



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

ANÁLISIS DE LA DEFORMACIÓN DE LA SECCIÓN  
TRANSVERSAL EN CARCAVAS SOMERAS DE FONDO  
ROCOSO

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ciencias

(Recursos Hídricos y Ambiental)

Presenta:

Ing. Juan Alberto Calzada Marín

Dirigido por:

Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ciencias  
(Recursos Hídricos y Ambiental)

## ANÁLISIS DE LA DEFORMACIÓN DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL EN CARCAVAS SOMERAS DE FONDO ROCOSO

### TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias  
(Recursos Hídricos y Ambiental)

**Presenta:**

Ing. Juan Alberto Calzada Marín

**Dirigido por:**

Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos

### SINODALES

Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos  
Presidente

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Carlos Fuentes Ruiz  
Secretario

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Miguel Angel Dominguez Cortázar  
Vocal

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Eduardo Alvarez Mendiola  
Suplente

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Carlos Alberto Chávez García  
Suplente

\_\_\_\_\_  
Firma

\_\_\_\_\_  
Dr. Aurelio Domínguez González  
Director de la Facultad

\_\_\_\_\_  
Dr. Irineo Torres Pacheco  
Director de Investigación y  
Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Fecha  
México

## RESUMEN

La transformación del medio, junto con el disturbio de laderas y cauces, ha provocado que la erosión se convierta en un problema ambiental cada vez más serio. El modificar el paisaje ocasiona el aumento de escurrimientos máximos y las frecuencias y volúmenes derivados de las tormentas, lo que lleva a la modificación de la geometría de los cauces y el aumento de la carga de sedimento. Es por ello importante implementar acciones de mitigación en zonas con esta problemática, para lo cual, es importante estudiar la evolución de la sección de los cauces. El presente trabajo se desarrolló en la Microcuenca San Miguel Deheti, ubicada en el municipio de Amealco, Querétaro. Los volúmenes, velocidades y caudales se midieron en cauces bajo condiciones de campo y también se corroboraron con ayuda de un Sistema de Información Geográfica (SIG). El suelo del sitio de estudio fue caracterizado para entender el comportamiento y dinámica de la deformación de cauces con lechos rocosos.

**(Palabras clave:** *Erosión en cárcavas, deformación de cárcavas, flujo concentrado*)

## SUMMARY

Environmental transformation, in combination with the disruption of hillslopes and streams, has converted erosion in a serious environmental problem. Modifying the landscapes causes the increase in maximum runoff, frequencies and produced runoff volumes, which in turn modifies the geometry of streams and increases sediment loads. Due to this, it is important to implement mitigating actions in problematic zones, for which, it is important to study the evolution of stream sections. This study was performed in the "San Miguel Deheti" small watershed, located in the municipality of Amealco, Queretaro. Runoff volumes, velocities and discharge was measured in streams under field conditions, and were also corroborated with the help of a Geographical Information System (GIS). The soil in the study site was characterized for a better understanding of the behavior and dynamics of deformation of streams with bedrock.

**(Key words:** Gully erosion, Gully deformation, concentrated flow)

## **AGRADECIMIENTOS**

A México que a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y de la Universidad Autónoma de Querétaro, permitió el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos, que como Director de Tesis siempre fue posible contar con su apoyo para la realización de este trabajo.

Al Dr. Carlos Fuentes por sus múltiples consejos.

Al Dr. Miguel Ángel Domínguez Cortázar por sus valiosas aportaciones.

Al Dr. Eduardo Álvarez Mendiola por alentarme ante diversas situaciones.

Al Dr. Carlos Alberto Chávez García por el apoyo brindado.

A los profesores que realizaron grandes aportaciones a mi formación ante el paso que realice en esta etapa de posgrado: M.C. Patricia Spindola, Dr. Alfonso Gutiérrez, Dr. Nabil Mobayed, Dr. Juan Carlos Jáuregui, M.C. Cesar Granada, Dr. Claudia Oleshcko, Dr. Enrique González.

A mis compañeros y amigos: Ale, Alejandra, Alex, Alondra, Armando, Artur, Banda, Chava, Chave, Christian, Cuevas, Denio, El Jefe, Foco, Franco, Gera, Héctor, Isra, Jorge, Josept, Juan, Kari, Leandro, Marce, Mauricio, Memo, Noe, Pablito, Raúl, Rebe, Silvestre, Silvia, Tavito, Temo y Tonhinho, y a cada una de las personas que me acompañaron en este camino

A mi familia de la cual siempre obtuve apoyo incondicional y el aliento para seguir adelante.

A mi amada esposa Larissa que estuvo conmigo en cada momento alentándome, a la cual no tengo palabras que describan el agradecimiento que tengo por su infinito apoyo, paciencia y comprensión, así como la gran admiración y amor que le profeso.

## DEDICATORIAS

A Dios por guiar mi camino y poner en él, a personas que con sus consejos, charlas, llamadas de atención, bromas y demás vivencias, llenaron mi ser de nuevas experiencias y conocimientos.

A mi familia que a pesar de la distancia siempre ha estado presente, a mis padres Herman Calzada Robles y Noemí Candelaria Marín Loría, a mis Hermanos Agustín y Jesús Miguel, que con mis cuñadas Elsy y Mary, me han brindado la oportunidad de ser tío de Eira, Melissa, Axel, Laira, Alejandra, Fernanda y a un nuevo integrante que viene en camino, a los cuales también les dedico este pequeño gran paso en mi vida, de la misma forma a toda mi familia, ya sea sanguínea o a aquella familia a la cual llamamos amigos.

A mis Abuelitas Rosita Robles y Manuelita Loría y a mis Ángeles Agustín Calzada y Facundo Marín, que sé que de alguna u otra manera guían y protegen mis pasos.

A mi esposa Larissa, que ha sido el motor de mi vida.

# INDICE GENERAL

i

RESUMEN .....	1
SUMMARY .....	2
AGRADECIMIENTOS.....	3
DEDICATORIAS.....	4
INDICE GENERAL.....	5
INDICE DE FIGURAS .....	7
I. INTRODUCCIÓN .....	8
1.1 Justificación .....	9
1.2 Descripción Del Problema.....	11
1.3 Antecedentes .....	13
II. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA.....	15
2.1 Cuenca .....	15
2.2 Erosión Hídrica.....	17
2.3. Erosión en Cárcavas .....	18
2.3.2 Teorías de Fallas .....	23
2.3.2.1 Mecánica de las fracturas.....	24
2.3.2.2 Teoría del máximo esfuerzo normal (Rankine) .....	25
2.3.2.3 Teoría de Mohr modificada.....	25
2.4 Objetivos .....	26
2.4.1 Objetivo general .....	26
2.4.2 Objetivos específicos .....	26
2.5 Hipótesis .....	26
III. METODOLOGÍA.....	27
3.1 Descripción Del Área De Estudio .....	27
3.2 Herramienta (Concepts) .....	30
IV. RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....	32
DESCRIPCIÓN DEL AREA DE ESTUDIO.....	32
FISIOGRAFIA .....	32

TOPOGRAFIA Y GEOLOGÍA .....	33
USO DEL SUELO Y VEGETACIÓN .....	36
V. LITERATURA CONSULTADA .....	51

## INDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Zonas funcionales de una cuenca .....	16
2. Morfología de la Microcuenca San Miguel Deheti.....	36
3. Rangos de Pendientes de la Microcuenca San Miguel Deheti.....	34
4. Pendientes de la Microcuenca San Miguel Deheti.....	36
5. Uso de Suelo y Vegetación de la Microcuenca San Miguel Deheti.....	37
6. Curva ombrotérmica en la región correspondiente a la microcuenca San Miguel Deheti..	38
7. Gastos presentes en la Microcuenca San Migeul Deheti.....	39
8. Grafico comparativo entre la sección transversal original y la deformación dada en el cauce después del evento simulado .....	40
9. Comparación de la simulación del evento sin y con obra de conservación.....	43
10. Caso de deformación cárcava 1 .....	45
11. Caso de deformación cárcava 2 .....	46

## INTRODUCCIÓN

El material arrastrado por la erosión en los taludes de los cauces a menudo es una importante parte importante del total de los sedimentos transportados. De acuerdo Walling y Collins (2005), los sedimentos originados en los taludes de los ríos normalmente representan entre el 5 y el 15% de los sedimentos en suspensión en los ríos de cabecera, y esta contribución supera el 40% en un número significativo de las cuencas. La importancia de la erosión en taludes de cauces como fuente de sedimentos puede ser incluso mayor en los ambientes más sensibles. Se ha encontrado que el material proveniente de taludes puede representar el 80% del total de sedimentos erosionados de las corrientes en la zona de loess del Medio Oeste de Estados Unidos (Simon *et al.*, 1996). Mientras que la erosión en los márgenes de cauces es un proceso de ajuste natural del canal, desempeña un papel importante en el mantenimiento de la capacidad media de transporte de canales de aluviales (Lane et al., 2006) y en la remoción de la diversidad biológica en áreas riparias o llanura de inundación (Salo et al., 1986). Bajo condiciones aceleradas, las tasas de ajuste lateral pueden amenazar estructuras ubicadas en la llanura de inundación, dando como resultado la pérdida de las tierras de interés agropecuario, y el incremento de sedimentación aguas abajo (Lawler et al., 1997). Esto a su vez puede tener graves consecuencias para los hábitats acuáticos, la calidad del agua y aumentar el riesgo de inundaciones (Owens et al, 2005; Pinter y Heine, 2005; Soulsby et al, 2001; Stover y Montgomery, 2001).

Las tasas del aumento de amplitud de los cauces pueden ser influenciadas por una amplia variedad de factores que pueden ser divididos en los procesos causales que dan lugar a la erosión y los procesos de control que influyen en la eficacia de los procesos que intervienen en los taludes de los cauces. El proceso causal más importante es a menudo la erosión fluvial, que consiste en el desprendimiento de partículas individuales o conjuntos de partículas del talud por el flujo y por efecto de las fuerzas de arrastre (Lawler et al., 1997). En general, las

tasas de erosión fluvial tienden a aumentar durante las inundaciones y, por consiguiente, presentan un patrón estacional (Knighton, 1973). Otros mecanismos causales incluyen procesos de sub-áreas, tales como la desecación (Lawler, 1992;. Prosser et al, 2000) y la acción de congelación-descongelación (Lawler, 1986; Stott, 1997; Yumoto et al, 2006) que pueden resultar en la ruptura y pérdida de material de los taludes, y la falla de la masa mediante la cual las fuerzas gravitatorias superan fuerzas de resistencia y cohesión (Lawler et al., 1997).

Dentro de los factores que controlan la eficacia de estos procesos se encuentra la cohesividad del material (Thorne, 1982), su textura, y la cobertura de la vegetación (Masterman, 1994), así como la presencia o ausencia de material vegetal muerto en los canales (Davis y Gregory, 1994). Las actividades antropogénicas también pueden ser importantes. Trimble (1994) encontró que el pastoreo de ganado en las zonas ribereñas causa que la velocidad de erosión en los bancos sea entre tres y seis veces más rápida que en áreas no pastoreadas, como resultado del material suelto y la eliminación de la vegetación. Del mismo modo, Stott (1999) concluyó que la tala de árboles de las zonas riparias en un bosque comercial fue la principal razón por la cual aumentó la tasa de erosión en los taludes de los cauces. Este cambio se atribuye al aumento de la exposición de los bancos a las corrientes. Los efectos erosivos son menos frecuentes y de menor intensidad cuando los taludes de los cauces se encuentran protegidos por la cubierta vegetal.

Las principales causas y los controles de la erosión en márgenes en un lugar determinado puede variar tanto espacial como temporalmente (Couper y Maddock, 2001; Lawler et al, 1999;.. Parker et al, 2008) y deben ser identificados con precisión y comprender si las medidas correctivas son rentables y eficientes.

## **1.1 Justificación**

La transformación del paisaje, junto con la manipulación excesiva de los cauces, han causado que la erosión y deformación de canales se convierta en un problema cada vez más complejo de predecir y, por lo tanto, su relevancia va en aumento. La urbanización y la transformación del paisaje natural provoca el aumento de las escorrentías derivadas de las tormentas, observando mayor variación en la frecuencias y los volúmenes, lo que lleva a canalizar las escorrentías y la ampliación de su cauce en muchas ocasiones y con ello puede ocasionar el aumento de las cargas de sedimentos (Graf, 1975). La erosión excesiva reduce la calidad del agua a través de aumento de la turbidez y el transporte de contaminantes y sedimentos. Las altas tasas de sedimentación pueden alterar el lecho del río, destruyendo el hábitat de macroinvertebrados y la vegetación acuática emergente, originado por daños de eutrofización.

Los estudios han demostrado que las tasas de deformación de cauces pueden ser elevadas, y con ello proporcionar una cantidad significativa de sedimentos a las corrientes (Simon et al., 2000). La contribución de la erosión de cauces a la sedimentación total puede ser de hasta un 80% en cuencas urbanas (Simon y Thorne, 1996). Predecir correctamente las fuentes de sedimentos y sus magnitudes, así como la carga total máxima diaria (TMDL) es esencial en el desarrollo de estrategias de manejo y uso del suelo, y con ello implementar planes donde el sedimento es identificado como la causa principal de su deterioro. Se necesitan modelos precisos para evaluar el impacto de la erosión de cauces y restauración de canales.

En la actualidad, la necesidad de un gran número de insumos, y la complejidad del proceso de software capaz de simular la erosión de cauces en cuencas hidrográficas, han dificultado la aplicación de modelos para estudiar las deformaciones causadas por el sedimento. El requerimiento de tiempo y dinero para la recolección de datos y el desarrollo de modelos son de la misma manera limitantes. Muchos modelos de cuencas y corrientes comúnmente utilizados como GWLF, SWAT, y CONCEPTS presentan subrutinas de erosión en canales incluidas dentro de la estructura general de los programa. Poca investigación se

ha hecho para verificar la exactitud de tales subrutinas, lo que limita su aplicación. Es necesario realizar investigaciones para una comprensión más completa de la complejidad del modelo y su efecto en las predicciones de la erosión del cauce, lo cual permitirá que desarrolladores de software, y personas claves en la toma de decisiones de zonas de interés, puedan evaluar mejor el impacto de las acciones antrópicas sobre carga de sedimentos en la cuenca.

En esta tesis se presenta un método para el análisis de las modificaciones en los perfiles transversales de cauces; con el afán de brindar una herramienta útil, a través de un programa de fácil aplicación, para el diseño de obras hidráulicas que sirvan al control de la pérdida de suelo y arrastre de material. Con esto se pretende que el diseño de las obras sea lo más apegado a las necesidades del cauce y hacerlas funcionales ante los problemas de erosión hídrica.

## **1.2 Descripción Del Problema**

La necesidad de evaluar los efectos que causan los cambios de uso y manejo de la tierra sobre la conservación del suelo ha llevado a recurrir, cada vez con más frecuencia, al uso de modelos de simulación, con fines tanto de diagnóstico como de pronóstico, sobre todo para predicción a medio y largo plazo.

La complejidad del trabajo reside en la gran variedad de procesos que han de ser simulados, como infiltración, escurrimiento, erosión, adsorción y transformaciones químicas en el suelo. Los modelos de simulación de procesos físicos representan el sistema que se modela a través de la descomposición del mismo en los componentes que lo integran. De este modo se simulan los fenómenos en los distintos componentes y así cada proceso se analiza de forma individual y se mejora o altera hasta que cumple con las necesidades del usuario (Aguilar, 2004).

Un aspecto importante de cualquier modelo es la definición de los parámetros de entrada, variables de estado y relaciones entre ambas para cada proceso incluido en el mismo, definiendo la escala espacio-temporal para la que dicha caracterización es válida. Además, es necesario conocer las características de los

datos existentes. Si los datos son adecuados, la calibración y validación de los modelos es necesaria previo a su aplicación como medios de predicción para evitar obtener resultados alejados de las condiciones reales (Overcash et al., 1981).

Los usuarios de los modelos a menudo se enfrentan con la difícil tarea de determinar los parámetros para calibrar, de manera que la respuesta del modelo imite la realidad; es decir, las condiciones del canal lo más cerca posible. Cuando el número de parámetros en un modelo es sustancial como consecuencia de un gran número de sub-procesos que se están considerando o debido a la propia estructura del modelo, el proceso de calibración se vuelve complejo y extenso computacionalmente (Rosso, 1994; Sorooshian y Gupta, 1995). En tales casos, el análisis de sensibilidad es útil para identificar y clasificar los parámetros que tienen un impacto significativo sobre los resultados del modelo de interés específicos (Saltelli et al., 2000).

El problema que se presenta en zonas con climas secos y semisecos es el elevado índice de arrastre de suelos debido a la erosión hídrica, ocasionado principalmente por el cambio de uso de suelo, asociado a la deforestación en la zona y por ende la desprotección que la cobertura vegetal. Aunado a esto, las características del suelo favorecen a la erosión hídrica, lo que propicia en gran medida la deformación rápida de los cauces. Esto dificulta el diseño de obras hidráulicas que permitan la conservación del suelo. La contribución principal de la investigación es generar una metodología rápida y eficiente que permita analizar la deformación del perfil transversal del cauce y con ello brindar una herramienta eficaz para el diseño de obras hidráulicas sobre cauces.

En varias ocasiones, al realizar un proyecto siempre existe una constante falta de información, para lo cual siempre se recurre a modelos hidrológicos que demuestren de una forma cuantitativa y gráfica los efectos de los diferentes componentes en los diferentes ciclos naturales dentro de una cuenca, así como de la implementación de prácticas de manejo del agua y preservación de suelos. Esto

ha llevado a tener que atacar la problemática de una forma puntual, ubicando las prácticas en sitios prioritarios, sin tener una certeza de que su ubicación es la adecuada, o mejor dicho, donde mayor efecto pueda tener en la retención de suelo, reducción del volumen y velocidad del escurrimiento.

Evaluar el efecto de la implementación de prácticas para la conservación de suelo y agua, requiere de la evaluación, validación y calibración de modelos a diferentes escalas espaciales y temporales.

Este estudio considera evaluar, validar y calibrar modelos hidrológicos, con el objetivo de determinar el impacto erosivo del flujo concentrado en la deformación de los perfiles transversales de los cauces en una zona de Amealco, Querétaro.

### **1.3 Antecedentes**

En la zona de estudio, los procesos de arrastre por erosión hídrica son recurrentes y de gran relevancia, puesto que los suelos por sus características presentan una gran erodabilidad, generando en los cauces una transformación rápida de su sección transversal, a pesar de la limitada precipitación en la zona de influencia, lo cual se puede traducir en un factor de susceptibilidad para las poblaciones o zonas de interés, en términos de desastres naturales.

Es de suma importancia conocer la deformación de las secciones transversales para el establecimiento de obras que permitan la conservación de suelo y agua. Para ello se pueden utilizar diferentes herramientas computacionales que necesitan ser adaptadas para distintas condiciones dependiendo las necesidades y características de cada sitio.

CONCEPTS fue diseñado por la Ley de Seguridad Nacional para trabajar como parte de una paleta de herramientas integradas de diseño construido en torno a la tecnología AGNPS98 y es apoyado por el USDA-Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS). CONCEPTS Versión 1.0 está diseñado para simular flujo inestable unidimensional, los procesos de transporte de sedimentos y la erosión de las márgenes y el fallo en canales (Langendoen, 2000). CONCEPTS

realiza un seguimiento del flujo de sedimentos a través de estructuras dentro de los cauces y es responsable de los cambios en la morfología del canal simulando la masa y el fallo. Los sistemas de corriente con sedimentos tanto cohesivos y no cohesivos, así como las variaciones en la cubierta vegetal, así como las alteraciones en la rugosidad del canal y su frontera pueden ser simulados mediante el submodelo SEDTRA. Otras aplicaciones incluyen la evaluación de las estructuras de control dentro del cauce, la ubicación y la eficacia de esas medidas y la evaluación de escenarios de restauración de corrientes y su capacidad para proporcionar estabilidad y mejoramiento del hábitat (Langendoen, 2000).

Las futuras versiones del modelo incluirán la capacidad de simular zonas de amortiguación riparias, vegetación, y la evolución de la forma del canal y de los patrones alternados de deposición y erosión (Langendoen, 2000).

## REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

### 2.1 Cuenca

Una cuenca hidrográfica se define como el espacio geográfico natural delimitado por los parteaguas de las montañas, en donde existen escurrimientos superficiales de agua, mismos que se conducen por medio de un sistema de drenaje o cauces a un punto de acumulación y tienen una salida (Cruz, 2003). La cuenca es el lugar en donde el hombre interactúa con el medio ambiente, dándose interrelaciones entre los componentes físicos y bióticos que lo integran, por lo que es de vital importancia su entendimiento en conjunto con la identidad cultural y socioeconómica que presenta la población para acceder y explotar los recursos naturales (Cotler, 2004).

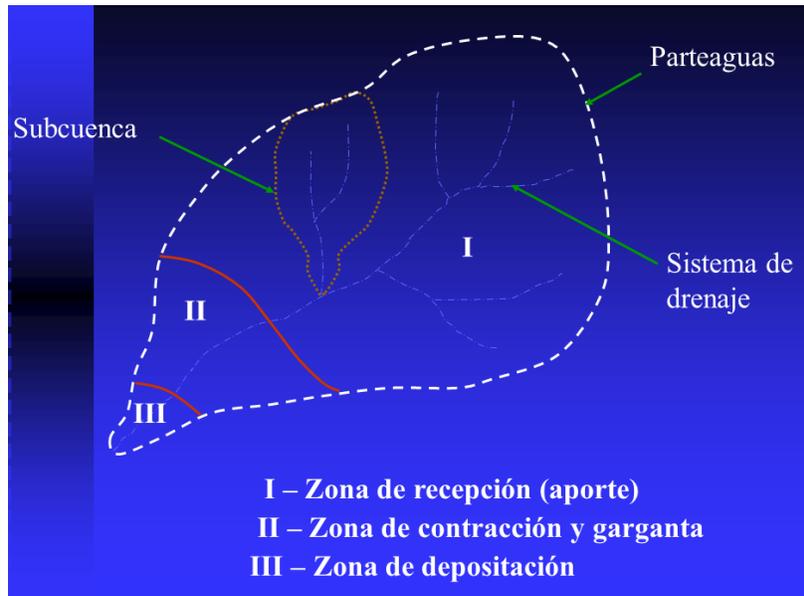
Una cuenca puede dividirse en tres zonas funcionales, mismas que presentan distintas características estructurales y un grado de 'fragilidad' diferente (Cotler *et al.*, 2004), tal como se puede observar en la Figura 1.

1. La zona de cabecera (parte alta de la cuenca). Es una zona de gran fragilidad para el funcionamiento de toda la cuenca, ya que los procesos que aquí se desarrollan pueden tener repercusiones en las zonas bajas. En la zona de cabecera se inicia la captación del agua, en donde la cubierta vegetal existente, actúa como reguladora de la cantidad y temporalidad del flujo del agua, protegiendo a los suelos de la erosión hídrica y la sedimentación y degradación de ríos, y por consiguiente la pérdida de fertilidad de los suelos en las laderas.

2. La zona de captación- transporte (zona media de la cuenca). Es el área en la que se capta la mayor parte del agua. También aquí se transporta el agua, sedimentos y los nutrientes que provienen de la parte alta. La zona media se caracteriza por ser una zona de amortiguamiento entre la parte alta y baja de la cuenca, y normalmente es donde se presentan con mayor intensidad las actividades productivas.

3. La zona de recepción o aporte (parte baja de la cuenca). Es la zona de recepción de los cauces de agua, mismos que se caracterizan por ser más

caudaloso. Esta zona normalmente recibe los impactos de las acciones realizadas en la parte media y alta de la cuenca.



*Figura 1 Zonas funcionales de una cuenca*

Dourojeanni (1991) menciona que la cuenca hidrográfica constituye el marco conceptual y espacial adecuado para la planeación y la gestión integral de los recursos naturales. Las cuencas hidrográficas, por ser las unidades físicas en las cuales tienen lugar todos los procesos naturales, son así mismo la unidad natural y lógica para el desarrollo agrícola, ambiental y socioeconómico. Con el crecimiento demográfico y el aumento de las necesidades de urbanización, industrialización y producción de alimentos, los efectos de la actividad antropogénica ya no se limitan a zonas pequeñas ni a una comunidad en particular; deben examinarse en el contexto más amplio en el que ocurren (Salgado, 2005).

La planeación y ejecución de acciones bajo el contexto de un manejo integral de cuencas dependen del tamaño de la cuenca y de su jerarquía en el sistema hidrográfico. Esto conlleva a ligar los problemas con el nivel jerárquico de cuenca adecuado, tanto para su planeación como para su gestión. Es decir, que toda

intervención local debe considerarse en el contexto de la situación general de la cuenca en donde se debe elaborar una metodología que considere varios niveles: cuenca, subcuenca, microcuenca, y además considerar las unidades de escurrimiento (FAO, 2007).

El manejo integral de una cuenca tiene como fin último la conservación y/o restauración del ciclo hidrológico natural de la cuenca, atendiendo durante el proceso, a objetivos intermedios como la conservación y restauración de otros recursos naturales, la reconversión productiva y formas más eficientes de aprovechamiento, y en general, el control de externalidades negativas que impactan la funcionalidad y el equilibrio ecológico de la cuenca. El propósito de este enfoque es integral y ecológico y permite tener ecosistemas más saludables capaces de proveer bienes y servicios ambientales que mejoren la calidad de vida de los habitantes (Córdova, 2010).

## **2.2 Erosión Hídrica**

La erosión es el desgaste que se produce en la superficie del suelo por la acción de agentes externos, como el viento o el agua, o por la fricción continua de otros cuerpos. La erosión hídrica es el proceso por el cual se produce el desprendimiento, transporte y depositación de las partículas de suelo por acción de los siguientes agentes principales:

a. Saltación pluvial. El impacto de las gotas de lluvia en el suelo desprovisto de vegetación y expuesto, ocasiona el desalojo y arrastre del suelo fino. El impacto compacta el suelo disminuyendo la permeabilidad e incrementando la escorrentía.

b. Escurrimiento superficial difuso. Comprende la erosión laminar sobre laderas desprovistas de vegetación y afectadas por la saltación pluvial, que estimulan el escurrimiento del agua arrastrando finos. El escurrimiento difuso ocurre cuando la velocidad del agua es menor de 0.30 m/s.

c. Esguerrimiento superficial concentrado. Produce dos formas, los surcos de erosión (canales bien definidos y pequeños), y las cárcavas, que son canales o zanrones de mayor magnitud. Cuando el flujo se hace turbulento, la energía del agua es suficiente para labrar canales paralelos o anastomados, llamados surcos. Más profundos y anchos que los surcos son las cárcavas, por las que circula agua durante y poco después de los aguaceros. El proceso se da en cuatro etapas: 1. Entallamiento del canal. 2. Erosión remontante desde la base. 3. Cicatrización. 4. Estabilización.

d. Esguerrimiento subsuperficial. Las aguas infiltradas ocasionan la tubificación y el sifonamiento del suelo, formando cavidades, en donde la fuerza de infiltración ha superado la resistencia del suelo.

Aspectos relacionados con la erosión hídrica que deben considerarse:

1. Las geoformas denudativas creadas por la erosión.
2. Los fenómenos dinámicos asociados al transporte de masas.
3. La sedimentación y la colmatación de las vaguadas de los cauces.

### **2.3. Erosión en Cárcavas**

Las cárcavas (también llamadas barrancas, o simplemente zanjas) son la manifestación más visible y llamativa del proceso erosivo. Se desarrollan a partir de la acción del esguerrimiento sobre la superficie, luego de que se alcanza un cierto caudal y velocidad del flujo, y se considera una cárcava como aquella forma de erosión que no puede ser borrada por el laboreo de implementos agrícolas.

La tasa de erosión en cárcavas depende del potencial de generación de esguerrimiento de la cuenca, del área de drenaje que recibe la cárcava, del material del suelo y subsuelo, de la forma que toma la sección y de la pendiente del terreno (Fangmeier *et al.*, 2006).

La forma y profundidad que adoptan las cárcavas está determinada por el tipo de material del suelo y su grado de cohesión. Para materiales poco cohesivos, la forma tiende a ser en “u”, mientras que para materiales más resistentes la forma típica es en “v”.

La evolución de las cárcavas comienza con un pequeño salto hidráulico, que puede generarse en un quiebre de pendiente, y que produce una cabecera de corte o cabecera que avanza en forma retrocedente, es decir en dirección contraria al escurrimiento. Esto ocurre debido a la formación de una cascada o salto de agua que va erosionando el piso de caída del agua, y generando un debilitamiento del subsuelo por salpicadura, y una reducción de la resistencia al corte de la masa por humedecimiento. En estas condiciones se producen caídas de bloques en la cabecera.

Las cárcavas avanzan siguiendo un ciclo de retroalimentación positiva, ya que la altura del salto de cabecera es cada vez mayor, lo cual genera una mayor energía cinética de la cascada que incrementa adicionalmente su poder erosivo. Por otra parte las cárcavas se van ramificando por toda la red de drenaje colectora, generando una red de cárcavas digitada que genera tantas cabeceras activas como vías de drenaje tenga la cuenca.

Las cárcavas pueden estar activas, cuando la cabecera avanza y el fondo de la cárcava genera nuevas cabeceras internas, o inactivas cuando tanto la cabecera como el piso están vegetados.

La ciencia ha desarrollado algunos modelos de predicción de la erosión en cárcavas (Kirby y Morgan, 1994). La expresión siguiente considera el tamaño de la cuenca y la precipitación mínima como factores que regulan el avance de las cárcavas (SCS, 1966, citado por Kirby y Morgan, 1994):

$$R = (5.25 * 10^{-3}) * A^{0.46} * P^{0.2} \dots\dots\dots(2.1)$$

Donde:

- R = avance promedio anual de la cabecera en m
- A = área de desagüe de la cuenca por encima de la cabecera en m<sup>2</sup> y
- P = precipitación total de lluvias de 24 horas igual o mayor a 12.7 mm para un período determinado, convertida a una base anual promedio en mm.

Utilizando este procedimiento para una cuenca representativa de las condiciones del sur de Córdoba, Argentina, se estimaron avances promedio del orden de 28 m/año, con máximos de 80 y mínimos de 6 m/año (Cisneros *et al.*, 2005). Para la misma región y utilizando otros procedimientos, se estimó un avance anual promedio del orden de 11 m/año con máximos de 17 para la cuenca La Colacha (Dpto. Río Cuarto, Córdoba), y mínimos de 3 para la cuenca de San Ambrosio (Cisneros, 2010).

Este tipo de erosión es el más reconocido por los productores agropecuarios, ya que implica daños muy visibles en sus tierras y, especialmente, en los caminos rurales que funcionan como vías preferenciales de circulación de escurrimientos, y por lo tanto, sufren en mayor medida los daños por este mecanismo de erosión.

### 2.3.1 Procesos de formación de cárcavas

La formación de una cárcava es un proceso gobernado por las características del flujo concentrado. Dicho proceso es tratado generalmente como un fenómeno de umbral (Knapen *et al.*, 2007); es decir, el arranque de partículas del suelo se produce cuando el flujo supera su umbral de resistencia. Para expresar la intensidad a la que tiene lugar el proceso de arranque de partículas de suelo, en la literatura se han presentado diversos indicadores hidráulicos. Entre los más simples, se encuentran la descarga total ( $Q$ ) o la descarga unitaria ( $q$ ) (Meyer *et al.*, 1975):

$$Q = vA; q = \frac{Q}{w} \dots \dots \dots (2.2)$$

con  $v$  como la velocidad del flujo ( $m \text{ s}^{-1}$ ),  $A$  como el área de la sección de la cárcava ( $m^2$ ) y  $w$  como la anchura de la cárcava ( $m$ ). El esfuerzo cortante del flujo ( $\tau$ ) también trata de reflejar la fuerza con la que éste incide sobre la superficie (Lyle y Smerdon, 1965) y por lo tanto la intensidad a la que se produce el desprendimiento:

$$\tau = \rho gRS \text{ con } R = \frac{A}{w_p} \text{ y } w_p = w + 2d$$

donde  $\rho$  es la densidad del fluido ( $kg \text{ m}^{-3}$ ),  $g$  es la aceleración de la gravedad ( $m \text{ s}^{-2}$ ),  $R$  es el radio hidráulico ( $m$ ) y  $S$  es la pendiente del cauce ( $m \cdot m^{-1}$ ). Mientras  $w_p$  es el perímetro de mojado ( $m$ ) y  $d$  es la profundidad del flujo.

Otro parámetro utilizado con frecuencia para medir la fuerza que ejerce el flujo sobre el suelo es la potencia de la corriente ( $\omega$ ) (Bagnold, 1977) o la potencia total de la corriente ( $\omega_T$ ) (Moore y Burch, 1986):

$$\omega = \tau\omega; \omega_T = \rho gQS$$

De acuerdo con el concepto de umbral, la tasa a la que las partículas del suelo son desprendidas se encuentra relacionada con el valor que adoptan la descarga, el esfuerzo cortante y la potencia de la corriente (Knapen *et al.*, 2007). Por tanto, se puede establecer un valor crítico de dichos parámetros para un suelo

específico, a partir del cual tiene lugar el desprendimiento de partículas de suelo ( $Q_{cr}$ ,  $\tau_{cr}$  y  $w_{cr}$ ). Por ejemplo, la tasa de erosión ( $\tau$ ) suele expresarse mediante la siguiente formulación (Arulanandan *et al.*, 1980):

$$\varepsilon = k(\tau - \tau_{cr}) \dots \dots \dots (2.3)$$

donde  $k$  es el coeficiente de erosionabilidad del suelo y  $\tau_{cr}$  es el esfuerzo cortante crítico que el flujo debe ejercer para arrancar una partícula de suelo.

Sin embargo, la energía del flujo no se emplea de forma exclusiva en el desprendimiento de partículas, sino que es también utilizada para el transporte de las mismas. Por lo que la intensidad del desprendimiento dependerá de la carga de sedimentos que el flujo transporte y de la energía disponible para el desprendimiento de partículas (Foster y Meyer, 1972):

$$\frac{Dr}{Dc} + \frac{G}{Tc} = 1 ; \text{despejando } Dr = Dc \left( 1 - \frac{G}{Tc} \right) \dots \dots \dots (2.4)$$

donde  $Dr$  es la intensidad de arranque ( $kg\ m^2\ s^{-1}$ ),  $Dc$  es la capacidad de despredimiento ( $kg\ m^2\ s^{-1}$ ),  $G$  es la carga de sedimentos del flujo ( $kg\ s^{-1}$ ) y  $Tc$  es la capacidad de transporte de sedimentos del flujo ( $kg\ s^{-1}$ ).

Los parámetros presentados en las anteriores ecuaciones son utilizados como variables predictoras para la iniciación de cárcavas y suponen la segunda generación de modelos disponibles para la estimación del desprendimiento de partículas por flujo concentrado (Knapen *et al.*, 2007). La tercera generación la representan los modelos que tratan de incorporar un componente estocástico en sus formulaciones (Sidorchuk, 2005) y que completan la evolución desde los modelos empíricos que supusieron la primera generación. Por tanto, la aparición de cárcavas como consecuencia de la circulación de flujo concentrado se relaciona con la superación de un umbral de tipo geomorfológico (Patton y Schumm, 1975), debido a una disminución en la resistencia de las fuerzas que mantienen unidas las partículas de suelo, a un incremento en la fuerza erosiva del flujo, o a ambos (Bocco, 1991). Este umbral puede ser extrínseco, bien de tipo

climático o bien de tipo antropogénico (Gómez, *et al.*, 2011), o intrínseco e inherente al propio sistema de la cárcava y consecuencia de procesos geomorfológicos y sedimentológicos naturales dentro del canal (Patton y Schumm, 1975).

La formación de una cárcava por flujo superficial frecuentemente aparece ligada a un incremento en la escorrentía. Dicho incremento puede deberse a varias causas: cambios en el uso del suelo, modificaciones en el área de drenaje motivadas por el hombre (Nyssen *et al.*, 2002), eventos de precipitación de características extremas, etc. Algunos trabajos han señalado la posibilidad de que una cárcava represente un estado evolutivo avanzado de un arroyo (FAO, 1965); sin embargo, varios autores señalan que su génesis suele ser mucho más compleja (Morgan, 1979). Otros investigadores han descrito la aparición de cárcavas por la acción de flujo concentrado superficial sobre pequeñas depresiones del terreno (originadas como consecuencia de sobrepastoreo, incendios, etc.) que con el tiempo terminan conectándose para formar un cauce incipiente (Leopold *et al.*, 1964). El origen de algunos sistemas de cárcavas también puede estar relacionado con la circulación de flujo subsuperficial a través de túneles en el suelo, se trata del fenómeno conocido como erosión en túnel («*piping*» en inglés; Jones, 1981). Este proceso tiene lugar cuando se produce la erosión de un volumen de suelo como consecuencia de la circulación de agua de percolación a través del suelo, dando lugar a formas tubulares. Estas estructuras pueden formar verdaderas redes de drenaje subterráneas sobre las que va incidiendo el flujo. Cuando la estructura se torna insostenible, el tubo colapsa, produciéndose el derrumbe de su parte superior y originando un escalón, que con la ayuda del flujo superficial se convierte en una incipiente cabecera. Harvey (1982b) también relacionó el colapso de túneles subterráneos con el desarrollo de sistemas de cárcavas. Sin embargo, no es necesario que se produzca el colapso del túnel para que se inicie la incisión y formación de una cárcava. El flujo subsuperficial puede favorecer procesos de eluviación, y éstos manifestarse en superficie como microdepresiones que combinadas con la acción de la escorrentía

superficial pueden dar lugar a la aparición de una cárcava (Avni, 2004). La erosión por túneles se encuentra ligada a suelos con baja permeabilidad (arcillosos o limosos) pero que a su vez tienen una alta capacidad de infiltración, debido a la presencia de macroporos (Bryan y Yair, 1982). Son proclives las áreas que, teniendo elevados contenidos de arcilla y limo en sus suelos, experimentan prolongados períodos de sequía, que dan lugar a fracturas de desecación, y tormentas de elevada intensidad durante el período de sequía, que originan la circulación de flujo a través de dichas fracturas. También favorecen el desarrollo de la erosión por túneles los elevados gradientes hidráulicos así como la presencia de iones solubles, especialmente el Sodio (Bull y Kirkby, 1997). En ocasiones la génesis de una cárcava se relaciona con la existencia de cicatrices superficiales cuyo origen puede ser natural, como sucede en el caso de los deslizamientos de tierra (Vittorini, 1972), o puede ser antrópico, como en el caso de las cunetas de caminos y carreteras o las actividades de construcción en ambientes urbanos (Douglas y Pietroniro, 2003).

### **2.3.2 Teorías de Fallas**

Hasta ahora se ha tratado la determinación de cargas, esfuerzos y deflexiones como resultado de esas cargas y la capacidad de los materiales para resistir las pruebas estándar de cargas. Ahora se estudiará:

1. La predicción de la capacidad de los materiales para soportar diferentes combinaciones de cargas (estáticas).
2. La selección de factores de seguridad adecuados para proporcionar la seguridad y confiabilidad requeridas. Es muy importante que las partes no se sobrediseñen al punto de hacerlas innecesariamente costosas, voluminosas, etc, o se desperdicien recursos.

Tipos de fallas (estáticas):

Hay básicamente dos categorías:

- Distorsión, o deformación plástica. Esta falla ocurre cuando la deformación plástica alcanza algún límite establecido (usualmente un 0.2% más allá de la fluencia)
- Fractura, que es la separación o fragmentación del miembro en 2 o más partes.

Las distorsiones están usualmente asociadas con esfuerzos cortantes. Los átomos deslizan unos sobre otros afectando la continuidad del material.

Se hacen dos importantes observaciones a este modelo simplificado:

1. El deslizamiento, o deformación plástica es irreversible, vale decir que no es recuperable si se alivian las cargas aplicadas. Esto es debido a que no hay tendencia a retroceder a arreglos de espaciamentos atómicos más cercanos (como en la deformación elástica)
2. No hay cambios de volumen durante la deformación plástica. La FRACTURA puede ser frágil o dúctil.

### **2.3.2.1 Mecánica de las fracturas**

El estudio de la mecánica de las fracturas principia con la suposición de que todos los materiales reales contienen grietas de algún tamaño, aun cuando sean de tamaño microscópico. Si hay fractura frágil, se debe a que las condiciones de carga y del medio ambiente (principalmente la temperatura) son tales que ocasionan una propagación casi instantánea hasta provocar la falla de una o más de las grietas originales. En forma teórica, el factor de concentración de esfuerzos en la base de una grieta se acerca al infinito debido a que el radio en la raíz de la grieta se aproxima a cero. Esto significa que si el material es dúctil, la fluencia se presentará dentro de un pequeño volumen de material en la base de la grieta, provocando redistribuciones del esfuerzo. Por lo tanto, el factor efectivo de la concentración de esfuerzo es considerablemente menor que infinito y, además varía con la intensidad del esfuerzo nominal aplicado.

### **2.3.2.2 Teoría del máximo esfuerzo normal (Rankine)**

Es tal vez la más simple de todas las teorías de las fallas. Sostiene simplemente que la falla ocurrirá siempre que el mayor esfuerzo a la tensión tienda a exceder la resistencia uniaxial a la tensión, o siempre que el esfuerzo más grande a la compresión tienda a exceder la resistencia uniaxial a la compresión. Con respecto a la gráfica del círculo de Mohr, se pronostica falla para cualquier condición de esfuerzos para la cual el círculo principal de Mohr se prolongue más allá de cualquiera de las fronteras verticales indicadas con líneas discontinuas. Esta teoría correlaciona en forma razonable con la información de pruebas para fracturas cuando el material es frágil. Como puede esperarse, no es adecuada para predecir las fallas de materiales dúctiles. Por esta razón, los puntos de prueba se designa como las resistencias finales a la tensión y a la compresión “Sut” y “Suc” respectivamente, en un material que se ha supuesto que es frágil.

### **2.3.2.3 Teoría de Mohr modificada**

Se han propuesto diversas modificaciones empíricas a las teorías básicas de las fallas, una de las cuales es la *teoría de Mohr* (teoría de Coulomb- Mohr). Se recomienda la aplicación en materiales frágiles, para los cuales la resistencia a la compresión excede en mucho la resistencia a la tensión. (Aunque se considera por lo general que la teoría es una modificación empírica de la teoría del máximo esfuerzo cortante, usando los valores experimentales de ambas resistencias a la tensión y a la compresión, se puede deducir analíticamente si se incluye el efecto de la *fricción interna*. Para predecir la fractura de materiales frágiles se recomienda modificar la teoría de Mohr. Correlaciona mejor con la mayoría de la información experimental que las teorías de Mohr o del máximo esfuerzo normal, que también se usan. Conviene recordar que en el mejor de los casos, una teoría sobre las fallas es un sustituto para la información de las pruebas relacionada con el material real y a la combinación de esfuerzos implicada. También, cualquier información adicional y útil de prueba puede usarse para mejorar una curva teórica de las fallas para un material dado.

## **2.4 Objetivos**

### **2.4.1 Objetivo general**

Evaluar la deformación en la sección transversal de cárcavas someras con fondo rocoso e identificar los factores asociados mediante mediciones en campo y aplicación de modelos.

### **2.4.2 Objetivos específicos**

- Caracterizar las condiciones de ocurrencia de cárcavas someras con fondo rocoso en un área erosionada de Amealco, Qro.
- Evaluar la geometría de secciones transversales en segmentos seleccionados de cárcavas existentes.
- Evaluar las propiedades físico/mecánicas de los suelos en el sitio de estudio.
- Evaluar los procesos hidrológicos de precipitación y escurrimiento superficial.
- Aplicar modelos de predicción de deformación de cárcavas.

## **2.5 Hipótesis**

La magnitud de la deformación y erosión en cárcavas se relaciona con las características físico-mecánicas del suelo y la naturaleza de las precipitaciones más que con las condiciones geomorfológicas del sitio.

## **METODOLOGÍA**

La problemática que se desea abordar en este trabajo es la deformación de cauces con lechos rocosos, debido que se ha percibido que sufren un cambio significativo a pesar de los eventos pluviales y fluviales de poca magnitud, por tener una frontera somera prácticamente impermeable. La deformación en este tipo de cauces es un tema de gran relevancia, puesto que conociendo el proceso y eventualidad de dicha deformación, se pueden realizar acciones pertinentes que eviten el arrastre de sedimentos, que azolvan y contaminan embalses aguas abajo, y así como evitar la pérdida de suelo productivo.

### **3.1 Descripción Del Área De Estudio**

El área seleccionada forma parte de la superficie de intervención del proyecto OBRAS DE CONSERVACIÓN DE SUELOS, AGUA Y REFORESTACIÓN EN PERALES, SAN JUAN DEL RÍO Y HACIENDA TIERRA BLANCA, AMEALCO, QRO., CONVENIO COTAS/UAQ:044CCA2012UAQDIP, el cual fue implementado de forma conjunta entre la COMISIÓN NACIONAL FORESTAL y el COMITÉ TÉCNICO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE SAN JUAN DEL RÍO A.C. y fue ejecutado por la Universidad Autónoma de Querétaro. El área presenta erosión severa por cárcavas y el proceso de socavación por erosión hídrica es de gran notoriedad.

### **3.2 Toma De Datos Y Calibración**

El análisis del área se realizó mediante un Sistemas de Información Geográfica, ArcGis, para lo cual se emplearon imágenes vectoriales escala 1:1000000 del área en cuestión, de las cuales se seleccionaron las que contuviesen información de la Edafología, Uso de Suelo y Vegetación, Curvas a Nivel, Infraestructura Hidráulica, Rasgos Hidrográficos, Fisiografía, Clima y el Modelo Digital de Elevación, con los cuales se pudo realizar la caracterización del área de estudio.

Con esta información se determinaron algunas características del terreno como la pendiente, las características edáficas, con la ayuda de la información de la imágenes de tipo raster y vectoriales, dicha información fue corroborada en laboratorio.

La evaluación de los procesos hidrológicos de precipitación y escurrimiento superficial, y la producción de sedimentos se realizaron con la herramienta AGWA (Automated Geospatial Watershed Assessment), la cual trabaja en plataforma ArcGis 9.2.

La herramienta AGWA requiere de la extensión Spatial Analyst para el manejo de estructuras de datos raster, tiene herramientas para la extracción de parámetros fisiográficos a partir del MDE, de extracción de parámetros provenientes de mapas temáticos de tipo y cobertura de suelos, y para el tratamiento espacial de las precipitaciones. Es por ello de su empleo para este estudio en el cual primero se determinó la dirección del flujo mediante la herramienta Flow Direction que busca el camino descendente entre las celdas, para que posteriormente con Flow Accumulation se determine el flujo acumulado ya que se determina el número de celdas de aguas arriba que vierten sobre cada una de las celdas inmediatamente aguas abajo de ella. Con la implementación de Stream Definition las celdas con acumulación de flujo superior a un límite especificado por el usuario como celdas pertenecientes a la red de flujo. El límite debe ser especificado como el número de celdas vertientes a la que se está clasificando en cada momento, para después dividir el cauce en segmentos no interrumpidos con Stream Link, una vez divididos los diferentes cauces ininterrumpidos estos son clasificados en orden con la ayuda de la herramienta Stream Order y crear un shape de los diferentes drenajes que se generaron, una vez realizado lo anterior podemos determinar un punto al inicio, la mitad o al final de cada tramo de corriente, para este caso nos interesan los puntos finales que es donde hay acumulación de flujo y es el punto importante para determinación de las cuencas

En este trabajo se presenta una aplicación de la extracción de parámetros fisiográficos a partir del MDE, para la generación de los datos de entrada al modelo KINEROS2 en la cuenca de San Miguel Deheti.

Los datos recabados fueron corroborados con pruebas de campo, como la determinación cualitativa de materia orgánica existente en el material a ser analizado mediante la aplicación directa de agua oxigenada al material colectado, dependiendo de la efervescencia, presentada es la cantidad de materia orgánica que se puede determinar de forma cualitativa directamente en el campo, la textura del mismo, que consiste en humedecer y amasar la muestra procurando formar una masa homogénea, una vez formada dicha masa se manipula con la mano izquierda por cuestiones de sensibilidad, para formar una tira y observar si hay presencia de brillo así como la rugosidad que pudiese tener la masa formada, entre otras, que se llevaron a cabo en las vistas a campo así como el análisis del material edáfico en laboratorio. Se realizaron diversos trabajos de campo donde se colectó material edáfico y geológico, los cuales fueron llevados a laboratorio para su análisis. Se realizaron análisis en el cual se determinaron Textura, Cantidad de Materia Orgánica, Contenido de Humedad al Limite Liquido, Contenido de Humedad al Limite Plástico, Índice de Contracción y Conductividad Hidráulica, así como los límites de Atterberg. Para la toma de muestra de suelo a ser analizado se determinó tomar 10 muestras de material del lecho del cauce estudiado, cada una con un distanciamiento de 1m, así como en el margen derecho e izquierdo de los cauces analizados, a 15cm y 25 cm de profundidad con respecto a la superficie. Datos meteorológicos fueron recabados con la ayuda de información recabada por diferentes Instituciones y analizadas con SIG y corroborados mediante un pluviómetro colocado en el área de estudio y estaciones meteorológicas cercanas al rea de estudio

Para la evaluación de la geometría de las secciones transversales se tomaron diez secciones transversales a lo largo del cauce, separadas cada una de ellas a un metro de distancia, en cada sección transversal se realizaron medidas directas, donde se tensó una cuerda en dicha sección y cada 50 cm se llevó a cabo un registro de la profundidad cotejada en cada punto. De igual manera, se midió la deformación de las diferentes secciones transversales en los cauces con un

levantamiento topográfico con Estación Total. Esto, permitió la toma de datos de una forma rápida y eficiente, en las diferentes tomas, ya sea antes y después de cada eventos registrado, y así poder calibrar las modelaciones de una forma directa. Cabe destacar que las mediciones del perfil transversal de cada una de las secciones a ser analizadas se realizaron en diferentes periodos delimitados por eventos de precipitación, la primera toma se realizó en el mes de octubre en el cual no se presentó ningún evento pluvial, por lo que no existió variación alguna en el cauce derivado de flujo de agua en dichas corrientes, el segundo levantamiento se realizó el 7 de noviembre de 2012 después de una precipitación acumulada de 28.7 mm, el 25 de enero de 2013 se tomó la tercera medición con una precipitación acumulada de 3.3 mm, esto para analizar la variación de un evento de diferentes magnitudes.

## **1.2 Herramienta (Concepts)**

La simulación de diferentes escenarios de deformación de los cauces transversales se realizó con la herramienta CONCEPTS, la cual fue diseñada para la evaluación de los proyectos de restauración de cauces. Cuando se combina con los programas de modelado a escala de cuencas, CONCEPTS puede ser utilizado para evaluar la eficacia a largo plazo de los esfuerzos de restauración y proporcionar a los ingenieros, planificadores y ecologistas con salida de simulación cuantitativa útil en los procedimientos de aplicación de diseño.

El Sistema de Evolución Conservacional de Canales y Transporte de Contaminantes (CONCEPTS), por sus siglas en inglés, CONservational Channel Evolution and Pollutant Transport System, es un modelo computacional desarrollado por el Departamento de Agricultura de EE.UU. (USDA)-Servicio de Investigación Agrícola (ARS) en el Laboratorio Nacional de Sedimentación (NSL) en Oxford, Mississippi. Dos versiones del modelo CONCEPTS fueron creadas para simular la hidráulica de canales abiertos de flujo, transporte de sedimentos y la morfología del canal (Langendoen, 2000). Una versión a escala de cuenca fue creado para simular procesos en cuencas y la conectividad de las redes de flujo. La versión de corrientes es un modelo centrado en el sistema hidráulico, el

movimiento de sedimentos y procesos que configuran los canales con mayor detalle en el modelado de procesos dentro del canal.

El modelo CONCEPTS fue diseñado como una herramienta para la evaluación de los proyectos de restauración de cauces. Cuando se combina con los programas de modelado a escala de cuencas, los conceptos pueden ser utilizados para evaluar la eficacia a largo plazo de los esfuerzos de restauración y proporcionar a los ingenieros, planificadores y ecologistas salidas de simulación cuantitativas útiles en los procedimientos de aplicación de diseño (Langendoen, 2000).

## **RESULTADOS Y CONCLUSIONES**

### **DESCRIPCIÓN DEL AREA DE ESTUDIO**

De los datos obtenidos mediante el análisis realizado con el uso de las herramientas de los Sistemas de Información Geográfica y su corroboración en campo se obtuvieron los siguientes resultados, los cuales, a su vez sirvieron para determinar datos de gran relevancia para la simulación de los cauces con presencia de erosión hídrica que fueron seleccionados, con los criterios anteriormente comentados.

El área de estudio denominada como San Miguel Deheti , denominada así por encontrarse en la localidad con el mismo nombre, se encuentra dentro de la subcuenca Drenaje Caracol la cual forman parte de la Cuenca del Rio Moctezuma, se encuentra en el municipio de Amealco perteneciente al Estado de Querétaro Arteaga México , ubicado en las coordenadas UTM: Longitud : -100.115278, Latitud : 20.214444; esta pertenece a la Región Hidrológica N° 26 (Lerma-Santiago-Chapala) Cuenca del Panuco, Subcuenca del Río San Juan, el escurrimiento principal nace en el Arroyo Los Tules a 2900 msnm el cual pertenece al mismo municipio de Amealco.

### ***FISIOGRAFIA***

La microcuenca donde se localiza el sitio de estudio se localiza en la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico, donde han tenido lugar una serie de acontecimientos naturales desde fines del Cretácico hasta el Terciario, se caracteriza por la presencia de valles intermontanos de gran extensión, cuyos rellenos consisten en general de paquetes de sedimentos vulcano clásticos y lacustres.

Dentro del estado de Querétaro esta provincia presenta un relieve de intensa actividad volcánica iniciada desde el Terciario hasta el Cuaternario, cuyos depósitos cubrieron a rocas sedimentarias del Mesozoico. Se presentan rocas antiguas de composición riolítica y andesítica, y recientes de composición basáltica.

En la región en estudio el relieve topográfico consta principalmente de extensas áreas de lomeríos de colinas redondeadas con cañadas, conocidas en su conjunto como llanuras y sierras de Querétaro e Hidalgo.

Los tipos de drenaje identificados son: rectangular, paralelo, dentrítico y radial. El área consta de una amplia red de drenaje superficial.

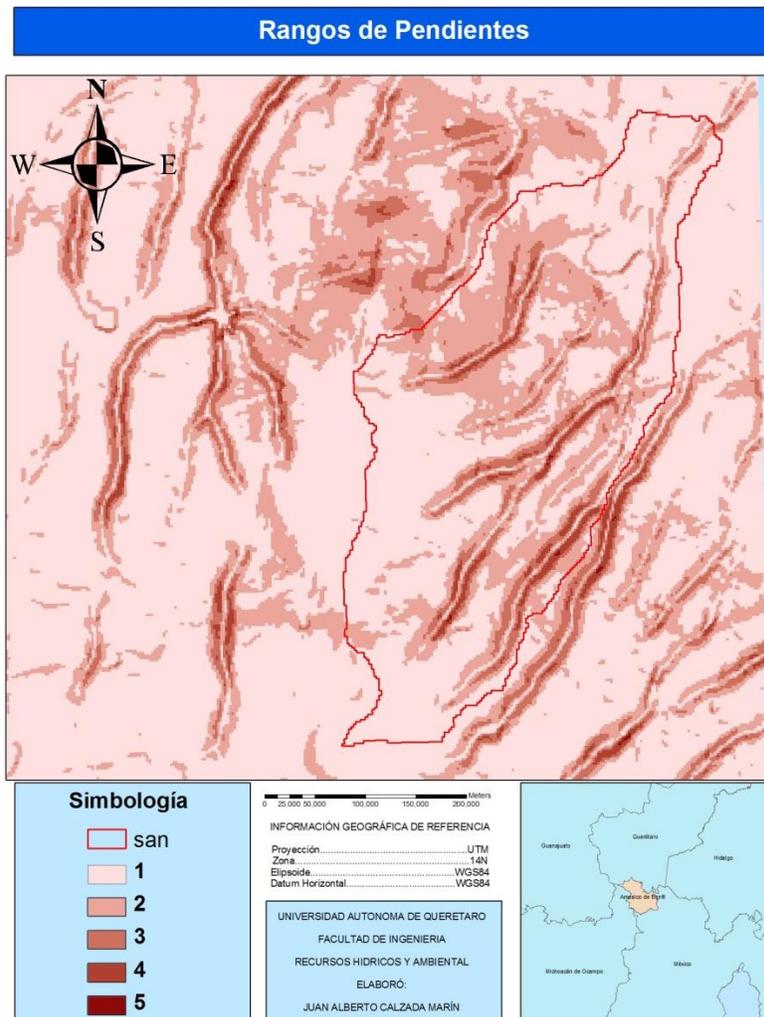
En la zona se caracteriza por la predominación de lomeríos y una pendiente media de 16.5 % y el suelo predominante es un Fhaeozem aplico el cual según datos de INEGI son empleados para el desarrollo de actividades económicas del sector primario (INEGI, 2005), por lo que una extensa superficie de bosques en la microcuenca ha sido eliminada para la agricultura predominantemente de maíz, el pastoreo o para el establecimiento de corrales para ganado ovino, caprino y bovino.

De acuerdo con los datos obtenidos con la ayuda de los SIG, se pudo determinar que la superficie del área de estudio está ocupada en un 34% de matorral templado, el 25% es de uso agrícola y el 24% está ocupado por pastizal inducido. El centro poblacional más importante de la zona es San Juan del Río, la obra Hidráulica más importante de la zona es la Presa Constitución de 1917 la cual surte de agua tanto a las zonas urbanas como al distrito de Riego N°23.

## **TOPOGRAFIA Y GEOLOGÍA**

En la región en estudio el relieve topográfico consta principalmente de extensas áreas de lomeríos de colinas redondeadas con cañadas, conocidas en su conjunto como llanuras y sierras de Querétaro e Hidalgo. La depresión o valle es una fosa o bloque hundido que ha sido rellenado por materiales recientes mediante procesos exógenos; forma valles de laderas tendidas hacia el suroeste, casi perpendiculares al cauce del río Lerma.

En el área de estudio se encuentran de forma general seis tipos de unidades geológicas; Ígneas extrusivas, Residual, Toba, Basalto y Aluvial.



*Figura 2 Rangos de Pendientes de la Microcuenca San Miguel Deheti*

La microcuenca San Miguel Deheti, se conforma por una serie de lomeríos que tienen una pendiente media de 16.5% , las elevaciones van de los 2229 hasta 2630 msnm. Las elevaciones más altas se encuentran al suroeste y se identifican las zonas más bajas que se van extendiendo aguas abajo de la microcuenca y una clara disminución de la elevación al noreste en donde desemboca el cauce principal de la microcuenca.

En cuanto a las pendientes que presenta la microcuenca se observa claramente que son mayores en la transición de las partes más altas a las bajas, teniendo en cuenta que la pendiente máxima es de 22.1 grados, es interesante observar que dichas pendientes se observan sólo en las zonas altas ubicadas al suroeste, mientras que las pendientes más bajas tienden a ser nulas y se ubican en la mayor extensión de la microcuenca.

La microcuenca cuenta con pendientes que van desde los 0.01 grados a los 22.1 grados, para una mejor visualización de las pendientes, se muestra el histograma de pendientes. Las pendientes predominantes son las que van desde los 4.43 grados hasta los 13.26 grados, estos gradientes corresponden a las denominadas “pronunciadas” que constituyen lomeríos.

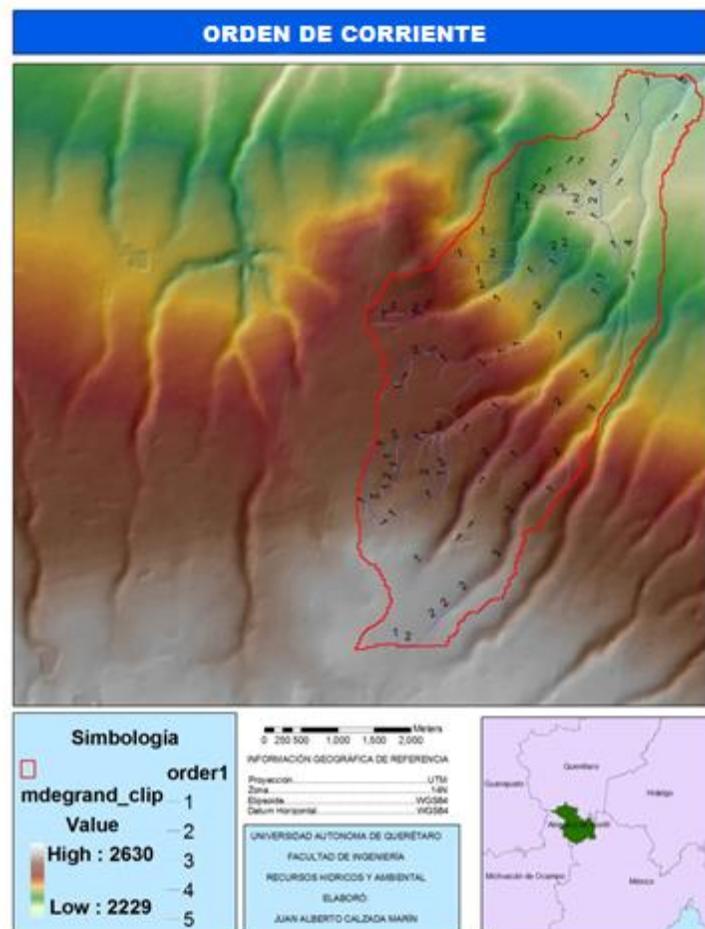


Figura Morfología de la Microcuenca San Miguel Deheti

El área consta de una amplia red de drenaje superficial; pero para ser más específicos el tipo de Red de Drenaje que se encuentra en la microcuenca de San Miguel Deheti es denditrico.

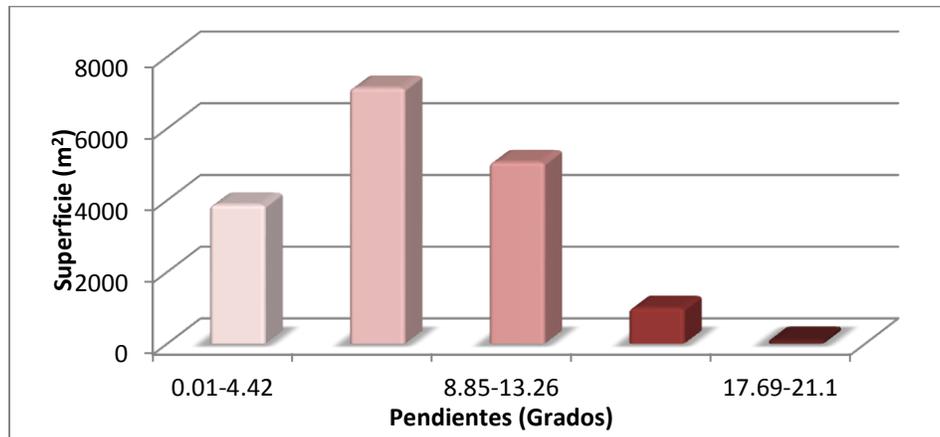


Figura 3 Pendientes de la Microcuenca San Miguel Deheti

### **USO DEL SUELO Y VEGETACIÓN**

A partir de la clasificación supervisada de las imágenes de satélite, información cartográfica existente y verificación en campo se determinaron dos clases de uso del suelo y vegetación en la microcuenca los cuales son: agricultura de temporal y pastizal inducido.

Como se puede observar en la figura 10, el uso de suelo y vegetación que predomina es el de pastizal inducido con más del 90% de la superficie total, la cual ha sustituido de manera drástica la vegetación natural que se encuentra en un alto grado de fragmentación El pastizal cultivado es aquel que se ha introducido intencionalmente en una región y para su establecimiento y conservación se realizan algunas labores de cultivo y manejo.

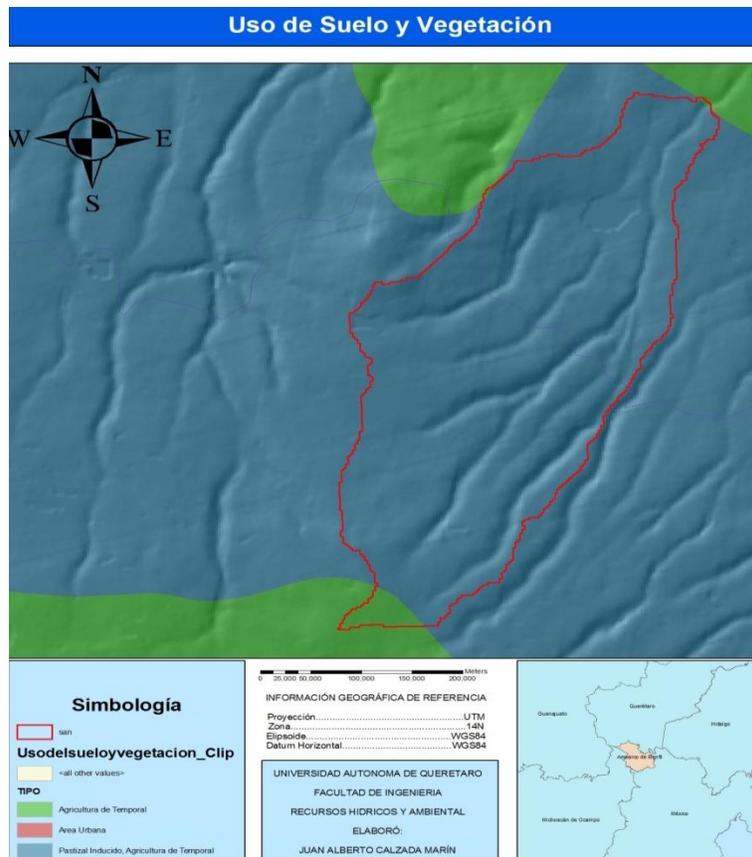


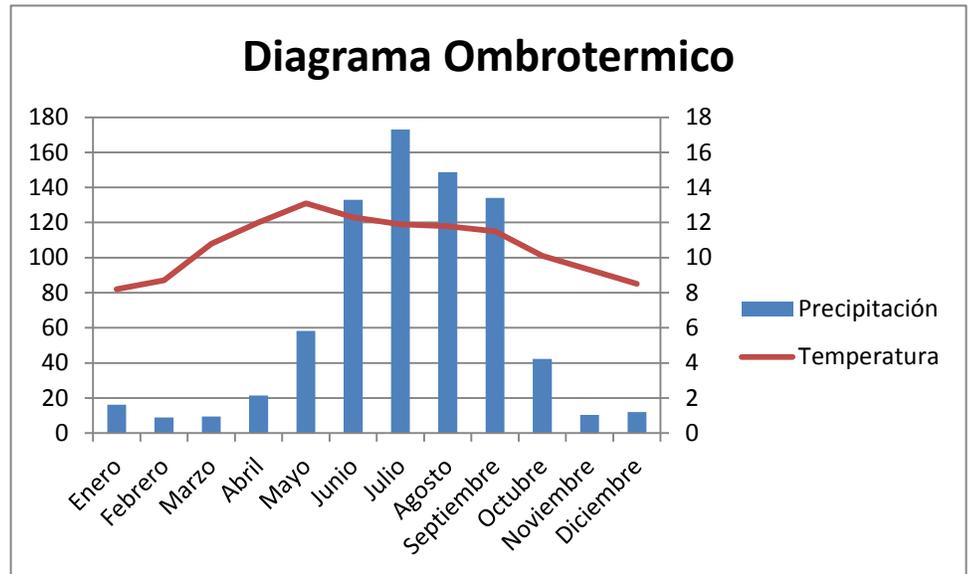
Figura 4 Uso de Suelo y Vegetación de la Microcuenca San Miguel Deheti

## CLIMA

En la microcuenca San Mieguel Deheti se identifican un clima predominante, templado (C), subhúmedo, con lluvias en verano C (W1)(W), donde el porcentaje de precipitación invernal es menor de 5.

El promedio anual de la temperatura para la zona es de 15°C. La precipitación media anual es del orden de 650 mm, sin embargo, por la ocurrencia de microclimas la precipitación varía, aumentando este valor sobre todo en las zonas de sierra hacia el parteaguas continental, con valores del orden de 1123.4 mm. De acuerdo con la estación climatológica Amealco la precipitación promedio anual, para el área de influencia de esta estación fue de 659 mm. La evaporación potencial media del área es de 1900 a 2000 mm/año.

Para realizar una clasificación del clima respecto a la temperatura y precipitación media mensual y posteriormente construir la curva o diagrama ombrotérmica (Figura 11),



*Figura 5 Curva ombrotérmica en la región correspondiente a la microcuenca San Miguel Deheti*

La temperatura promedio del mes más frío es de 8.2°C (enero) y el mes más caluroso es de 13.1°C (mayo), con un promedio anual de temperatura de 15°C. La precipitación para el mes más lluvioso es de 173.1 mm (julio) y mayo es el mes más seco con nula presencia de precipitación es febrero con una precipitación de 9mm.

En general los climas presentes en la microcuenca en su mayor parte son de tipo templado subhúmedo lo cual favorece la presencia de bosques de encino y por las bondades del clima y suelo, estas áreas son afectadas por el cambio de uso de suelo, de una vegetación natural a uso agropecuario.

Se realiza una simulación con el modelo computacional CONCEPTS, el cual ya fue descrito con anterioridad, para un evento típico el cual presenta una

precipitación de 28.7 mm, de la cual se deduce, con la ayuda de la herramienta AGWA, un escurrimiento de 0.08 m<sup>3</sup>/s para el cauce en el cual se está realizando la obra, en la Figura 11 se pueden observar la simulación generada, en ArcGis mediante la herramienta AGWA

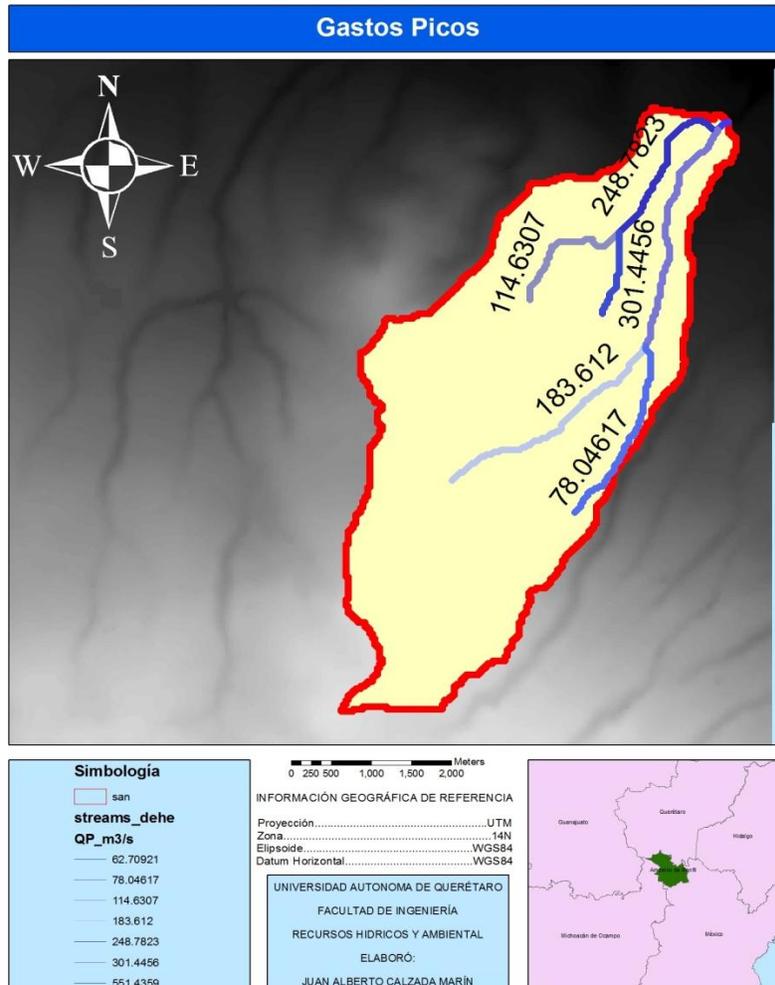
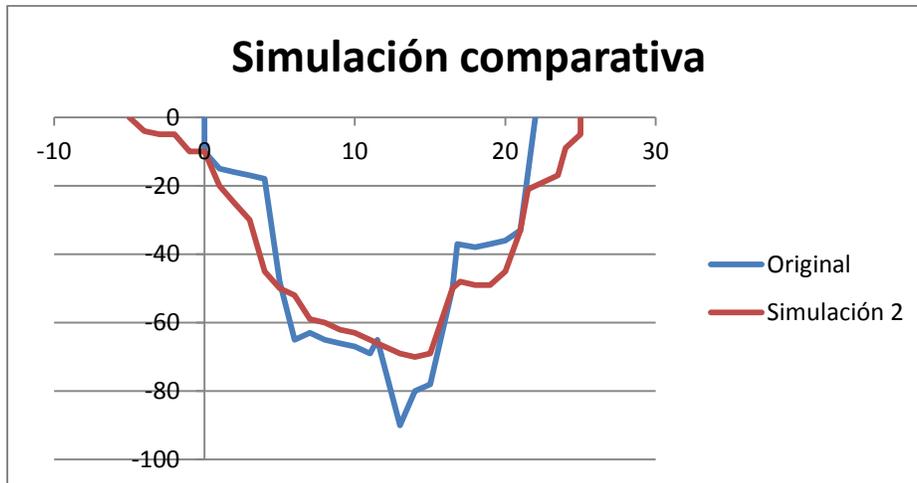


Figura 6 Gastos presentes en la Microcuenca San Migeul Deheti

Uno de los datos tomados en cuenta para realizar la simulación en CONCEPTS es el gasto, una vez obtenido este dato se procedió a realizar la modelación, en con junto con otros datos, como lo son ángulo de reposo, textura, dentro de los principales los cuales se derivaron de análisis del material edáfico en laboratorio, asi como la cobertura vegetal que se determinó en campo.



*Figura 7 Grafico comparativo entre la sección transversal original y la deformación dada en el cauce después del evento simulado*

Se puede observar en la figura 13 la resultante de la simulación del modelo computacional antes comentado donde se puede observar la modificación cauce transversal originado por la socavación lateral dado por el fenómeno de erosión hídrica y la resistencia ofrecida al material edafológico.

En un principio los resultados obtenidos en la modelación no correspondían a la realidad mostrada en campo, por lo tanto se procedió a realizar un análisis de forma más exhaustiva de las condiciones de ocurrencia en el sitio elegido, para que con ello se llegara a una correcta modelación donde existiera fidelidad conforme al fenómeno presente, puesto que en la cárcava analizada es claramente perceptible un desprendimiento lateral del material edáfico que comprenden los taludes de dicho cauce. En la parte del lecho del cauce anteriormente mencionado, el cual está conformado principalmente por un manto rocoso, se observa una deformación la cual está determinada no por la socavación sino por la acumulación de material procedente de los taludes del propio cauce.

Realizando un análisis de mayor precisión de los factores condicionantes para la realización de dichos procesos de socavación por erosión hídrica, se percibió que

los más relevantes para este tipo de modelación son los componentes físico químicos del suelo, los procesos hidrogeológicos aunado a los factores vegetativos, como lo es en este caso la cobertura vegetal en las laderas del cauce conformadas principalmente por vegetación forrajera , que forman una capa de un alto grado de protección que controlan en gran medida el fenómeno de erosión hídrica presentes en el sitio de estudios.

En la siguiente tabla se demuestra los diferentes análisis con sus respectivas repeticiones para corroborar la veracidad de los datos, los cuales se introdujeron en la modelación para hacerlo más apegado a la realidad presente en el sitio de estudio.

*Tabla 1 Datos físicoquímicos del material edáfico obtenidos en laboratorio*

MUESTRA	REPETICION	% MATERIA ORGANICA (COMBUSTION SECA)	TEXTURA	CONTENIDO DE HUMEDAD A LIMITE LIQUIDO (%)	CONTENIDO DE HUMEDAD A LIMITE PLASTICO (%)	INDICE DE CONTRACCIÓN (%)	CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA
X (LADERA)	1	8.69	FRANCO ARENOSO	39.12	15.41	8.92	0.0010
	2	9.08	FRANCO ARENOSO	39.88	14.48	9.11	0.0015
	3	9.10					0.0040
Y (LECHO)	1	5.82	ARCILLO ARENOSA	28.87	15.19	7.58	0.0006
	2	6.11	ARCILLO ARENOSA	29.49	14.10	7.14	0.0003
	3	6.10					0.0008

De acuerdo con los datos obtenidos en el laboratorio de determino el grado de erodabilidad presente en cada una de las muestras analizadas siendo de 0.340 t./ha.MJ\*ha/mm\*hr en las laderas de los cauces y en la parte del lecho 0.344 t./ha.MJ\*ha/mm\*hr , esto de forma genérica, los resultados de erodabilidad son muy similares lo que es lógico debido a que el material depositado en el fondo del cauce se deriva en gran medida del desprendimiento del suelo presente en las laderas del mismo.

Otro factor que se determino fue el ángulo de reposo para el caso de los taludes de la cárcava estudiada, en la cual se determinó que el tamaño de la partícula es

de 2.54 cm y un ángulo de reposo de 31 grados con respecto a la horizontal con lo cual se deduce que el ángulo de reposo para este tipo de suelos con las características que presenta es de 30° lo que lo hace un ángulo moderadamente pronunciado

Como se mencionó con anterioridad la vegetación es un factor de gran importancia, el cual no debe menospreciarse en los procesos de modelación de la erosión hídrica. Es claramente perceptible que la vegetación natural del área de interés ha sido modificada para ser substituida por áreas de agostadero, las cuales a pesar de brindar una protección al material edáfico no resulta ser tan eficiente, como el bosque de encino que existía originalmente, provocando con ello que los estragos ocasionados por la erosión hídrica sean perceptibles, claro ejemplo son las cárcavas las cuales día con día se presentan con mayor frecuencia y mayor severidad derivándose en la pérdida de superficie de interés antropogénico, aunado a la deficiencia de la calidad del agua.

Cabe destacar que dentro de la modelación del cauce la vegetación fue un factor crucial, puesto que el programa infiere valores predeterminados de acuerdo con las investigaciones de los programadores iniciales, los cuales no siempre se adaptan a todos los medios. En este caso no fue la excepción puesto que la vegetación empleada fue la denominada como herbácea, la cual según el manual debe introducirse un valor de 0.25 en cuanto a los factores que agregan mayor resistencia ante el flujo, lo cual no correspondía para el caso de la microcuenca de San Miguel Deheti, donde se observó que la vegetación era más endeble con respecto a la vegetación con la cual fue calibrado originalmente el modelo y por lo tanto su valor de resistencia tiende a ser menor, por lo que se optó por realizar la simulación con un valor de 0.20 para el tipo de vegetación con que se cuenta en el sitio de estudio, la cual también es herbácea pero amacollada.

Para la modelación del fenómeno se tomó en cuenta el punto de ubicación de una presa de geocostales. Para la toma de la primera sección se determinó un transepto aguas arriba y para una segunda muestra se optó por una sección aguas debajo de dicha estructura hidráulica, cabe mencionar que se le dio mayor

importancia a la sección ubicada aguas debajo de la presa de geocostales para así realizar el análisis del comportamiento de la cárcava con dicha estructura hidráulica, para con ello determinar si este tipo de obra es la adecuada o se requiere de otro tipo de acción en términos de conservación de suelo y agua. También se realizó una modelación en la cual se toma en cuenta la obra anteriormente mencionada, se puede observar en la figura 13, como la implementación de estas obras no frena en su totalidad dicho fenómeno, esto se debe a que son obras un tanto puntuales, pero que si resguarda en cierta medida el recurso suelo, evitando que la problemática de la erosión hídrica se acelere.

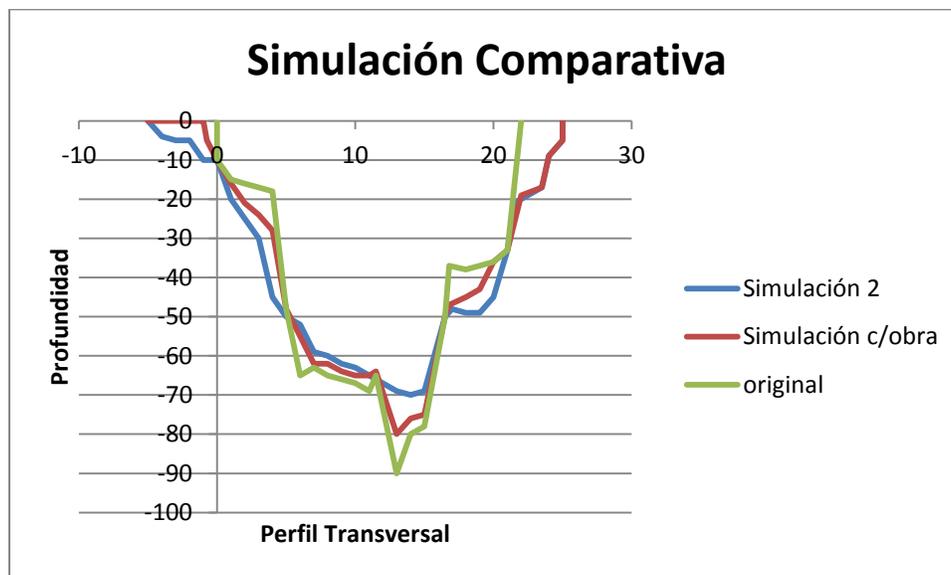


Figura 8 Comparación de la simulación del evento sin y con obra de conservación

También se determinó en un primer momento que la cantidad de sedimentos generados en evento de precipitación antes mencionado fue de  $0.934\text{m}^3$ . Posteriormente se realizó una modelación tomando en cuenta la implementación de una estructura hidráulica, la cual al momento de ser simulada da como resultado que es posible una disminución de  $0.527\text{m}^3$  de sedimentos.

Cabe destacar que se realizaron mediciones que compararan la precipitación con la deformación de los cauces y el volumen de sedimentos generado o depositado en la sección determinada para este estudio, para ello se tomaron dos cauces: un primer cauce con una pendiente de 10% de inclinación y el segundo cauce con

22% de inclinación. Se realizaron mediciones previas, posteriormente se hizo lo propio pasado un periodo donde se registró una precipitación acumulada de 28.6 mm, consecutivamente pasado otro periodo en el cual se registró una precipitación de 12.4 mm Realizando las mediciones pertinentes se determinó que en la cárcava la cual denominaremos como 1, en el primer evento sufrió una pérdida de 0.656 m<sup>3</sup> de material edáfico mientras que la cárcava 2 que presenta mayor pendiente tuvo una erosión positiva de 0.818 m<sup>3</sup>. En el segundo evento el cual tuvo una precipitación menor la cárcava 1 tuvo una depositación de 0.22m<sup>3</sup>, mientras que en la cárcava 2 la depositación de 0.2 m<sup>3</sup>. En ambos casos es notorio y un tanto lógico que en el evento donde se registró mayor precipitación existiese un mayor arrastre, debido a la fuerza ejercida por el fluido a su paso, la cual no es el único factor determinante de la forma del cauce puesto que al existir un segundo evento, aunque sea de menor magnitud, se supondría obvio la perdida de material edáfico, lo cual no aconteció, debido que en las partes laterales del cauce existió fractura de los consolidados edáficos existentes, los cuales colapsaron dando como resultado un arrastre negativo de material en los cauces estudiados, en los cauces en cuestión se observaron la deformación en el lechos y en los taludes, siendo que en el fondo la deformación es originada por la acumulación de sedimentos mientras que en las partes laterales del cauce se da el cambio de forma ya sea por arrastre de suelo durante los eventos fluviales o por el colapso de los taludes al ceder a las diferentes fracturas u esfuerzos a los cuales es sometido.

*Tabla 6 Comparación de Sedimentos Generados en los cauces estudiados. Obras aguas abajo*

Tabla Comparativa de Generación de Sedimentos				
	pp 28.6 mm		pp 12.4 mm	
	Sin Obra	Con Obra	Sin Obra	Con Obra
Carcava 1	0.656	0.374	-0.22	-0.18
Carcava 2	0.812	0.464	-0.2	-0.15

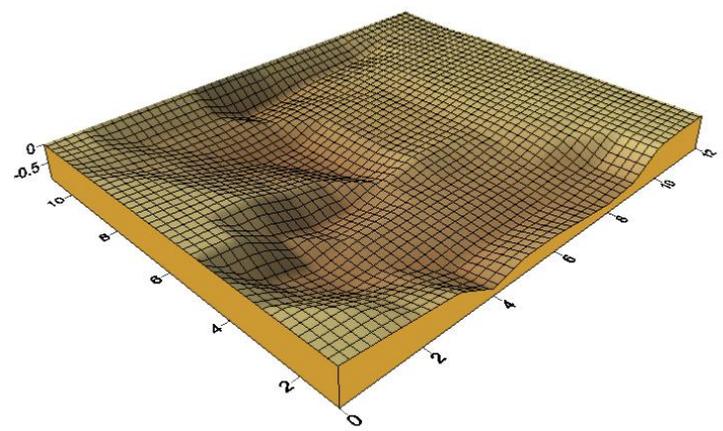
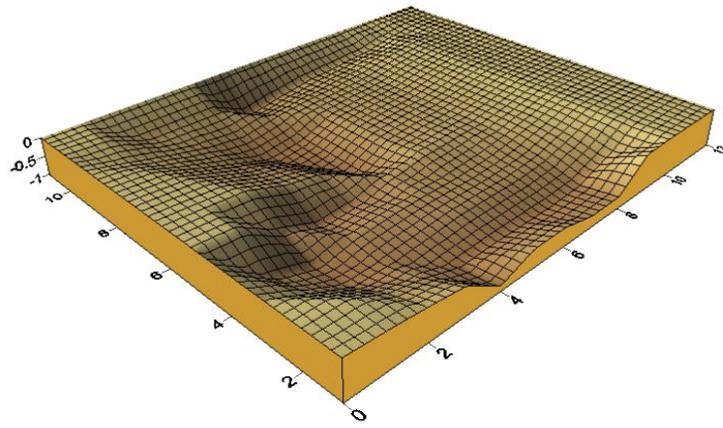
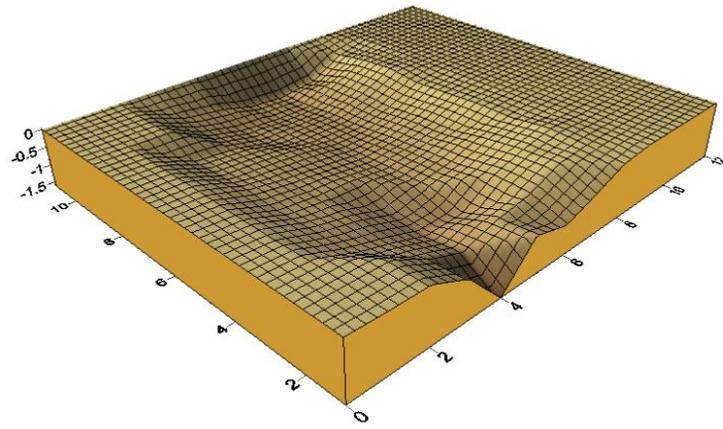


Figura 9 Caso de deformación cárcava 1

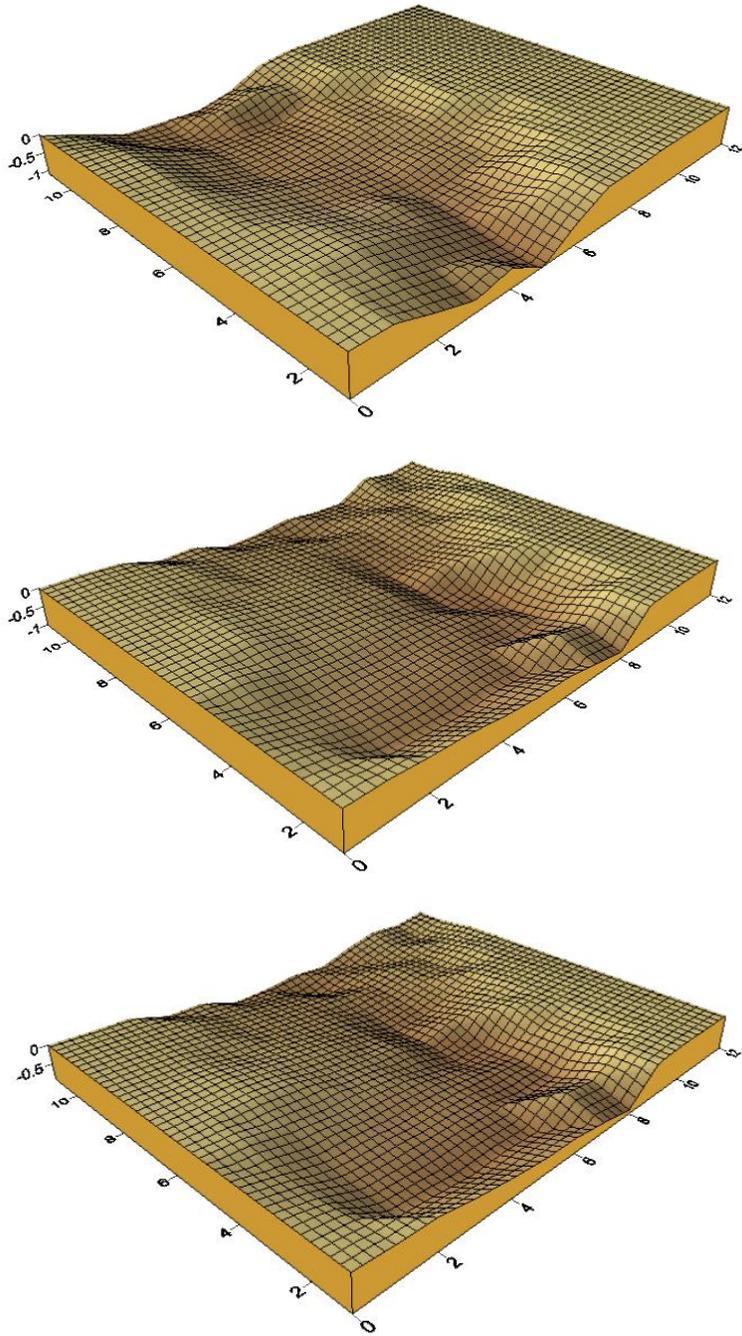


Figura 10 Caso de deformación cárcava 2

Tabla 7 Cubicación de cambio volumétrico de sedimentos

Cárcava	Volumen (m <sup>3</sup> )			Cambio de Volumen (m <sup>3</sup> )		
	Cauce original	10/07/2012	25/01/2013	Periodo 1 <sup>a</sup>	Periodo 2 <sup>b</sup>	Periodo 3 <sup>c</sup>
1	33.52	44.76	44.48	11.24	-0.28	10.96
2	34.95	44.75	44.76	9.80	0.01	9.81

Cabe destacar que la erosión sufrida en los cauces estudiados se dio de forma lateral debido a que la resistencia del material rocoso, el cual desvía el agua hacia las laderas de los cauces, provocando que la corriente socave paulatinamente el material edáfico en las partes medias dejando vulnerables las capas del suelo en las laderas, que posteriormente colapsan. Como lo podemos observar en la siguiente imagen.



## **CONCLUSIONES**

Podemos concluir que la modelación de este tipo de fenómenos es importante puesto que la simulación de los escurrimientos superficiales es una herramienta valiosa para comprender el comportamiento de la evolución de cárcavas y con ello hacer más eficiente el manejo y conservación de los recursos suelo y agua, ya que procesos biológicos y económicos de los habitantes de la región

Dentro de la modelación es de gran trascendencia tomar en cuenta las obras de conservación de suelo y agua, para así realizar el análisis de su comportamiento para que con ello se realice una óptima gestión y una mejor gerencia de este tipo de recursos, para cuando se necesite implementar un programa de conservación o restauración de recursos naturales.

Los modelos computacionales utilizados para las simulaciones presentan una serie de limitaciones relacionadas a la falta de Información recabada en campo, sobre las características fisicoquímicas del suelo, las características vegetativas y la interacción de estos factores en las diversas áreas de interés donde se requieran aplicar, debido a que el comportamiento de los fenómenos a pesar de presentar generalidades, existen componentes que los caracterizan y provocan que se presente particularidades en cada área de estudio . Para obtener modelos más cercanos a la realidad se deberá hacer una mejor caracterización de los componentes en los cuales se basa la modelación; así mismo es recomendable la incorporación de nuevos datos y la comparación con las situaciones reales.

Es recomendable realizar constantes calibraciones conforme se vaya actualizando la información del monitoreo constante propuesto, con la ventaja que puede ser el emplear una herramienta informática como son los SIG que permite obtener y actualizar la información de manera rápida y sencilla.

El modelo de simulación de dos dimensiones empleado, arrojan resultados congruentes con las observaciones y tienen la ventaja de ser fácilmente actualizables y modificables de acuerdo a datos particulares conforme a nuevos estudios y pueden servir como una herramienta importante para la gestión de las cuencas hidrográficas.

La implementación de sistemas de información geográficos en la modelación de cárcavas resulta ser una herramienta de gran valía que permite tener una amplia versatilidad en el momento de manipular una gran cantidad de datos en tiempos relativamente cortos y es lo que le da a los modelos en el presente trabajo la facilidad de ser modificados de una forma rápida y sencilla para su posterior actualización.

De la misma forma es imprescindible recalcar la importancia de la cobertura vegetal dentro de la modelación y aún más dentro del medio natural, puesto que juega un papel fundamental para el control de la erosión hídrica, principalmente para el control de cárcavas e inclusive para evitar la aparición de estas. En términos de conservación de suelo se realizó una simulación en la cual se incluía una obra de conservación, la cual arrojó datos donde la deformación fue frenada aunque no en su totalidad, si se compara esta simulación con la primer simulación fallida, donde la resistencia de la vegetación es mayor, se puede concluir que la mejor forma de realizar la conservación es con la implementación de un material que recubra los taludes del cauce ya sea con vegetación o en su defecto con geomembrana, por efectos de agilizar la conservación de los taludes del cauce y evitar la deformación de este.

El recurso suelo como el agua son recurso indispensable no sólo para el desarrollo actividades antropocéntricas y económico; sino para el óptimo desarrollo del medio natural y por consiguiente para la subsistencia de todas las especies, por lo que es de gran relevancia su gestión y manejo de una manera

responsable que permita la sustentabilidad la importancia de su cuidado y su explotación responsable no puede ser menospreciada.

Los modelos de simulación son una herramienta para representar de manera simplificada un aspecto de la naturaleza, obras construidas es ella de forma muy aproximada y didáctica. También es valiosa para la obtención de una solución práctica a la elaboración del diseño definitivo de obras, cabe destacar que el análisis de datos es importante ya que de ello dependerá la toma de decisiones al momento de realizar el manejo de un cauce e inclusive una cuenca ya que es el punto de partida para futuros modelos, que complemente y promueva la investigación de fenómenos como los analizados.

## LITERATURA CONSULTADA

Aguilar, C. (2004). Evaluación de la contaminación difusa en zonas de olivar con diferentes alternativas de manejo del suelo. TPFC, Dpto. Agronomía, Universidad de Córdoba.

Apuntes de Clase de la Asignatura: “Cimentaciones” Curso Enero – Julio 2012 Impartida por el Dr. Alfredo Pérez García, Docente e Investigador de la Facultad de Ingeniería, UAQ.

CANNON, S.H. y GARTNER, J.E. (2005) “Wildfire-related debris flow from hazard perspective”. En JACOB, M. y HUNGR, O.(Eds.) *Debris Flow Hazards and Related Phenomena* (363-383). Heidelberg, Alemania: Springer Verlag, en asociación con Chichester, U.K.: Praxis Publishing Ltd.

Chen Fu, Hua; (1975), “Foundation on expansive soil”, Elsevier Scientific Company, New York, USA.

Chow, V.T., Maidment, D.R. y Mays, L.W. (1994): Hidrología aplicada. McGraw-Hill. Santa Fe de Bogotá, Colombia

Couper, P., Maddock, I.P., 2001. Subaerial river bank processes and interaction with other bank erosion mechanisms on the River Arrow, Warwickshire, UK. *Earth Surface Processes and Landforms* 26, 631–646.

COATES, D.R. (1977) “Landslides perspectives”. En : COATES, D.R. (Ed.) *Landslides. Reviews in Engineering Geology*, (3):28-35. The Geological Society of America. Boulder, C.O.

COROMINAS, J. (1996) "The angle of reach as a mobility index for small and large landslides". *Canadian Geotechnical Journal*, 33: 260-271.

COUSSOT, P (1992) *Rheology of Debris Flows*. Study of Concentrated dispersions and Suspensions. Tesis de Ph.D. INPG, Grenoble Francia

Coussot, P., Meunier, M., 1996. Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth Science Reviews*, No.40, p.209-227.

Cruden, D., Varnes, D., 1996. Landslide types and processes. In Turner A.K. & Schuster R.L., 1996. *Landslides: Investigation and Mitigation*. Special Report 247. Transportation Research Board, National Research Council. National Academy Press, Washington D.C. 675 p.

Cruz G. (2003) La cuenca como unidad de planeación ambiental, Instituto Nacional de Ecología, México. Consultado en: <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/estudios/397/cruz.html>. Fecha de consulta: 17/09/11.

DAVIES, T.R.H. (1986) "Large debris flows: a macroviscous phenomena". *Acta Mechanica*, (63): 161-178.

Davis, R.J., Gregory, K.J., 1994. A new distinct method of river bank erosion in a forested catchment. *Journal of Hydrology* 157, 1–11.

EPA. (2005). United States Environmental Protection Agency. Total Maximum Daily Loads. Available at: [www.epa.gov/OWOW/tmdl/index.html](http://www.epa.gov/OWOW/tmdl/index.html).

FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 2007. La nueva generación de programas y proyectos de gestión de cuencas hidrográficas. FAO. Roma. 154 pp.

FELL, R., HO, K.K.S., LACASSE, S. y LEROI, E. (2005) "A framework for landslide risk assessment and management". En: HUNGR, O., FELL, R. COUTURE, R. y EBERHARDT, E. (Eds.) *Proceedings of the International Conference on Landslide Risk Management*, (3-25). Vancouver. Balkema, London.

Fredlund, D. G. y Rahardjo, H. (1993). Soil mechanics for unsaturated soils. John Wiley & Sons, Inc. New York.

García J. F., Fuentes M. O. Gracia S. J., (1995) "Erosión en laderas", Cuaderno de Investigación No. 24, CENAPRED, México.

García, L. (2005) Modelización hidrológica e hidráulica aplicada a la estimación de la carga de fondo en cauces torrenciales corregidos (Rámbra del Cárcavo, Murcia). Universidad de Granada. España

García, Marcelo. (2008) Sedimentation Engineering: Processes, Management, Modeling, and Practice. ASCE Publications. USA

Goodwin, P. (2004). "Analytical Solutions for Estimating Effective Discharge". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 130, No. 8, August 2004, pp. 729–738.

Graf, W. H. (1971). *The Hydraulics of Sediment Transport*. McGraw-Hill, New York, NY.

Graf, W. H. (1975). Impact of Suburbanization on Fluvial Geomorphology. *J. of water Resources Research* 11(5): 690-692.

Graf, W. H. (1984). *Hydraulics of Sediment Transport*. Water Resources Publications, Littleton, CO.

Highland L. M., Bobrowsky P., 2008. *The Landslide Handbook - A Guide to Understanding Landslides*. United States Geological Survey, Reston, Virginia. 129 pp

HUNGR, O. (2000) "Analysis of debris flow surges using the theory of uniformly progressive flow". *Earth Surface Processes and Landforms*, 25: 1-13

Hungr, O. and Evans, S.G. 1988. Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards. Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides in Lausanne. Rotterdam: Balkema, 685–90

Hutchinson J.N. (1988). "Morphology and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology". Fifth International Symposium on landslides, Lausanne, pp. 3-35.

IVERSON, R.M. The physics of debris flows. *Review of Geophysics*. Vol. 35, 1997, pp. 245-296.

IVERSON, R.M. y DELINGER, R.P. Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain 1. Coulomb mixture theory. *J. Geophys. Res.* Vol. 106, 2001, pp. 537-552.

JAKOB, M. y JORDAN, P. (2001) "Design floods in mountain streams – the need for a geomorphic approach". *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28 (3): 425-439

Julien, P. Y. 1995. *Erosion and Sedimentation*. Cambridge University Press, Cambridge, New York.

Knighton, A.D., 1973. Riverbank erosion in relation to streamflow conditions, River Bollin-Dean, Cheshire. *East Midlands Geographer* 5, 416–426.

Lane, S.N., Tayefi, V., Reid, S.C., Yu, D., Hardy, R.J., 2006. Interactions between sediment delivery, channel change, climate change and flood risk in a temperate upland environment. *Earth Surface Processes and Landforms* 32, 429–446.

Langendoen, E. J. (2000). *CONCEPTS – Conservational Channel Evolution and Pollutant Transport System*. United States Department of Agriculture – Agricultural Research Service National Sedimentation Laboratory. Oxford, MS.

Lawler, D.M., 1992. Process dominance in bank erosion systems. In: Carling, P., Petts, G.E. (Eds.), *Lowland Floodplain Rivers: Geomorphological Perspectives*. Wiley, Chichester, pp. 117–143.

Lawler, D.M., Thorne, C.R., Hooke, J.M., 1997. Bank erosion and instability. In: Thorne, C.R., Hey, R.D., Newson, M.D. (Eds.), *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*. John Wiley and Sons Ltd, Chichester, pp. 137–172.

Lawler, D.M., Grove, J.R., Couperthwaite, J.R., Leeks, G.J.L., 1999. Downstream change in river bank erosion rates in the Swale–Ouse system, Northern England. *Hydrological Processes* 13, 977–992.

Masterman, R.J.W., 1994. *Vegetation effects on river bank stability*. Unpublished Ph.D. thesis. University of Nottingham.

Maza, J.A. y Cruickshank Carlos (1975) Instituto de Ingeniería. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). México, DF.

O'BRIEN, J. y JULIEN, P. Laboratory Analysis of Mudflow Properties. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, Vol. 114, núm. 8, 1988, pp. 877-887.

Overcash, M. y Davidson, J. (1981). Environmental impact of non-point source pollution. AnnArbor Science. Michigan. 275-389 pp.

Owens, P.N., Batalla, R.J., Collins, A.J., Gomez, B., Hicks, D.M., Horowitz, A.J., Kondolf, G.M., Marden, M., Page, M.J., Peacock, D.H., Petticrew, E.L., Salomons, W., Trustrum, N.A., 2005. Fine-grained sediment in river systems: environmental significance and management issues. *River Research and Applications* 21, 693–717.

Parker, C., Simon, A., Thorne, C.R., 2008. The effects of variability in bank material properties on riverbank stability: Goodwin Creek, Mississippi. *Geomorphology* 101, 533–543

PASTOR, M., QUECEDO, M., GONZALEZ, E., HERREROS, M.I., MERODO, J.A.F., FERNÁNDEZ, J.A. y MIRA, P. Simple approximation to bottom friction for Bingham fluid depth integrated models. *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 130, núm. 2, 2004, pp. 149-155.

PIERSON, T.C. (1980) "Erosion and deposition by debris flows at Mt. Thomas, North Canterbury, New Zealand". *Earth Surface Processes*, 5: 227-247.

PIERSON, T. C. AND COSTA, J. E. (1987) - A rheologic classification of subaerial sediment-water flows. En: COSTA, J.E. y WIECZOREK, G.F. (Eds.): *Debris Flows/Avalanches: process, recognition and mitigation. Reviews in Engineering Geology*, 7:1-12. Geological Society of America.

Pinter, N., Heine, R.A., 2005. Hydrodynamic and morphodynamic response to river engineering documented by fixed-discharge analysis, Lower Missouri River, USA.

*Journal of Hydrology* 302, 70–91.

Prosser, I.P., Hughes, A.O., Rutherford, I.D., 2000. Bank erosion of an incised upland channel by subaerial processes: Tasmania, Australia. *Earth Surface Processes and Landforms* 25, 1085–1101.

Rosso R. (1994). An introduction to spatially distributed modelling of basin response. In *Advances in Distributed Hydrology*, Rosso R Peano A Becchi I, Bemporad GA (eds). Water Resources Publications: Fort Collins; 3–30.

Ruiz Guzmán Edgar Iván (2008) *Diseño de elementos mecánicos. Teoría de Fallas*. Instituto Tecnológico de Culiacán. Sinaloa, México.

Salo, J., Kalliola, R., Hakkinen, I., Makinen, Y., Niemala, P., Puhakka, M., Coley, P.D., 1986. River dynamics and the diversity of the Amazon lowland forest. *Nature* 322, 254–258.

Saltelli A, Scott EM, Chan K, Marian S. (2000). *Sensitivity Analysis*. John Wiley & Sons: Chichester.

SHARPE, C.F.S. (1938) *Landslides and related phenomena*. New York: Columbia University Press

Simon, A., and C. R. Thorne. 1996. Channel Adjustment on an Unstable Coarsegrained Alluvial System: Opposing Trends of Boundary and Critical Shear Stress, and the Applicability of Extremal Hypothesis. *Earth Surface Processes and Landforms*. 21: 155-180.

Simon, A., A. Curini, S. E. Darby, and E. J. Langendoen. 2000. Bank and near-bank processes in an incised channel. *Geomorphology*. 35(3-4):193-217.

Simon, A., Rinaldi, M., 2006. Disturbance, stream incision, and channel evolution: the roles of excess transport capacity and boundary materials in controlling channel response. *Geomorphology* 79, 361–383.

Soulsby, C., Youngson, A.F., Moir, H.J., Malcolm, I.A., 2001. Fine sediment influence on salmonid spawning habitat in a lowland agricultural stream: a preliminary assessment. *Science of the Total Environment* 265, 295–307.

Stott, T.A., 1997. A comparison of stream bank erosion processes on forested and moorland stream in the Balquhider catchments, central Scotland. *Earth Surface Processes and Landforms* 22, 383–399.

Stover, S.C., Montgomery, D.R., 2001. Channel change and flooding, Skokomish River, Washington. *Journal of Hydrology* 243, 272–286.

TAKAHASHI, T. Debris Flow. *IAHR Monograph*. Rotterdam: A.A. Balkema, 1991, 165 pp.

Thomas, R.C. and Milligan, C.D. (2004). Putting Teachers in the Loop: Tools for Creating and Customising Simulations. *Journal of Interactive Media in Education (Designing and Developing for the Disciplines Special Issue)*, 2004

Thorne, C. R. (1982). "Processes and mechanisms of river bank erosion." *Gravel-bed rivers*, R. D. Hey, J. C. Bathurst, and C. R. Thorne, eds., Wiley, New York, 227–271.

Trimble, S.W., 1994. Erosional effects of cattle on streambanks in Tennessee, USA. *Earth Surface Processes and Landforms* 19, 451–464.

VAN DINE, D.F. (1985) “Debris flows and debris torrents in the southern Canadian Cordillera”. *Canadian Geotechnical Journal*, (22):44-68.

VARNES, D.J. (1954) “Landslides types and processes”. En ECKEL, E.B. (Ed.) *Landslides and Engineering Practice* (20-47). Special Report 28. Highway Research

Board, U.S. National Academy of Sciences. Washington, D.C.

Varnes D.J. (1978). “Slope movement types and processes”. Special report 176: Landslides: Analysis and control (R.L. Schuster and R.J. Krizek, eds.), TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.11-33.

Walling, D.E., Collins, A.L., 2005. Suspended sediment sources in British rivers. In: Walling, D.E., Horowitz, A.J. (Eds.), *Sediment Budgets*. IAHS Press, Wallingford, pp. 123–133.

Wilson, G. (2005) A interação entre as formas de fundo e o movimento de sedimentos. Segundo Simposio Regional sobre Hidráulica de Rios. RJ, Brasil.

Yumoto, M., Ogata, T., Matsuoka, N., Matsumoto, E., 2006. Riverbank freeze-thaw erosion along a mountain stream, Nikko volcanic area, central Japan. *Permafrost and Periglacial Processes* 17, 3