



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ciencias

Impacto de la implementación de prácticas para el Manejo del Agua  
y Preservación del Suelo a nivel microcuenca de montaña.

### TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias en Recursos Hídricos y Ambiental

#### Presenta:

Ing. Rebeca Vázquez Zago

#### Dirigido por:

Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos

#### SINODALES

Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos  
Presidente

Dr. Nabil Mobayed Khodr  
Secretario

Dr. Miguel Ángel Domínguez Cortázar  
Vocal

Dr. Laura M. Norman  
Suplente

M. en C. César Augusto Granada Isazar  
Suplente

Firma

Firma

Firma

RÚBRICA

Firma

Firma

Dr. Aurelio Domínguez González  
Director de la Facultad

Dr. Irineo Torres Pacheco  
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Junio, 2013  
México

## RESUMEN

En el presente trabajo se muestra una evaluación del impacto de prácticas para el Manejo del Agua y la Preservación del Suelo (MAPS) en los procesos hidrológicos dentro de la microcuenca llamada "El Ventilador" ubicada en el municipio de Mineral de Angangueo, Michoacán.

Fue necesario elegir un sitio de estudio donde se pudieran observar prácticas de restauración de una microcuenca; por este motivo elegimos la microcuenca "El Ventilador", ya que ahí se presentó un evento meteorológico atípico que ocasiono deslaves, inundación, deforestación, erosión, etc.; gracias a este evento se realizaron prácticas dentro de la zona de desastre para el manejo del agua y preservación del suelo, como construcción de pequeñas presas y reforestación de algunas zonas.

En este caso se utilizó la herramienta AGWA (Automated Geospatial Watershed Assesment) específicamente el modelo KINEROS2 (Kinematic Runoff and Erosion Model V.2) en plataforma ArcGis para realizar la modelación hidrológica para la evaluación de la respuesta de la microcuenca de montaña "El Ventilador" a los efectos de la cobertura y uso de suelo así como de las prácticas que ahí se presenten.

Se utiliza el modelo KINEROS2 para evaluar el impacto de prácticas para el manejo del agua y preservación del suelo en el escurrimiento, gasto pico, infiltración y producción de sedimentos en la microcuenca.

Los resultados de la modelación generaron nuevos conocimientos sobre la eficiencia de las prácticas y en general de la respuesta hidrológica de las microcuencas cuando se implementan acciones para su restauración hidrológica.

(Palabras clave: KINEROS, procesos hidrológicos, prácticas)

## **SUMMARY**

In this paper we show an evaluation of the impact of the practices for water management and the soil preservation in hydrological processes in the watershed called “El Ventilador”, located in the town of Mineral de Angangueo, Michoacán.

It was necessary to choose study site where you could watch restoration practices of a watershed; which is why we chose the watershed “El Ventilador”, since there is presented an unusual weather event that caused that caused landslides, floods, deforestation, erosion, etc.. And thanks to this event were held practices for water management and soil conservation.

In this case we used the tool AGWA (Automated Geospatial Watershed Assessment) model specifically KINEROS (Kinematic Runoff and Erosion Model) in ArcGIS platform for hydrological modeling to assess the response of the watershed to the effects of coverage and use of soil and of the practices that occur there.

Models are used to assess the impact of management practices for water and soil conservation in runoff, peak flow, infiltration, and sediment production of mountain watershed scale.

The modeling results generated new knowledge into the efficiency of general practice and the hydrological response of watersheds when implemented for hydrologic restoration actions.

(Keywords: KINEROS, hydrological processes, practices)

**A mi familia  
(Celso, Elvira, Celso Carlos y Elizabeth)**

Por siempre estar a mi lado.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco la colaboración y guía del Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos en la realización de este trabajo, también la revisión de los doctores y maestros Nabil Mobayed Khodr, Miguel Ángel Domínguez Cortázar, César Augusto Granada Isazar y Laura M. Norman

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico durante el posgrado.

Gracias a la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) y a la Facultad de Ingeniería.

Agradezco a mis padres y hermanos por estar siempre apoyándome en cualquier situación, en especial a mi papá Celso Vázquez por interesarse mucho en el trabajo que realicé, y también a mi novio por ayudarme en el proceso de elaboración de tesis.

# ÍNDICE

	Página
<b>RESUMEN</b> .....	<b>i</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>ii</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>iv</b>
<b>I. INTRODUCCION</b> .....	<b>1</b>
OBJETIVOS E HIPÓTESIS .....	3
<b>II. REVISION DE LITERATURA</b> .....	<b>4</b>
2.1 Antecedentes.....	4
2.1.1 Microcuenca “El Ventilador” .....	4
2.2 Terminología.....	5
2.3 Modelo.....	8
2.3.1 AGWA-KINEROS2.....	8
2.3.1.1 Elementos del modelo .....	10
2.3.1.2 Procesos de la herramienta KINEROS2.....	12
<b>III. METODOLOGIA</b> .....	<b>15</b>
3.1 Descripción del área de estudio.....	15
3.1.1 Localización .....	15
3.1.2 Morfometría.....	16
3.1.3 Fisiografía .....	19
3.1.4 Topografía.....	21
3.1.5 Hidrología.....	23
3.1.6 Geología.....	23
3.1.7 Edafología.....	26
3.1.8 Uso de suelo y Vegetación.....	27
3.1.8.1 Bosques.....	29
3.1.8.2. Agricultura y pastizales.....	31
3.1.8.3. Vegetación secundaria .....	32
3.1.8.4. Otros usos de suelo y vegetación.....	33
3.1.9 Practicas de Manejo de Agua y Preservación de Suelo (MAPS) .....	34
3.1.9.1 Reforestación .....	34
3.1.9.2 Presas .....	37
3.1.9.2.1 Presas de Geocostales .....	37

3.1.9.2.2 Presas de Piedra Acomodada .....	38
3.1.9.2.3 Presas de Mampostería .....	39
3.1.9.2.4 Presas de Gaviones .....	40
3.2 Requerimientos de datos y capas de información para el modelo KINEROS2 .....	42
3.2.1 Tablas de datos.....	43
3.2.2 Capas de información geo-referenciada .....	44
3.2.2.1 Digitalización de las capas de información .....	45
3.2.2.2 Extracción de capas de información de CONABIO .....	45
3.2.2.3 Modelo digital de elevaciones (DEM) .....	45
3.2.2.4 Cobertura de suelo .....	46
3.2.2.5 Edafología .....	47
3.3 Implementación del modelo KINEROS2 (Modelación hidrológica) .....	47
3.3.1 Delimitación de la microcuenca.....	48
3.3.2 Parametrización con la cobertura y tipo de suelo.....	49
3.3.3 Generación del archivo de precipitación .....	50
3.3.4 Generación de archivos de entrada y corrida del programa .....	50
3.3.5 Despliegue de resultados.....	51
<b>VI. RESULTADOS Y DISCUSION .....</b>	<b>53</b>
4.1 Resultados.....	53
4.1.1 Ejecución del modelo sin prácticas MAPS .....	53
4.1.2 Ejecución del modelo con prácticas MAPS.....	56
4.2 Comparativo de modelación con y sin prácticas MAPS.....	59
<b>V. CONCLUSIONES Y RRECOMENDACIONES .....</b>	<b>63</b>
5.1 Recomendaciones .....	63
5.2 Conclusiones .....	63
<b>LITERATURA CITADA.....</b>	<b>65</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro</b>	<b>Página</b>
<b>3.1.</b> Características morfológicas de la microcuenca “El Ventilador” .....	17
<b>3.2.</b> Clasificación de las pendientes presentes en la microcuenca El Ventilador, con base en la propuesta de clasificación de Hubp (1989).....	22
<b>3.3.</b> Unidades Geológicas presentes en la microcuenca “El Ventilador” .....	26
<b>3.4.</b> Unidades Edafológicas presentes en la microcuenca “El Ventilador” .....	27
<b>3.5.</b> Uso de suelo y vegetación presente en la microcuenca “El Ventilador” .....	28
<b>3.6.</b> Listado de las tablas requeridas por KINEROS .....	44
<b>3.7.</b> Descripción de las tablas primarias de datos .....	44
<b>3.8.</b> Capas de información requeridas para la ejecución del modelo KINEROS .....	45
<b>4.1</b> Resultados de procesos hidrológicos sin prácticas MAPS en la microcuenca “El Ventilador” .....	53
<b>4.2</b> Resultados de procesos hidrológicos con prácticas MAPS en la microcuenca “El Ventilador” .....	56
<b>4.3</b> Resultados de la unidad de escurrimiento No. 1 con y sin prácticas MAPS en la microcuenca “El Ventilador”. .....	60
<b>4.4</b> Resultados de la unidad de escurrimiento No. 6 con y sin prácticas MAPS en la microcuenca “El Ventilador”. .....	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
3.1. Microcuencas de aporte a la población de Mineral de Angangueo, Michoacán.....	15
3.2. Mapa de localización de la microcuenca “El Ventilador”.....	16
3.3. Mapa de morfometría de la microcuenca “El Ventilador”.....	17
3.4. Curva Hipsométrica de la microcuenca “El Ventilador”.....	18
3.5. Perfil del cauce principal de la microcuenca “El Ventilador”.....	19
3.6. Mapa de fisiografía de la zona donde se ubica la microcuenca “El Ventilador”.....	20
3.7. Modelo Digital de Elevaciones de la microcuenca “El Ventilador”.....	21
3.8. Mapa de pendientes de la microcuenca “El Ventilador”.....	22
3.9. Mapa que muestra la Región, Cuenca y Subcuenca hidrológica.....	23
3.10. Mapa de Geología de la microcuenca “El Ventilador”.....	25
3.11. Mapa de edafología de la microcuenca “El Ventilador”.....	26
3.12. Mapa de uso de suelo y vegetación de la microcuenca “El Ventilador”.....	29
3.13. Área reforestada en la microcuenca “El Ventilador”.....	36
3.14. Ubicación de presas de geocostales, gavión, mampostería y piedra acomodada en la microcuenca “El Ventilador”.....	42
3.15. Estructura de organización de los directorios requerido por el modelo AGWA.....	43
3.16. Tabla de vista de vegetación NALC del modelo AGWA Fuente (Burns et al., 2004).....	46
3.17. Mapa que muestra las unidades de escurrimiento obtenidas con el modelo KINEROS2 de la microcuenca “El Ventilador”.....	49
3.18. Diagrama de flujo del procedimiento de ejecución de KINEROS2.....	52
4.1. Resultados de infiltración sin prácticas MAPS en la microcuenca “El Ventilador”.....	54
4.2. Resultados de escurrimiento sin prácticas MAPS en la microcuenca “El Ventilador”.....	54
4.3. Resultados de producción de sedimentos sin prácticas MAPS en la microcuenca “El Ventilador”.....	55

<b>4.4.</b> Resultados de gasto pico sin prácticas MAPS en la microcuenca “El Ventilador” .....	55
<b>4.5.</b> Resultados de infiltración con prácticas MAPS en la microcuenca “El Ventilador” .....	57
<b>4.6.</b> Resultados de escurrimiento con prácticas MAPS en la microcuenca “El Ventilador” .....	57
<b>4.7.</b> Resultados de producción de sedimentos con prácticas MAPS en la microcuenca “El Ventilador” .....	58
<b>4.8.</b> Resultados de gasto pico con prácticas MAPS en la microcuenca “El Ventilador” .....	58
<b>4.9.</b> Mapa que muestra las unidades de escurrimiento con el área reforestada obtenidas con el modelo KINEROS2 de la microcuenca “El Ventilador” .....	59
<b>4.10.</b> (A) Infiltración total en mm, (B) Escurrimiento total en mm, (C) Producción de sedimentos total en ton/ha y (D) Gasto pico total en m <sup>3</sup> /s, para las unidades de escurrimiento 1 y 6 con y sin prácticas MAPS. ....	61

## ÍNDICE DE IMÁGENES

<b>Imagen</b>	<b>Página</b>
<b>3.1.</b> Bosque de oyamel.....	30
<b>3.2.</b> Bosque de pino .....	31
<b>3.3.</b> Área dedicada a la agricultura de temporal y zona con pastizal inducido .....	32
<b>3.4.</b> Vegetación secundaria arbustiva y herbácea en asociación con pastizales inducidos .....	33
<b>3.5.</b> Áreas sin vegetación aparente .....	34
<b>3.6.</b> Plántula de pino para reforestar un predio dañado. ....	35
<b>3.7.</b> Vista de una Presa de Geocostales implementada en un cauce de primer orden de la microcuenca “El Ventilador”. ....	38
<b>3.8.</b> Presa de piedra acomodada, implementada en un cauce de primer orden de la microcuenca “El Ventilador”. ....	39
<b>3.9.</b> Vista de una Presa de Mampostería, construida sobre el cauce 1 en la microcuenca “El Ventilador”. ....	40
<b>3.10.</b> Vista frontal de una Presa de Gavión, implementada en un cauce de segundo orden en la microcuenca “El Ventilador”.....	41

## I. INTRODUCCION

Al igual que en el resto del mundo, en México los recursos naturales enfrentan una situación difícil, en particular el recurso suelo. En muchas partes presenta procesos de degradación que inician con la pérdida de cubierta vegetal ocasionada por muy diversos factores económicos y sociales, y que continua con su erosión, la pérdida de fertilidad, la compactación, lo que afecta de manera importante la disponibilidad y calidad del agua y en ocasiones la seguridad humana debido a derrumbes, inundaciones y otros fenómenos (Cardoza et al., 2007).

La combinación de la presencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos en cuencas con condiciones degradadas del suelo y la vegetación causan daños considerables sobre todo en zonas de montaña, por lo que se requiere de la implementación de acciones para la regulación hidrológica y la restauración de cuencas.

La sociedad mexicana tiene el compromiso de participar en la conservación del recurso suelo y podemos hacerlo desde dos frentes: uno de ellos es previniendo su degradación, conservando la vegetación que los protege, y el segundo, frenando y revirtiendo los procesos de degradación ya presentes (Cardoza et al., 2007).

Las consecuencias de la deforestación y de la degradación del suelo forestal son: la erosión y sedimentación en lagos, ríos y lagunas; la disminución en la captación de agua y recarga de mantos acuíferos; las inundaciones; la reducción del potencial productivo por la pérdida paulatina de fertilidad de suelos, y los impactos negativos en la biodiversidad, cuyos efectos resultantes son la pobreza y migración de la población rural (Cardoza et al., 2007).

La implementación de prácticas para el buen manejo del agua y la preservación del suelo requiere de una inversión costosa en tiempo y recursos económicos, por lo que evaluar el impacto en las variables hidrológicas de interés de forma previa ayudaría a tomar decisiones más adecuadas.

Los trabajos de protección, conservación y restauración de suelos se han realizado principalmente en áreas forestales de ejidos y comunidades donde participan mujeres y hombres, jóvenes y adultos, quienes han entendido la utilidad de este tipo de obras y prácticas para conservar sus suelos, adaptadas a las condiciones naturales, sociales y económicas para resolver los problemas que se presentan en cada lugar, de tal manera que la gente las asimile y las haga suyas, proceso que ya se ha venido dando por lo que se puede considerar que tienen sentido humano y pueden con el tiempo, formar parte de su cultura con respecto al uso y conservación del recurso suelo (Cardoza et al., 2007).

Estas acciones requieren del conocimiento del impacto de la implementación de prácticas para el manejo del agua y la preservación de suelo (MAPS) en las variables de escurrimiento, infiltración y producción de sedimentos. Solo de esta manera se puede evaluar la eficiencia de las mismas y para esto se requiere del monitoreo de éstas. Sin embargo, realizar estas no son del todo fáciles por lo que el uso de modelos se hace necesario.

En este trabajo se utiliza el modelo KINEROS2 para evaluar el impacto de prácticas para el manejo del agua y la preservación del suelo en el escurrimiento, infiltración y producción de sedimentos a nivel de microcuenca. Los resultados de la modelación serán comparados con mediciones de campo que permitirán validar los modelos y generar nuevo conocimiento sobre la eficiencia de las prácticas y en general de la respuesta hidrológica de las microcuencas cuando se implementan acciones para su restauración hidrológica ambiental.

## OBJETIVOS E HIPÓTESIS

### *Objetivo general*

Evaluar el impacto de la implementación de prácticas para el manejo de agua y preservación de suelo en la microcuenca “El Ventilador” de aporte a la población de Mineral de Angangueo, Michoacán.

### *Objetivos específicos*

- ✓ Caracterizar biofísicamente la microcuenca “El Ventilador”.
- ✓ Verificar la ubicación y características de las presas de geocostales, piedra acomodada, mampostería y gaviones así como la reforestación con oyamel y/o pino dentro de la microcuenca “El Ventilador”.
- ✓ Generar la información necesaria para la implementación del modelo KINEROS2.
- ✓ Realizar la modelación hidrológica de la microcuenca “El Ventilador” para evaluar los resultados de escurrimiento, gasto pico, infiltración y producción de sedimentos con y sin prácticas de Manejo de Agua y Preservación de Suelo (MAPS).

### *Hipótesis*

- ✓ La implementación de presas de mampostería, gaviones, piedra acomodada y geocostales, así como de reforestación con oyamel y/o pino en la microcuenca “El Ventilador” de aporte a la población de Mineral de Angangueo, Michoacán, disminuye el escurrimiento, la erosión y la producción de sedimentos en la microcuenca.
- ✓ El modelo KINEROS2 permite evaluar el impacto de prácticas MAPS en las condiciones de estudio así como dar bases para el diseño de prácticas de manejo de agua y preservación de suelo.

## II. REVISION DE LITERATURA

### 2.1 Antecedentes

La importancia de la aplicación de trabajos con enfoque de cuencas radica en que se pueden cuantificar y evaluar los efectos de las diferentes actividades del hombre tales como: erosión, sedimentación, escurrimiento e infiltración. Es vital considerar que el agua es el elemento unificador de la cuenca; muchos de los fenómenos que se cuantifican en ella, tienen que ver con el fenómeno hídrico (Cardoza et al., 2007).

#### 2.1.1 Microcuenca “El Ventilador”

Como ejemplo de un sitio en donde se han implementado prácticas para el manejo del agua y conservación del suelo, es la microcuenca “El Ventilador”, ubicada en el municipio de Mineral de Angangueo, Michoacán.

En febrero del año 2010, en varios municipios del estado de Michoacán, entre ellos Mineral de Angangueo, se presentó un evento meteorológico atípico, el cual fue declarado desastre natural; ya que hubo pérdida de vidas humanas y severos daños, dejando semidestruida la zona urbana del poblado (Aguilar et al., 2010).

La parte alta de la cuenca del río “Mineral de Angangueo” representa más del 70% del área total de drenaje de la misma y tiene el potencial de aportar volúmenes considerables de flujo superficial que transita por el cauce que cruza la zona urbana del poblado del mismo nombre. Por esta razón las acciones de restauración hidrológica se enfocaron a estas zonas de aporte, y la planificación y gestión integral de la microcuenca del poblado de Mineral de Angangueo fueron consideradas como prioritarias, estableciendo las medidas de control,

protección y mitigación de daños por efecto de escurrimientos, sedimentos y arrastre de materiales (CONAGUA, 2010).

Como parte de las acciones necesarias para la restauración de la microcuenca se realizaron un estudio hidrológico, de erosión y sedimentación, riesgo de deslizamiento y se elaboró el plan de acción para cumplir con el objetivo de llevar a cabo la implementación de prácticas de regulación hídrica para el control y corrección de cauces torrenciales en sus diferentes modalidades, para así disminuir la velocidad de las corrientes de agua y controlar las crecidas súbitas donde se manifiestan los fenómenos de erosión, transporte y depósito de materiales de arrastre (CONAGUA, 2010).

Para este trabajo se realizó un estudio del impacto de la implementación de prácticas para el manejo del agua y la preservación del suelo en el escurrimiento, infiltración y producción de sedimentos a nivel microcuenca, específicamente en la microcuenca “El Ventilador” tomando como base las acciones de construcción de presas pequeñas y reforestación que se realizaron para la restauración de dicha microcuenca.

## **2.2 Terminología**

Definiendo algunos términos que se utilizaran en el estudio entendemos por hidrología a la ciencia natural que estudia el agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo los seres vivos. En ingeniería es utilizada principalmente en relación con el diseño y ejercicio de estructuras hidráulicas. La hidrología es la base para resolver problemas prácticos de inundaciones y sequías, erosión y transporte de sedimentos y contaminantes de agua (Linsley *et al.*, 1977; Aparicio, 2007).

Una cuenca es toda área drenada por una corriente o sistema de corrientes, cuya agua confluye a un punto de salida (Cardoza et al., 2007).

Existen 2 tipos de cuencas; la cuenca hidrográfica es un área fisiográfica delimitada por una línea divisoria conocida como “parteaguas” que une los puntos de mayor elevación del relieve, en donde fluyen corrientes superficiales de agua que desembocan en ríos, lagos, presas o al mar. Está definida por sistemas topográficos. El otro tipo de cuenca es la hidrológica la cual es un área fisiográfica delimitada por un “parteaguas” que contiene una corriente o un sistema de corrientes hídricas superficiales y toda la estructura hidrogeológica subterránea como una sola unidad. Está definida por la disposición y colocación de las capas geológicas, los límites geológicos de la cuenca pueden ser mayores a los de los topográficos y el agua interceptada en una cuenca puede fluir a otra cuenca vecina (Cardoza et al., 2007).

La definición de cuenca no establece límites en cuanto a la extensión de su superficie, por lo que con base en su tamaño puede recibir denominaciones tales como: subcuenca, cuenca mayor o menor, microcuenca, entre otras (Cardoza et al., 2007).

Los modelos hidrológicos son una representación simplificada de los sistemas reales y su objetivo es estudiar la operación de los sistemas y predecir su respuesta (Chow *et al.*, 1988). El objetivo de un modelo hidrológico entonces es determinar los componentes del ciclo del agua en una cuenca o región y evaluar su comportamiento espacialmente, en términos cualitativos y cuantitativos. Los componentes más importantes de los modelos hidrológicos son: precipitación, infiltración, escurrimiento, erosión y producción de sedimentos.

Por intercepción se entiende a la parte de la lluvia, que cae sobre una superficie vegetativa, que es retenida o colectada por el follaje; ésta cantidad de

lluvia no alcanza a la superficie del suelo y no contribuye a la infiltración o al escurrimiento.

La infiltración se define como el movimiento del agua, a través de la superficie del suelo hacia adentro del mismo, producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares, es el proceso en el cual el agua es absorbida por el suelo. La cantidad y velocidad de agua infiltrada en el perfil del suelo depende del tipo de suelo, del contenido de humedad de la zona y su profundidad. El proceso de infiltración es de gran importancia ya que su velocidad determina generalmente la cantidad de agua que escurre durante inundaciones o lluvias de intensidades fuertes. La infiltración se correlaciona con las propiedades del suelo y con el aporte de agua al sistema hidrológico. (Schwab *et al.*, 1990; Aparicio, 2007).

El escurrimiento se define como el agua que proviene de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca, es la parte de la precipitación que en forma de corriente superficial o subterránea se abre camino hacia arroyos, lagos u océanos. Los factores que influyen en la escorrentía son: factores climáticos (cantidad de precipitación, duración de la precipitación, humedad antecedente), factores fisiográficos (área, permeabilidad), factores humanos (obras hidráulicas, rectificación de ríos), factores hidrológicos (tamaño, forma, orientación, topografía y geología del suelo y el tipo de cultivo). Las principales características que determinan la cantidad de escurrimiento son: gasto específico, gastos máximos, medios y mínimos, coeficiente de escurrimiento y tiempo de concentración (Schwab *et al.*, 1990; Monsalve, 1999; Aparicio, 2007).

Para definir la erosión y producción de sedimentos se sabe que el suelo es removido constantemente de la superficie de la tierra y transportado aguas abajo por los ríos hasta que se deposita finalmente en los lagos, estuarios y océanos.

Dado que el agua es uno de los principales agentes de la erosión y el vehículo de transporte del material erodado, este proceso es de gran interés para la hidrología. El interés principal en hidrología son las tasas de transporte y las tasas de deposición en embalses, puertos y estuarios, así como los medios para controlar en los sitios donde se producen, tanto para conservar el suelo en su sitio, como para minimizar la acumulación en embalses y puertos (Linsley *et al*, 1977).

## **2.3 Modelo**

Para la obtención del escurrimiento, gasto pico, infiltración y producciones de sedimentos de la microcuenca “El Ventilador”, con y sin prácticas de restauración como construcción de presas pequeñas de geocostales, piedra acomodada, mampostería y gaviones y reforestación con oyamel y/o pino, se utilizó la herramienta AQWA-KINEROS2.

### **2.3.1 AGWA-KINEROS2**

AGWA (Automated Geospatial Watershed Assesment) es una herramienta que está diseñada para utilizar grupos de datos espaciales en plataforma ArcGis. Los componentes claves de la herramienta AQWA son los modelos hidrológicos que ésta utiliza para evaluar la respuesta de una cuenca a los efectos de la cobertura y uso de suelo. Existen dos modelos que AQWA contiene, KINEROS2 y SWAT, ambos son capaces de simular representaciones complejas de una cuenca tomando en cuenta la variabilidad espacial del suelo, la distribución de precipitaciones y la vegetación (Burns *et al.*, 2004).

Kepner *et al.*, (2004) reportan haber utilizado el programa AGWA para analizar los cambios en la cobertura vegetal de la cuenca del Río San Pedro y para la planeación de uso de suelo de la misma. Se identificó que la parte superior de la cuenca del Río San Pedro había sufrido drásticas transiciones de

una cuenca rural a una con regiones urbanas y agrícolas; lo que se vio reflejado en un aumento del volumen de escurrimiento superficial, así como en un decremento de la calidad del agua ocasionado por la tasa de erosión y producción de sedimentos. En cuanto a la evaluación del uso de suelo, Kepner *et al.*, (2004) analizaron tres diferentes escenarios basados en el incremento poblacional y en su distribución espacial hasta el año 2020; los resultados arrojaron impactos importantes en la hidrología de la cuenca, sobre todo en el volumen de escurrimiento, en la descarga de los canales, en la producción de sedimentos y en una reducción del acceso al agua superficial.

AGWA es una herramienta que discretiza la superficie de la microcuenca en unidades de escurrimiento, con base en un área de acumulación de flujo y un área de aportación definida por el usuario. Posteriormente, analiza la información de suelos de la microcuenca con base en la composición porcentual de los tipos de suelo y su textura; mientras que la información de uso de suelo, se basa en los valores de grupo hidrológico para cada tipo, como; el porcentaje de cobertura, la infiltración y el coeficiente de rugosidad de Manning (n). Trabaja por evento de lluvia. La corrida del programa genera estimaciones de las tasas de: escurrimiento ( $m^3$ ), producción de sedimentos (kg/ha), gasto pico ( $m^3/s$ ) e infiltración (mm) (Burns *et al.*, 2004).

En este caso se realizó una modelación hidrológica con el Kinematic Runoff and Erosion Model – Kineros KINEROS2 es una versión actualizada de KINEROS incorporada en AGWA; el modelo KINEROS2 requiere bases de datos más procesados; fue desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos para la evaluación del estado actual de los recursos de una microcuenca menor a 10,000 hectáreas, así como para evaluar escenarios posibles y facilitar la toma de decisiones y manejo de recursos (Goodrich *et al.*, 2002; Burns *et al.*, 2004).

Inundaciones en Ambos Nogales (Sonora, México y Arizona, USA) propiciaron la construcción de estructuras de detención en zonas específicas del canal para prevenir futuras inundaciones. L. M. Norman et al. realizaron un estudio aplicando el modelo KINEROS2 para comprender la capacidad de dichas estructuras de detención bajo escenarios distintos de inundación y urbanización. Los resultados muestran la reducción en el flujo máximo para el evento de 10 años 1 hora basado en el uso de suelo actual con estructuras de detención. Sin embargo, los resultados del modelo demuestran también que las tormentas más grandes y la creciente urbanización generará mayor presión sobre las estructuras de detención y limitará su efectividad.

KINEROS2 es un modelo de base física que describe los procesos de intercepción, infiltración, escorrentía superficial, erosión y producción de sedimentos de pequeñas cuencas agrícolas o urbanas para un evento determinado. La cuenca hidrográfica está representada por una cascada de planos y de canales; las ecuaciones diferenciales parciales que describen el flujo superficial, flujo de canal, la erosión y el transporte de sedimentos se resuelven por medio de técnicas de diferencias finitas, utiliza ecuaciones unidimensionales de la cinemática para simular el flujo en planos rectangulares y trapezoidales a través de canales abiertos, conductos circulares y pequeños estanques de detención (Burns *et al.*, 2004).

### **2.3.1.1 Elementos del modelo**

*Flujo superficial* es un plano de superficie rectangular con parámetros de entrada uniformes. Las superficies no uniformes, como áreas convergentes o divergentes, o fallas importantes en pendientes, se pueden representar mediante una cascada de flujo superficial con distintos parámetros de entrada. La topografía en las partes altas juega un papel importante en la determinación de la forma del hidrograma. Con KINEROS2 se asume que la topografía tiene una

elevación máxima, y que el área cubierta por el flujo varía linealmente con la elevación hasta el máximo (Semmens *et al.*, 2002).

*Canales* están definidos por dos trapecios en la sección transversal arriba y abajo del tramo. Los parámetros geométricos e hidrológicos pueden ser uniformes, o variados a lo largo del tramo. Si está presente, el flujo base puede ser representado como un flujo constante. Uniendo todos los canales trapecoidales se puede representar un par de canales, cada uno con sus propias características hidráulicas y filtrantes. Para cada canal, las relaciones geométricas del área transversal del flujo  $A$  y del perímetro mojado  $P$  están expresadas en términos de la misma profundidad  $h$ , donde cero corresponde al nivel más bajo del canal. Es importante señalar que el perímetro mojado no incluye la interface donde las dos secciones se unen (Semmens *et al.*, 2002).

*Presas.* La cuenca también presenta elementos de detención o almacenamiento, los cuales reciben un flujo de entrada de uno o más canales y producen un flujo de salida en una estructura no controlada. Estos elementos representan un estanque, un canal, o una estructura para la medición del almacenamiento. KINEROS2 acomoda estos elementos. Mientras el flujo de salida es únicamente en función de la profundidad del agua, la dinámica del almacenamiento se describe por la información del usuario y la ecuación de balance de masas (Semmens *et al.*, 2002):

$$\frac{dV}{dt} = q_I - q_O - A_p f_c$$

Donde  $V$  es el volumen de almacenamiento ( $L^3$ ),  $q_I$  es el flujo de entrada ( $L^3/T$ ),  $q_O$  es el flujo de salida ( $L^3/T$ ),  $A_p$  es el área superficial del estanque ( $L^2$ ) y finalmente  $f_c$  es la velocidad de infiltración en el estanque ( $L/T$ ).

La ecuación anterior se escribe en forma de diferencias finitas en intervalos de tiempo  $t$  y el tiempo  $t + \Delta t$  se determina por el método de bisección. Para fines de enrutamiento del agua, la geometría del depósito puede ser descrita como una simple relación entre  $V$ , área de la superficie, y la descarga. KINEROS2 resuelve para  $V$  en el instante  $t + \Delta t$  utilizando un método Newton-Raphson/bisección híbrido. Para una  $V$  dada, la descarga y el área se estiman utilizando interpolaciones log-log (Semmens *et al.*, 2002).

### 2.3.1.2 Procesos de la herramienta KINEROS2

El efecto de intercepción es controlado por dos parámetros: la altura de intercepción y la fracción de la superficie cubierta por la vegetación interceptada (COVER). Éste parámetro de altura de intercepción refleja la altura promedio de la lluvia retenida por un determinado tipo de vegetación o por la mezcla de varios tipos de vegetación presentes en la superficie, según se especifique.

La infiltración,  $f_c$ , es la velocidad a la que el suelo absorbe el agua (verticalmente) cuando hay una oferta ilimitada en la superficie. La tasa de infiltración,  $f$ , es igual a la lluvia,  $r(t)$ , hasta que se alcanza dicho límite. KINEROS2 utiliza el modelo de parámetros Parlange (Parlange *et al.*, 1982), en el cual los modelos de Green y Ampt (1911) y Smith y Parlange (1978) son incluidos para los dos límites. Un parámetro de escala,  $\gamma$ , es el tercer parámetro adicionado a los dos parámetros básicos  $K_s$  y a escala de la longitud capilar,  $G$ . La mayoría de los suelos presentan una infiltración media con respecto a estos dos modelos, y KINEROS2 utiliza una ponderación de  $\gamma$  con valor de 0.85. La variable para infiltración es el contenido de agua inicial, en función de la saturación del suelo,  $\Delta\theta_i$ , definida como el contenido de saturación de agua menos el contenido inicial del agua. En términos de estas variables, el modelo básico es (Semmens *et al.*, 2002):

$$f_c = K_s \left[ 1 + \frac{\gamma}{\exp\left(\frac{\gamma I}{G\Delta\theta_i}\right) - 1} \right]$$

El modelo de infiltración de KINEROS2 emplea la profundidad de infiltración aproximada donde  $f_c$  es descrita en función de la profundidad de infiltración  $I$  (Smith *et al.*, 2002).

La escorrentía se obtiene con las ecuaciones de onda cinemática de superficie y flujo del canal como:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial \alpha \cdot h^m}{\partial x} = r_1(t) - f_1(x, t)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q(A)}{\partial x} = q_1(t) - f_{c1}(x, t)$$

Donde  $h$  es la profundidad del suelo,  $t$  es el tiempo,  $x$  es la distancia a lo largo del elemento,  $\alpha$  la obtenemos por medio de  $S^{1/2}/n$  cuando se utiliza la ecuación de Manning, donde  $S$  es la pendiente, y  $n$  es el coeficiente de rugosidad de Manning,  $m$  es 5/3,  $r_1(t)$  es la tasa de lluvia en un tiempo  $t$ ,  $f_1(x, t)$  es la tasa de infiltración,  $A$  es el área transversal del canal,  $Q(A)$  es gasto de entrada del canal en función del área,  $q_1(t)$  es la entrada lateral neta por unidad de longitud en el canal y  $f_{c1}(x, t)$  es la infiltración neta por unidad de longitud en el canal. Estas ecuaciones, y las ecuaciones de erosión y transporte de sedimentos son resueltas utilizando los métodos de ecuaciones de diferencias finitas (Smith *et al.*, 1995).

KINEROS2 simula por separado la erosión causada por la energía de gotas de lluvia y la erosión causada por el agua que fluye (erosión hidráulica) (Semmens *et al.*, 2002).

La ecuación general utilizada para describir la dinámica sedimentaria en cualquier punto a lo largo de una trayectoria de flujo superficial es una ecuación de balance de masa similar a la del flujo de agua cinemática (Bennett, 1974):

$$\frac{\partial(AC_s)}{\partial t} + \frac{\partial(QC_s)}{\partial x} - e(x, t) = q_s(x, t)$$

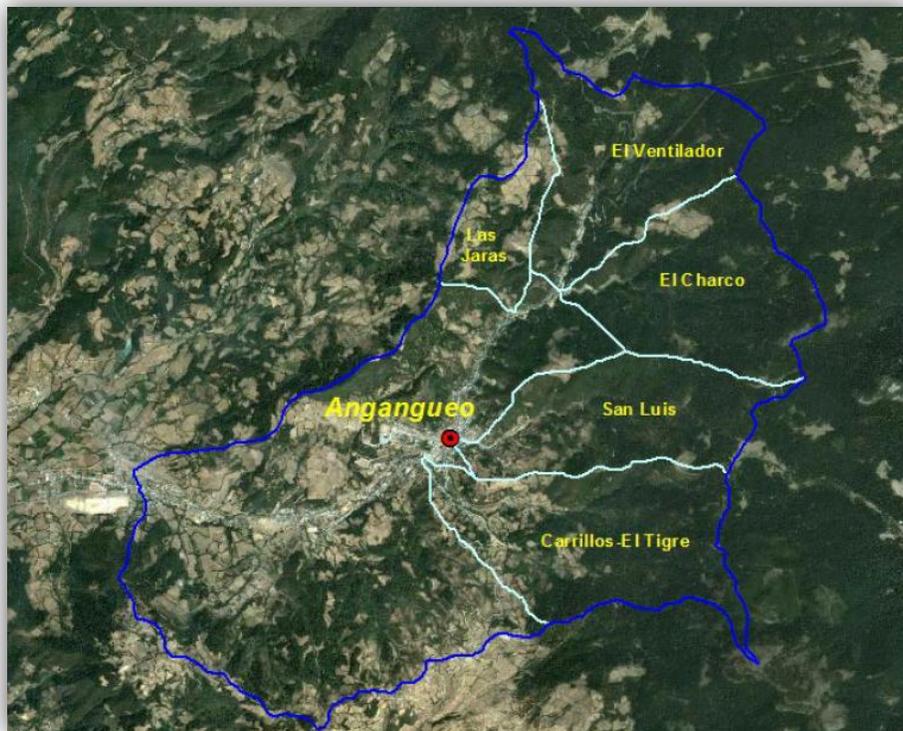
Donde  $C_s$  es la concentración de sedimentos,  $Q$  es el gasto de entrada,  $A$  es la sección transversal del área del canal,  $e$  es la velocidad de erosión del suelo y  $q_s$  es la tasa de entrada lateral de los sedimentos.

### III. METODOLOGIA

#### 3.1 Descripción del área de estudio

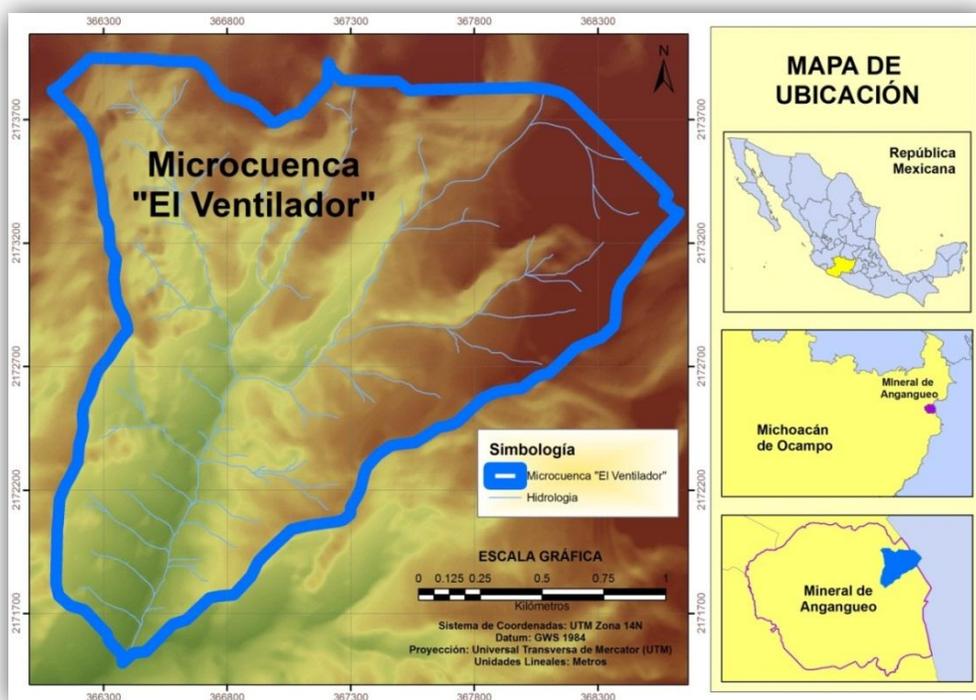
##### 3.1.1 Localización

La microcuenca "El Ventilador" se encuentra incluida en la subcuenca Mineral de Angangueo, la cual a su vez es parte de la Cuenca del Río Tuxpan. La microcuenca "El Ventilador" forma parte de un conjunto de cinco microcuencas que descargan aguas arriba de la población de Mineral de Angangueo y representan en conjunto el área de aportación hacia este núcleo de población (Figura 3.1).



**Figura 3.1.** Microcuencas de aporte a la población de Mineral de Angangueo, Michoacán.

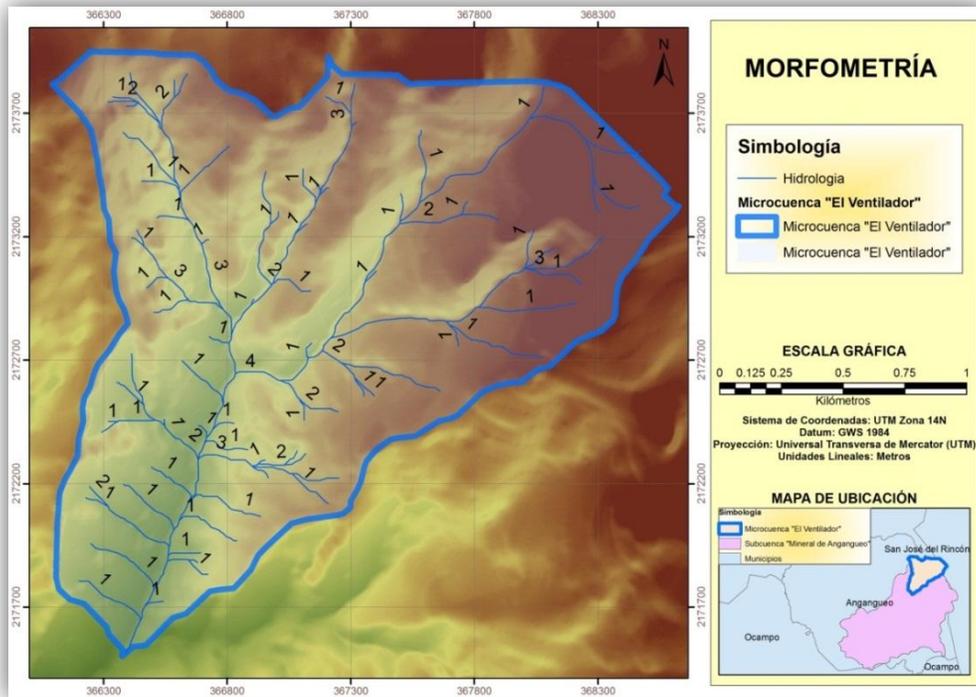
La microcuenca "El Ventilador", con una superficie de aproximadamente 362 ha, se ubica puntualmente al Noreste del municipio de Angangueo, entre las coordenadas extremas 2,174,046 Norte 2,171,553 Sur, 366,083 Oeste y 368,636 Este. Colinda al Norte con el municipio de Senguio, al Sur con el municipio de Ocampo, y al Oeste con los municipios de Aporo y Ocampo (Figura 3.2).



**Figura 3.2.** Mapa de localización de la microcuenca "El Ventilador".

### 3.1.2 Morfometría

La microcuenca "El Ventilador" es de tipo exorreica, y de acuerdo a sus parámetros morfométricos presenta una forma cónica. Su sistema de drenaje es dendrítico bifurcado y por su dimensión se considera una cuenca pequeña o microcuenca (Figura 3.3).



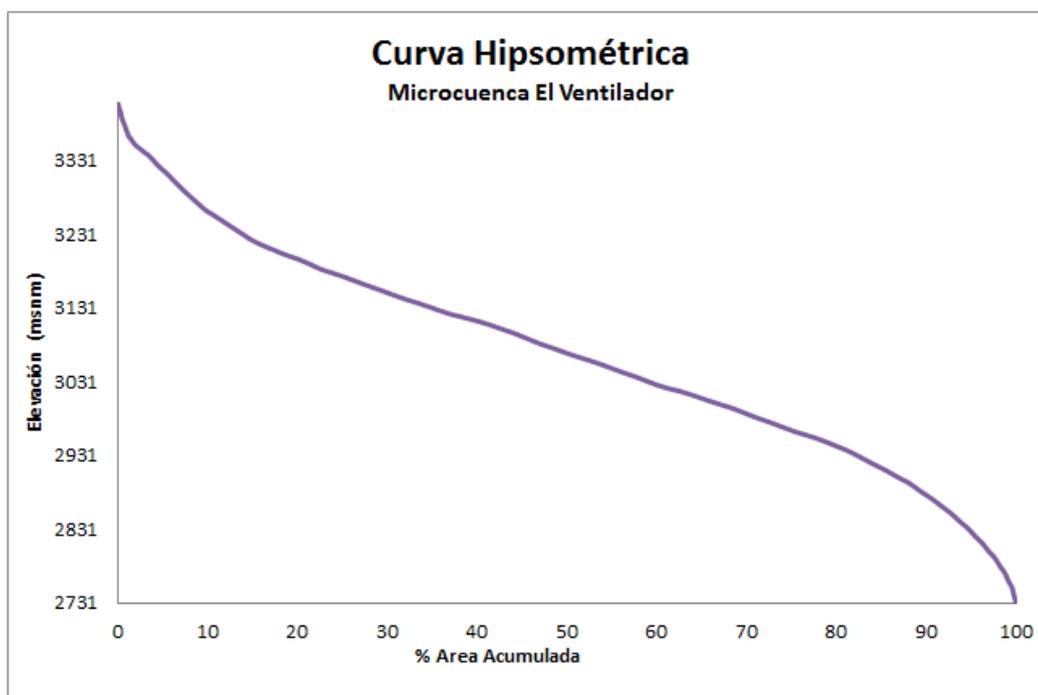
**Figura 3.3.** Mapa de morfometría de la microcuenca “El Ventilador”.

En la Cuadro 3.1 se presentan las características morfométricas más importantes.

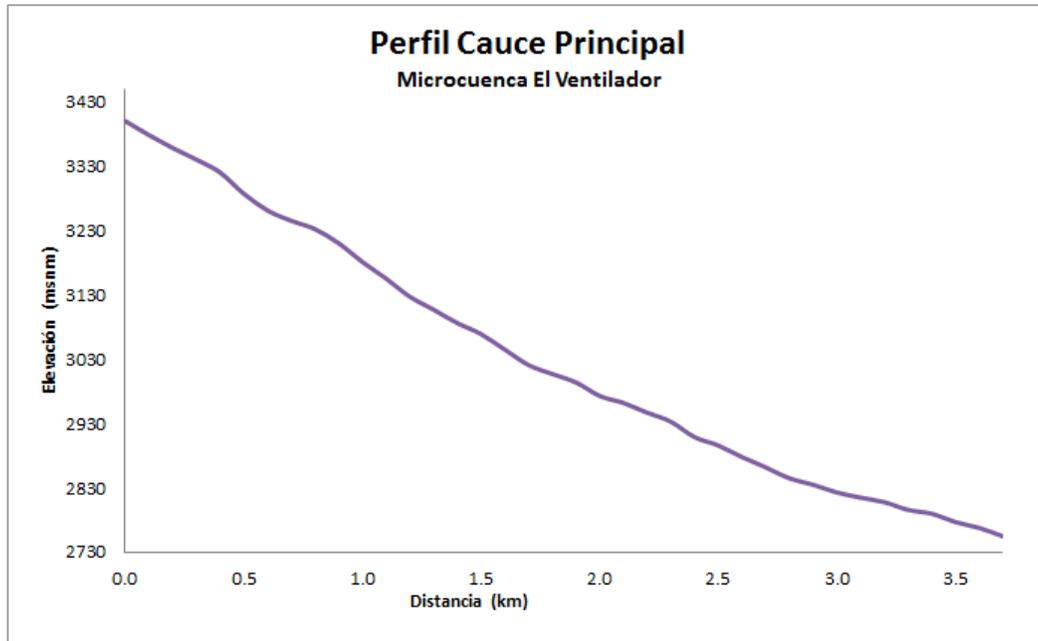
**Cuadro 3.1.** Características morfológicas de la microcuenca “El Ventilador”

Parámetros	Valores
Área (A)	362.049 ha
Perímetro (P)	8.68 km
Longitud (L)	2.88 km
Índice de forma	0.4353
Longitud del Cauce	3.646 km
Densidad de Drenaje	4.09 km/km <sup>2</sup>
Orden de Corriente	5
Pendiente Media	27° (45%)
Elevación Mínima	2731.61 m
Elevación Máxima	3410.47 m
Elevación Media	3071.04 m

A partir de las características antes descritas podemos deducir que la microcuenca se encuentra en una zona en donde el relieve topográfico es de tipo abrupto, constituido por grandes eminencias de pronunciadas pendientes por donde descienden arroyos torrenciales tributarios de los Ríos Puerco y Carrillo que se encuentran en etapa juvenil; estos ríos se unen aguas abajo a los Ríos Limpio, de la Plancha y las Trojes, para formar el río de Angangueo, que es afluente del Río Tuxpan. La topografía de la zona y la forma de la microcuenca determinan que el tiempo de respuesta hídrica sea rápido, y a pesar de que la mayoría de los afluentes son intermitentes de mediana longitud y baja densidad de drenaje, no retiene el agua ya que es drenada al exterior de la microcuenca de forma rápida, por esta razón, es recomendable realizar prácticas para la captación de agua, control de su velocidad y retención de sedimentos y rocas, así como para la conservación de humedad en laderas. De acuerdo al tipo de cuencas determinadas por la hipsometría, la microcuenca "El Ventilador", es una cuenca geológicamente madura y de montaña (Figuras 3.4 y 3.5).



**Figura 3.4.** Curva Hipsométrica de la microcuenca "El Ventilador".



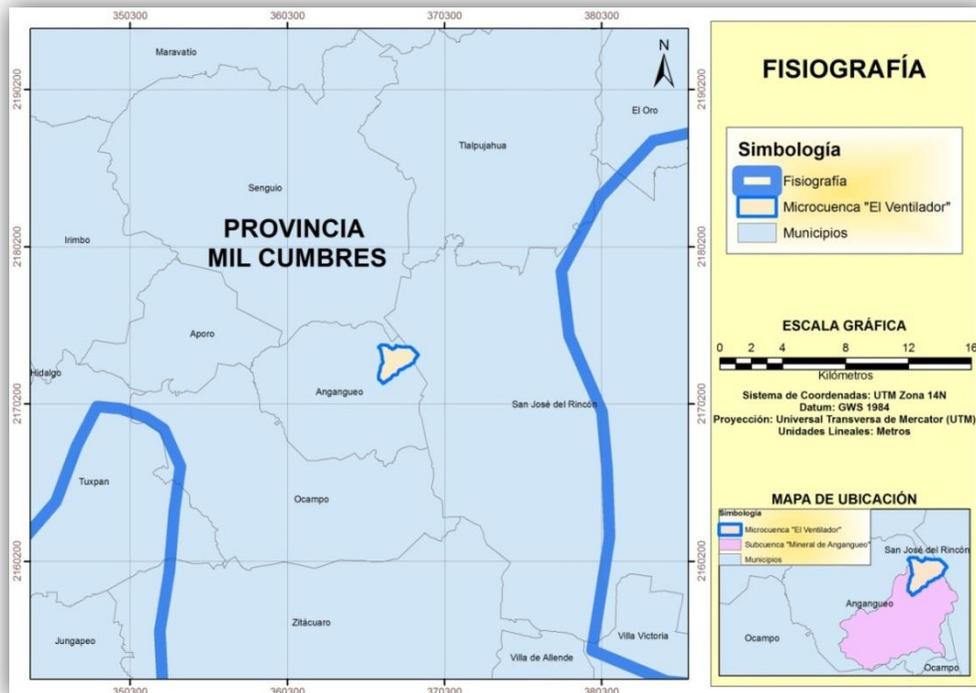
**Figura 3.5.** Perfil del cauce principal de la microcuenca “El Ventilador”.

### 3.1.3 Fisiografía

La microcuenca "El Ventilador" está ubicada dentro de la Provincia Fisiográfica del Eje Volcánico Transversal, que marca el extremo sur de la Altiplanicie Mexicana y la separa de la Depresión del Balsas. En general, a esta provincia se le puede caracterizar como una gran masa de rocas volcánicas de diversos tipos, acumulada en innumerables y sucesivos episodios volcánicos iniciados desde mediados del Terciario hasta el presente. La zona está integrada por grandes sierras volcánicas y coladas lávicas. En esta región se localiza casi la totalidad de la cuenca del Río Lerma, pues sólo quedan fuera de ella los afluentes que proceden de la Mesa del Centro.

De forma más específica la zona de estudio se localiza en su totalidad en la subprovincia Mil Cumbres (Figura 3.6). Esta subprovincia corresponde a una región accidentada y complicada por la diversidad de sus geoformas, como son: sierras volcánicas complejas, mesetas lávicas escalonadas, lomeríos basálticos y

el valle por el cual el Río Lerma, se dirige al norte, hacia la presa Solís. Esta subprovincia presenta agrestes paisajes formados por bosques de coníferas en una compleja topografía. Clima y geología condicionan la formación de suelos cuyo origen volcánico es dominante para los andosoles. En general, se puede mencionar que esta subprovincia presenta condiciones abruptas en donde las pendientes impiden una agricultura mecanizada, aunque se encuentran algunas zonas con terrenos de pendientes hasta de 15% donde se puede llevar a cabo agricultura con prácticas de terráceo o algunos otros cuidados de la tierra. En la mayor parte del terreno, sólo es posible el aprovechamiento forestal (INEGI, 1990).



**Figura 3.6.** Mapa de fisiografía de la zona donde se ubica la microcuenca “El Ventilador”.

El pueblo de Anganguero se encuentra enclavado en la cañada de San Francisco que está orientada de norte a sur y tiene una longitud de 10 km. Esta cañada se inicia en el lado sur de la altiplanicie formada en la parte superior de la

sierra; localizándose en esta los llanos denominados Las Papas con una altitud de 3,160 m y Garatachía con 3,100 msnm.

### 3.1.4 Topografía

La microcuenca "El Ventilador", cuenta con una topografía accidentada el rango de elevaciones va desde los 2,731.61 m en las partes más bajas del área de estudio, hasta los 3,410.47 m, principalmente en la parte Noreste de la microcuenca; en donde de hecho, se encuentran los rangos más altos: 3,200 a 3410.47 msnm, que se extienden hacia el Norte y Noroeste (Figura 3.7). Por lo que respecta a las pendientes, la microcuenca se caracteriza por tener predominantemente zonas de pendientes muy pronunciadas, tal como se muestra en los datos de la Cuadro 3.2 y espacialmente en la Figura 3.8.

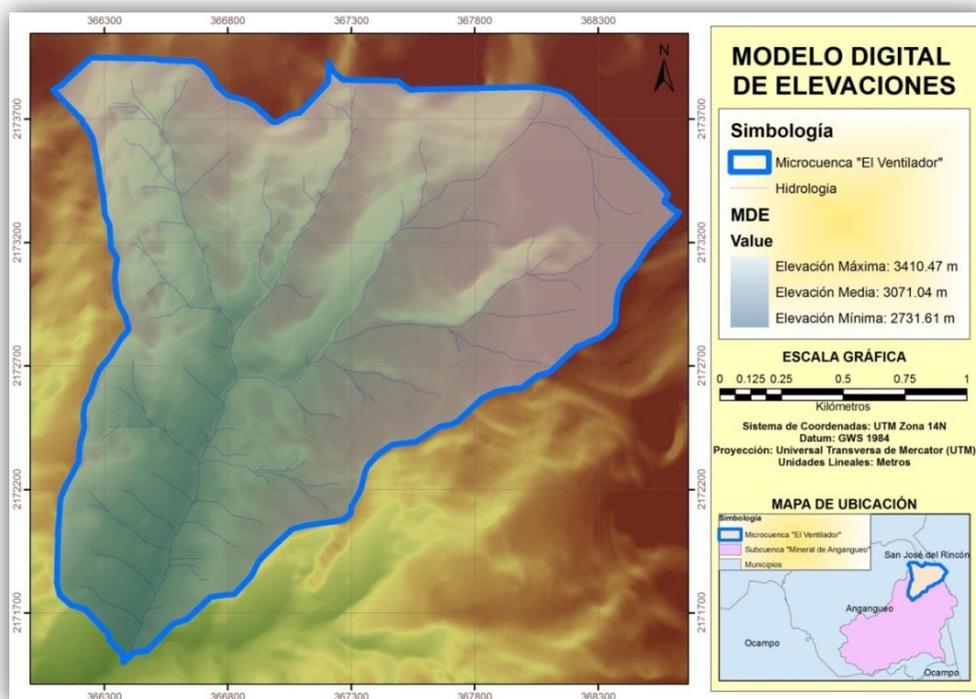
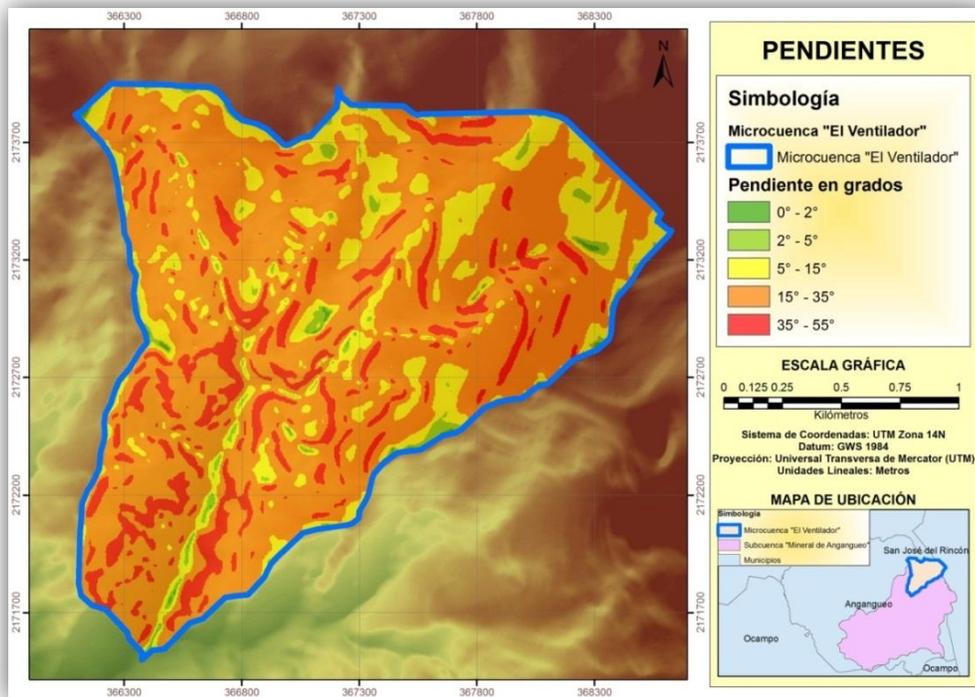


Figura 3.7. Modelo Digital de Elevaciones de la microcuenca "El Ventilador".

**Cuadro 3.2.** Clasificación de las pendientes presentes en la microcuenca El Ventilador, con base en la propuesta de clasificación de Hubp (1989).

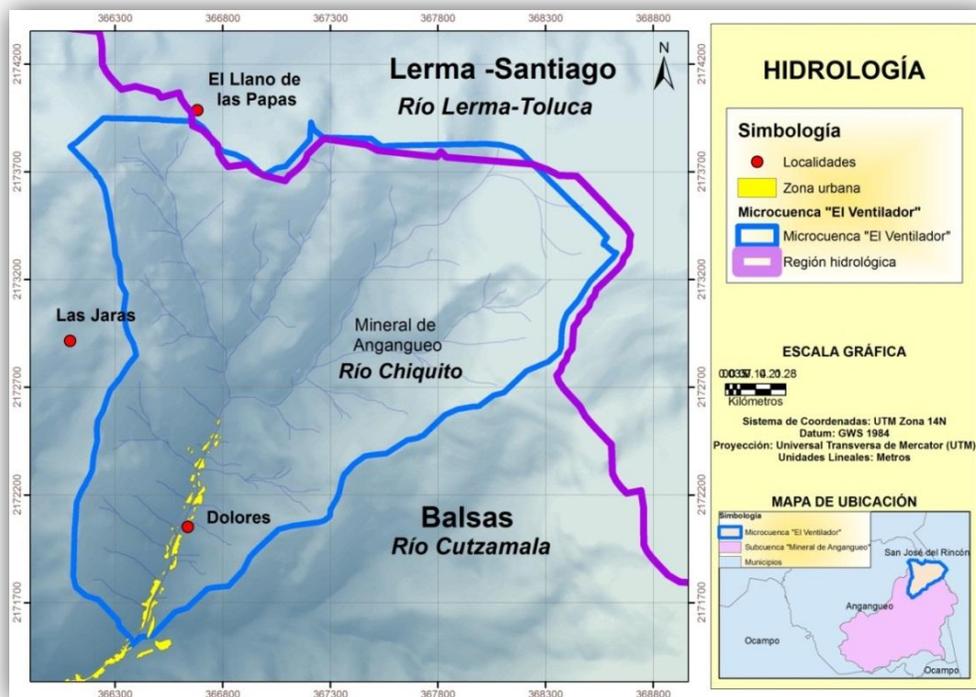
Tipo de pendiente	Rangos de pendientes	Superficie	Superficie
	Grados	Ha	%
Plano (planicie)	0 - 2	1.82	0.50
Ligeramente inclinado	2 – 5	8.21	2.27
Fuertemente inclinado	5 – 15	66.01	18.21
Muy inclinado	15 – 35	240.70	66.42
Empinado	35 - 55	45.67	12.60



**Figura 3.8.** Mapa de pendientes de la microcuenca "El Ventilador".

### 3.1.5 Hidrología

La microcuenca "El Ventilador" se encuentra dentro de la región hidrológica del Río Balsas (RH18) y particularmente en la Cuenca del Río Cutzamala y la Subcuenca del Río Chiquito (Figura 3.9).



**Figura 3.9.** Mapa que muestra la Región, Cuenca y Subcuenca hidrológica.

### 3.1.6 Geología

La microcuenca "El Ventilador" se encuentra en una zona geológica en donde predominan rocas ígneas terciarias, de naturaleza andesítica y basáltica. Los basaltos se presentan en forma de derrames de lava y forman algunas altiplanicies como el Llano de Las Papas y Garatachía. El primero, se ubica en los límites de la zona norte de la microcuenca, mientras que las andesitas forman principalmente las eminencias topográficas como el cerro de Guadalupe, el cerro del Melón, entre otros.

La sierra de Angangueo está constituida en su base por una gruesa formación de pizarras que están atravesadas o cubiertas por rocas ígneas, estas rocas son las de más reciente actividad volcánica, que se efectuó en el Terciario. La sierra divide al estado de Michoacán y de México y forma el parteaguas de dos sistemas fluviales que irrigan a cada estado.

Las rocas sedimentarias representan depósitos recientes que corresponden a:

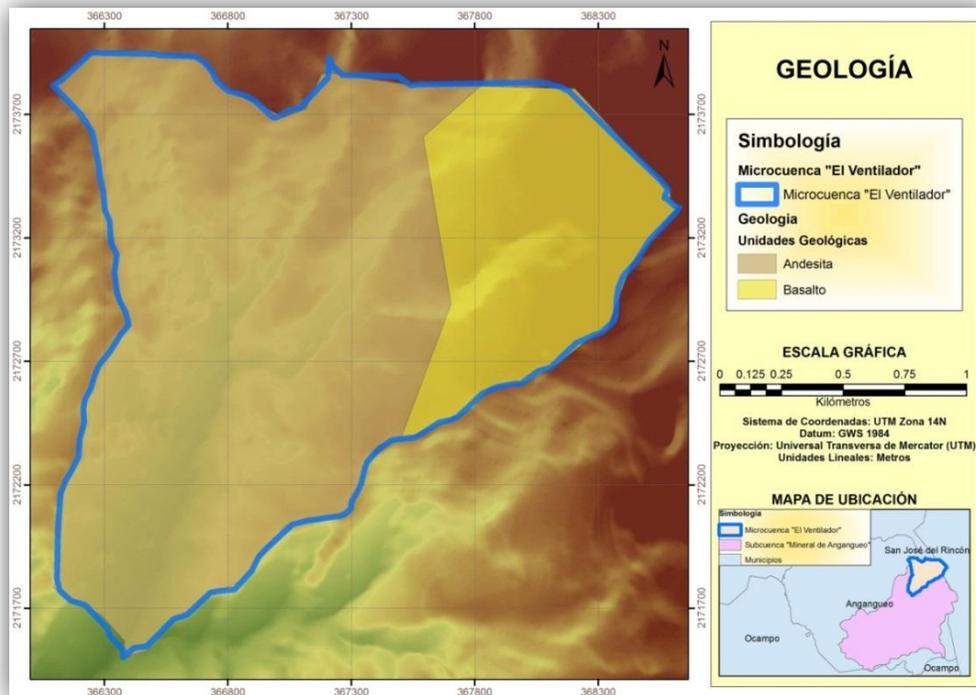
**Depósitos aluviales:** Son el producto de la desintegración y descomposición de las rocas expuestas principalmente en las partes elevadas y que son, transportados y acumulados por el agua en las partes bajas. Tal es el caso de la cañada de San Francisco y los lugares inmediatos a los cauces de los arroyos. Los depósitos aluviales se deben a los cambios bruscos de temperatura que desintegra las rocas formando un material arenoso *in situ*.

**Suelos residuales:** Son el producto de la lixiviación de las rocas subyacentes y de los minerales sulfurosos, especialmente el sulfuro de hierro. Si bien es cierto que el hierro se disuelve rápidamente en aguas sulfatadas, se precipita como hidróxido de hierro en presencia de oxígeno, y la zona superficial y el afloramiento de un cuerpo de sulfuros se mancha generalmente con coloraciones rojizas debido al contenido de óxidos de hierro principalmente aluminio.

Las rocas ígneas pertenecen a la zona de fosas tectónicas y vulcanismo reciente.

Las rocas que en esta zona se encuentran son andesitas, dacitas y basaltos. La asociación andesita-basalto conforma la orografía local; las andesitas adoptan la forma de picos y montañas, mientras que los derrames basálticos forman mesetas. Las andesitas, son las rocas más ampliamente

difundidas, cubren la mayor parte de la superficie y casi la totalidad del subsuelo. Desde el punto de vista económico, son las rocas más importantes por formar la roca encajonante de los yacimientos del lugar. Se diferencian dos tipos de andesitas, las andesitas de piroxena (augita e hiperstena) y andesitas de anfíbola (hornablenda); las primeras son las más abundantes. El color de las andesitas varía de café rojizo a gris y verde, con diferentes tonalidades y cambios graduales entre los mismos cerca de las zonas mineralizadas. Las andesitas de hiperstena adoptan colores oscuros y se les encuentra en la carretera que une a Angangueo con el tiro de Catingon.



**Figura 3.10.** Mapa de Geología de la microcuenca “El Ventilador”.

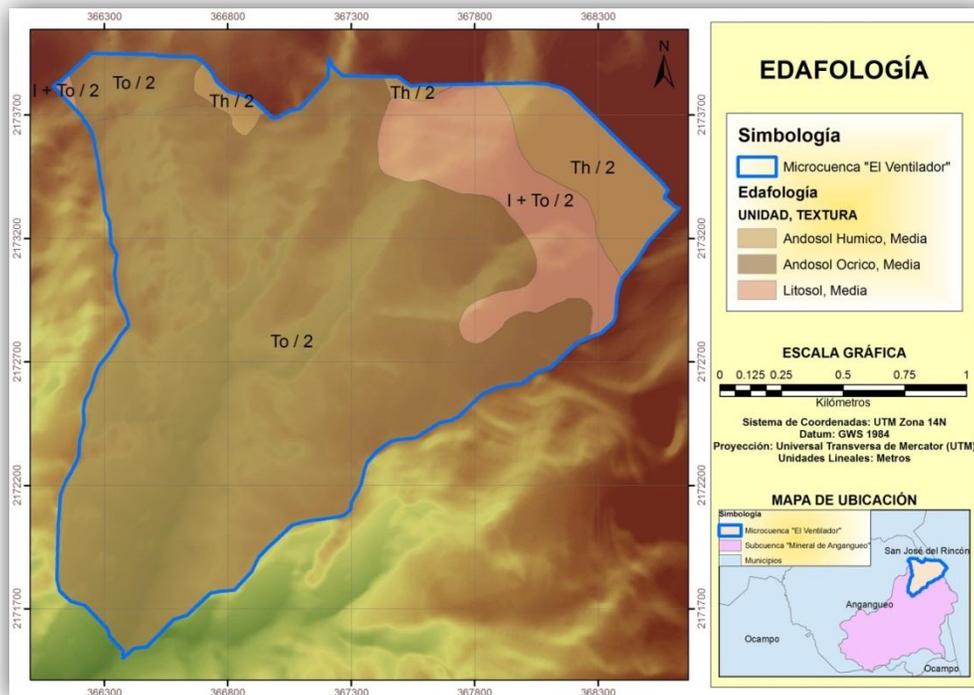
Las unidades geológicas presentes en la microcuenca de intervención, caracterizan en la Cuadro 3.3, mientras que su distribución se observa en el mapa de la Figura 3.10.

**Cuadro 3.3.** Unidades Geológicas presentes en la microcuenca “El Ventilador”

Clave	Clase	Tipo	Era	Sistema	Tipo de roca
Ts (B)	Ígnea extrusiva	Basalto	Cenozoico	Neógeno	Ígnea extrusiva Básica
Ts (A)	Ígnea extrusiva	Andesita	Cenozoico	Neógeno	Ígnea extrusiva Intermedia

### 3.1.7 Edafología

Los suelos de la microcuenca El Ventilador son de origen volcánico, en la mayoría del territorio predomina el Andosol ócrico (To) de textura media ocupa 290.26 ha, es decir, poco más del 80% de la superficie de la microcuenca, le sigue el Litosol (I) de textura media con 42.8 ha, que representan el 11.8%; también se encuentra presente el Andosol húmico (Th) de textura media con 28.93 ha alrededor de 8% de la superficie del área de estudio (Figura 3.11).



**Figura 3.11.** Mapa de edafología de la microcuenca “El Ventilador”.

**Andosoles:** Son suelos oscuros muy ligeros, con alto contenido de ceniza y otros materiales de origen volcánico. Particularmente los suelos Andosol Húmico presentan una capa superficial algo gruesa, oscura pero pobre en nutrientes, con terrones muy duros cuando están secos; el Andosol ócrico es muy limoso o arcilloso a menos de 50 cm de profundidad; tiene una capa superficial clara y pobre en materia orgánica y en nutrientes. La vegetación que sustentan es en su mayoría bosques de oyamel y pino. Es muy común la presencia de gruesas capas de grava y arena.

**Litsoles:** Son suelos que están limitados en profundidad por una roca dura continua y coherente dentro de los 25 cm de la superficie. Se localizan en las partes altas de la microcuenca (al noreste) con pendientes abruptas donde poco o ningún material del suelo se ha acumulado, principalmente en aquellas desmontadas para su incorporación a la agricultura de temporal o pastizales, estas zonas son las que presentan mayor erosión.

**Cuadro 3.4.** Unidades Edafológicas presentes en la microcuenca “El Ventilador”

Unidad	Clave	Fase	Textura	Superficie (Ha)
Litosol	I + To / 2	s/n	Media	42.28
Andosol Ócrico con fase gravosa	To / 2	Gravosa	Media	278.69
Litosol	I + To / 2	s/n	Media	0.60
Andosol Húmico	Th / 2	s/n	Media	3.27
Andosol Ócrico	To / 2	s/n	Media	11.79
Andosol Húmico con fase gravosa	Th / 2	Gravosa	Media	25.73

### 3.1.8 Uso de suelo y Vegetación

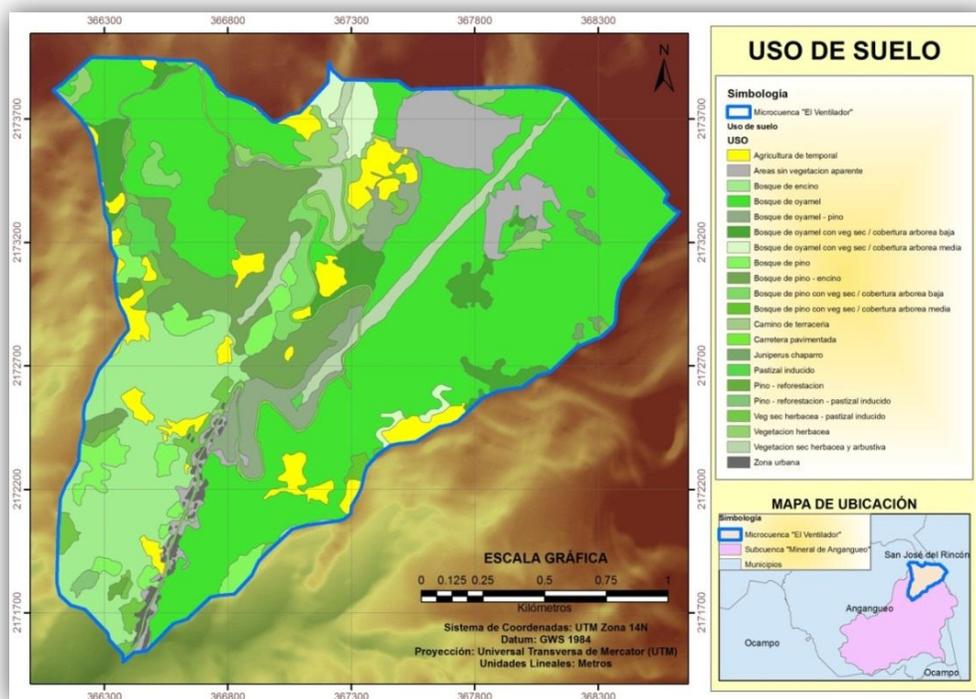
Para estudios anteriores (CONAGUA, 2010) se realizó además de la clasificación visual de la imagen de satélite obtenida de google earth, una verificación en campo para determinar que en la microcuenca existen veintiuna

clases de uso de suelo y/o vegetación los cuales se muestran en el siguiente cuadro así como su superficie y porcentaje respecto a la microcuenca (Figura 3.12 y Cuadro 3.5).

**Cuadro 3.5.** Uso de suelo y vegetación presente en la microcuenca “El Ventilador”

Uso de suelo	Superficie			
	SIN MAPS (Ha)	%	CON MAPS (Ha)	%
Agricultura de temporal	20.66	5.66	20.66	5.66
Áreas sin vegetación aparente	19.97	5.47	3.84	1.05
Bosque de encino	41.24	11.30	41.24	11.30
Bosque de oyamel	161.82	44.32	177.95	48.74
Bosque de oyamel - pino	12.97	3.55	12.97	3.55
Bosque de oyamel con vegetación seca / cobertura arbórea baja	12.07	3.30	12.07	3.30
Bosque de oyamel con vegetación seca / cobertura arbórea media	6.10	1.67	6.10	1.67
Bosque de pino	12.54	3.43	12.54	3.43
Bosque de pino - encino	30.21	8.27	30.21	8.27
Bosque de pino con vegetación seca / cobertura arbórea baja	5.22	1.43	5.22	1.43
Bosque de pino con vegetación seca / cobertura arbórea media	0.81	0.22	0.81	0.22
Camino de terracería	0.55	0.15	0.55	0.15
Carretera pavimentada	4.13	1.13	4.13	1.13
Juniperus chaparro	1.72	0.47	1.72	0.47
Pastizal inducido	2.36	0.65	2.36	0.65
Pino - reforestación	0.96	0.26	0.96	0.26
Pino - reforestación - pastizal inducido	0.66	0.18	0.66	0.18
Vegetación seca herbácea - pastizal inducido	7.66	2.10	7.66	2.10
Vegetación herbácea	9.49	2.60	9.49	2.60
Vegetación seca herbácea y arbustiva	11.74	3.21	11.74	3.21
Zona urbana	2.24	0.61	2.24	0.61
<b>TOTAL</b>	<b>362.11</b>	<b>100</b>	<b>362.11</b>	<b>100</b>

Como se puede observar en el cuadro anterior y en la siguiente figura el bosque de oyamel es el que predomina dentro de la microcuenca con el 56.91% de la superficie, le sigue el bosque de encino y de pino con un 11.48% y un 13.49%.



**Figura 3.12.** Mapa de uso de suelo y vegetación de la microcuenca “El Ventilador”.

A continuación se hace una descripción de los usos de suelo y vegetación que se encuentran dentro de la microcuenca.

### 3.1.8.1 Bosques

Los bosques ocupan el 81.87% (4296.71 ha) de la superficie de la microcuenca y dentro de este grupo se encuentran los bosques de oyamel, encino y pino en estados naturales, alterados y en diversas asociaciones.

El bosque de oyamel se distribuye en la mayor parte de la superficie de la microcuenca y se caracteriza por ser una comunidad en la que predomina el *Abies religiosa*. La masa arbolada está conformada principalmente por elementos de la misma especie y es posible encontrar árboles que sobrepasan los 30 m acompañados por diferentes especies de coníferas y latifoliadas. El bosque es denso por su condición libre de disturbio pero debido al fuerte impacto que provocan las actividades humanas, su área se encuentra en constante disminución para dar lugar a espacios agrícolas y pecuarios. Las especies que los constituyen son principalmente del género *Abies* como: oyamel, pinabete (*Abies religiosa*), además de pino u ocote (*Pinus* spp.), encino o roble (*Quercus* spp.) y aile (*Alnus tirmifolia*).

El bosque de oyamel en su asociación con pino es una de las comunidades en el área con mayor diversidad florística y se localiza en la zona centro de la microcuenca.



**Imagen 3.1.** Bosque de oyamel

El bosque de pino se encuentra de manera aislada en pequeños manchones en la zona centro, norte-oeste de la microcuenca y se caracteriza por ser una comunidad siempre verde constituida por árboles del género *Pinus* los cuales presentan alturas de 15 a 30 m con un estrato inferior relativamente pobre

en arbustos, pero con abundantes gramíneas lo cual se relaciona con la tala inmoderada.

El bosque de encino se localiza al sur-oeste de la microcuenca en donde es posible encontrarlo en comunidades conformadas exclusivamente por especies del género *Quercus* y en algunas áreas asociada a especies del género *Pinus*. En el área la comunidad de bosque de encino está constituida por una masa arbórea densa con alturas que no sobrepasan los 8 m, la vegetación arbustiva es poco perceptible mientras que la herbácea se desarrolla moderadamente. En las áreas en donde se encuentra asociada a pino los árboles presentan alturas de 12 a 20 m. La especie de *Quercus* que destaca es la *Quercus laurina*.



**Imagen 3.2.** Bosque de pino

### **3.1.8.2. Agricultura y pastizales**

En la microcuenca el desarrollo de áreas con agricultura o pastizales es mínima al presentar tan solo 20.12 y 10.71 ha respectivamente lo cual equivale a casi el 9% de las superficies dentro de la microcuenca.

La agricultura es de temporal y el principal cultivo que se desarrolla es el de maíz. Este uso del suelo se localiza en pequeñas áreas de la microcuenca.

El pastizal es de tipo inducido, es decir, es aquel que surge cuando es eliminada la vegetación original. Estos pastizales pueden aparecer como consecuencia de desmonte de cualquier tipo de vegetación; también pueden establecerse en áreas agrícolas abandonadas o bien como producto de áreas que se incendian con frecuencia. En la microcuenca se distribuyen de manera aislada principalmente al nor-oeste y sur-oeste de la microcuenca.



**Imagen 3.3.** Área dedicada a la agricultura de temporal y zona con pastizal inducido

### **3.1.8.3. Vegetación secundaria**

La vegetación secundaria dentro de la microcuenca se encuentra representada por estratos herbáceos (gramíneas principalmente) y arbustivos y es posible encontrarlo como parte de la alteración en los bosques y de manera aislada, es decir, áreas con vegetación secundaria solamente.

La vegetación secundaria es una vegetación que se crea mediante una alteración en la vegetación original la cual puede ser de manera natural al ocurrir

incendios, deslizamientos, huracanes ó de manera inducida por el hombre al eliminar la cobertura vegetal para el establecimiento de cultivos y/o pastizales y posteriormente ser abandonados. Este tipo de vegetación es parte de la sucesión vegetal hacia un estado primario en donde la vegetación herbácea es el inicio de la sucesión seguida de la vegetación arbustiva y finalmente la vegetación arbórea.

La vegetación herbácea es la que más sobresale en comparación con la arbustiva y es posible encontrar áreas con este tipo de vegetación al este y sur de la microcuenca principalmente.

Una de las formas en la que aparece la vegetación secundaria como se mencionó anteriormente es al abandonar áreas con pastizales por lo que es posible encontrar áreas en las cuales se encuentra este tipo de asociación.



**Imagen 3.4.** Vegetación secundaria arbustiva y herbácea en asociación con pastizales inducidos

#### **3.1.8.4. Otros usos de suelo y vegetación**

En la microcuenca también es posible encontrar áreas sin vegetación aparente en 4.38 ha las cuales están constituidas por afloramientos rocosos, caminos de terracería, áreas de inundación y áreas de jales.

Las áreas sin vegetación aparente se encuentran principalmente al oeste de la microcuenca y al este en donde se encuentran afloramientos rocosos en la parte de mayor altitud dentro de la microcuenca.



**Imagen 3.5.** Áreas sin vegetación aparente

### **3.1.9 Practicas de Manejo de Agua y Preservación de Suelo (MAPS)**

Cuando hablamos de prácticas de Manejo de Agua y Preservación de Suelo, nos referimos para este caso de estudio, en la restauración de la cobertura vegetal en las zonas deforestadas y el control de avenidas y azolves en los cauces.

#### **3.1.9.1 Reforestación**

La reforestación es la acción de poblar o repoblar con especies arbóreas o arbustivas, mediante plantación, regeneración manejada o siembra, cualquier tipo de terreno. En México, la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), creó el

Programa Nacional de Reforestación (PRONARE) para recuperar la superficie en donde la vegetación natural se ha perdido. El PRONARE ha significado un cambio importante en las estrategias de reforestación anteriormente implementadas, dando mayor énfasis al uso de especies nativas y al incremento en la supervivencia de los árboles plantados. La reforestación debe implementarse durante las primeras lluvias o durante las lluvias (Imagen 3.6).



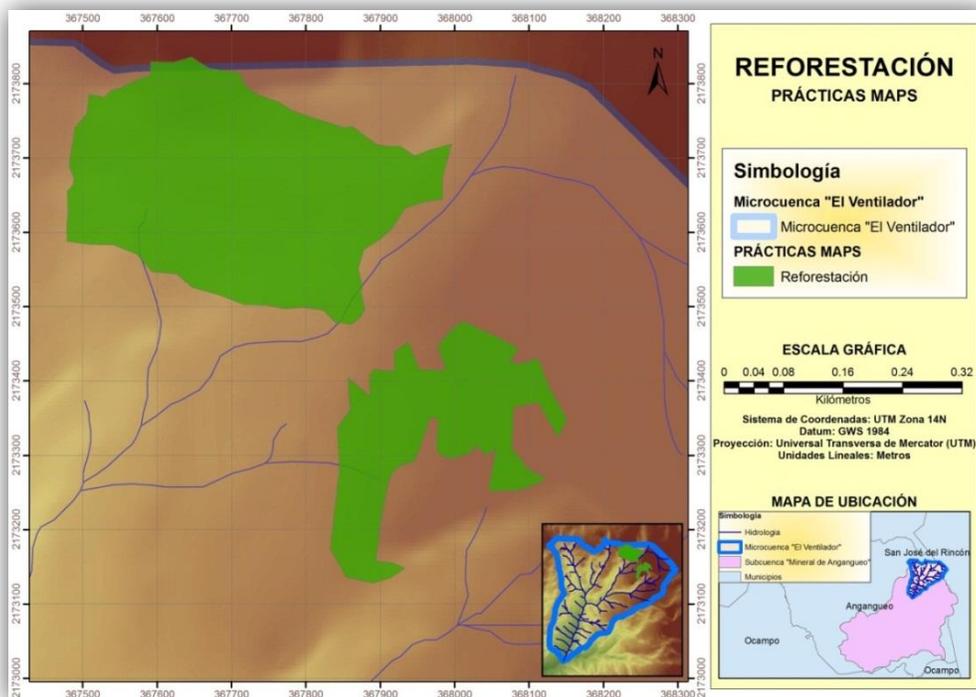
**Imagen 3.6.** Plántula de pino para reforestar un predio dañado.

En el caso de las laderas, el uso de prácticas MAPS promueve el establecimiento de una mayor cobertura vegetal, el reforzamiento de los taludes por efecto de las raíces de la vegetación, y la colocación de represas transversales para detener el movimiento de suelo y fomentar la formación de terrazas.

En la microcuenca "El Ventilador" se realizaron prácticas de reforestación con el propósito de recuperar la cobertura vegetal aérea y sobre el terreno, y reducir la magnitud del escurrimiento y erosión, promoviendo la interceptación de la lluvia y la infiltración del agua.

Las zonas que se reforestaron en la microcuenca "El Ventilador" son aquellas identificadas como zonas degradadas (aparentemente sin vegetación

arbórea) y zonas en riesgo de degradación, con porcentajes de cobertura menor al 50% y donde la fragmentación de la vegetación por las actividades humanas ha aumentado la magnitud de los procesos erosivos y de escurrimiento. Adicionalmente, la reforestación sirve de protección a las prácticas MAPS, para que regulen los procesos por un tiempo mayor.



**Figura 3.13.** Área reforestada en la microcuenca “El Ventilador”.

El impacto principal y más importante de una reforestación es la restauración del ecosistema; con ello se garantiza además la captación del agua de lluvia y se contribuye a la recarga de acuíferos. De manera adicional, los árboles trasplantados ya establecidos, el sistema radicular de éstos, contribuye a la retención de las partículas de suelo, para evitar su arrastre por el agua y su depositación en los cauces de la microcuenca. De igual manera, los árboles trasplantados, funcionan como nodrizas para otras especies de pastos y arbustos, que lleguen hasta el predio transportadas por el viento o animales los cuales, también contribuyen a la estabilización del suelo, una vez que desarrollen

su sistema radicular, así como a la captación de agua de lluvia (CONAFOR, 2012).

### **3.1.9.2 Presas**

Para los cauces se recomienda el uso de prácticas MAPS para la regulación hídrica y el control de la erosión y sedimentación. Dentro de estas se consideran:

#### **3.1.9.2.1 Presas de Geocostales**

Este tipo de presas son estructuras de geocostales (geotextiles rellenos con arena) que se ordenan en forma de barrera o trinchera y se coloca en cauces de primer orden con pendientes máximas de 35%, así como, en cárcavas menores a 1 m de profundidad para estabilizarlas. Los geocostales son costales fabricados con textiles duraderos que se degradan después de varios años (aproximadamente 10 años). La función de las presas de geocostales, es la de reducir la velocidad del agua, controlar la erosión hídrica, detener azolves y permitir la infiltración del agua. Entre sus beneficios, cabe destacar que protegen obras de infraestructura rural y favorece la acumulación de sedimentos (Imagen 3.7) (CONAFOR, 2012).

Para el caso de la microcuenca "El Ventilador" las estructuras se conforman con costales de geotextil de 50x75 cm, rellenos con suelo de la zona, preferentemente de densidad aparente mayor a 1, y se colocaron en cauces de primer orden donde la acumulación del flujo no es significativa, las velocidades no son tan aceleradas y las pendientes no son muy fuertes (CONAFOR, 2012).



**Imagen 3.7.** Vista de una Presa de Geocostales implementada en un cauce de primer orden de la microcuenca “El Ventilador”.

#### **3.1.9.2.2 Presas de Piedra Acomodada**

Son estructuras hechas a base de piedras acomodadas, que se coloca transversalmente a la dirección del flujo de la corriente. Sirven para reducir la velocidad de los escurrimientos superficiales, retener azolves y controlar la erosión en las cárcavas. Incrementan la calidad del agua del cauce al pasar a través de la estructura hace la función de filtro, estabiliza lechos de cárcavas, retiene suelo y permite el flujo normal de escurrimientos superficiales (Imagen 3.8) (CONAFOR, 2012).

Debido a que el material utilizado es de densidad más alta que los geocostales, estas prácticas pueden implementarse en cauces de primer orden, donde la acumulación del flujo y las velocidades son mayores. Su estabilidad se incrementa en comparación con las presas de geocostales y en general, van aguas debajo de estos, aunque pueden también ser intercaladas. Su ubicación e implementación depende en gran medida de la disponibilidad de material y del acceso. Las pendientes del cauce no deben ser mayores a 30%, para que estas

presas filtrantes funcionen de manera efectiva y puedan retener un volumen significativo de sedimentos (CONAFOR, 2012).



**Imagen 3.8.** Presa de piedra acomodada, implementada en un cauce de primer orden de la microcuenca “El Ventilador”.

### **3.1.9.2.3 Presas de Mampostería**

La presa de mampostería es una estructura rígida permanente construida a base de piedra, y una mezcla elaborada a base de cemento, arena y cemento, cal y arena. Se construye perpendicular a la cárcava o cauce, con profundidades mayores a 2 m. Su principal función es reducir la velocidad de los escurrimientos superficiales almacenar agua y/o retener azolves. El almacenamiento de agua de las presas de mampostería, tiene varios beneficios para las actividades rurales, pues funciona como bebederos para el ganado, de igual forma, al reducir la pendiente media de la cárcava con la poza que se forma, reduce la velocidad del agua (Imagen 3.9) (CONAFOR, 2012).

Estas estructuras son de mucha mayor resistencia que las presas de piedra acomodada al utilizar mezcla de concreto como cementante entre las piedras, y generalmente se recomiendan para cauces de orden mayor a 1 y/o donde las pendientes son mayores de tal manera que la acumulación y velocidad

de flujo es mayor. Son muy recomendadas en la previo e inmediatamente posterior a la intersección de dos cauces de orden 2 o mayor, se colocan estratégicamente en zonas donde el control de los escurrimientos y sedimentos es necesario (CONAFOR, 2012).



**Imagen 3.9.** Vista de una Presa de Mampostería, construida sobre el cauce 1 en la microcuenca “El Ventilador”.

#### **3.1.9.2.4 Presas de Gaviones**

Son estructuras flexibles, permanentes y permeables construidas con cajas en forma de prisma rectangular hechas de alambre galvanizado con figuras de hexágono y entrelazadas con una triple torsión; a esta caja se le llama gavión. Los gaviones se rellenan de piedras y se colocan uno sobre otro, con el objeto de formar el cuerpo de la presa (Imagen 3.10). Se construye perpendicular a las cárcavas con profundidades mayores a 2 m. La función de las presas de gavión, es reducir la velocidad de los escurrimientos superficiales en las cárcavas, así como, la erosión hídrica, retener azolves, estabilizar el fondo de la cárcava para impedir su crecimiento en profundidad y anchura; por otro lado, permite la filtración del agua y contribuye a la recarga de mantos acuíferos y de manera adicional, contribuye a proteger las prácticas ubicadas aguas abajo en la cárcava o cauce. Entre las ventajas de las presas de gavión, cabe destacar que son muy

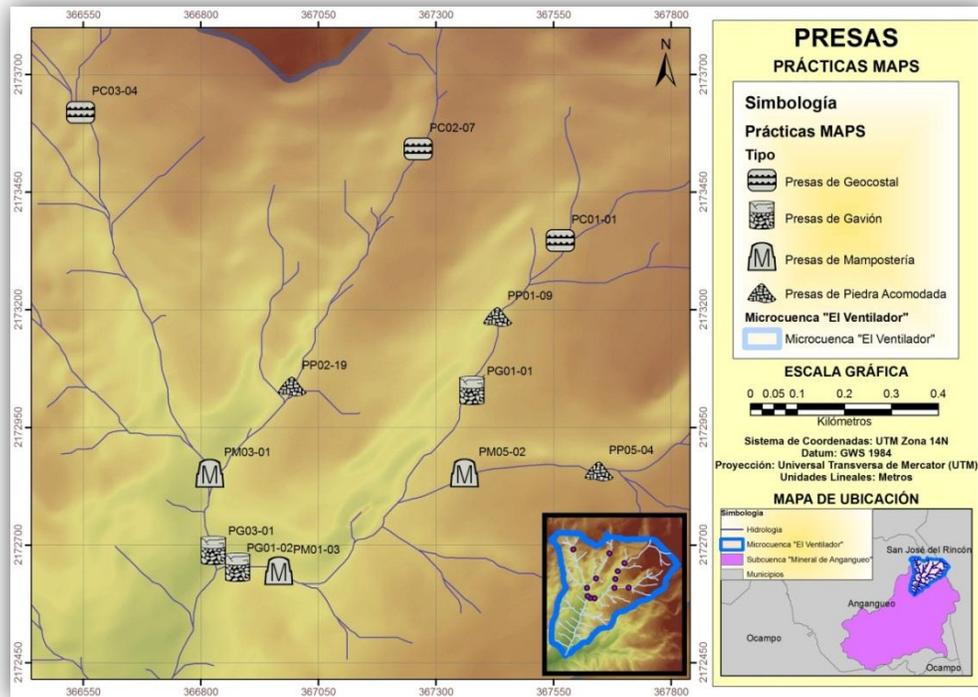
eficientes y durables, se adaptan a cualquier cárcava por su flexibilidad y en caso de llegar a sufrir alguna deformación, esta no pierde su eficiencia; son presas baratas en comparación por ejemplo con otras de mampostería (CONAFOR, 2012).



**Imagen 3.10.** Vista frontal de una Presa de Gavión, implementada en un cauce de segundo orden en la microcuenca “El Ventilador”.

Las presas filtrantes de gaviones son estructuras modulares que se recomiendan para secciones donde el flujo en cantidad y velocidad es muy significativo. Normalmente se colocan en las partes bajas donde es necesario regular los escurrimientos y sedimentos para evitar el daño a infraestructura carretera, casas, o al mismo cauce (CONAFOR, 2012).

A continuación se muestra la ubicación de algunas de las presas ubicadas en la microcuenca “El Ventilador”; con éstas presas se realizó la modelación hidrológica del presente trabajo.



**Figura 3.14.** Ubicación de presas de geocastales, gavión, mampostería y piedra acomodada en la microcuenca “El Ventilador”.

### 3.2 Requerimientos de datos y capas de información para el modelo KINEROS2

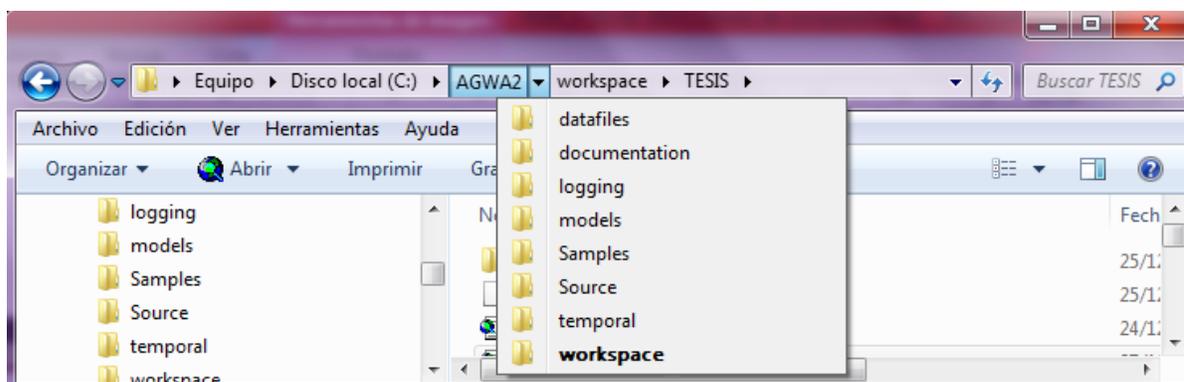
Dentro de la plataforma ArcGis, AGWA es una extensión que contiene el modelo KINEROS2. De acuerdo al manual del usuario de AGWA (Burns et al., 2004), en específico para KINEROS, el procedimiento de aplicación consiste en las siguientes condiciones y pasos:

La extensión AGWA requiere que los archivos estén organizados según la estructura mostrada en la Figura 3.15. El directorio “agwa2” está ubicado en el disco “C:”, el cual está integrado principalmente por los siguiente subdirectorios: “datafiles”, “documentation”, “loggin”, “models”, “Samples”, “Source”, “temporal” y “workspace”. Dentro del subdirectorio “workspace” se guardan todos los

proyectos de modelación deseados, en este caso se nuestra proyecto se llama “Tesis”.

A su vez, dentro del subdirectorío de nuestro proyecto, la extensión genera una serie de nuevos subdirectoríos donde se almacena la información, temporal y no temporal, generada durante la modelación: “av\_cwd”, “rainfall” y “simulations”. Se emplean dos tipos de información: capas de información y tablas.

Las capas de información primaria y secundaria se encuentran en el directorío de “Tesis” en la carpeta “Datos de entrada”; mientras que las tablas que son proporcionadas por el usuario se ubican en el directorío “datafiles”.



**Figura 3.15.** Estructura de organización de los directoríos requerido por el modelo AGWA.

### 3.2.1 Tablas de datos

Las tablas de datos requeridas por el programa se enlistan en la Cuadro 3.6 y sus características se describen en la Cuadro 3.7.

**Cuadro 3.6.** Listado de las tablas requeridas por KINEROS

<b>Tablas de datos</b>
Hgr.dbf
FAO_World.dbf
FAO_Propierties.dbf
FAO_Summ.dbf
Kin_lut.dbf
Nacl_lut.dbf

**Cuadro 3.7.** Descripción de las tablas primarias de datos

<b>Tablas de datos</b>	<b>Descripción</b>
Hgr.dbf	Geometría hidráulica para discretización de la cuenca, es utilizada para definir la geometría de los canales basados en las áreas de contribución.
FAO_World.dbf	Presenta información organizada con base a las unidades mapa suelo (soil mapping units). Incluye las unidades de suelo (soil units) y porcentajes asociados con cada unidad mapa suelo.
FAO_Propierties.dbf	Es la lista de las unidades de suelo, utilizadas tanto para los suelos superficiales como para los subterráneos, también contiene el valor de la textura.
FAO_Summ.dbf	Contiene unidades de suelo y propiedades de suelo adicionales como es la capacidad de agua disponible (AWC) y fragmentos de roca.
Kin_lut.dbf	Contiene información de textura de los suelos asociadas a parámetros hidrológicos como conductividad hidráulica saturada (Ks), media de capilaridad (G) y porosidad (p).Es usada por el modelo en el proceso de parametrización para obtener propiedades del suelo.
Nacl_lut.dbf	Contiene información de parámetros hidrológicos como son el número de curva (CN) y el porcentaje de cobertura, para cada tipo de vegetación según la clasificación de la NACL.

### 3.2.2 Capas de información geo-referenciada

Las capas de información requeridas para la modelación en KINEROS2 se enlistan en la Cuadro 3.8.

**Cuadro 3.8.** Capas de información requeridas para la ejecución del modelo KINEROS

Primarias		Secundarias	
<i>Nombre</i>	<i>Tipo</i>	<i>Nombre</i>	<i>Tipo</i>
DEM	<i>Grid</i>	Dirección de Flujo	Grid
Cobertura de Suelo	<i>Grid</i>	Flujo de Acumulación	Grid
Suelo	<i>Shapefile</i>	Red de Drenaje	<i>Grid</i>

Las capas de información se pueden obtener de dos fuentes, una del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y otra de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Mientras mayor sea la resolución de las capas, mejores serán los resultados de la corrida del modelo KINEROS2.

### 3.2.2.1 Digitalización de las capas de información

Se digitalizan las capas de información que el modelo requiere según la disponibilidad cartográfica y, se seleccionan las de mayor detalle o resolución disponibles.

### 3.2.2.2 Extracción de capas de información de CONABIO

Para la obtención de la capa de edafología y cobertura vegetal se puede acceder a la página de la CONABIO (<http://www.conabio.gob.mx/>). Los shapefiles obtenidos del servidor de la CONABIO en coordenadas geográficas.

### 3.2.2.3 Modelo digital de elevaciones (DEM)

La tabla de atributos del DEM está constituida por dos campos: value y count. Con un tamaño de celda o de pixel de 5 x 5 m. En el modelo KINEROS se recomienda que el tamaño de los pixeles no sea mayor a 50 x 50 m para lograr resultados más confiables.

### 3.2.2.4 Cobertura de suelo

Debido a que la clasificación de cobertura de suelo del INEGI no es similar con la descrita en la tabla *nacl\_lut.dbf*, es necesario hacer una reclasificación de los tipos de cobertura/uso de suelo. Este arreglo se realiza considerando las características de los usos de suelo de las clasificaciones de INEGI y de North American Landscape Characterization (NALC). La tabla de atributos del grid de cobertura del suelo seleccionado se forma con dos campos: *value* y *count*. El campo *value* se completa con números ordinales que se asocian con el campo "CLASS" (clase) de la tabla *nacl\_lut.dbf*. En ésta última, cada clase corresponde a un tipo de cobertura de suelo según la clasificación de la NACL mostrada en la Figura 3.16.

Class	Name	A	B	C	D	Cover	Int	N	Imperv
1	Forest	36	60	73	79	30	1.15	0.150	0.00
2	Dak Woodland	48	48	57	63	20	1.15	0.050	0.00
3	Mesquite Woodland	71	71	81	89	20	1.15	0.050	0.00
4	Grassland	49	69	79	84	25	2.00	0.150	0.00
5	Desert Scrub	63	77	85	88	25	3.00	0.055	0.00
6	Riparian	30	55	70	77	70	1.15	0.060	0.00
7	Agriculture	66	77	85	89	50	2.80	0.040	0.00
8	Urban	77	85	90	92	15	0.10	0.015	0.40
9	Water	100	100	100	100	0	0.00	0.000	0.00
10	Barren	90	92	94	96	0	0.00	0.035	0.00
11	Clouds	0	0	0	0	0	0.00	0.000	0.00

**Figura 3.16.** Tabla de vista de vegetación NALC del modelo AGWA Fuente (Burns et al., 2004).

En la Figura 3.16, la definición de los parámetros es la siguiente: A, B, C, D = Grupos hidrológicos de suelos COVER = Dosel INT = Alturas de intercepción N = Coeficiente de Manning IMPERV = Porcentaje de la superficie impermeable (donde el agua no puede penetrar) Para ajustar la tabla de atributos de la cobertura y uso de suelo digitalizado se utiliza la tabla *.dbf* de la NACL incluida en el folder "datafiles" del programa AGWA. Se reclasifican las clases con base en la categorización de la NACL.

Es importante mencionar que se utilizaron dos capas de cobertura vegetal para el análisis. Para el análisis sin prácticas de Manejo de Agua y Preservación del Suelo, en el área denominada como reforestada, se utilizaron valores de Área sin vegetación aparente; y para el análisis con prácticas MAPS en el área reforestada se utilizaron valores de Bosque de oyamel.

### **3.2.2.5 Edafología**

El ajuste de la tabla de atributos de edafología consiste en asignar a cada tipo de suelo de la capa de edafología su correspondiente valor de SNUM (Soil Mapping Unit o número de clasificación de suelo según la FAO). Los datos se adicionan manualmente utilizando como guía la tabla *FAO\_World* del folder “datafiles” del modelo AGWA. Este proceso es necesario debido a que el programa utiliza varias tablas con base en esta clasificación para extraer el valor de los parámetros que se utilizan en el modelo. La tabla de la *FAO\_World* considera en la asignación del SNUM al porcentaje de partículas primarias y la textura para cada tipo de suelo que forma una combinación.

### **3.3 Implementación del modelo KINEROS2 (Modelación hidrológica)**

Para la modelación se necesita el DEM del territorio de la microcuenca, el *grid* de cobertura de suelo, el shapefile de suelos y los datos de precipitación. Los resultados que se obtienen de la modelación con *KINEROS* son: infiltración, producción de sedimentos y escurrimientos. Estos resultados se presentan en intervalos en un mapa.

La modelación consiste en los siguientes pasos:

- ✓ Delimitación de la microcuenca
- ✓ Parametrización del modelo con la cobertura y tipo de suelo
- ✓ Generación de los archivos de precipitación
- ✓ Generación del archivo de entrada y corrida del programa

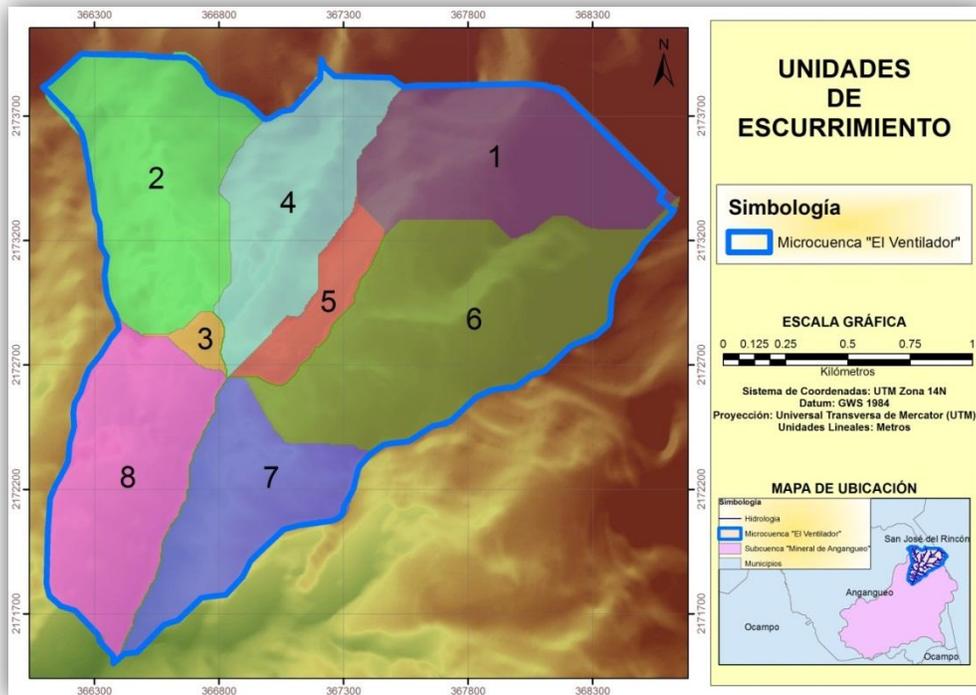
- ✓ Despliegue de resultados

### 3.3.1 Delimitación de la microcuenca

La delimitación de la microcuenca consiste en establecer los límites del área de estudio y dividirla en unidades de escurrimiento con base en el umbral del área de contribución (CSA). Para la delimitación de la cuenca se utiliza el *DEM*, en el cual los espacios y huecos son rellenados por el programa, a partir de que éste genera los *grids* de dirección y acumulación de flujo. El *DEM* debe encontrarse en la vista del proyecto. Generados estos archivos de entrada, se procede a la delimitación de la microcuenca, indicando sobre el *DEM* el punto de salida de la microcuenca. La delimitación de la microcuenca con base en el punto de salida, se realiza haciendo uso del archivo *stream 950 grid*, generado automáticamente por el modelo después de haber creado el *grid* de flujo de acumulación. El archivo *stream 950 grid* contiene la red de ríos específica para el *DEM*, que es formulada por el programa seleccionando con todas las celdas del *grid* de acumulación con valores mayores que 950. Es decir, son todas las celdas que contribuyen para la formación del escurrimiento proveniente de al menos 950 celdas río arriba.

La división de la microcuenca en unidades de escurrimiento se basa solamente en el umbral del área de contribución, el porcentaje de ésta varía según el tamaño de la cuenca. Para cada cuenca se utiliza el mínimo valor posible, según lo permitido por el modelo para tener mayor representatividad geométrica en la discretización. El umbral del área de contribución se refiere al área mínima que se requiere antes que se canalice el agua en una corriente. Mientras más pequeño sea el valor de CSA, mayor será el número de elementos o subcuencas que resultarán. De este modo, el valor de CSA es una medida de la complejidad geométrica en la que se discretiza la microcuenca. La información acerca del valor de CSA recomendado no se ha estudiado a detalle, sin embargo, el valor de 2.5% ha producido los mejores resultados en análisis

preliminares (Mendoza, 2008), en este caso se utilizó 15% dándonos como resultado ocho unidades de escurrimiento (Figura 3.17). Como penúltimo paso se le asigna un nombre a la microcuenca y se selecciona el modelo hidrológico a utilizar, en este caso KINEROS. Finalmente, se escoge la relación de la geometría hidráulica, la cual se recomienda indicar por default que es la de *North Carolina's Coastal Plain*.



**Figura 3.17.** Mapa que muestra las unidades de escurrimiento obtenidas con el modelo KINEROS2 de la microcuenca “El Ventilador”.

### 3.3.2 Parametrización con la cobertura y tipo de suelo

El objetivo de esta etapa es la extracción de parámetros hidrológicos asociados con los datos de cobertura y tipo de suelo. Por esta razón, es necesario que los “*shapefiles*” de cobertura de suelo y tipo de suelo se encontraran en la vista. Para la parametrización de la cuenca con el tipo de suelo se utiliza la clasificación de suelos de la FAO, consiste en la extracción de

parámetros hidrológicos de las tablas: *FAO\_World*, *FAO\_Properties*, *FAO\_Summ* y *kin\_lut.dbf*, y la adición de esta información a la tabla de atributos de la microcuenca.

Finalmente, la parametrización con la cobertura de suelo consiste en derivar los parámetros hidrológicos, número de curva y porcentaje de cobertura, de la tabla *nacl\_lut.dbf*. Este proceso se da mediante la intersección del *grid* de la microcuenca (*grid* de las subcuencas o elementos) con el de la cobertura de suelo creando así un archivo temporal del que se obtienen los porcentajes de constitución de cada clase de cobertura en cada elemento de la microcuenca.

### **3.3.3 Generación del archivo de precipitación**

Entre las opciones para adicionar la información de precipitación, se encuentra la de diseño de una tormenta que es la que se recomienda usar. La tormenta de diseño se basa en un periodo de retorno, una lámina de lluvia, una duración y un índice de saturación. El primer paso para lograr este parámetro, consiste en ubicar write KINEROS precipitation file, en donde se asigna un nombre a la tormenta. Esta tormenta debe corresponder a la tormenta de diseño adecuada para las necesidades del estudio hidrológico. Para este estudio la tormenta de diseño es de 95.6 mm/hr con un periodo de retorno de 25 años, este dato se obtuvo de un estudio previo de la microcuenca “El Ventilador” (Aguilar et al., 2010).

### **3.3.4 Generación de archivos de entrada y corrida del programa**

Esta etapa consiste en seleccionar los archivos de entrada los cuales son cada una de las capas creadas con anterioridad, y se prosigue a realizar la corrida del programa, adicionando cada una de las tablas empleadas y los archivos empleados. El modelo va pidiendo la información necesaria para realizar los cálculos respectivos de forma ordenada.

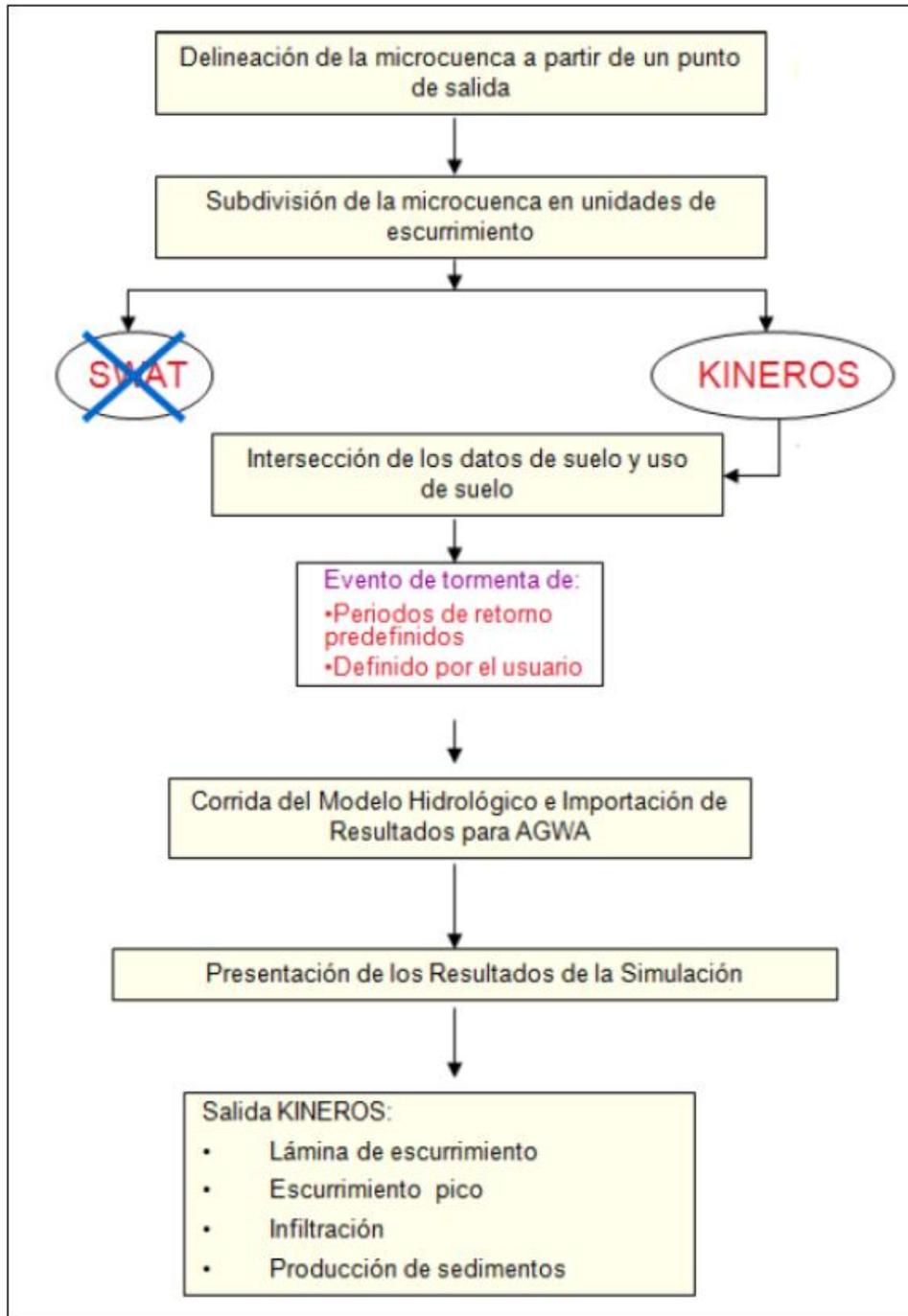
### 3.3.5 Despliegue de resultados

Los parámetros de salida del programa son:

- 1) Infiltración (mm)
- 2) Escurrimiento superficial (mm)
- 3) Gasto pico ( $m^3/s$ )
- 4) Producción de sedimentos (kg/ha)

Los resultados son dados espacialmente para cada unidad de escurrimiento y para los cauces. El despliegue de los resultados se realiza por medio de la ventana “*view kineros results*” del modelo, en la cual se seleccionan los archivos de entrada (microcuenca y simulación) y el parámetro de salida que se quiere observar.

En el diagrama de la Figura 3.18, se muestra de manera gráfica la consecución de cada una de las fases para la corrida del modelo KINEROS.



**Figura 3.18.** Diagrama de flujo del procedimiento de ejecución de KINEROS2.

Para realizar la modelación se realizó el análisis con y sin prácticas de manejo de agua y preservación del suelo.

## VI. RESULTADOS Y DISCUSION

### 4.1 Resultados

#### 4.1.1 Ejecución del modelo sin prácticas MAPS

Siguiendo todos los pasos descritos en el punto 3.3 se realizó la modelación con la herramienta AGWA-KINEROS2. En este caso se utilizó la capa de uso de suelo y cobertura vegetal con valores, en el área reforestada, de Área sin vegetación aparente, todas las demás capas y el archivo de precipitación es el mismo.

A continuación se muestran los resultados arrojados de la modelación con la herramienta KINEROS2 de los procesos asociados a la microcuenca sin practicas MAPS.

**Cuadro 4.1** Resultados de procesos hidrológicos sin prácticas MAPS en la microcuenca “El Ventilador”

Unidad de Escurrimiento	Infiltración	Escurrimiento	Producción de Sedimentos	Gasto pico
	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>kg/ha</i>	<i>m3/s</i>
1	36.63	58.48	519.77	35.68
2	41.25	53.96	517.30	27.97
3	35.82	59.33	336.00	2.50
4	42.18	52.97	702.86	15.80
5	35.77	59.32	253.59	9.72
6	40.72	54.27	518.57	39.18
7	37.11	57.91	415.29	28.70
8	37.62	57.49	596.86	38.25

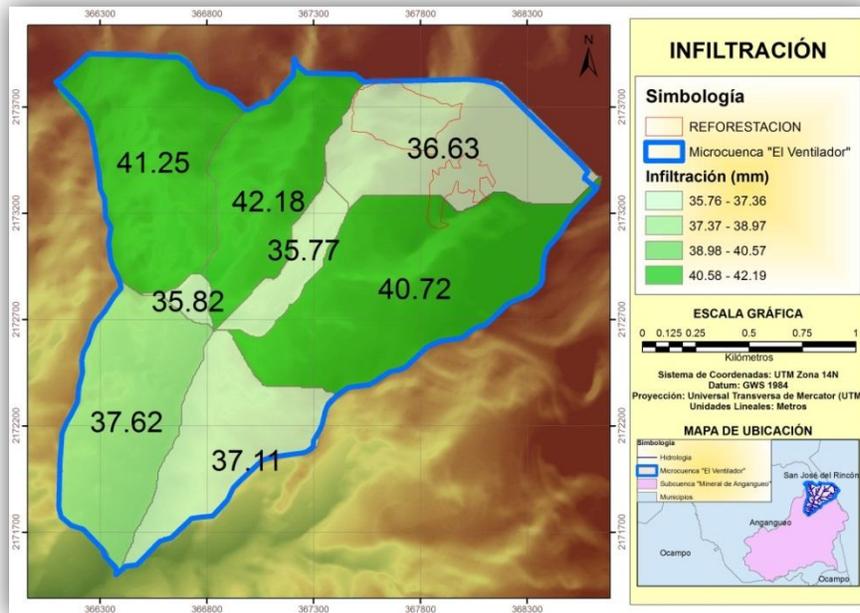


Figura 4.1. Resultados de infiltración sin prácticas MAPS en la microcuenca “El Ventilador”.

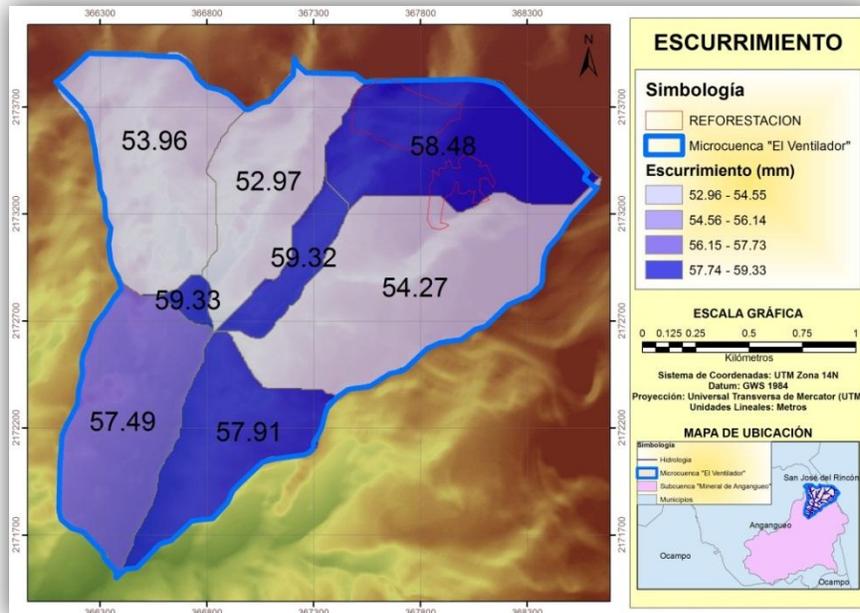


Figura 4.2. Resultados de escurrimiento sin prácticas MAPS en la microcuenca “El Ventilador”.

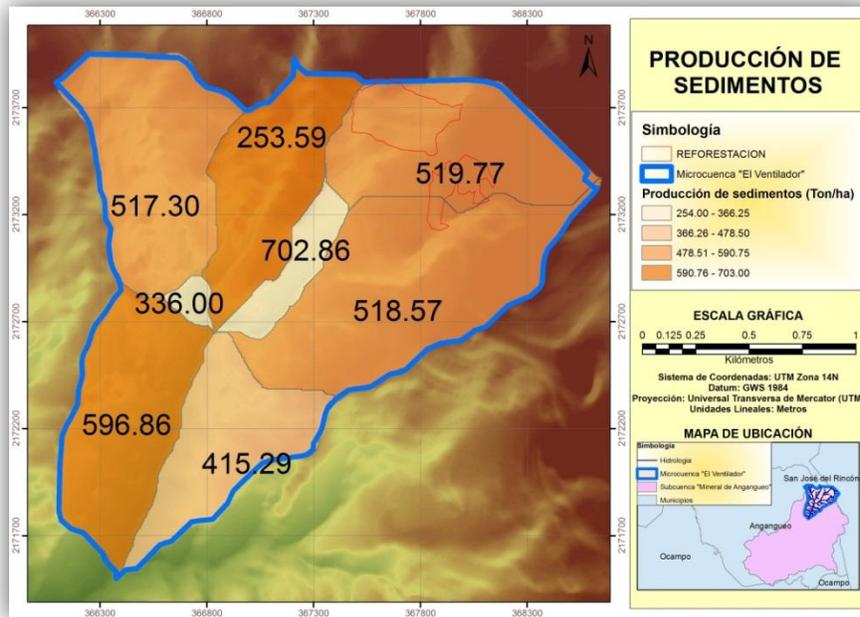


Figura 4.3. Resultados de producción de sedimentos sin prácticas MAPS en la microcuenca "El Ventilador"

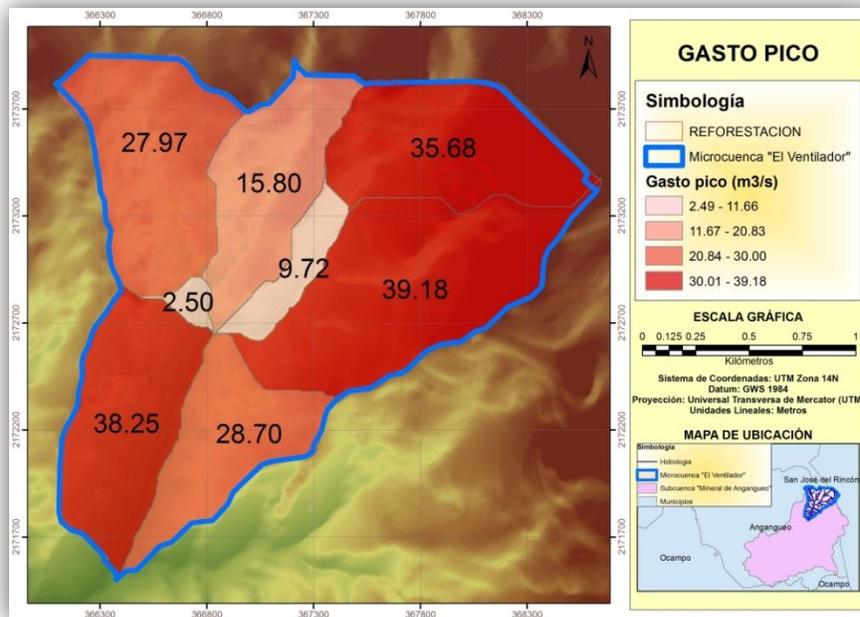


Figura 4.4. Resultados de gasto pico sin prácticas MAPS en la microcuenca "El Ventilador"

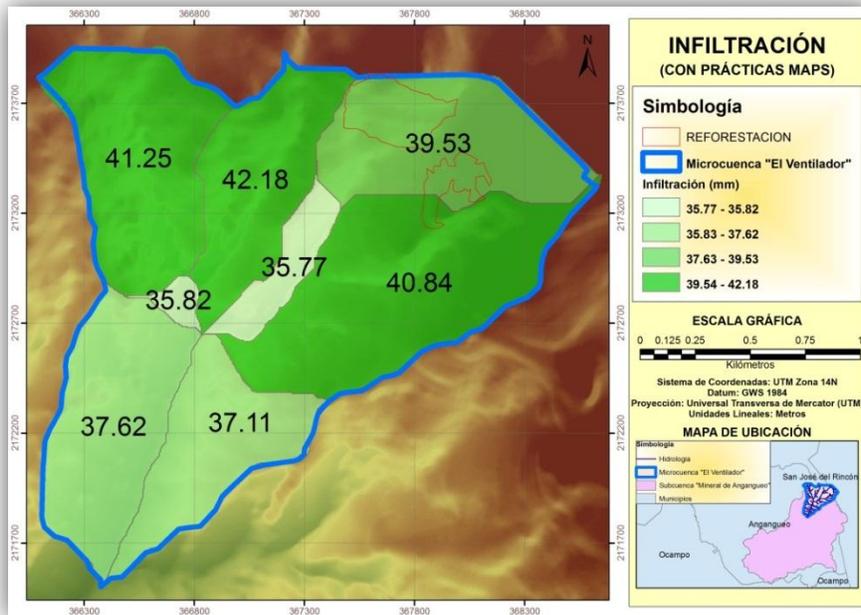
#### 4.1.2 Ejecución del modelo con prácticas MAPS

Siguiendo todos los pasos descritos en el punto 3.3 se realizó la modelación con la herramienta AGWA-KINEROS2. En este caso se utilizó la capa de uso de suelo y cobertura vegetal con valores, en el área reforestada, de Bosque de oyamel, todas las demás capas y el archivo de precipitación es el mismo.

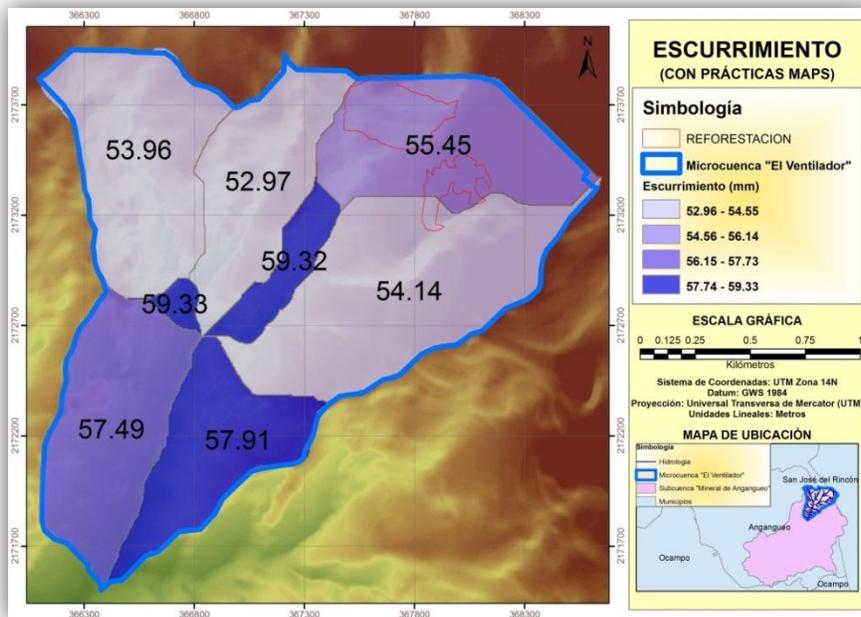
A continuación se muestran los resultados arrojados de la modelación con la herramienta KINEROS2 de los procesos asociados a la microcuenca con prácticas MAPS.

**Cuadro 4.2** Resultados de procesos hidrológicos con prácticas MAPS en la microcuenca “El Ventilador”

Unidad de Escurrimiento	Infiltración	Escurrimiento	Producción de Sedimentos	Gasto pico
	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>kg/ha</i>	<i>m3/s</i>
1	39.53	55.45	419.92	25.98
2	41.15	53.96	517.30	27.97
3	35.82	59.33	336.00	2.50
4	42.18	52.97	702.86	15.80
5	35.77	59.32	253.59	9.72
6	40.84	54.14	513.02	38.54
7	37.10	57.91	415.29	28.70
8	37.62	57.49	596.86	38.25



**Figura 4.5.** Resultados de infiltración con prácticas MAPS en la microcuenca “El Ventilador”



**Figura 4.6.** Resultados de escurrimiento con prácticas MAPS en la microcuenca “El Ventilador”

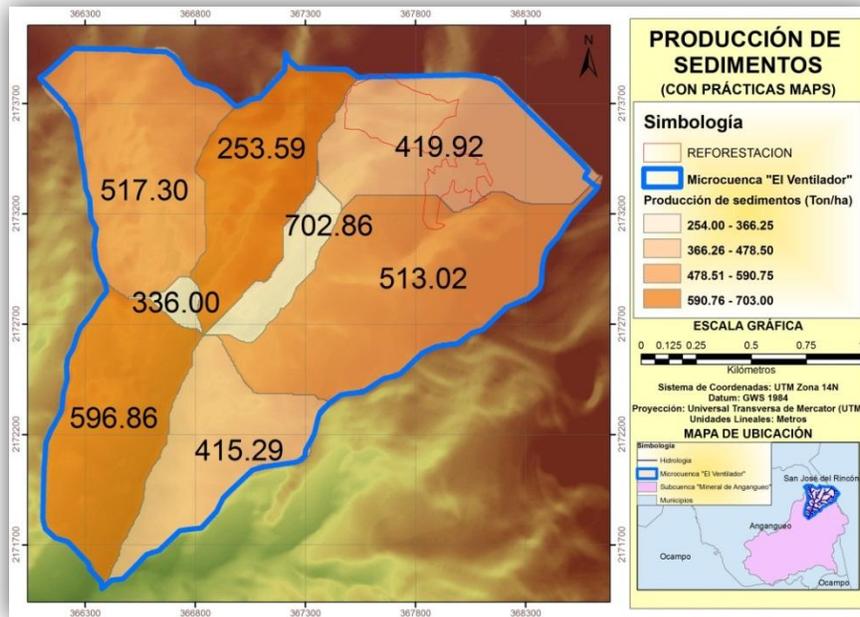


Figura 4.7. Resultados de producción de sedimentos con prácticas MAPS en la microcuenca "El Ventilador"

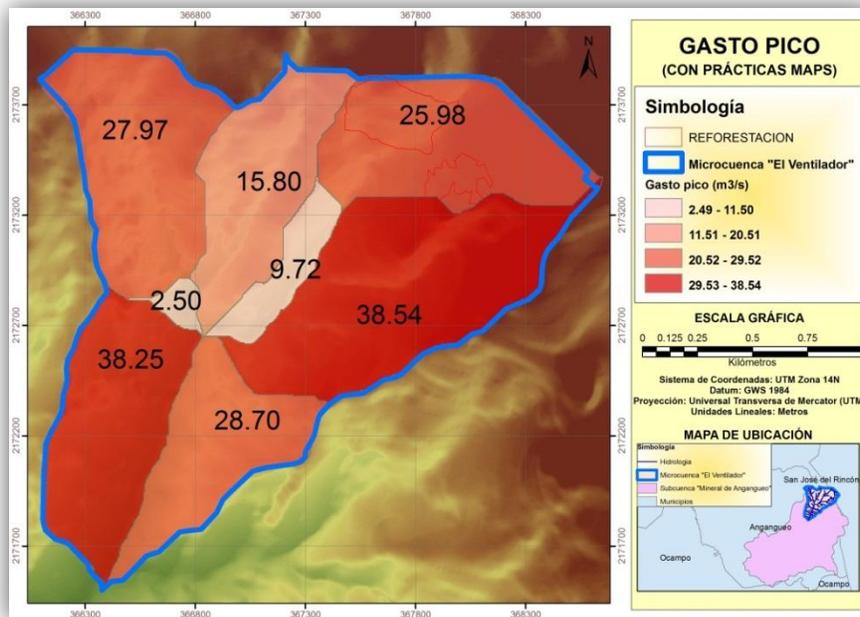
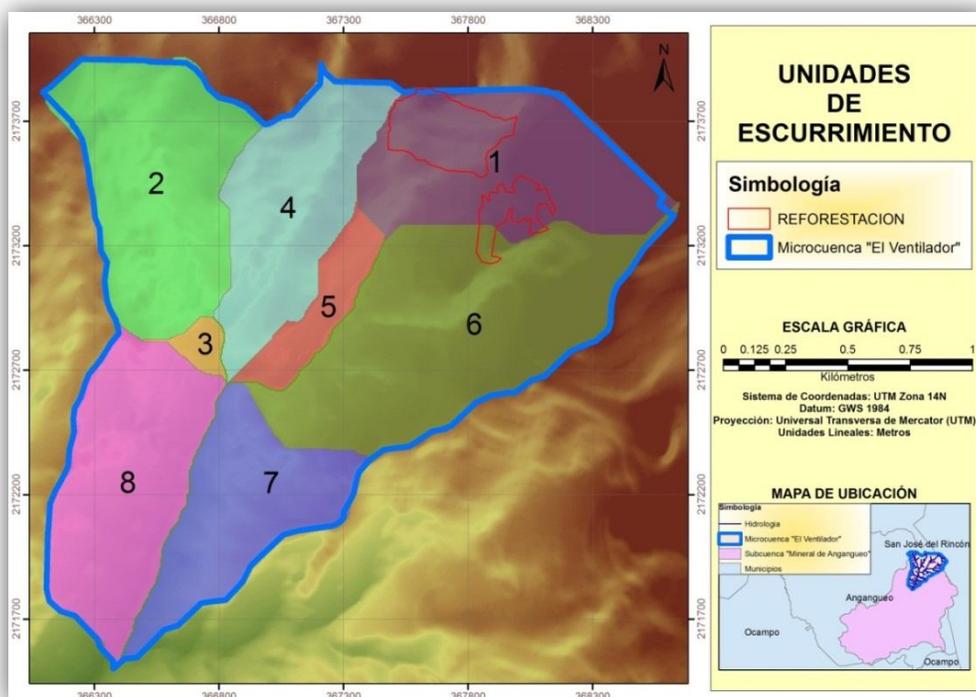


Figura 4.8. Resultados de gasto pico con prácticas MAPS en la microcuenca "El Ventilador"

## 4.2 Comparativo de modelación con y sin prácticas MAPS

Las unidades de escurrimiento en las que se presentan cambios más notorios, tratándose de prácticas de reforestación, son la No. 1 y 6, ya que en éstas es donde se encuentra el área reforestada (Figura 4.9).



**Figura 4.9.** Mapa que muestra las unidades de escurrimiento con el área reforestada obtenidas con el modelo KINEROS2 de la microcuenca "El Ventilador".

Los resultados obtenidos en las unidades de escurrimiento No. 1 y 6 de gasto pico ( $m^3/s$ ), escurrimiento (mm), infiltración (mm) y producción de sedimentos (Ton/ha) dentro de nuestra área de estudio, obtenidos después de la modelación hidrológica con la herramienta AGWA específicamente utilizando el modelo KINEROS, para cada escenario se muestra en la tabla 4.3 y 4.4.

**Cuadro 4.3** Resultados de la unidad de escurrimiento No. 1 con y sin prácticas MAPS en la microcuenca “El Ventilador”.

Procesos en Unidad de escurrimiento No. 1	Prácticas MAPS	
	SIN	CON
Infiltración (mm)	36.63	39.53
Escurrecimiento (mm)	58.48	55.45
Producción de sedimentos (Ton/ha)	519.77	419.92
Gasto pico (m3/s)	35.68	25.98

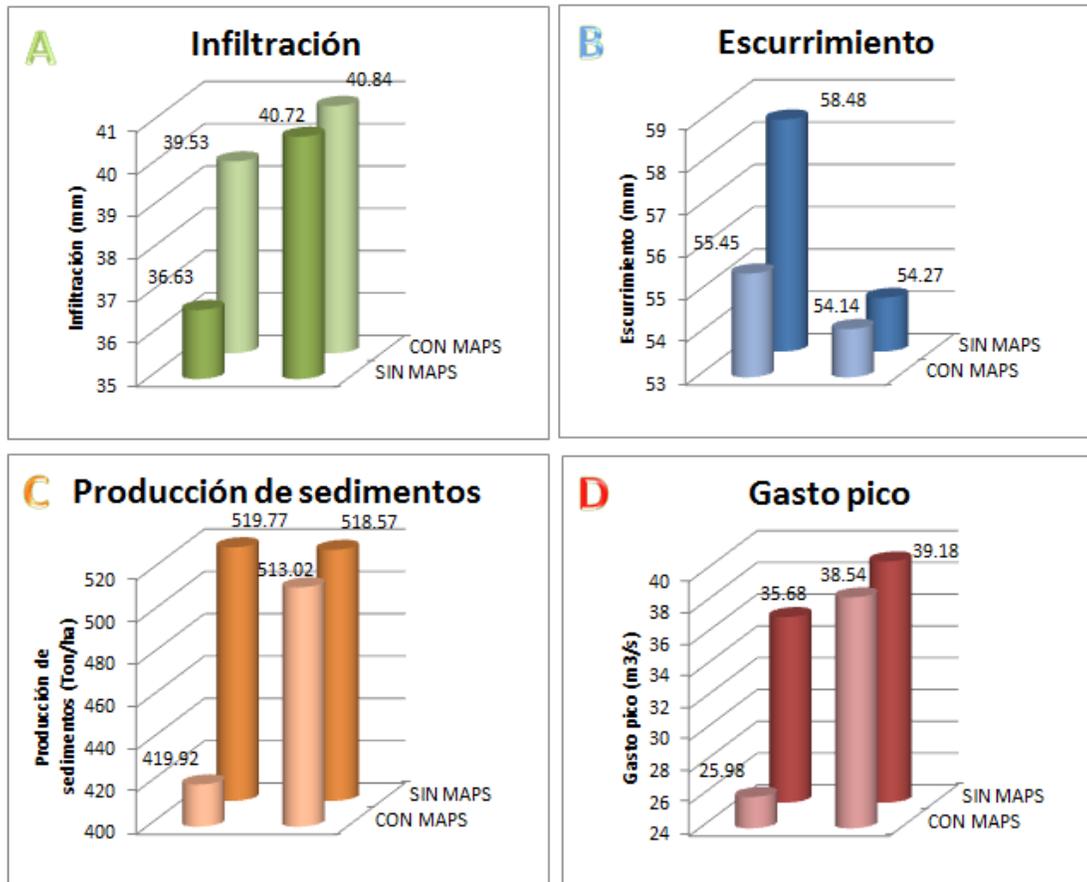
**Cuadro 4.4** Resultados de la unidad de escurrimiento No. 6 con y sin prácticas MAPS en la microcuenca “El Ventilador”.

Procesos en Unidad de escurrimiento No. 6	Prácticas MAPS	
	SIN	CON
Infiltración (mm)	40.72	40.84
Escurrecimiento (mm)	54.27	54.14
Producción de sedimentos (Ton/ha)	518.57	513.02
Gasto pico (m3/s)	39.18	38.54

Se observa que al reforestar determinada área se encuentran cambios dentro de los resultados de gasto pico, infiltración, escurrimiento y producción de sedimentos.

Analizando los resultados de gasto pico y escurrimiento se puede observar que al utilizar prácticas de reforestación con bosque de oyamel se presenta en el área un gasto pico y un escurrimiento menor. En la unidad de escurrimiento 1 se presenta una disminución de 27.19% de gasto pico y en la unidad 6 un 1.63%; podemos observar que esta disminución de gasto pico está en relación con el porcentaje de bosque de oyamel que se encuentra en cada una de las unidades, en la unidad 1 se presenta un aumento del 26.05% de bosque de oyamel y en la unidad 6 un 1.21%. En relación con el escurrimiento en la unidad 1 se presenta una disminución del 5.18% y en la unidad 6 un 0.24%; el escurrimiento se observa que también está relacionado con el porcentaje de bosque de oyamel que se encuentre en las unidades.

Así mismo la infiltración aumenta en la unidad de escurrimiento 1 un 7.92% y en la unidad 6 un 0.29%, lo que demuestra la capacidad que tienen las coberturas vegetales forestales para regular los procesos hidrológicos en la microcuenca.



**Figura 4.10.** (A) Infiltración total en mm, (B) Esgurrimento total en mm, (C) Producción de sedimentos total en ton/ha y (D) Gasto pico total en m<sup>3</sup>/s, para las unidades de escurrimiento 1 y 6 con y sin prácticas MAPS.

Se observa cómo se comporta la microcuenca en cada una de las unidades de escurrimiento, teniendo como resultado valores de escurrimiento mayor en la corrida sin prácticas MAPS en los procesos de escurrimiento,

producción de sedimentos y gasto pico en comparación con la corrida con prácticas MAPS.

Con respecto a los resultados de infiltración, como ya se mencionó, los valores más altos se presentan una vez reforestada el área; se sabe que hay una relación estrecha entre el escurrimiento de una zona y la infiltración que se presenta en la misma. Por lo tanto comparando los resultados se obtiene que a menor infiltración en determinado uso de suelo exista mayor escurrimiento en el mismo.

La producción de sedimentos está relacionada con el escurrimiento, su velocidad y el tipo y textura del suelo. Para este caso observamos disminución de producción de sedimentos en la unidad 1 de un 19.21 y en la unidad 6 de 1.07%. Un factor importante es el uso de suelo, ya que regula los procesos hidrológicos de superficie como el escurrimiento, ya que como se puede observar en los resultados obtenidos, la producción de sedimentos disminuye si se encuentra bosque de oyamel, ya que el impacto, desprendimiento y transporte de sedimentos se ve regulado por la cobertura vegetal.

Cabe mencionar que en nuestras dos unidades de escurrimiento se presentan litosoles y andosoles, en la unidad 1 se presenta un 45.29% de litosol y un 54.71% de andosol, en la unidad 6 un 18.30% de litosol y un 81.70% de andosol. Se ha encontrado en estudios anteriores (Guerra et al, 2003) que se presenta una elevada capacidad de infiltración en los horizontes superficiales de estos suelos, y que aumenta cuando existe una cobertura vegetal, donde los porcentajes de escurrimiento no superan el 0.6% de la pluviometría total. En este caso se presentan valores de cobertura vegetal altos y favorables para la infiltración.

Se puede observar que en la unidad de escurrimiento 1 en relación con la unidad 6 se presenta mayor cantidad de sedimentos, esto es porque en la unidad 1 se encuentra en porcentaje con respecto a su área un 45.29% de litosoles; en estos suelos se encuentran zonas desmontadas y se incorpora la agricultura de temporal o pastizales.

## **V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1 Recomendaciones**

- Es necesaria considerar otros factores para la obtención de resultados más precisos; estos factores pueden ser: condiciones climáticas, humedad en el suelo, variabilidad y espacial de las lluvias, acciones antropogénicas, etc.
- Se recomienda, aparte de prácticas de reforestación, la implementación de obras hidráulicas para contribuir con la regulación hidrológica del área de estudio; como son presas de los distintos materiales.

### **5.2 Conclusiones**

Un modelo hidrológico acoplado a una plataforma SIG, permite estudiar lo que está sucediendo en la cuenca de forma más apegada a la realidad, así la generación de información servirá como instrumento de planeación hidrológico-ambiental para las instituciones, organismos o gobiernos quienes podrán tomar mejores decisiones.

El modelado espacial y herramientas de análisis, como AGWA, constituyen uno de los métodos más poderosos para imaginar y evaluar posibles

escenarios futuros y los impactos que se presentan. Los estudios demuestran la capacidad de integración de la información digital de cobertura vegetal con modelos de procesos hidrológicos en la herramienta AGWA para explorar y evaluar las opciones para un entorno futuro. Esta herramienta ayuda a obtener resultados de gasto pico, infiltración, escurrimiento y producción de sedimentos para así poder evaluar de mejor manera una microcuenca, permitiendo a su vez, generar posibles escenarios y respuestas.

Con los resultados obtenidos se puede concluir que utilizando prácticas MAPS, en este caso reforestación, se presentan valores de infiltración más altos y de gasto pico, escurrimiento y producción de sedimentos menores lo cual ayuda a la regulación hidrológica de la microcuenca. Anteriormente en el área conocida como reforestada se encontraba bosque de oyamel, con esto podemos comprobar que los resultados obtenidos con nuestra modelación son los adecuados.

Los resultados de la simulación de indican que al ser reforestada un área determinada se contribuye a la modificación de la hidrología de las cuencas, los cuales se manifiestan en la modificación de gasto pico, infiltración, escurrimiento y producción de sedimentos. Los valores de infiltración representan el estado de conservación del área de estudio en cada una de sus unidades. A menor escurrimiento y gasto pico, la infiltración aumenta. La producción de sedimentos está relacionada estrechamente con la cobertura vegetal que presente la microcuenca.

## LITERATURA CITADA

- Aguilar Garduño Ernesto, Santillán Hernández Oscar David, Salgado Maldonado Gilberto y Martínez Morales Manuel.** 2010. Análisis Técnico de la Vulnerabilidad Hidrológica ante el Crecimiento Urbano. Caso de Angangueo, Michoacán.
- Aparicio Mijares F. J.** 2007. Fundamentos de hidrología de superficie. Editorial Limusa. Págs. 19, 27 y 177.
- Barfield B. L., Hayes J. C., Stevens E. and Harp S. L. and Fogle A.** 2006. SEDIMOT III Model – Watershed Models. Págs. 381.
- Bennett, J.P.** 1974. Concepts of mathematical modeling of sediment yield. Water Resources research. Págs. 485-492.
- Campos Aranda D. F.** 2000. Tránsito Hidrológico de Crecientes en Ríos con Flujo Lateral. México.
- Comisión Nacional de Agua (CONAGUA).** 2010. Restauración Hidrológica Ambiental de la Microcuenca de Aporte a la Población de Mineral de Angangueo, Michoacán, (microcuenca El Ventilador); Mediante la Implementación de Prácticas de Manejo del Agua y Preservación de Suelos. Informe Final. Convenio de Colaboración SGIH.GDTT-UAQ-010/02/RF/CC. Págs. 189.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal).** 2012. Criterios técnicos para la ejecución de los proyectos de conservación y restauración de suelos 2012. Periférico Poniente No. 5360, Col. San Juan de Ocotlán, C.P. , Zapopan, Jal. México.
- Foster, G. R., Lane L. J., Nowlin J. D., Laflen J. M., and Young R. A.** 1981. Estimating Erosion and Sediment Yield on Field Sized Areas. Transactions of the ASAE.
- Gómez M. A., Saldaña P., Ordoñez A., Mijangos M.A., Salcedo E. y Guadarrama M.A.** 2002. Estudio para la Manifestación de Impacto Ambiental de la Presa Extóraz, Querétaro. SEMARNAT. Págs. 30.

- Goodrich, D.C., Unkrich, C.L., Smith, R.E. and Woolshiser, D.A.** 2002. KINEROS2 - A distributed inematic runoff and erosion model. Proc. 2nd Federal Interagency Conf. on Hydrologic Modeling, July 29-Aug. 1, Las Vegas, NV. CD-ROM, Págs. 12.
- Guerra J.A., Arbelio C.D., Armas C.M., Rodríguez Rodríguez A., Mora J.L..** 2003. Erosión diferencial de andosoles y aridsoles en dos zonas climáticas de la isla de Tenerife. Departamento de Edafología y Geología, Facultad de Biología, Universidad de La Laguna, Avda. Astrofísico Francisco Sánchez s/n 38204 La Laguna, Tenerife, I. Canarias. E-mail: antororo@ull.es.
- Kepner, W.G., Semmens, D.J., Bassett, S.D., Mouat, D.A., and Goodrich, D.C.** 2004. Scenario Analysis for the San Pedro River, Analyzing Hydrological Consequences of a Future Environment. Environmental Monitoring and Assessment. Págs. 94, 115-127.
- Laura M. Norman<sup>1</sup>, Lainie Levick<sup>2</sup>, D. Phillip Guertin<sup>2</sup>, James Callegary<sup>1</sup>, Jesús Quintanar Guadarrama<sup>3</sup>, Claudia Zulema Gil Anaya<sup>4</sup>, Andrea Prichard<sup>5</sup>, Floyd Gray<sup>1</sup>, Edgar Castellanos<sup>4</sup>, Edgar Tepezano<sup>4</sup>, Hans Huth<sup>6</sup>, Prescott Vandervoet<sup>5</sup>, Saul Rodriguez<sup>4</sup>, Jose Nunez<sup>7</sup>, Donald Atwood<sup>7</sup>, Gilberto Patricio Olivero Granillo<sup>8</sup>, and Francisco Octavio Gastelum Ceballos<sup>9</sup>.** 2010. Nogales Flood Detention Study. <sup>1</sup>U.S. Geological Survey (USGS), Tucson, Ariz. <sup>2</sup>University of Arizona, School of Natural Resources and the Environment, Tucson, Ariz. <sup>3</sup>La Sección mexicana de la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA; Mexican Section of the International Boundary and Water Commission), Nogales, Sonora. <sup>4</sup>Instituto Municipal de Investigación y Planeación (IMIP; Municipal Institute for Research and Planning), Nogales, Sonora, <sup>5</sup>University of Arizona, Transboundary Aquifer Assessment Program (TAAP), Udall Center for Studies in Public Policy, Tucson, Ariz. <sup>6</sup>Arizona Department of Environmental Protection- Office of Border Environmental Protection (ADEQ-OBEP), Tucson, Ariz. <sup>7</sup>U.S. Section of the International Boundary and Water Commission (IBWC), El Paso, Tex. <sup>8</sup>Comisión Nacional del Agua (CONAGUA; National Water Commission), Hermosillo, Sonora. <sup>9</sup>Organismo

Operador de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento (OOMAPAS; Water and Wastewater Utility), Nogales, Sonora .

**Linsley K. P., Kohler M. A. y Paulus J. L. H.** 1977. Hidrología para Ingenieros. Segunda edición. Editorial McGraw Hill. Págs. 4, 13.

**Monsalve S. G.** 1999. Hidrología en la Ingeniería. Segunda edición. Editorial Alfaomega. Colombia. Págs. 131-134, 191.

**Cardoza V. R., Cuevas F. L., García C. J. S., Guerrero H. J. A., González O. J. C., Hernández M. H., Lira Q. M. de L., Nieves F. J. L. Tejeda S. D., Vázquez M. C. M.** 2007. Protección, restauración y conservación de suelos forestales. Manual de obras y prácticas. Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), Periferico Pte. No. Periferico Pte. No. 5360, Col. San Juan de Ocotan C.P. 45019, Zapopan, Jalisco, Mexico. Tel. 01 (33) 3777-7000 [www.conafor.gob.mx](http://www.conafor.gob.mx)

**Rivera J.** 2003. Erosion and Sediment Transport in a Proposed Regional Sanitary Landfill.

**Semmens D.J., Goodrich D.C., Unkrich C.L., Smith, R.E., Woolhiser D.A., and Miller S.N.** 2002. KINEROS2 and the AGWA Modeling Framework.

**Schwab, O. G., Frevert K. R., Edminster, W. T. y Bornes K. K.** 1990. Ingeniería de Conservación de Suelos y Aguas. Editorial Limusa. University of State Ohio, University of Arizona, United States Department of Agriculture.

**Smith, R.E., Goodrich, D.C., Woolhiser, D.A. and Unkrich, C.L.** 1995. KINEROS – A kinematic runoff and erosion model; Chapter 20. In: Singh, V.P., (Ed.), Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, Pág. 1130.

**Smith, R. E., Smettem K.R.J., Broadbridge P. and Woolhiser D.A.** 2002. Infiltration Theory for hydrologic Applications. Water Resources Monograph Series. Págs. 15, 212.

**Wilson B. N., Barfield B. J. and Moore J. D.** 1982. A Hydrology and Sedimentology Watershed Model. Part I: Modeling Techniques, Department of Agricultural Engineering, University of Kentucky, Lexington, Kentucky.

**Yang, C. T.** 1972. Unit Stream Power and Sediment Transport. Journal of the Hydraulic Division.