana del proyecto. La ventana de inicio del permite al usuario operar el proyecto predeterminado, o acceder a modelaciones nuevas. Esta ventana también puede ser desactivada seleccionando el espacio de mensaje que se encuentra en la parte de debajo de la misma, de tal manera en próximas modelaciones no aparecerá esta opción. La ventana de trabajo permite cinco opciones de trabajo:

- 1- Utilizar un proyecto predeterminado de WEPP.
2. Crear un nuevo proyecto de laderas.
3. Abrir un proyecto de laderas existente.
4. Abrir una hoja de trabajo.
5. Abrir un proyecto de cuencas.

Como no existe ningún proyecto de modelación en el archivo, se deberá cerrar esta ventana y se dirige al ícono de archivo, posteriormente se selecciona la opción nueva cuenca.

Con esta opción, el programa direcciona a una ventana de cuencas predeterminada, formada por tres perfiles de ladera y un cauce. WEPP configura las laderas con base a su posición con respecto al cauce, estas pueden ser arriba, a la derecha o a la izquierda.

Configuración de los perfiles de laderas

Para configurar los perfiles de laderas primero se deberá tener claro la división deseada del perfil del terreno para configurarlo a WEPP. La mayor dificultad en este procedimiento es adaptar las dimensiones de la microcuenca en estudio a una configuración WEPP. Esto debido a que el modelo únicamente permite la construcción de perfiles de laderas regulares (cuadrados o rectángulos). Por lo tanto es importante tener en cuenta que muchas veces la forma del terreno no coincidirá perfectamente al realizar las divisiones de laderas en WEPP.

Siguiendo con la configuración predeterminada de la microcuenca de tres perfiles de ladera y dos cauces, se procede a ingresar la información de suelos, pendiente y manejo por cada perfil. Para ello, se selecciona dando doble clic en la ladera que se encuentra en la cabecera del cauce.

Esto abrirá la ventana principal de trabajo para el perfil de ladera No.1. Todos los perfiles se muestran de manera similar, orientados de izquierda que representa la parte alta y finaliza en la parte baja a la derecha de la pantalla. Se logran apreciar tres capas de diferentes colores, estas representan: suelo, pendiente y manejo (en orden ascendente).

Para ingresar la información correspondiente a las características de suelo, se selecciona la tercera capa, esto activa la ventana del editor de datos de suelo. En esta parte, se ingresa la información de nombre de suelo, textura, albedo; porcentaje de saturación inicial que se encuentran en la parte superior de la ventana del editor. En la parte media se ingresan los valores de erodabilidad entre canalillos (kg s m^4), erodabilidad en canalillos (s m^{-1}); esfuerzo cortante crítico (Pa) y conductividad hidráulica efectiva (mm h^{-1}). En las versiones actuales del modelo, se tiene la opción de obtener estos valores con base a cálculos del WEPP, esto facilita la modelación ya que para obtener estos valores se requiere de una cantidad importante de información.

Posteriormente se ingresan la información de cada profundidad de capas de suelo y los valores de arena (%), arcilla (%); materia orgánica (%), capacidad de intercambio catiónico ($\text{meq} / 100 \text{ g}$) y pedregosidad (%) para cada capa. Esta información se obtiene de los muestreos en campo y análisis en laboratorio.

Para guardar las modificaciones se selecciona la opción “guardar como” para que el editor agregue la información a la base de datos del modelo.

En la creación de la pendiente, se selecciona la capa localizada a la mitad del perfil de laderas. Se activará el editor de perfiles de pendiente mostrando en la

parte izquierda de la ventana el perfil de ladera y en la parte izquierda la tabla de información referente a distancia (m) ladera abajo y porcentaje de pendiente. La configuración de la información de usos de suelo y manejo es la más complicada y extensa. WEPP permite tanto nivel de detalle como usos (p.e. maíz, soya) manejo (p.e. rotación, perenne) y tipos de labranza (p.e. labranza convencional, cero labranza) o simplemente utilizar la información existente en la base de datos de manejo. Con el fin de optimizar la simulación, es recomendable trabajar sobre los archivos existentes y únicamente realizar modificaciones en base a la información disponible.

En la parte superior del editor de manejo de cultivo, se muestra el período de cultivo (p.e. enero, febrero, marzo), en la parte baja se aprecia cuatro columnas de edición (fecha, tipo de operación, nombre y comentarios).

En la columna de fecha se ingresan las fechas de cada operación, de esta manera el editor configurara la operación en la programación calendario de la parte superior. La columna de tipo de operación permite al usuario seleccionar una amplia variedad de labores como siembra, corte, control de malezas; riego, entre otras. Al seleccionar el ícono de la derecha de la opción mencionada, se activa el editor de labores, en este se ingresa la información específica para cada labor. En la columna de nombre permite realizar modificaciones con respecto al cultivo ubicado en el perfil (p.e. maíz, soya, sorgo, alfalfa etc.). Los comentarios por cada labor son opcionales para cada usuario.

Se repiten estas operaciones para la configuración de cada perfil de ladera.

Configuración de los cauces

Para esto se selecciona el cauce a trabajar y se ingresan los valores necesarios para cada factor. En el caso de suelo, pendiente y manejo se realiza el mismo procedimiento que para laderas. Para cauces la variante radica en ingresar el ancho del cauce (m) y el tipo de canal (p.e. zanja, canal de piedra, canal de tierra entre otros).

Clima

Para seleccionar el componente climático, se selecciona el ícono de sol que se encuentra en la parte superior de la ventana de trabajo.

En la ventana que surge se ingresa la información climática a simular. Para la simulación por eventos se selecciona Single-Storm. Con esta opción se activa las celdas para ingresar los valores de la tormenta. Se ingresa la fecha del evento en formato mm/dd/aaaa, duración de la tormenta (h), cantidad de la tormenta (mm), intensidad máxima en mm.h^{-1} y el tiempo de duración al máximo de la tormenta (%) es simplemente el tiempo al pico de la tormenta expresado en porcentaje.

Modelación del evento

Después de ingresar toda la información de suelo, pendiente, manejo; cauces y clima se puede iniciar la modelación del evento deseado.

Para operar el modelo WEPP se oprime el icono del círculo verde localizado en la barra de herramientas del extremo derecho.

Por lo general WEPP tarda unos pocos segundos en desarrollar la simulación, pero esto depende de la cantidad de información que sea ingresada y los perfiles de ladera.

Resultados

WEPP brinda resultados por en una tabla de valores. Expresa el volumen de descarga (m^3), producción de sedimentos (t), relación de entrega de sedimentos (adimensional) y expresa por cada perfil de ladera los valores de escurrimiento (m^3), pérdida de suelo (kg); deposición de sedimentos (kg), producción de sedimentos (kg), área, longitud (m) y ancho (m).

De igual manera refleja resultados para los cauces en volumen de descarga (m^3), producción de sedimentos (t), largo (m) y ancho del cauce (m).

De tal manera, con toda la información generada por la simulación del WEPP, se pueden obtener herramientas clave en la toma de decisión para la conservación y el manejo adecuado del recurso suelo.