

# **Universidad Autónoma de Querétaro**

**Facultad de Ciencias Naturales**

**Facultad de Ingeniería**

**Facultad de Psicología**

**Facultad de Filosofía**

**Facultad de Ciencias Políticas y Sociales**

**Facultad de Química**

**EFFECTO DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN EL APORTE DE  
SEDIMENTOS HACIA LA PRESA JALPAN, RESERVA DE LA BIÓSFERA  
SIERRA GORDA QUERÉTARO**

**TESIS**

**Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Maestra en Gestión Integrada de Cuencas**

**Presenta:**

**Gabriela Batalla Camargo**

**Dirigida por:**

**Dr. M. Alfonso Gutiérrez López**



# Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ciencias Naturales  
Maestría

## EFFECTO DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN EL APORTE DE SEDIMENTOS HACIA LA PRESA JALPAN, RESERVA DE LA BIÓSFERA SIERRA GORDA QUERÉTARO

### TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestra en Gestión Integrada de Cuencas

#### Presenta:

Gabriela Batalla Camargo

#### Dirigido por:

Dr. M. Alfonso Gutiérrez López

#### SINODALES

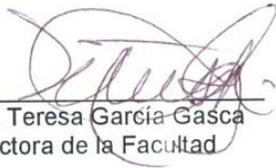
Dr. Martín Alfonso Gutiérrez López  
Presidente

M en G. Hugo Luna Soria  
Secretario

M en I. Pablo Talamantes Contreras.  
Vocal

M en GIC Milagros Córdova Athanasiadis  
Suplente

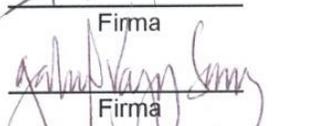
M en GIC Gabriel Vázquez Sánchez  
Suplente

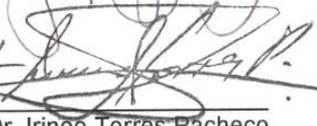
  
Dra. Teresa García Gasca  
Directora de la Facultad

  
Firma

  
Firma

  
Firma

  
Firma

  
Firma

  
Dr. Irineo Torres Pacheco  
Director de Investigación y  
Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Noviembre, 2013  
México

## RESUMEN

La transformación acelerada de las superficies forestales en áreas de uso agropecuario o urbano ha sido uno de los procesos más comunes en varias regiones de México durante los últimos 30 años. El cambio de uso de suelo natural o rural a uso urbano produce importantes transformaciones, tales como el aumento de la escorrentía superficial, especialmente cuando se producen fuertes precipitaciones de tormenta lo que ocasiona desbordes, inundaciones, erosión, difusión de contaminantes, entre otros efectos.

De acuerdo al Programa de Manejo de la Reserva de Biósfera Sierra Gorda (RBSG) publicado en el año 1999, grandes extensiones de bosque han sido deforestadas debido a los cambios en el uso de suelo con fines agropecuarios, a la tala clandestina, incendios y a las plagas, lo anterior ha conllevado a la pérdida de áreas con vocación forestal. Dentro de la superficie de la RBSG de Querétaro, se encuentra la Presa Jalpan, la cual se construyó entre los años 1975 y 1976. Dicho embalse que capta el agua desde las partes altas de la cuenca, cumple con varias funciones tanto económicas como ambientales; es tal su importancia ecológica que obtuvo la categoría de Sitio RAMSAR en el año 2004, no obstante lo anterior no existen estudios que permitan conocer la tasa de sedimentos que se transportan a la cuenca a través de sus cauces, por tal motivo se consideró pertinente la realización del presente estudio, en el cual, mediante el empleo de métodos directos e indirectos, se calcula la producción de sedimentos hacia la presa Jalpan contemplándose distintos escenarios con la finalidad de poder plantear una línea de acciones que deriven en el conocimiento del fenómeno de erosión hídrica para la conservación de la capacidad de almacenamiento de dicho embalse.

**Palabras clave:** Erosión hídrica, precipitación, uso de suelo, aporte de sedimentos, sedimentación de embalses.

## ABSTRACT

The rapid transformation of forest areas into agricultural areas or urban use has been one of the most common processes in various regions of Mexico for the past 30 years . The change in land use or of rural to urban uses produces important changes , such as increased surface runoff, especially during heavy storm rainfall causing overflows , flooding, erosion , diffusion of pollutants , among other effects.

According to Program Management Sierra Gorda Biosphere Reserve ( RBSG ) published in 1999 , large tracts of forest have been deforested due to changes in land use for agricultural purposes , to illegal logging , fires and pests , this has led to the loss of areas suitable for forestry . Within RBSG surface of Queretaro is Jalpan , which was built between 1975 and 1976 . This reservoir captures water from the upper parts of the basin, serves various purposes both economic and environmental, ecological importance is such that obtained the status of RAMSAR site in 2004 , notwithstanding the above there are no studies that reveal the rate of sediment transport to the basin through its channels , for this reason it was considered appropriate to carry out this study , in which, by using direct and indirect methods , calculate the sediment yield to the dam jalpan contemplating different scenarios in order to raise a line of actions that result in the understanding of the phenomenon of erosion by water conservation storage capacity of the reservoir.

**Keywords:** Water erosion, precipitation, land use, sediment, sedimentation of reservoirs.

## DEDICATORIA

A MATEO

## **AGRADECIMIENTOS**

**AGRADEZCO EL APOYO ECONÓMICO PROPORCIONADO POR CONACYT Y LA UAQ.  
AGRADEZCO A PROFESORES Y AMIGOS EL APOYO INCONDICIONAL.**

## ÍNDICE

RESUMEN.....	ii
ABSTRACT .....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
CAPÍTULO 1. INTRODUCTORIO .....	1
1.1 Planteamiento del problema .....	1
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo general.....	4
1.2.2 Objetivos específicos .....	4
1.3 Marco teórico.....	5
Uso de suelo.....	9
1.5. Unidad base de estudio .....	9
CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN RESERVA DE LA BIOSFERA SIERRRA GORDA DE QUERÉTARO Y UNIDAD BASE DE ESTUDIO .....	13
2.2 Caracterización del medio abiótico .....	14
Litología y geomorfología.....	14
Geología.....	15
Edafología .....	19
Clima .....	21
Hidrología .....	25
2.3 Caracterización del medio biótico .....	26
Flora .....	26
Fauna .....	30
Caracterización socioeconómica .....	31
CAPÍTULO 3. ESQUEMA METODOLÓGICO GENERAL .....	40
3.1 Rectificación de la unidad base de estudio .....	40
3.2 Corrección de algunos polígonos de la cartografía base de uso de suelo y vegetación para la unidad base de estudio .....	42
Revisión de cartografía.....	42
Edición de polígonos del mapa base de uso de suelo y vegetación.....	43
3.3 Estimación del proceso lluvia ecurrimento .....	43
3.3.1 Tratamiento de datos de lluvia .....	43
3.3.2 Estimación de gasto (Q) mediante el uso del programa LAANRUN .....	44
3.4 Estimación de la producción de sedimentos .....	45
3.4.1 Medición directa.....	45
3.4.2Aplicación del método RUSLE .....	54
CAPÍTULO 4. MODELACIÓN DEL FENÓMENO LLUVIA-ESCURRIMIENTO.....	57
4.1 Métodos basados en envolventes.....	58
4.2 Métodos basados en la fórmula racional.....	64
4.3 Métodos basados en la forma del hidrograma .....	70
4.4 Métodos empíricos .....	73

CAPÍTULO 5. METODOLOGÍAS PARA ESTIMAR LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS EN CUENCAS .....	84
5.1 Métodos con base en medición directa.....	84
Registro de descarga diaria de sedimentos .....	84
Periodo de acumulación de carga de sedimentos por periodos .....	85
Método de la curva de descarga de sedimentos y duración del flujo.....	85
Curvas de producción de sedimentos y volumen de agua anual.....	86
5.2 Métodos de modelación matemática.....	87
Métodos empíricos o de agrupación de variables .....	87
Métodos estocásticos .....	96
Métodos de Simulación de Procesos Físicos.....	96
CAPÍTULO IV. RESULTADOS .....	99
Caracterización morfométrica. ....	99
Trazo de polígonos en el mapa de uso de suelo y vegetación base .....	100
Resultados del programa LAANRUN .....	101
Resultados de las mediciones en campo .....	105
Tratamiento de los datos de lluvia.....	108
Resultados RUSLE .....	109
CAPÍTULO V. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES.....	130
LITERATURA CITADA .....	135
ANEXOS.....	140
Anexo 1. SPOT 5.....	140
Anexo 2. Resultados software LAANRUN.....	141

## ÍNDICE DE CUADROS

### Cuadro

1. Coordenadas extremas del área de estudio.....	10
2. Geología del área de estudio.....	18
3. Tipos de suelo en la unidad base de estudio.....	21
4. Región hidrológica del área de estudio.....	25
5. Destino de la tierra.....	33
6. Uso de la tierra.....	34
7. Uso de suelo y vegetación del área de estudio.....	37
8. Procesos de cambio en el área de estudio.....	39
9. Valores para el coeficiente de escurrimiento C para la fórmula de Dickens.....	59
10. Valores para el coeficiente de escurrimiento C para la fórmula racional.....	64
11. Valores para el coeficiente de escurrimiento C para el método ARMCO.....	67
12. Valores para el factor de pendiente para el método ARMCO.....	67
13. Valores para el coeficiente de escurrimiento C para el método de Talbot.....	74
14. Valores para el coeficiente de escurrimiento C para el método de Bürkli-Ziegler.....	75
15. Valores para el coeficiente de infiltración del suelo $\Phi$ .....	76
16. Valores para el coeficiente de retardo n.....	76
17. Valores para el coeficiente de precipitación $f_w$ .....	77
18. Valores numéricos del PSIAC respecto a la producción de sedimentos.....	89
19. Uso de suelo y vegetación.....	100
20. Métodos empleados.....	101
21. Intensidad de la precipitación (mm) a diferentes duraciones y periodos de retorno.....	108
22. Aporte de sedimentos en función del área de la cuenca.....	110
23. Valores generales del factor K (en sistema inglés).....	118
24. Factor C.....	121
25. Factor C en área de estudio.....	122
26. Factor de método de control de la erosión.....	124
Cuadro 27. Densidad aparente.....	125
28. Aporte de sedimentos del área de estudio en $\text{kg/m}^2$ al año (48.9 mm/24 horas).....	128
29. Aporte de sedimentos del área de estudio en $\text{kg/m}^2$ al año (100.78 mm).....	128

## ÍNDICE DE FIGURAS

### Figura

1. Sistema de Microcuencas Presa Jalpan. Microcuencas que conforman al sistema, corrientes de agua superficial y cuerpos de agua. ....	10
2. Cuenca a la que corresponde el área de estudio. ....	11
3. Municipios en los que se inserta el área de estudio. ....	12
4. Geología .....	18
5. Tipo de suelo. ....	20
6. Estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio. ....	23
7. Precipitación y temperatura en la estación Jalpan. ....	24
8. Precipitación y temperatura en la Estación Jalpan (DGE) .....	24
9. Número de habitantes por localidad.....	32
10. Mapa de uso de suelo y vegetación. ....	38
11. Funcionamiento extensión DetermHidro .....	41
12. Esquema metodológico para la generación del mapa de uso de suelo y vegetación actualizado. ....	42
13. Puente Escanelilla .....	45
14. Puente Ahuacatlán de Guadalupe .....	46
15. Sitios de muestreo .....	46
16. Diagrama de Hjulström .....	48
17. Diagrama de Shields.....	49
18. Fotografía de perfil de Puente Escanelilla .....	51
19. Puente Ahuacatlán, sus dimensiones y configuración.....	54
20. Sistema de drenaje y cauce principal.....	99
21. Mapa de uso de suelo y vegetación. ....	100
22. Resultados en diagrama de Shields.....	107
23. Precipitación (mm) estimada a distintos periodos de retorno y duraciones. ....	108
24. Hietograma de precipitación máxima .....	116

## CAPÍTULO 1. INTRODUCTORIO

### 1.1 Planteamiento del problema

La transformación acelerada de las superficies forestales en áreas de uso agropecuario o urbano ha sido uno de los procesos más comunes en varias regiones de México durante los últimos 30 años (Castelán Vega *et al*, 2007).

El cambio de uso de suelo natural o rural a uso urbano produce importantes transformaciones, tales como el aumento de la escorrentía superficial, especialmente cuando se producen fuertes precipitaciones de tormenta lo que ocasiona desbordes, inundaciones, erosión, difusión de contaminantes, entre otros efectos (Henríquez Cristián *et al*, 2006).

La erosión del suelo representa una grave amenaza para el mantenimiento de sistemas agrícolas y ambientales. No obstante, debido al carácter discontinuo del fenómeno, ligado a la ocurrencia de lluvias intensas a veces esporádicas, su percepción por la sociedad es intermitente. En zonas semiáridas, una consecuencia de gran importancia asociada a la erosión es la pérdida de capacidad de almacenamiento de los embalses. Un problema frecuente, es la falta de información que conlleve a una adecuada estimación de la erosión y del volumen de sedimento aportado a dicho embalse para así poder planificar el óptimo manejo de los recursos disponibles (Carvajal Ramírez y Giráldez Cervera, 2000).

La implementación de métodos para predecir la pérdida de suelo por erosión en México no ha sido muy extensa, se han realizado numerosas investigaciones para cuantificar la tasa de erosión bajo diferentes usos de suelo a nivel de cuenca hidrográfica y para evaluar la efectividad de diferentes coberturas vegetales en el control de la erosión en terrenos agrícolas utilizando parcelas de erosión o lotes de escurrimiento, pero pocos estudios se han enfocado a la

predicción de la erosión con fines de planeación y diseño de prácticas de conservación de suelos (Santacruz De León, 2011).

El área de estudio del presente trabajo se ubica al interior de la Reserva de la Biósfera Sierra Gorda, la cual es la séptima en tamaño dentro de las áreas naturales protegidas federales de primer nivel en México, incluyendo a las marítimas, y se le considera como la más diversa en ecosistemas de todas ellas. Tal relevancia se le concede a nivel internacional que en 2001 se le asignó como Reserva MaB-UNESCO, quedó incluida dentro de la Red Mundial de Reservas de la Biósfera, y se inscribió como un proyecto de escala completa a siete años con el apoyo del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF, por sus siglas en Inglés), y administrado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) (Centro Queretano de Recursos Naturales, 2006).

De acuerdo al Programa de Manejo de la Reserva de Biósfera Sierra Gorda (RBSG) publicado en el año 1999, grandes extensiones de bosque han sido deforestadas debido a los cambios en el uso de suelo con fines agropecuarios, a la tala clandestina, incendios y a las plagas, lo anterior ha conllevado a la pérdida de áreas con vocación forestal (INE, 1999). Como es sabido, los cambios de uso de suelo que se llevan a cabo en una cuenca, tienen efecto sobre los procesos cíclicos naturales como el hidrológico, nutrientes, transporte de sedimento, entre otros.

En zonas de la sierra como a lo largo de las laderas y mesetas en la cuenca directa del Río Jalpan se ha observado que se ha abandonado la agricultura de temporal en zonas relativamente extensas, en forma gradual durante los últimos 20 años (Centro Queretano de Recursos Naturales, 2006<sup>b</sup>).

Dentro de la superficie de la RBSG, se encuentra la Presa Jalpan (en la Microcuenca del mismo nombre). La presa se construyó entre los años 1975 y 1976 y se diseñó para tener una capacidad al NAMO (nivel de aguas máximas

ordinarias o de operación) de 8 millones de metros cúbicos (<http://www.conagua.gob.mx>).

La Presa Jalpan fue construida sobre el cauce del río del mismo nombre y capta el agua desde las partes altas de la cuenca; el agua almacenada se usa con fines agrícolas y como fuente de abastecimiento para el consumo humano de población de la localidad Jalpan de Serra. De igual forma algunas actividades económicas se realizan en ese reservorio de agua, tales como pesca a pequeña escala, acuacultura y turísticas entre otras (<http://ramsar.conanp.gob.mx>).

La presa Jalpan se ubica al interior de la Reserva de la Biósfera Sierra Gorda de Querétaro, misma que cuenta con programa de manejo, aunque en él no se incluyen restricciones o análisis de las actividades que pueden realizarse para mantener en buen estado a la presa. Este cuerpo de agua, comenzó a atraer a especies de aves acuáticas y actualmente sirve como sitio de reproducción y refugio para 33 especies tanto migratorias como residentes presentes en pequeños números. Por este motivo y por las funciones que presta este reservorio como abrevadero y sitio de alimentación para especies de importancia ecológica, es que en el año 2004 fue declarada como sitio RAMSAR (<http://ramsar.conanp.gob.mx>).

En el párrafo 1 del artículo 3 del texto de la Convención de Ramsar, se estipula que “las Partes Contratantes deberán elaborar y aplicar su planificación de forma que favorezca la conservación de los humedales incluidos en la Lista [de Humedales de Importancia Internacional] y, en la medida de lo posible, el uso racional de los humedales de su territorio.” También se estipula que se deberán establecer políticas para la conservación de dichos humedales, entendiéndose por “política” aquella declaración publicada por un gobierno nacional con metas, calendarios, compromisos y presupuestos para las acciones planteadas (Secretaría de Ramsar, 2010).

No obstante lo antes mencionado, existen pocos estudios en la zona que proporcionen datos que relacionen el uso de suelo de las tres microcuencas que en conjunto forman el sistema cuya red de drenaje tiene como punto de salida la Presa Jalpan, con la cantidad de sedimentos que se aporta a dicho embalse.

Cabe destacar que conforme a algunas estimaciones, el promedio de vida de los reservorios de agua hechos por el hombre es de aproximadamente 22 años y la vida útil decrece en términos de la acumulación de sedimentos que presenten, por tal se considera que es relevante la realización de un estudio que permita conocer la tasa de sedimentos que se transporta a la Presa Jalpan y su relación con el uso de suelo con la finalidad de realizar una serie de propuestas para la conservación del embalse.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Establecer líneas de acción para la conservación de la capacidad de almacenamiento de la presa Jalpan a través de la estimación del transporte de sedimentos y su relación con el uso del suelo.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Rectificar la unidad base de estudio en base a la hidrología superficial.
- Estimar el escurrimiento (Q) en el área de estudio.
- Generar distintos escenarios de la producción de sedimentos en el área de estudio:
- Proponer líneas de acción que deriven en la generación de conocimientos que den lugar a un manejo integral de las microcuencas que forman parte del sistema de drenaje que conduce a la Presa Jalpan.

### **1.3 Marco teórico**

#### ***El ciclo hidrológico***

El ciclo hidrológico está compuesto por diferentes variables relacionadas entre si por medio de los procesos hidrológicos; dichos procesos se encuentran asociados con aquellos fenómenos que intervienen tanto en el movimiento del agua como en los cambios que sufre ésta en sus características físicas, químicas y biológicas al desplazarse por diversos medios. Se puede representar como un sistema compuesto de tres subsistemas generales: subsistema atmosférico, subsistema de agua superficial y subsistema de agua subterránea. Cada subsistema presenta una capacidad de retención (también llamada almacenamiento) de cierto volumen de agua durante un determinado intervalo de tiempo o residencia (Breña Puyol. y Jacobo Villa. 2006).

#### ***El proceso erosivo***

La erosión puede definirse como un proceso complejo que incluye el desprendimiento, remoción y transporte de partículas de suelo o material rocoso por parte de los agentes erosivos (agua, viento, gravedad). En un sentido geomorfológico, el término erosión (y los términos asociados de remoción y transporte) se utiliza habitualmente en referencia a una unidad paisajística concreta, como por ejemplo una ladera o una cuenca. Cuando el transporte de las partículas erosionadas se produce más allá de la unidad donde ha tenido lugar la erosión, es costumbre no utilizar el término erosión (o transporte) y pasar a hablar de producción de sedimento (Alatorre y Beguería, 2009).

En términos generales, se puede decir que la erosión (y el tipo de esta) que se presentará en un determinado suelo va a depender de ciertas variables (UNESCO, 2010), estas son:

- Clima
- Vegetación
- Hojarasca
- Tipo de suelo
- Topografía
- Velocidad del flujo
- Uso de la tierra

A continuación se describen brevemente cada una de dichas variables (UNESCO, 2010):

Clima: La variable climática más importante es la lluvia, no obstante, existen algunas tormentas más erosivas que otras; lo anterior es determinado por variables como la intensidad de la tormenta (mm/hr) y la cantidad del agua que ha caído (mm). Otros factores que intervienen en la tasa de erosión producida son la duración de la tormenta, la distribución temporal de su intensidad, las condiciones iniciales de humedad en el suelo (esto es, el tiempo transcurrido desde la última tormenta) y la temperatura de las gotas de agua producidas por la tormenta (por ejemplo, una tormenta cuyas gotas se encuentran a temperaturas bajas, infiltrarán el suelo a tasas muchos menores).

Índice de erodabilidad de una tormenta: Se determina en base a la energía cinética del evento (Morgan, 2005). De este modo, la erosibilidad de una tormenta está en función de su duración e intensidad, así como el agua caída y la velocidad y diámetro de las gotas de lluvia. Se ha comprobado que el tamaño de las gotas está relacionado con la intensidad de la tormenta, aumentando su  $D_{50}$  a medida que la intensidad se incrementa (Laws y Parsons, 1943), relación que se mantiene hasta intensidades no superiores a los 100 mm/hr.

Debido a la alta variabilidad geográfica de las características precipitacionales, muchas ecuaciones han sido desarrolladas, relacionando la intensidad de las tormentas con la energía cinética producida.

- **Erosión hídrica**

El tipo de erosión predominante en México es la erosión hídrica, debido a que el 65% del territorio nacional tiene pendientes mayores a 10%. Esta situación se sumó al hecho de la presencia de una escasa cobertura vegetal al inicio de las lluvias, lo incrementa el riesgo de erosión hídrica en más del 70% del territorio, llegando a ser extrema en un 9% del País (Pando Moreno M., *et al.*, 2003).

Uno de los procesos de degradación del suelo más importante y que afecta la capacidad de las tierras para la producción de alimentos, es la erosión hídrica, la cual provoca que aumente la carga sólida que arrastran los ríos. Dicha erosión se produce por dos mecanismos, el primero de estos, se encuentra relacionado con el impacto directo de la gota de lluvia sobre la superficie del suelo lo que produce la desagregación del mismo cuando este se encuentra desnudo; el segundo está relacionado con el escurrimiento del suelo debido a la pendiente, lo que ocasiona el arrastre de partículas del mismo (Escalante, 2005).

En un estudio realizado por Reyes y colaboradores (En: Pando, *et al.*, 2003) utilizando la ecuación universal de pérdida de suelo para caracterizar la erosión hídrica laminar y en arroyuelos, en Oaxaca, encontraron que los factores de longitud y grado de pendiente fueron los que más influyeron en las pérdidas de suelo en los periodos de tiempo estudiados.

El proceso de erosión hídrica inicia cuando las gotas de lluvia, al caer, impactan directamente sobre la superficie del suelo, ocasionando que los agregados se rompan en agregados más finos, hasta separar el limo, la arcilla y la arena. El material fino una vez separado, tapa los poros del suelo por lo que el agua empieza a escurrir por la superficie (Pereyra, 2005).

En los ecosistemas sin perturbar, la cantidad de suelo disponible se mantiene relativamente constante en el tiempo, mientras que, cuando el ecosistema es perturbado por causas naturales o por actividades humanas, los procesos de erosión hídrica se ven acelerados; el grado de erosión dependerá entonces de la vulnerabilidad del sistema y de la magnitud de la perturbación. A su vez, la vulnerabilidad del sistema dependerá de las características del sitio, tales como el clima (principalmente la precipitación), el tipo de vegetación, el tipo de suelo y la topografía (Pereyra, 2005).

### ***Transporte de sedimentos***

En México el estudio de transporte de sedimentos se ha limitado principalmente a mediciones rutinarias de concentración de sólidos en suspensión cerca de la superficie; sin embargo, el problema es mucho más complejo y difícil y va más allá de solo medir el flujo, ya que se debe tener bien definido qué tipo de sedimento se quiere medir y esto dependerá de para qué necesitamos el dato, es decir qué tipo de estudio estamos realizando (Rivera-Trejo, 2005).

Generalmente se suelen distinguir entre la carga de fondo o de lecho, la carga en suspensión y la carga de lavado. La primera está asociada a partículas sólidas en movimiento en el fondo del canal; la segunda, a las partículas que estando en el lecho han saltado y se encuentran suspendidas pero que se pueden sedimentar y la tercera se suele asociar a aquellas partículas que se encuentran suspendidas y no se sedimentan. Comúnmente se ha asociado la carga de lavado (wash load) con los aportes propios de la cuenca; en general está gobernada fuertemente por la capacidad de suministro, a través de la erosión de finos, de la propia cuenca y escasamente con las condiciones hidráulicas de la corriente. Las cargas de lecho y suspensión están gobernadas por la capacidad de transporte del flujo, estando por lo tanto estrechamente relacionadas con el caudal líquido. Las diferencias entre carga y suspensión no son claras, ya que no existe una brusca discontinuidad entre ambos procesos; de hecho una misma partícula

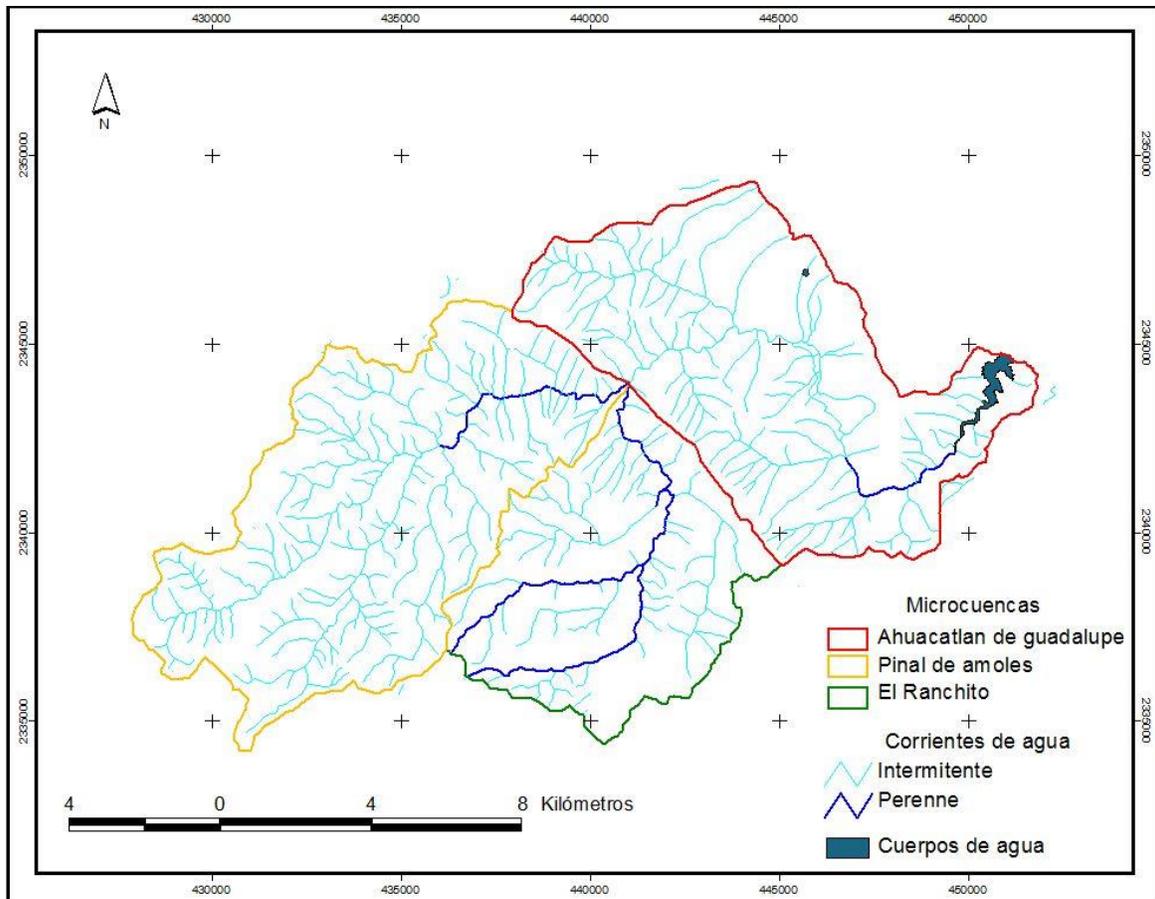
puede alternar su forma de transporte según varíe la distribución de la turbulencia; varios autores han tratado entonces de definir criterios que permitan diferenciarlos (Montoya y Montoya, 2005).

### **Uso de suelo**

El uso de suelo se define como el resultado de las actividades socioeconómicas desarrolladas sobre un territorio. En primera instancia se pueden diferenciar los usos “naturales” de los usos “antrópicos” (Rosette Vergés, 2008).

### **1.5. Unidad base de estudio**

La unidad base de estudio se ha denominado para este trabajo “Sistema de Microcuencas Presa Jalpan” , tiene una superficie de 18,940.59 hectáreas. Su delimitación se derivó de la revisión de las curvas de nivel de la carta de INEGI, el modelo digital de elevación y los escurrimientos superficiales del sistema que se presupone sea el que alimente y tenga influencia en el transporte de sedimentos hacia el embalse conocido como presa Jalpan. Una vez efectuado el análisis de la información antes mencionada, se procedió al trazo del parteaguas, quedando así incluidas dentro de esta área tres microcuencas (cuya delimitación había sido definida en un trabajo previamente realizado por la Maestría en Gestión Integrada de Cuencas), estas son: microcuenca Ahuacatlán de Guadalupe, microcuenca Pinal de Amoles y microcuenca el Ranchito (Figura 1).



**Figura 1. Sistema de Microcuencas Presa Jalpan. Microcuencas que conforman al sistema, corrientes de agua superficial y cuerpos de agua.**

Las coordenadas extremas de unidad base de estudio se muestran en el Cuadro 1.

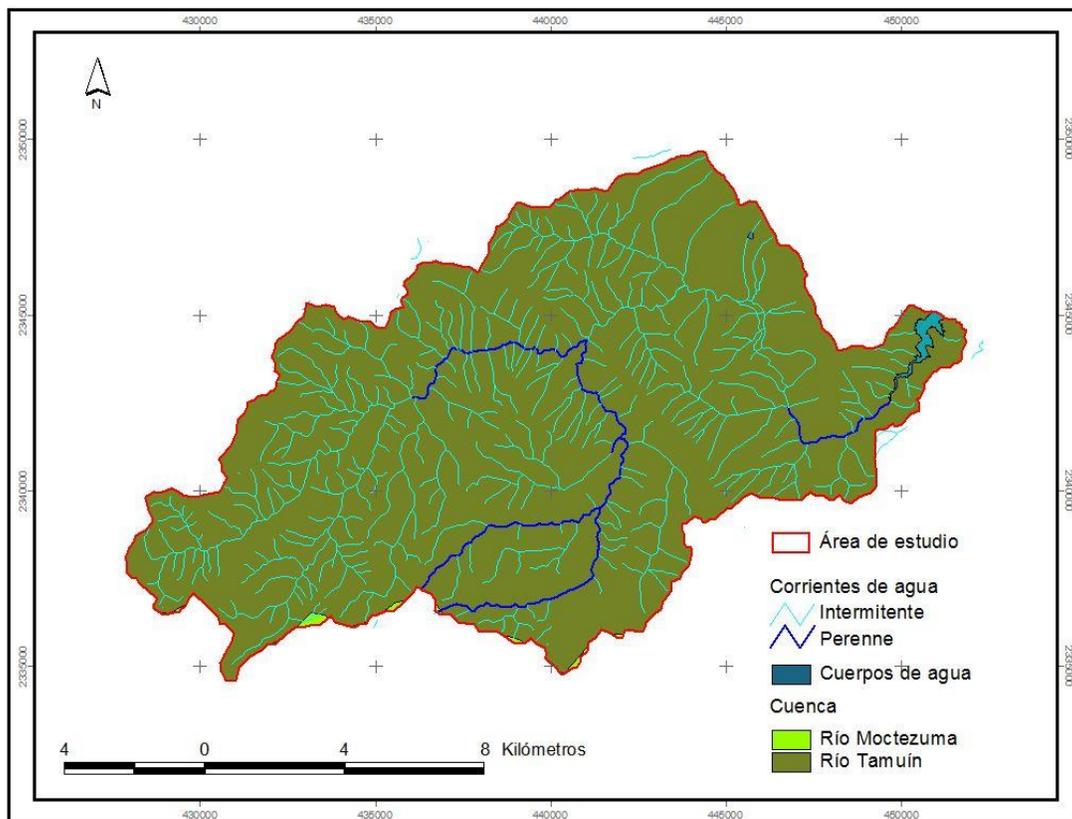
**Cuadro 1. Coordenadas extremas del área de estudio**

<b>Coordenadas UTM WGS84</b>	
NORTE	2349668.61
SUR	2334563.71
ESTE	451856.90
OESTE	427864.05

**El Sistema de Microcuencas Presa Jalpan se ubica en la parte Norte del Estado de Querétaro, dentro de la Región Hidrológica Pánuco. El 99.7% del área de**

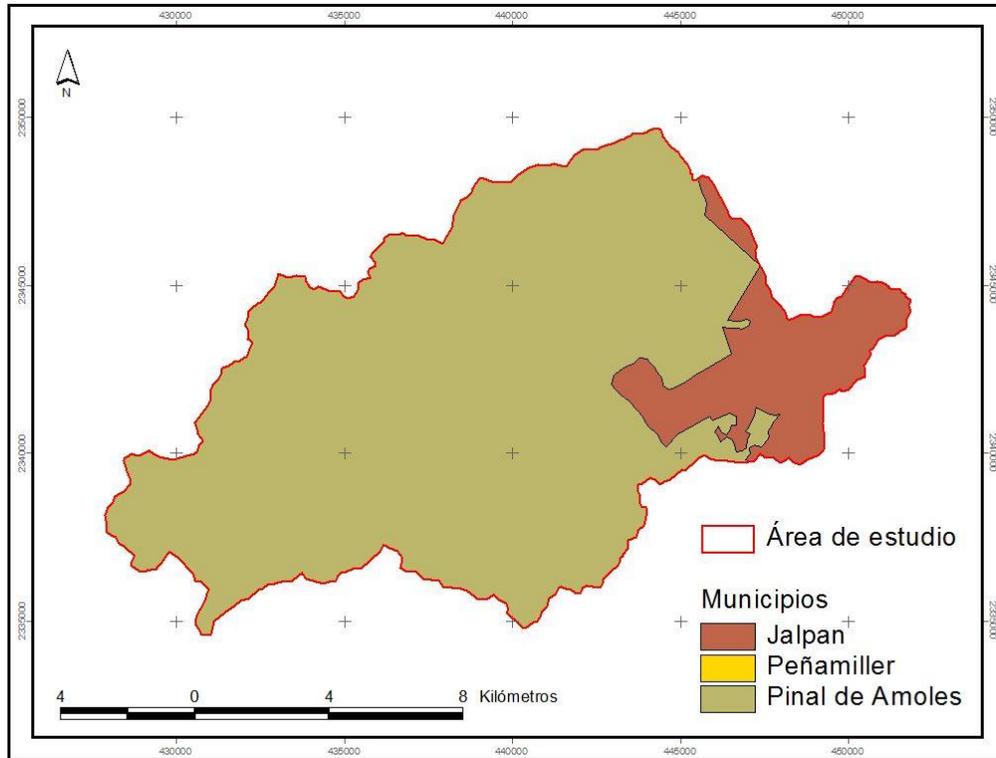
de estudio se encuentra dentro de la cuenca Río Tamuín, mientras que menos del 0.3% se halla en la cuenca Río Moctezuma ( Figura 2).

La totalidad del polígono que forma la unidad base de estudio se ubica al interior de la Reserva de la Biósfera Sierra Gorda, la cual fue decretada en el año de 1997. Tiene alturas que varían de los 3000 msnm hasta los 761 msnm.



**Figura 2. Cuenca a la que corresponde el área de estudio.**

El 87.15% de la unidad base de estudio se encuentra en el Municipio de Jalpan de Serra, el 12.85 % en el Municipio de Pinal de Amoles y solo un 0.1% en el Municipio de Peñamiller (Figura 3).



**Figura 3. Municipios en los que se inserta el área de estudio.**

El punto de salida del área de estudio, es la presa Jalpan, la cual fue construida entre los años 1975 y 1976 sobre el cauce del río Jalpan. y capta el agua desde las partes altas de la cuenca; el agua almacenada se usa con fines agrícolas y como fuente de abastecimiento para el consumo humano de población de la localidad Jalpan de Serra. De igual forma algunas actividades económicas se realizan en ese reservorio de agua, tales como pesca a pequeña escala, acuacultura y turísticas entre otras.

## **CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN RESERVA DE LA BIOSFERA SIERRA GORDA DE QUERÉTARO Y UNIDAD BASE DE ESTUDIO**

La información que a continuación se presenta, referente a la descripción de la Sierra Gorda de Querétaro, fue obtenida principalmente del Plan de Manejo de esta área natural protegida (INE, 1997), así como de distintas cartas temáticas y vectoriales de INEGI a escalas 1:50000 y 1:250000. De igual forma se consultaron algunas otras fuentes bibliográficas que describen la zona de manera general.

### **2.1. Ubicación de la Reserva de la Biósfera**

La Reserva de La Biosfera Sierra Gorda de Querétaro es un área Natural Protegida cuya creación formal se llevó a cabo el día 19 de mayo de 1997, fecha en que fue publicado su Decreto en el Diario Oficial de la Federación. Se encuentra ubicada en el estado de Querétaro, representando el 32% del territorio total de dicho estado. Se localiza entre los paralelos 20° 50' y 21° 45' de latitud norte y los meridianos 98° 50' y 100° 10' de longitud oeste. Tiene una superficie de 383,567 hectáreas, de las cuales 24,803 hectáreas corresponden a zonas núcleo y una superficie de amortiguamiento de 358,764 hectáreas.

La zona de amortiguamiento a su vez, fue dividida en 6 subzonas con la finalidad de establecer condiciones de manejo acordes con las características bióticas, abióticas y socioeconómicas presentes en cada zona y en función de criterios de conservación y manejo de sus elementos naturales.

Las subzonas fueron clasificadas en tres tipos:

- Subzonas de Aprovechamiento Controlado;
- Subzonas de Aprovechamiento Sustentable; y
- Subzonas de Aprovechamiento Intensivo.

La Reserva de La Biosfera Sierra Gorda limita al Norte con el río Santa María, al Sur con el río Victoria – Xichú – Extóraz – Santa Clara hasta la intersección con el río Moctezuma, al Sureste con el río Moctezuma y al Oeste con la sierra formada por cerro El Toro, cerro Ojo de Agua y cerro El Infiernillo.

La Reserva, que ocupa la mayor parte de la Sierra Gorda la cual forma parte de la Sierra Madre Oriental, abarca el 100% de los municipios Arroyo Seco, Jalpan de Serra y Landa de Matamoros, el 88.03% de Pinal de Amoles y el 69.7% de Peñamiller. Se caracteriza por su gran complejidad fisiográfica con alturas que van desde los 300 hasta los 3,100 msnm, lo que da lugar a numerosas variantes climáticas mismas que favorecen el establecimiento de comunidades vegetales representativas de la flora mexicana asociadas con algunas poblaciones frágiles de fauna silvestre.

## **2.2 Caracterización del medio abiótico**

### **Litología y geomorfología**

El proceso geológico más evidente es el de la orogenia causado por esfuerzos tectónicos compresivos y distensivos los cuales dieron lugar a la formación de la denominada provincia fisiográfica Sierra Madre Oriental. Esta provincia ocupa una extensión de 5,000 km<sup>2</sup> en la porción Norte del estado de Querétaro, y los sistemas fluviales del río Santa María y del río Moctezuma la dividen mediante un sistema cañones, delimitando a la denominada Subprovincia de Carso Huasteco. Dentro de esta Subprovincia de la Sierra Madre Oriental ocupando el 76.68 % de la misma, se ubica la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda de Querétaro.

Las topoformas que caracterizan a la Reserva son: Sierras de laderas convexas, Sierras de laderas abruptas; Cañones; y Llanuras intermontanas. Al Oeste predominan laderas convexas con pendientes de 12 a 70%. En la parte Este y Sur, sierras de laderas abruptas, con pendientes de 12 a 70%. Los cañones

presentan pendientes de 40 a más de 70%. Finalmente, se localizan llanuras intermontanas en una pequeña porción del noroeste de Arroyo Seco, con pendientes del orden del 12 al 40%.

La topografía de la Sierra Gorda Queretana es abrupta, de 300 a 3,500 msnm, con una altitud media predominante entre los 1,300 y los 2,400 msnm, caracterizada por elevaciones como los cerros de Jasso y el de La Media Luna (2,420 msnm) el cual se ubica al Suroeste de la Reserva. Al Oeste se encuentra el cerro de la Tembladera (1,880 msnm) y al Este el cerro de Otates (1,450 msnm), cerro del Pelón (1,400 msnm), La Tinaja, San Pedro y Piletas.

Entre los cerros más elevados se pueden mencionar el Cerro de La Calentura y de La Pingüica, en el municipio de Pinal de Amoles, con alturas de 3,060 y 3,100 msnm, respectivamente. Cabe mencionar que el cerro de La Pingüica forma parte del parteaguas entre la subcuenca del Tamuín y la subcuenca del río Extóraz, perteneciente éste al Moctezuma.

Las llanuras intermontanas se presentan a altitudes entre 600 y 900 msnm, con una altitud promedio de 750 msnm y una extensión entre 5 y 7 km<sup>2</sup>, en dichas llanuras se han desarrollado distintos asentamientos humanos y la actividad agrícola.

## **Geología**

La mayor parte de la Sierra Gorda pertenece a la denominada plataforma Valles San Luis Potosí, la cual se vio afectada por distintos esfuerzos tectónicos de la Orogenia Laramide durante el Cretácico y el Terciario. La deformación de la plataforma Valles San Luis determina un patrón estructural orientado de noroeste a sureste representado por numerosos plegamientos recumbentes de considerable amplitud expuestos en rocas del cretácico. Este patrón estructural está representado por dos estilos de deformación: uno sobre rocas calcáreas-

arcillosas y arcillo-arenosas de estratificación delgada, representado por las formaciones Soyatal, Mexcala y Trancas; y el otro en rocas calcáreas de estratificación mediana a gruesa que constituye la formación El Abra. Esta última, por lo general, presenta estructuras anticlinales amplias con abundantes diasclasas y fracturas, además de fallas normales de poca y mediana extensión. Esta formación favorece el desarrollo del paisaje cárstico.

En la Reserva predominan rocas del cretácico inferior de la era Mesozoica, con litología de tipo roca sedimentaria y conglomerados. La formación Las Trancas son las rocas más antiguas que afloran en la Sierra Gorda, estas son del jurásico superior al cretácico inferior y subyacen a la formación El Abra. Se la encuentra en los núcleos del anticlinorio El Piñón y de los anticlinales cerro de Yesca y Bonanza, parcialmente aflora en los ríos Extóraz y Santa María.

En el anticlinal del Cerro de la Yesca la formación Trancas consiste de 3 cuerpos. El inferior está compuesto por pizarras calcáreas carbonosas de color gris oscuro, el cuerpo medio de calizas claras con estratificación de mediana a gruesa, de 50 m de espesor y el cuerpo superior formado de filitas interestratificadas con capas muy delgadas de caliza arcillosa. Esta formación subyace discordantemente a la formación El Abra.

La formación El Abra continúa la secuencia estratigráfica y está constituida por calizas con espesores de 1,500 a 2,000 m. Carrillo y Suter (1982) definen 4 facies para esta formación, que son: formación Tamaulipas para las facies de cuenca, constituidas por calizas de textura fina con capas y nódulos de pedernal, y con intercalaciones de finos estratos de lutita; formación Tamabra para las facies de talud, compuestas por brechas sin sedimentarias y calizas bioclásticas de textura media; y formaciones El Doctor y El Abra para las facies de plataforma, constituida en el borde por arrecifes de rudistas y calizas bioclásticas olíticas de textura gruesa.

Durante casi todo el terciario afloran numerosos cuerpos intrusivos de pequeña magnitud ubicados al sureste de la localidad de Pinal de Amoles. A fines del terciario ocurrieron frecuentes erupciones volcánicas que dieron lugar a las rocas ígneas extrusivas presentes en la Sierra Gorda y que se componen de una secuencia de riolitas y tobas ácidas que afloran en la localidad de Atarjea, mientras que los basaltos se presentan desde Ayutla hasta Arroyo Seco.

Al Norte se identifican testigos del período cuaternario de la era Cenozóica así como rocas sedimentarias de litología aluvial. La edad del relieve es menor que la edad de las rocas que lo constituyen. Esta ha sido determinada con el método conocido como sedimentos correlativos determinando que los valles profundos que disectan a la Sierra Madre Oriental son posteriores al Eoceno, es decir, durante el terciario inferior, mientras que la parte más profunda es la más joven, de edad Holocénica, es decir cuaternario, y es más antigua hacia las porciones superiores.

La dinámica actual del relieve determinada por las características estructurales, litológicas, topográficas y climáticas define los procesos exógenos de intemperismo, erosión y remoción en masa que modelan al relieve. El análisis de la dinámica actual del relieve no debe limitarse a la actividad externa relacionada con el clima, sino que debe abarcar a las fuerzas endógenas dado que, según algunas investigaciones, la Sierra Madre Oriental se encuentra en proceso de levantamiento, lo que acelera el efecto de los agentes modeladores del relieve.

Debido a la naturaleza calcárea de la región, así como a la influencia de otros factores de tipo geológico, climático y geográfico, las rocas presentan procesos de disolución, determinando la presencia de distintas formas de relieve cárstico como son dolinas, simas, cavernas y poljés, entre otros.

Conforme a la carta temática geológica del INEGI escala 1:250000, la zona de estudio presenta cuatro tipo de rocas (Figura 4). La más abundante es la Ki(cz), es decir, roca caliza (Cuadro 2).

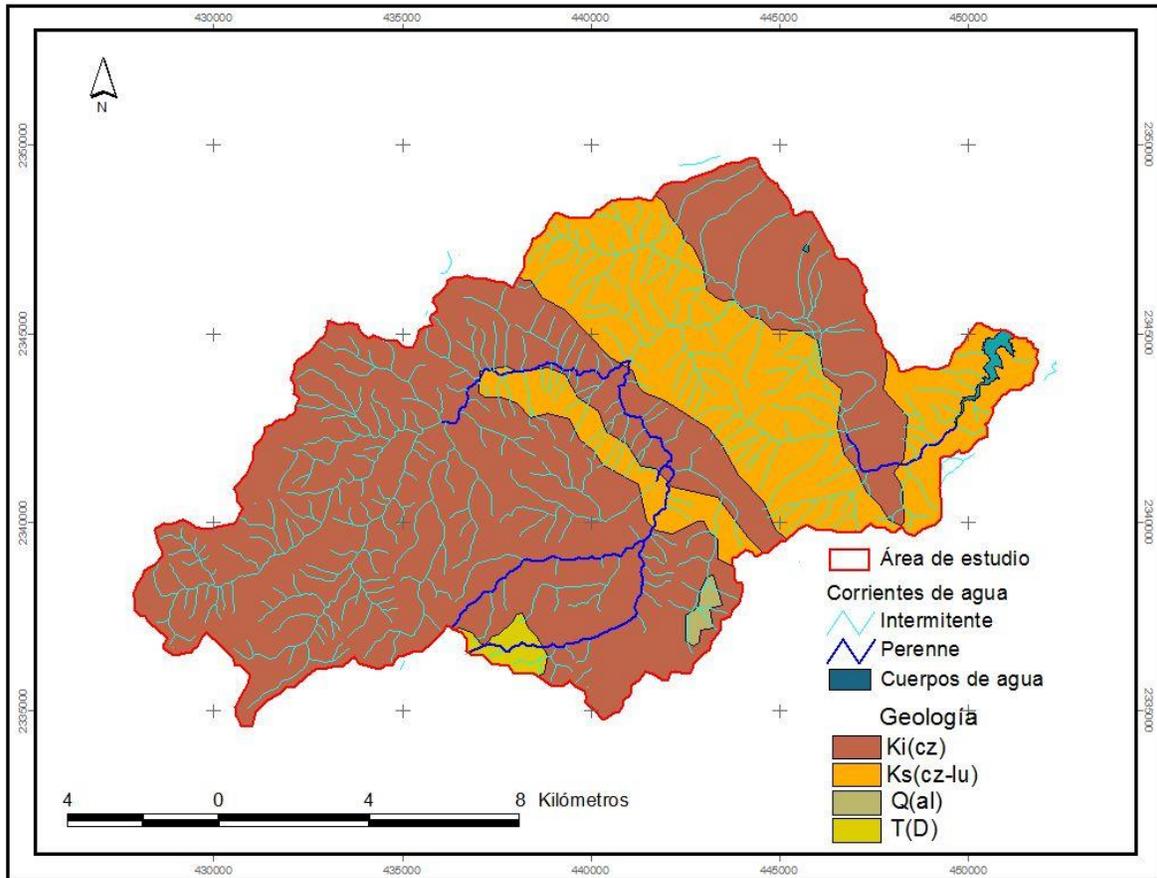


Figura 4. Geología

Cuadro 2. Geología del área de estudio

CLAVE(*)	Era	Sistema	Hectáreas	Porcentaje
Ki(cz)	Mesozoico	Cretácico	13,288.10	70.16
Ks(cz-lu)	Mesozoico	Cretácico	5,372.35	28.36
Q(al)	Cenozoico	Cuaternario	87.06	0.46
T(D)	Cenozoico	Terciario	193.09	1.02

Claves (\*):

K i= Cretácico inferior

Ks = Cretácico Superior

Q = Cuaternario

T = Terciario

cz = caliza

lu = lutita

al = aluvial

D = diorita

## **Edafología**

El tipo de suelo predominante en la Reserva de la Biósfera es el litosol de color negro o gris muy oscuro; este posee altos contenidos de nutrientes y presenta desde 10 cm de profundidad en laderas y pendientes abruptas con alto riesgo de erosión, hasta 50 cm en los valles.

También existen luvisoles mismos que presentan un color rojizo o pardo amarillento ácidos, con pedregosidad superficial (comunidades de Pinal de Amoles, Landa de Matamoros, Soledad de Guadalupe, La Lagunita, San Juan Buenaventura y San José del Tepame); se asocian con suelos secundarios de tipo litosoles, rendzinas, feozem y, en algunas partes, con cambisoles calcáreos. Estas asociaciones presentan textura media a fina de color pardo grisáceo oscuro; su textura es de migajón arcilloso y profundidad de menos de 50 cm.

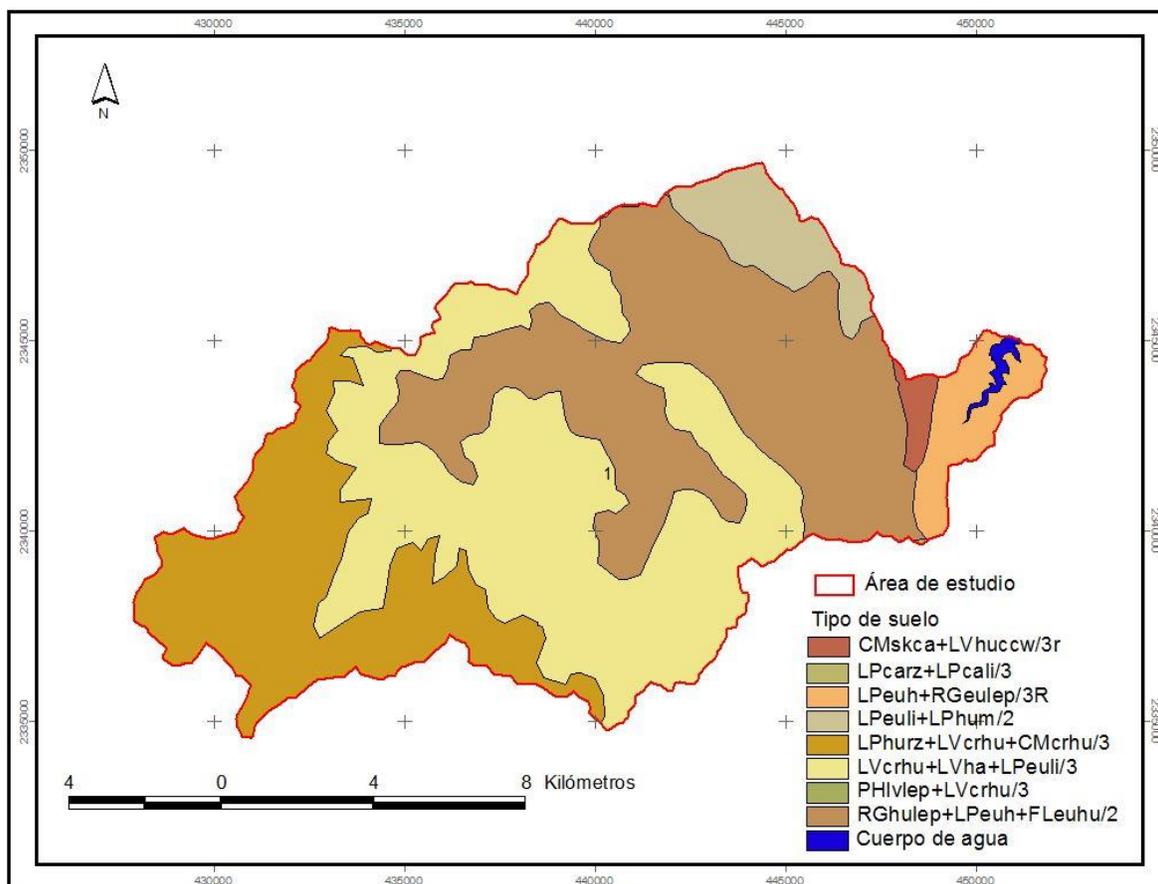
Al Sur de la comunidad de Jalpan de Serra se encuentran regosoles (Carrizal de los Sánchez), los cuales son suelos jóvenes con capa superficial de color grisáceo oscuro; su textura es de migajón arcilloso cuando están asociados con fluvisol éutrico de textura fina (al sur del cañón del Río Jalpan); son generalmente delgados y cuando son profundos presentan pedregosidad superficial con cantidades altas de calcio, potasio y magnesio. También se asocian con luvisoles, litosoles y rendzinas; con profundidades menores a los 50 cm.

Por último, los vertisoles pélicos (comunidades de Concá, Municipio de Arroyo Seco, y La Reforma y Otates, Municipio de Landa de Matamoros). Se encuentran distribuidos en pequeñas zonas de forma irregular; son de color negro y textura arcillosa, y cuentan con capacidad de retener nutrientes; son generalmente poco profundos (menos de 10 cm).

De acuerdo a la carta temática edafológica del INEGI escala 1:250000, la zona de estudio (Sistema de Microcuencas Presa Jalpan) presenta ocho tipos de suelo y un cuerpo de agua (

Figura 5), siendo el más abundante el que presenta la combinación LVcrhu+LVha+LPeuli/3 (luvisol crómico húmico + luvisol háplico + leptosol eútrico-hiper lítico); la mayor parte de los suelos presentan textura fina (

Cuadro 3).



**Figura 5. Tipo de suelo.**

**Cuadro 3. Tipos de suelo en la unidad base de estudio**

<b>CLAVE_WRB (*)</b>	<b>Hectáreas</b>	<b>Porcentaje</b>
CMSkca+LVhuccw/3r	179.99	0.95
LVcrhu+LVha+LPeuli/3	6850.83	36.17
LPeuli+LPhum/2	931.99	4.92
PHlvlep+LVcrhu/3	0.67	0.00
LPhurz+LVcrhu+CMcrhu/3	4034.38	21.30
RGhulep+LPeuh+FLeuhu/2	6123.88	32.33
LPeuh+RGeulep/3R	745.58	3.94
LPcarz+LPcali/3	3.49	0.02
Cuerpo de agua (presa)	69.78	0.37

Claves (\*):

CM = cambisol

PH = phaeozem

RG = Rregosol

LV = luvisol

LP = leptosol

sk = esquelético

eu = éutrico

ca = calcárico

hu = húmico

cr = crómico

ccw = cálcico hipo

ha = háplico

li = lítico

lep = léptico epi

euh = éutrico hiper

rz = réndzico

## **Clima**

En la parte central el clima que predomina es el semicálido-subhúmedo, que comprende la zona de transición entre los cálidos y templados, y abarca las localidades más frescas de los primeros y las más cálidas de los segundos. El tipo es (A)C1(w0)(w); es el más seco de los subhúmedos, con régimen en verano, temperatura media del más frío superior a los 18 °C, bajo porcentaje

de lluvias invernal menor del 5%, con verano cálido isotermal (parte de los municipios de Arroyo Seco, Jalpan de Serra, Pinal de Amoles y Landa de Matamoros).

Al suroeste seco y semiseco semicálidos (BS1hw y BS0hw), presenta lluvias en verano, pero es durante el invierno que alcanza su máximo registro, de 10.2%, y su mínimo para la misma fecha es menos de 5%. Al noroeste y oeste son templados subhúmedos con lluvias en verano C(w2) y C(w2) (w), con verano cálido, el más húmedo de los subhúmedos, con escasa precipitación invernal y extremo; comprende altitudes entre 2,000 y 2,500 msnm. Al oeste, El Cantón, San Gaspar, Pinal de Amoles, Puerto del Derramadero y al este Valle de Guadalupe, Pinalito de La Cruz, Tres Lagunas, Rancho Nuevo y La Esperanza del norte de Jalpan.

La precipitación media anual máxima es de 883.33 y la mínima de 313.31 mm, aunque en la región de Agua Zarca se alcanzan los 1,500 mm. La intensidad de lluvias promedio para Ahuacatlán y Jalpan de Serra es de 48.9 mm/24 hr y el número de días con lluvia apreciable es 61.3, mientras que los días nublados son 63.2 y 79.6 respectivamente; para Peña Miller el promedio de lluvia máxima es de 35 mm/24 hr y 53.5 días nublados. Los vientos dominantes llegan del norte, Ahuacatlán reporta del sureste, mientras que para Peña Miller son del Sureste y Norte en el mes de enero mientras que en julio sólo del Norte. Las temperaturas mínimas se dan en los meses de diciembre y enero, las máximas en abril y mayo, y el promedio anual varía de 13 °C, en las zonas altas de Pinal de Amoles, a 24 °C en las regiones más bajas como Jalpan.

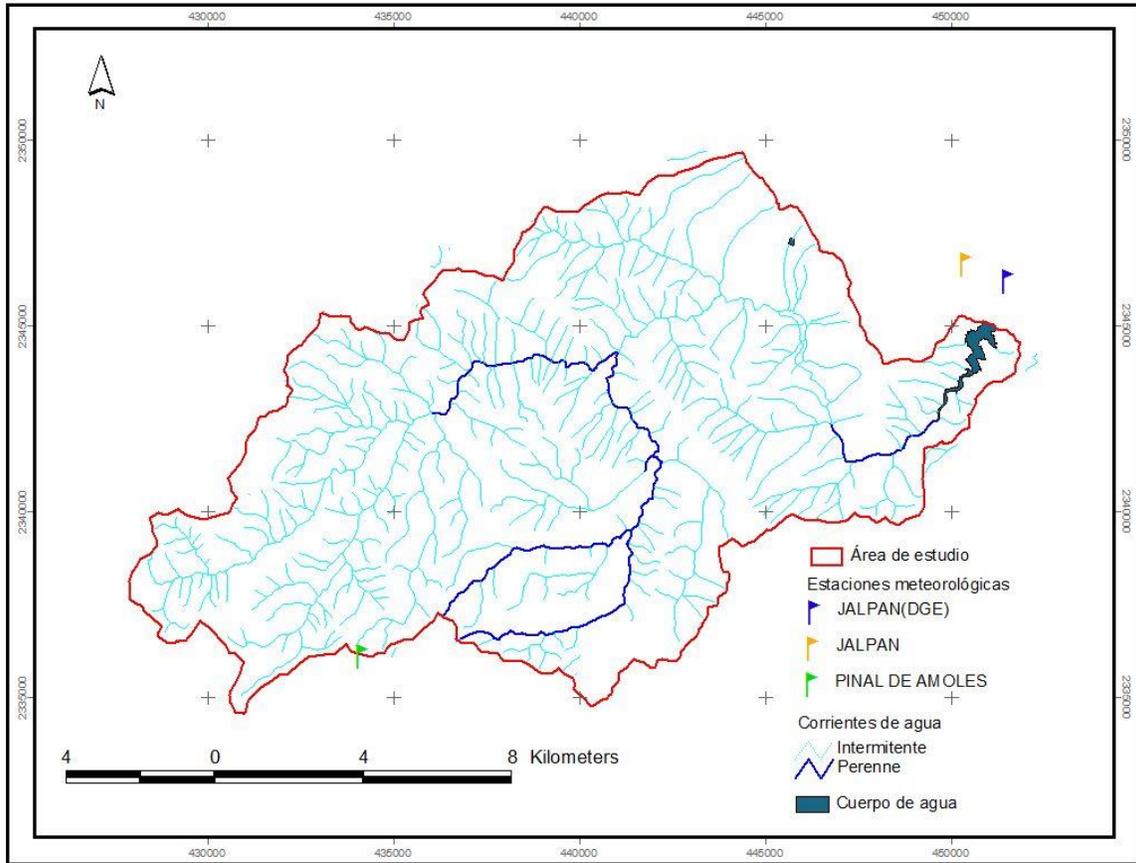
Para determinar si en la zona de estudio se encontraban estaciones meteorológicas que aportaran información sobre precipitación y temperatura, se empleó la base de datos del ERICIII, determinándose que al interior del área del área de estudio no se existían estaciones meteorológicas, por lo que se utilizó la información de estaciones cercanas a la unidad base de estudio, estas fueron:

Estación Jalpan y Estación Jalpan (DGE); cabe mencionar que otra estación cercana es la Pinal de Amoles (

Figura 6), sin embargo, esta última no presentó información, por lo que se emplearon los datos de las restantes para el análisis de datos. A partir de enero de este año (2013), se colocó una Estación Meteorológica Automatizada (EMA) en la presa Jalpan.

En caso de la Estación Jalpan (Clave 22008), la base de datos proporcionó información relativa al periodo comprendido entre los años 1942 y 2000. En la gráfica puede observarse que la mayor precipitación ocurrió en el mes de septiembre, lo que deriva en una caída de la temperatura, cuyos valores más altos se alcanzaron en el mes de mayo para este periodo de tiempo (Figura 7).

Los resultados obtenidos para la Estación Jalpan (DGE) para el periodo correspondiente a 1966-1984, son similares, es decir, la mayor precipitación promedio es la obtenida para el mes de septiembre, mientras que los valores de temperatura más altos fueron en mayo (Figura 8).



**Figura 6. Estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio.**

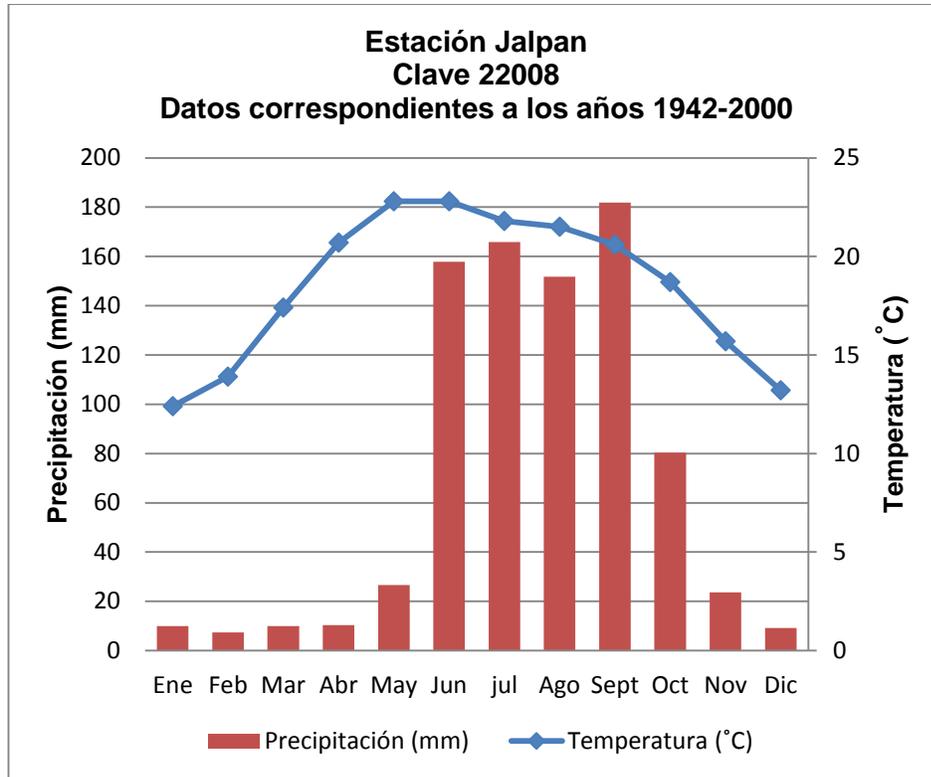


Figura 7. Precipitación y temperatura en la estación Jalpan.

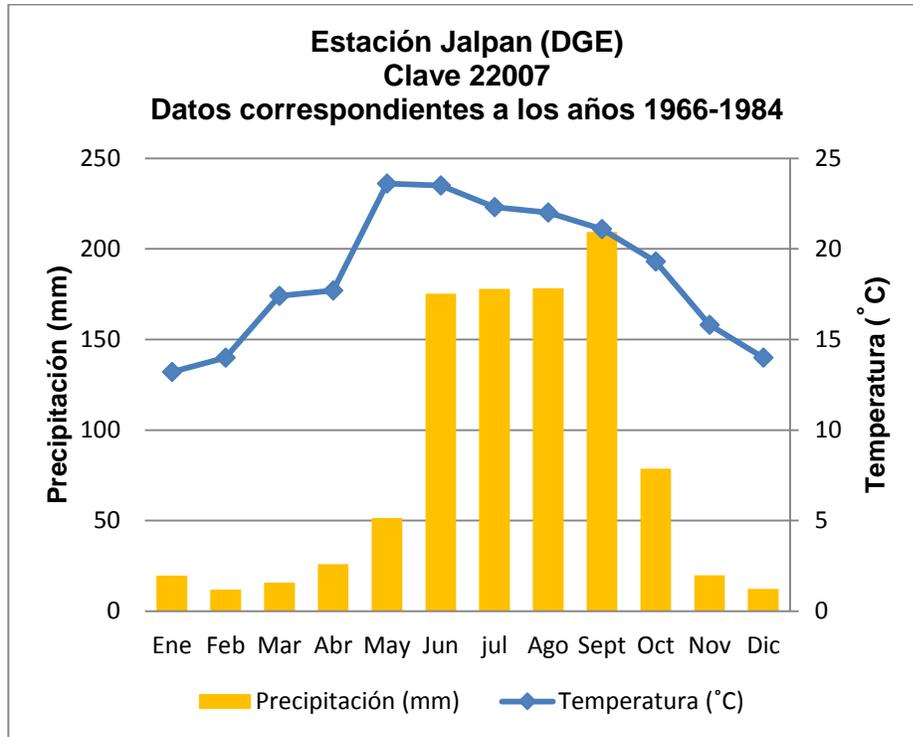


Figura 8. Precipitación y temperatura en la Estación Jalpan (DGE)

## Hidrología

La reserva de la biósfera pertenece a la Región Hidrológica del Río Pánuco (RH-26). El área se divide en dos cuencas: la del Río Tampaón o Tamuín, y la del Río Moctezuma. La primera ocupa una extensión de 2,038 km<sup>2</sup>, siendo sus principales afluentes los ríos Ayutla, Santa María y Jalpan. La segunda, abarca 1,532 km<sup>2</sup> de la Reserva, siendo su principal afluente el río Extóraz (Cuadro 4).

La Sierra Gorda de Querétaro cuenta con recursos hidrológicos de gran valor, distribuidos en tres subcuencas principales: Río Santa María, Río Extóraz y Río Moctezuma, afluentes del Río Pánuco; así como laderas medias y altas que constituyen áreas relevantes de captación y aprovisionamiento de agua que promueven los procesos ecológicos y el suministro del líquido para las comunidades locales.

**Cuadro 4. Región hidrológica del área de estudio**

Región hidrológica	Cuenca	Subcuenca
Pánuco (26) RH26	Río Moctezuma	Río Moctezuma Río Extóraz Río Aztla
	Río Tamuín	Río Tamuín o Tampaón Río Santa María La Tinaja (drenaje subterráneo). Río Verde

Fuente: (INE *et al.*,1997).

De los 66 ríos y arroyos registrados en el estado de Querétaro, 25 se localizan en la Reserva de la Biósfera y debido a la naturaleza cárstica de la región, se presentan bajos escurrimientos y corrientes superficiales.

## 2.3 Caracterización del medio biótico

### Flora

La Reserva presenta siete tipos de vegetación (la clasificación de la vegetación sigue la base fisonómica florística empleada por Rzedowski), siendo los principales los bosques y selvas en sus diferentes modalidades, seguidos del matorral xerófilo.

Los bosques y selvas presentan una gran diversidad de climas y ocupan una extensión de 268,250 ha. Aquí se consideran al bosque tropical subcaducifolio, bosque tropical caducifolio, el bosque mesófilo de montaña, el bosque de encino y los bosques de coníferas. En segundo lugar en extensión tenemos al matorral xerófilo con 61,500 ha, el cual es un conjunto de comunidades vegetales dominadas por plantas arbustivas que crecen en regiones áridas y semiáridas.

El resto del área es ocupada por la agricultura y los asentamientos humanos. Entre las especies cultivadas se encuentran varias de importancia alimenticia como *Zea mays* (maíz), *Phaseolus spp.* (frijol) y *Citrus spp.* (limón); especies de ornato y protección como *Eucalyptus spp.* (eucalipto), *Delonix regia* (framboyán), *Ligustrum lucidum* (trueno) y *Jacaranda mimosaeifolia* (jacaranda); y pastos introducidos como *Digitaria decumbens* (pangola) y *Panicum maximum* (guinea).

Los tipos de vegetación en la Reserva son:

*Bosque tropical subcaducifolio*: Esta comunidad ocupa extensiones muy reducidas que no han sido cuantificadas. Está presente en las profundas cañadas de los ríos Santa María, Moctezuma y sus afluentes en los municipios de Landa de Matamoros, Jalpan de Serra y Arroyo Seco. Las especies principales son *Adelia barbinervis* (espino blanco), *Brosimum alicastrum* (oxite), *Cedrela*

*odorata* (cedro rojo), *Cupania dentata*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Macfadyena unguiscati*, *Neurolaena lobata*, *Ceiba pentandra* (ceiba), *Ficus pertusa* (higuerón) y *Bursera simaruba* (chacá).

*Bosque tropical caducifolio*: Esta comunidad tiene una extensión de aproximadamente 145,250 ha, de las cuales 122,445.75 ha se encuentran más o menos conservadas y se localizan en los municipios de Jalpan de Serra, Pinal de Amoles, Landa de Matamoros y Arroyo Seco. El resto se encuentra combinado con matorral xerófilo y a veces con encinar (ladera y cañadas). Las altitudes en que se desarrolla son 300 a 1,400 msnm y las especies arbóreas dominantes son: *Bursera simaruba* (chacá), *Capparis incana* (palo cenizo), *Esenbeckia berlandieri* (jopoy), *Lysiloma microphylla* (palo de arco), *Phoebe tampicensis* (laurel) y *Psidium sartorianum* (guayabillo). También se encuentran *Acacia coulteri* (guajillo), *Guazuma ulmifolia* (aquiche) y *Bursera lancifolia* (chacá).

*Bosque de encinos (Quercus)*: Los encinares son comunidades que se desarrollan en altitudes entre los 800 y 3,100 msnm y participan con 61,500 ha. El municipio que reporta mayor porcentaje de este tipo de vegetación es Pinal de Amoles, pero también se desarrolla en los municipios de Landa de Matamoros, Jalpan de Serra, Arroyo Seco y Peñamiller, siendo las especies características: *Quercus mexicana* y *Q. castanea*, en cañadas y laderas, entre los 1,200 a 2,300 msnm; *Q. polymorpha* en altitudes inferiores; *Q. crassifolia* y *Q. greggii*, en altitudes de 2,200 a 3,100 msnm ; de afinidad hacia los climas húmedos y a menudo colindando con el bosque mesófilo de montaña se presenta el encinar de *Q. affinis*.

*Bosque de coníferas*: Comunidades vegetales perennifolias en las cuales los géneros predominantes son *Pinus sp.*, *Juniperus sp.*, *Cupressus sp.* y *Abies sp.* y ocupan una extensión de 22,250 ha.

*Bosque de pinos (Pinus)*: Este tipo de vegetación abarca una superficie de 19, 000 ha y tiene afinidad por los climas: frío, templado, semicálido húmedo y subhúmedo. Destacan varias especies de *Pinus sp.* y conviven con *Juniperus sp.* y *Abies sp.* En el área se encuentra *Pinus greggii* desde Valle Verde, municipio de Jalpan de Serra a El Madroño, municipio de Landa de Matamoros, hasta los 1,600 msnm, y *P. patula* (pino lacio), en el municipio de Pinal de Amoles, entre 2,400 y 2,850 msnm en áreas con régimen de frecuentes neblinas y acompañado de *P. montezumae*, *P. ayacahuite* y *P. teocote*. *Pinus rudis* en las zonas secas entre los 2,750 y 3,100 msnm; y en una pequeña porción *Pinus oocarpa* en La Florida, municipio de Arroyo Seco. Entre los municipios de Peñamiller y Pinal de Amoles se tiene un bosque de pino piñonero (*P. cembroides* y *P. pinceana*).

*Bosque de enebro (Juniperus)*: La superficie que abarca es de 2,750 ha, en la comunidad de Tres Lagunas, Landa de Matamoros; además, manifiesta una etapa de transición entre el matorral xerófilo y el bosque de encino – pino. Se desarrolla en altitudes de 1,500 y 2,500 msnm y las especies características son *Juniperus flaccida*, *J. deppeana* (nebrito) y *Arbustus xalapensis* (madroño). Cerca de La Florida, municipio de Arroyo Seco, se encuentra mezclada con pino y encino.

*Bosque de cedro blanco (Cupressus lindleyi)*: Ocupa 400 ha y el árbol dominante es *Cupressus lusitanica*, el cual está sujeto a protección especial y se desarrolla a altitudes de 1,600 a 2,600 msnm, en el municipio de Landa de Matamoros particularmente cerca de las comunidades de Llano Chiquito, Pinalito de La Cruz y La Florida.

*Bosque de oyamel (Abies)*: Este tipo de comunidad tiene a *Abies guatemalensis* y *A. religiosa* como especies dominantes, las cuales están en peligro de extinción y existen sólo en pequeños manchones, localizados en los municipios de Jalpan de Serra, Landa de Matamoros y Pinal de Amoles, entre los 2,200 y 3,100 msnm. Una especie importante que también se encuentra en estos

bosques (en las barrancas del cerro de La Pingüica, en el municipio de Pinal de Amoles) es *Pseudotsuga menziesii*.

*Bosques mixtos:* Es importante mencionar que bosques de encinos y pinos se encuentran mezclados, ocupando 38,250 ha. Estos se encuentran en los municipios de Jalpan de Serra, Landa de Matamoros, Pinal de Amoles y Arroyo Seco, y las especies más representativas son *Pinus greggii*, *P. patula*, *Quercus laurina* y *Q. obtusata*.

*Bosque mesófilo de montaña:* Se localiza en las regiones más húmedas, con precipitación media superior a 1,000 mm, en los municipios de Pinal de Amoles, Jalpan de Serra y Landa de Matamoros. Su extensión es de 10,000 ha. Las especies más importantes de esta comunidad son: *Liquidambar styraciflua*, (somerio o quirámbaro), *Dalbergia paloescrito* (palo escrito), *Ulmus mexicana* (petatillo), *Taxus globosa* (granadillo), *Tilia mexicana*, *Nephelea mexicana*, *Clethra pringlei*, *Quercus affinis* (encino escobillo), *Quercus germana* (encino bellotón), *Magnolia dealbata* y *Magnolia schiedeana* (especies que están amenazadas).

*Matorral xerófilo:* Conjunto de comunidades vegetales dominadas por plantas arbustivas que crecen en regiones áridas y semiáridas. De acuerdo con su composición florística y la forma biológica de las especies dominantes, en la Reserva se encuentran los siguientes subtipos: matorral crasicaule, matorral submontano, matorral micrófilo y matorral rosetófilo.

*Encinar arbustivo:* Este tipo de vegetación tiene poca participación, ya que se desarrolla en climas extremos (secos y fríos) en las cimas del cerro de La Pingüica, municipio de Pinal de Amoles, y Cerro Grande, municipio de Jalpan de Serra. Está formado por especies de K (encinos), *Arctostaphylos pungens* y *Litsea sp.* (laurel).

Vegetación de galería: Presente en las orillas de los ríos Extóraz, Moctezuma, Jalpan y Santa María. Con presencia de especies como *Platanus mexicana* (álamo), *Taxodium mucronatum* (sabino), *Salix sp.* (sauces) y *Carya illinoensis* (nogal).

## **Fauna**

La fauna se distribuye atendiendo a los tipos de hábitats, ya que la interrelación que ésta tiene con la flora es muy estrecha debido a condiciones físicas. Un alto porcentaje de la misma es representativa de la región Neártica. Sin embargo, debido a las migraciones de la mayoría de los animales, se los puede encontrar en la región de climas semicálidos o cálidos, tal es el caso de las aves.

Algunas de las especies encontradas en el área son *Ursus americanus*, *Panthera onca*, *Ateles geoffroyi*, *Lutra longicaudis*, *Lynx rufus*, *Crax rubra*, *Penelope purpurascens*, *Falco peregrinus*, *Cathartes aura*, *Parabuteo uncinctus* y *Buteogallus anthracinus*.

Las características físicas y bióticas hacen de la Sierra Gorda un corredor biológico con una gran cantidad de especies. Las zonas que destacan son: al oriente de la Reserva, los ríos Moctezuma y Tancuilín, en donde existe una gran cantidad de especies de mariposas y su mejor representación vegetal es la selva mediana y el bosque mesófilo de montaña entre los 800 y 2,000 msnm, además tiene animales como *Cuniculus paca* (tuza real), *Eira barbara* (viejo del monte), *Potos flavus* (martucha) y *Aulacorhynchus prasinus* (tucancillo verde); la zona núcleo "Joya del Hielo", con bosque mesófilo y especies de fauna en peligro extinción como *Penelope purpurascens* (pava cojolita) y *Dendrortyx barbatus* (chivizcoyo); la zonas núcleo de los cañones de los ríos Ayutla y Santa María, así como del Extóraz, comparten similitud de ecosistemas, tales como selva mediana y baja caducifolia, así como de fauna silvestre que presenta movimientos migratorios de norte a sur dentro de la Reserva, como es el caso de *Ara militaris* (guacamaya verde). Por lo que respecta a la fauna acuática se identificaron nutrias

y langostinos de río; la zona núcleo “Cañada de las Avispas” tiene como hábitat especial el bosque mesófilo de montaña y especies de fauna como *Dendrotyx barbatus* (chivizcoyo), *Mazama americana* (temazate), *Puma concolor* (puma) y *Ursus americanus* (oso negro).

Otra zona importante en biodiversidad es la Barranca del Infiernillo al oeste de la Reserva por donde pasa el Arroyo Hondo, al que forman los arroyos del Bosque, Co pal y Cedral. Su vegetación es bosque mixto y, al igual que El Chuveje, son elegidos por *Ara militaris* (guacamaya verde) en busca de sitios de descanso y alimentación.

La vegetación fondo de la Zona Núcleo “Sótano del Barro”, sitio donde viven las guacamayas verdes en el cual existe un pequeño bosque en su interior, con árboles de gran altura y una densa vegetación , además de la vegetación que se desarrolla en las paredes del sótano y en la zona de oscuridad. En estas últimas crecen generalmente los musgos, hongos, líquenes y raras veces helechos .Además, año con año, a través de la Reserva se puede presenciar el fenómeno migratorio de la mariposa monarca durante la temporada de invierno.

En la Reserva hay varia especies reportadas que tienen algún estatus de protección de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo.

## **Caracterización socioeconómica**

### ***Población***

De acuerdo a los datos poblacionales de la cartas topográficas de INEGI, con escala 1:50 000, al interior de la unidad base de estudio estudio, se encuentran 53 localidades en las cuales habitan un total de 11,707 personas, Las

localidades con un mayor número de habitantes son Pinal de Amoles y Ahuacatlán de Guadalupe (Figura 9).

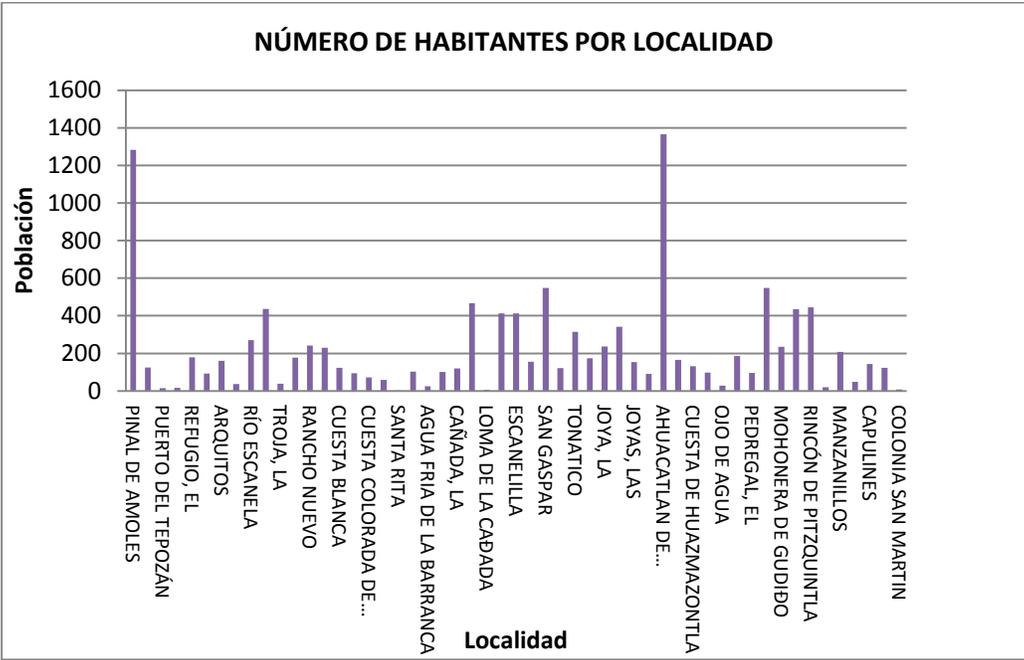


Figura 9. Número de habitantes por localidad.

Los Municipios de la Sierra Gorda están clasificados entre los más marginados del Estado, presentando un índice de marginación alto los de Jalpan de Serra, Pinal de Amoles, Arroyo Seco y Peñamiller. Consecuencia de esto, existen altas tasas de migración principalmente entre la población masculina en busca de empleo, sobre todo a partir de la edad de 15 años. De alguna manera, los ingresos generados por este fenómeno y que son inyectados en la región, han permitido la supervivencia de las familias de los trabajadores, pero esto ha derivado en fuertes problemas sociales y culturales (Abad, 2006).

### **Tenencia de la tierra**

Las reformas al artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos así como la Ley Agraria, permiten reconocer tres formas de propiedad de tierras y aguas: pública, privada y social. Esta última corresponde a los núcleos agrarios, es decir, ejidos y comunidades agrarias. El ejido se define como las tierras, bosques y aguas que son entregadas por el gobierno a un núcleo de población campesina para su explotación (INEGI, 2006).

El destino de la tierra que constituye los polígonos agrarios, puede ser de tres tipos: asentamiento humano, uso común y tierras parceladas.

Como se ha mencionado en el Capítulo I, la unidad base de estudio se encuentra, en distintas proporciones, en tres municipios: Pinal de Amoles, Jalpan de Serra y Peñamiller. Dado que la mayor parte de la superficie de dicha zona de estudio se encuentra en Pinal de Amoles y Jalpan de Serra, se presentan dos tablas en las que se muestran cifras correspondientes al destino de la tierra (Cuadro 5) y al uso que se le da a esta (Cuadro 6).

**Cuadro 5. Destino de la tierra**

<b>Municipio</b>	<b>Núcleos agrarios</b>	<b>Total (Ha)</b>	<b>Uso común (Ha)</b>	<b>Parcelada</b>	<b>Asentamiento humano (Ha)</b>
Pinal de Amoles	18	24,080.028	18,584.306	5,097.406	398.316
Jalpan de Serra	6	11,866.951	8,431.697	3,341.748	93.507

Fuente: INEGI, 2006).

**Cuadro 6. Uso de la tierra**

Municipio	Parcelada (Ha)	Uso de la tierra				
		Agrícola (%)	Ganadero (%)	Agropecuario (%)	Forestal (%)	Otros Usos (%)
Pinal de Amoles	5,097.406	93.8	2.4	3.2	0.2	0.4
Jalpan de Serra	3,341.748	78	1.2	20.6	0.1	0.1

### ***Actividades económicas***

La población económicamente activa (PEA) de la Reserva se comporta de la siguiente manera: 30.96% no recibe ingresos, el 48.01% están en el rango entre 0 y 2 salarios mínimos, el 14.3% recibe 2 o más, y el 6.73% no está especificado.

El sector que predomina en la Reserva es el primario, con una participación de 60.5% de la PEA, el secundario participa con 17.02% y el terciario con 16.58%, hay un 5.9% no especificado.

En el municipio de Jalpan de Serra, el sector primario cuenta con la mitad de la población económicamente activa (52,545); sin embargo, el sector terciario cobra una importancia especial (28.8%), debido a la situación estratégica de la ciudad de Jalpan de Serra, que la convierte en el principal centro de servicios de la región. Por último, está el sector secundario (14.06%). En Landa de Matamoros, el sector primario alcanza el porcentaje de la PEA más alto de La Sierra con 73.77%, y tienen poca importancia el secundario, con 9.79%, y el terciario con 11.48%.

En Arroyo Seco también hay una presencia alta del sector primario (63.85%). Ahí la agricultura es la más importante de las actividades del municipio y, junto con Jalpan de Serra, son los principales municipios agrícolas de la Reserva. El sector secundario (15.83%) y terciario (18.22%) tienen poca importancia.

Para el municipio de Pinal de Amoles se vuelve a presentar un alto porcentaje del sector primario (65.77%), mientras que el sector secundario (12.42%) y el terciario (10.88%), son también escasos. Finalmente, el municipio de Peñamiller tiene el porcentaje más bajo del sector primario con 42.58%, siendo casi igual en importancia que el sector secundario con 39%, en parte por la presencia de la minería y la artesanía. El sector terciario aporta sólo un 15.51%.

Correlacionando la actividad con los ingresos se vislumbra que la población serrana, en un alto porcentaje, se dedica a las actividades primarias (principalmente agricultura, ganadería y silvicultura), pero sobre todo para autoconsumo. A continuación se menciona la situación que guardan las principales actividades productivas de la región.

**Agricultura:** La agricultura en la región es de temporal y riego, con clara predominancia de la primera. Ésta se distribuye en valles de Jalpan, Landa y Arroyo Seco, en las riberas del río Extóraz en Peñamiller, y en laderas de Pinal de Amoles. Está enfocada a producir principalmente maíz y frijol, y a menor escala alverjón y garbanzo. Es practicada por la mayor parte de la población con fines de autoconsumo y, en ocasiones, para venta de los excedentes del producto.

La agricultura de riego se ubica principalmente en los valles de Jalpan, río Extóraz y Concá, municipio de Arroyo Seco, en donde se produce principalmente maíz, frijol, jitomate, tomate de cáscara y chile poblano. En las márgenes del río Extóraz, en Peñamiller (algunas hectáreas fuera de la reserva),

se produce maíz y frijol. La fruticultura es mayoritariamente de riego y aporta una producción importante de cítricos (naranja y en menor medida limón y mandarina), mango y guayaba. La producción se localiza principalmente en el municipio de Arroyo Seco y en segundo término en el de Jalpan de Serra. Los demás municipios tienen una producción frutícola poco considerable que incluye el cultivo de naranja, manzana, durazno y pera en Pinal de Amoles, café en Landa de Matamoros y nuez en Peñamiller.

**Ganadería:** La principal actividad ganadera en la Reserva, considerada la actividad pecuaria más importante para los pobladores de la región, es la cría de ganado vacuno, aunque existe también la presencia de otros tipos de ganado. Se orienta, sobre todo, a la producción de pies de cría, bajo sistemas extensivos de libre pastoreo, carentes de tecnología moderna, que utilizan pastos nativos y, en pequeñas áreas, zacates inducidos tales como estrella de África y Guinea.

**Aprovechamiento forestal:** En la reserva existen extensiones de bosques de encino y pino que son sometidas a aprovechamientos forestales. Se aprovecha madera del *Cupressus lindleyi* (cedro blanco), *Pinus patula*, *P. montezumae* y *P. teocote* (pino), y también la madera plagada del *Pinus greggii*.

### ***Uso del suelo***

La aptitud de los suelos está dada por la vocación de los mismos, y está influenciada por factores como la topografía, el clima y la hidrología, entre otros. En la Reserva los usos actuales del suelo son el forestal, el agrícola, el pecuario, el habitacional y, ahora como resultado de la creación de la Reserva, la conservación.

De acuerdo a información proporcionada por el Centro Queretano de Recurso Naturales, y en la cual fueron retrabajados algunos polígonos para este trabajo mediante la interpretación de una imagen SPOT 5 del año 2010 (Figura

10), en la unidad base de estudio, se presentan trece tipos de uso de suelo y vegetación, siendo el que mayor superficie el de agricultura de temporal (con el 34.57%), el bosque de pino también presentó elevado porcentaje de cobertura (28.88%) mientras que la agricultura de riego, el chaparral y las zonas urbanas contribuyen con el menor porcentaje (Cuadro 7).

**Cuadro 7. Uso de suelo y vegetación del área de estudio.**

<b>Uso de suelo y vegetación</b>	<b>Hectáreas</b>	<b>Porcentaje</b>
Agricultura de riego	25.51	0.13
Agricultura de temporal	6,548.01	34.57
Bosque de encino	1,325.74	7.00
Bosque de encino perturbado	883.82	4.67
Bosque de pino	5,469.24	28.88
Bosque de pino perturbado	2,104.91	11.11
Bosque mesófilo de montaña perturbado	365.11	1.93
Bosque tropical caducifolio	1,850.45	9.77
Bosque tropical caducifolio perturbado	25.50	0.13
Chaparral	20.48	0.11
Cuerpo de agua	67.97	0.36
Pastizal inducido	171.04	0.90
Zona urbana	82.81	0.44
<b>Total</b>	<b>18,940.59</b>	<b>100.00</b>

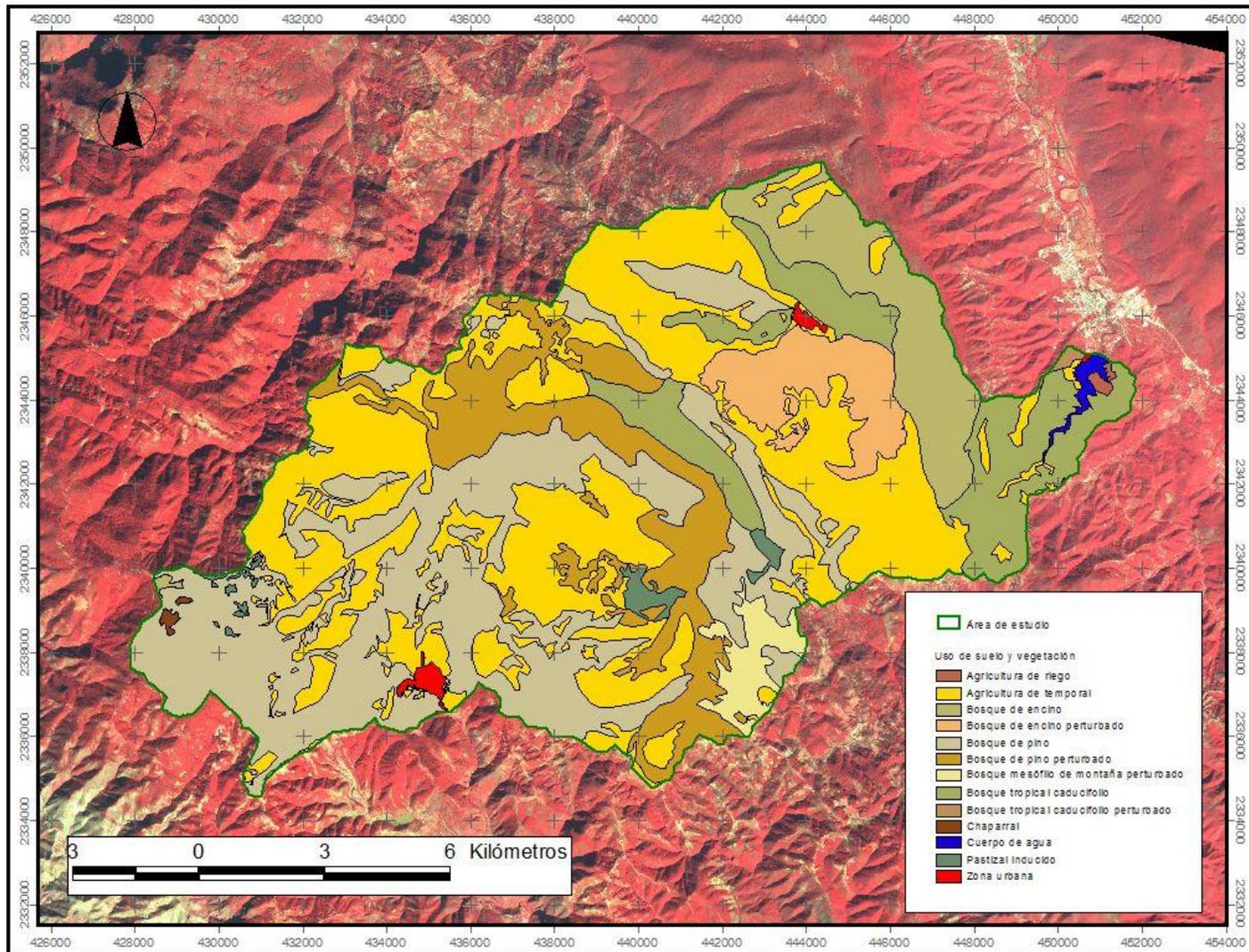


Figura 10. Mapa de uso de suelo y vegetación.

Cabe destacar el hecho de la recuperación o estabilización en relación a las coberturas vegetales, que ha presentado la Reserva de la Biósfera Sierra Gorda. Conforme al Reporte Técnico XII del Centro Queretano de Recursos Naturales “Vegetación, Uso del Suelo y Unidades de Paisaje en la Sierra Gorda Queretanos” (Centro Queretano de Recursos Naturales. 2006<sup>a</sup>) y a la carta de cambio de vegetación del periodo 1973-2004 proporcionada por dicho centro, durante el periodo antes señalado, las áreas con vegetación han superado los desmontes (Cuadro 8), esto puede deberse a ciertos factores, entre ellos el abandono de tierras debido al fenómeno de migración que se presenta en la región, así como a programas de reforestación y normativas establecidas en el Programa de Manejo de la Reserva de la Biósfera Sierra Gorda de Querétaro y el creciente activismo ecológico en la zona.

**Cuadro 8. Procesos de cambio en el área de estudio.**

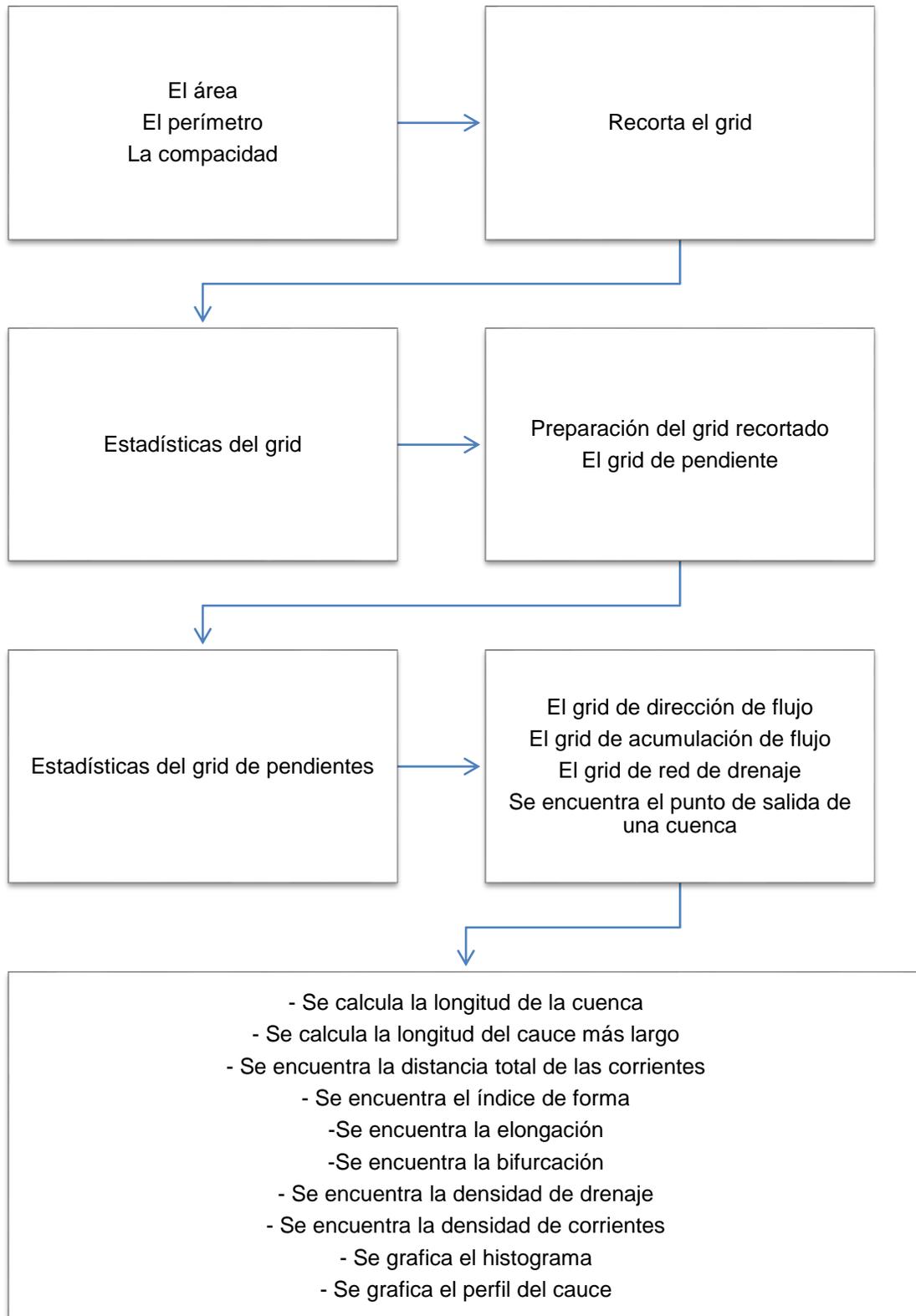
<b>Proceso</b>	<b>Hectáreas</b>	<b>Porcentaje</b>
Desmontado sin cambios	2,962.62	15.59
Desmonte	81.46	0.43
Desmonte coníferas	1,923.82	10.11
Desmonte latifoladas	267.14	1.41
Desmonte tropicales	71.32	0.37
Recuperación	71.84	0.36
Recuperación coníferas	2,451.50	12.90
Recuperación latifoliadas	71.15	0.37
Recuperación tropicales	311.51	1.63
Sin cambio	10,728.23	56.83

## **CAPÍTULO 3. ESQUEMA METODOLÓGICO GENERAL**

### **3.1 Rectificación de la unidad base de estudio**

Como fase inicial de este proyecto se llevó a cabo la rectificación de la unidad base de estudio, para lo cual se analizó información perteneciente a la Maestría en Gestión Integrada de Cuencas (UAQ) sobre la cartografía ya existente de las microcuencas cercanas a la presa Jalpan, posteriormente se revisó la información correspondiente a corrientes y vías de conducción del agua de las cartas F14C47 y F14C48 de la carta topográfica escala 1:50000 versión 4 del conjunto de datos vectoriales de INEGI y se generó un modelo digital de elevación a partir de las curvas de nivel a 20 metros de equidistancia obtenidas de la fuente anteriormente señalada.

En esta primera fase se pudo determinar que tres de las microcuencas cercanas a la presa Jalpan (Microcuenca Ahuacatlán de Guadalupe, Microcuenca El Ranchito y Microcuenca Pinal de Amoles) funcionaban a manera de un solo sistema conductor de los flujos superficiales de agua hasta el embalse (Microcuenca Ahuacatlán de Guadalupe), esto es, que el agua superficial que llega a la presa proviene de las partes altas de las microcuencas adyacentes y de la microcuenca en la cual se encuentra la presa, el hecho de que las tres microcuencas son parte de un mismo sistema fue corroborado mediante el empleo del software ArcView 3.2 específicamente utilizando la extensión DetermHidro la cual es una herramienta computacional que calcula algunos de los parámetros que caracterizan hidrológicamente a una microcuenca (Valtierra, 2007). El proceso del funcionamiento de la extensión DetermHidro se muestra en la Figura 11, mientras que los mapas y datos generados para la unidad base de estudio se muestran en la sección correspondiente a resultados.



**Figura 11. Funcionamiento extensión DetermHidro**

Fuente: Valtierra, 2007.

### 3.2 Corrección de algunos polígonos de la cartografía base de uso de suelo y vegetación para la unidad base de estudio

La segunda etapa metodológica se desarrolló en varias fases (Figura 12) las cuales se describen a continuación:

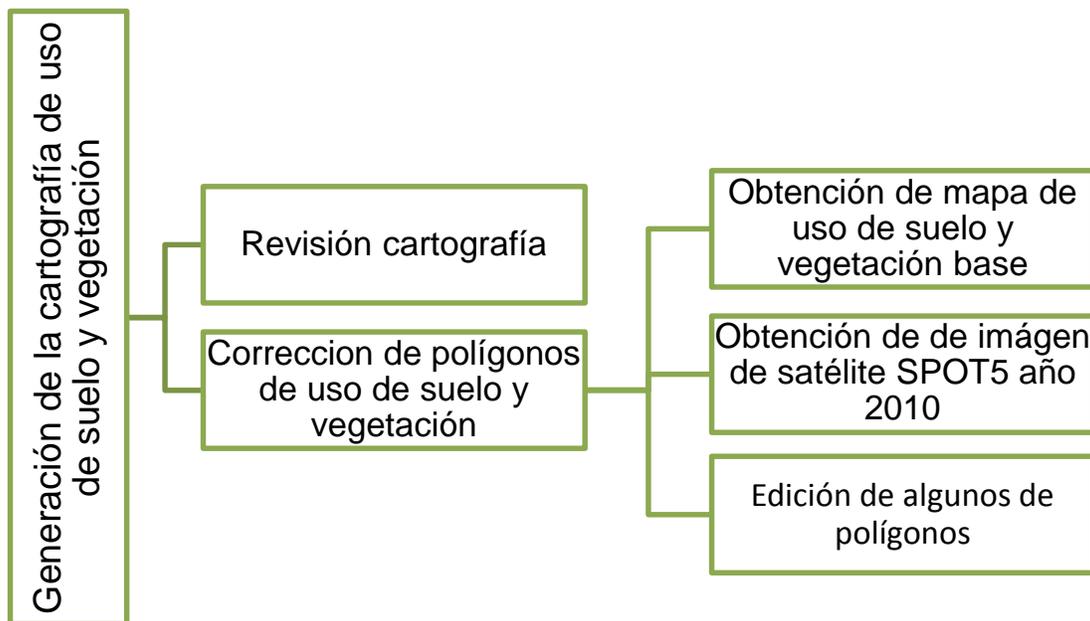


Figura 12. Esquema metodológico para la generación del mapa de uso de suelo y vegetación actualizado.

#### Revisión de cartografía.

Durante esta fase se encontraron tres fuentes principales de información cartográfica: INEGI, cartografía elaborada por la Maestría en Gestión Integrada de Cuencas (UAQ) y Centro Queretano de Recursos Naturales.

*INEGI:* Información cartográfica temática escala 1:250,000 como edafología, geología, uso de suelo y vegetación y conjunto de datos topográficos escala 1:50,000.

*Maestría en Gestión Integrada de Cuencas:* Información cartográfica sobre delimitación de Microcuencas en el Estado de Querétaro, límites Municipales, Estatales, entre otras.

*Centro Queretano de Recursos Naturales:* “Carta de Uso del Suelo y Vegetación” escala 1:50,000 del estado de Querétaro, imagen SPOT 5 año 2010, carta denominada “cambio732004” en la cual se establecen las zonas de cambio de uso de suelo y vegetación de Querétaro, entre otras.

### **Edición de polígonos del mapa base de uso de suelo y vegetación**

Una vez revisada la cartografía existente, se tomó la decisión de emplear como mapa base, la generada por el Centro Queretano de Recursos Naturales; sobre este vector se modificarían algunos de los polígonos. Para lo anterior, se empleó también una imagen SPOT 5 visualizada en las bandas 3,2,1. La imagen corresponde a la fecha 19 de enero del año 2010.

Ya seleccionados nuestros insumos y mediante el empleo del software ArcView 3.2, se cargaron tanto la capa correspondiente al uso de suelo y vegetación como la imagen SPOT, ambas fuentes de información se encontraban en el mismo sistema de referencia, por lo que únicamente se superpusieron. Posteriormente se relacionaron de forma visual los polígonos de uso de suelo y vegetación, con el color que presentaba dicha superficie en la imagen SPOT5 y se fueron redefiniendo algunos de los polígonos, generándose un nuevo vector de trabajo.

## **3.3 Estimación del proceso lluvia ecurrimiento**

### **3.3.1 Tratamiento de datos de lluvia**

Una vez identificadas las estaciones cercanas al área de estudio que tuvieran datos de precipitación (conforme a la base de datos ERICIII), se determinó que la estación Jalpan, Jalpan era la que tenía una menor cantidad de valores ND (no determinados) por lo que se tomó la decisión de emplear dichos datos para obtener distintas láminas de precipitación proyectadas a diferentes periodos de retorno.

Ya con los datos de la estación Jalpan, Jalpan, datos de precipitación de la estación antes señalada, se procedió a identificar el valor más alto de lámina de precipitación (HP) correspondiente a cada año. Posteriormente, los datos obtenidos fueron ordenados de mayor a menor y se aplicó la ecuación de Bell para generar distintas intensidades de lluvia a variados periodos de retorno (2, 2.33, 5, 10, 20 y 50 años).

### **3.3.2 Estimación de gasto (Q) mediante el uso del programa LAANRUN (LAGun ANalysis RUNoff)**

#### ***Características del programa (Laguna Ocampo y Gutiérrez López, 2004)***

LAANRUN (LAGun ANalysis RUNoff) es un programa de cómputo que incluye más de 40 modelos de escurrimiento que han sido desarrollados en varios países del mundo; y contempla una serie de artículos en el cual se presentan las características y expresiones matemáticas de cada uno de ellos. Los modelos se agruparon dependiendo de la cantidad y tipo de variables utilizadas para estimar caudales de diseño (características climatológicas, hidrométricas y fisiográficas de la zona en estudio). Los modelos se clasificaron de la siguiente forma: modelos basados en envolventes (utilizan comúnmente el área de la cuenca); modelos basados en la fórmula racional, modelos que definen la forma y tipo del hidrograma, modelos empíricos (desarrollados para cuencas específicas; pero sin embargo aplicables a otro lugar con características similares) y modelos para obtener el caudal medio ( $T_r=2.33$  años).

Para cada uno de los métodos que considera LAANRUN se analizó si se contaba con los datos que se solicitan para el cálculo de las ecuaciones en cada caso. Se descartaron aquellos modelos aplicables a obras urbanas, aeropuertos, etc. Posteriormente, se generó una tabla con los resultados obtenidos para cada uno de los métodos empleados.

### 3.4 Estimación de la producción de sedimentos

#### 3.4.1 Medición directa

##### *Selección de sitios de muestreo*

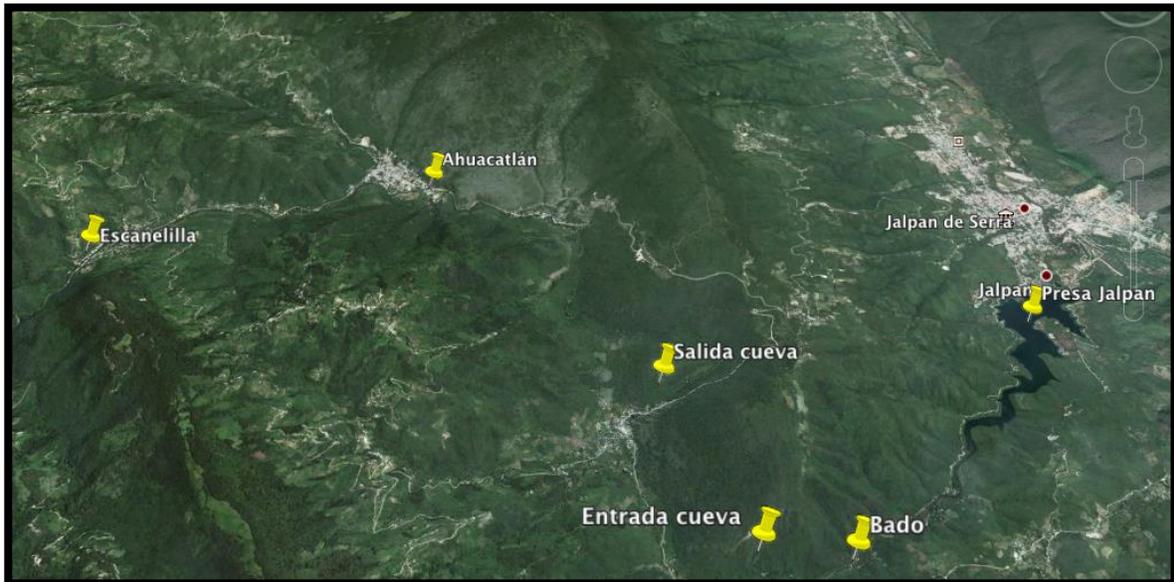
En el mes de marzo del presente año, se realizó un recorrido por la zona de estudio con la finalidad de identificar los sitios de muestreo para el análisis de sólidos sedimentables totales y velocidades de cauce. Durante el recorrido se tomaron fotografías y se habló con personas de la localidad para identificar algunos de los puntos por donde pasa el cauce principal. Así pues, se lograron definir 5 puntos estratégicos para la toma de datos, estos fueron: Puente Escanelilla (Figura 13), Puente en Ahuacatlán de Guadalupe (Figura 14), entrada de cueva en Laguna de Pitzquintla, salida de cueva y punto inicial de presa Jalpan (al cual denominamos vado) (Figura 15).



Figura 13. Puente Escanelilla



**Figura 14. Puente Ahuacatlán de Guadalupe**



**Figura 15. Sitios de muestreo**

## **Muestreo**

A finales del mes de julio y principios del mes de agosto, se realizó una campaña de medición de sólidos sedimentables y velocidades de cauce en los sitios de muestreo seleccionados.

Para la medición de sólidos sedimentables totales se utilizó como referencia la NMX-AA-004-SCFI-2000. De acuerdo a esta normativa, las muestras debían ser homogéneas y con un volumen representativo superior a un litro en un frasco de polietileno o vidrio con tapa de boca ancha.

El procedimiento para calcular la cantidad de sólidos sedimentables en cada muestra se describe a continuación:

- Se mezcla la muestra original a fin de asegurar una distribución homogénea de sólidos suspendidos a través de todo el cuerpo del líquido.
- Se coloca la muestra en un cono Imhoff hasta la marca de 1 litro y se deja sedimentar 45 min, una vez transcurrido este tiempo se debe agitar suavemente los lados del cono con un agitador y se mantiene en reposo 15 min más y se registra el volumen de sólidos sedimentables del cono como mL/L.

Para la medición de velocidades se empleó un flujómetro. Las velocidades obtenidas en los diferentes puntos de muestreo se utilizaron para determinar el máximo diámetro de las partículas de suelo que el flujo del río puede transportar a dicha velocidad.

Para lograr esto se utilizó el diagrama de Hjulström, el cual está dividido en tres partes: erosión, transporte y sedimentación. Los diámetros reportados son los que se encuentran en la línea divisoria de la sedimentación y transporte como arrastre de fondo del diagrama de Hjulström (Figura 16).

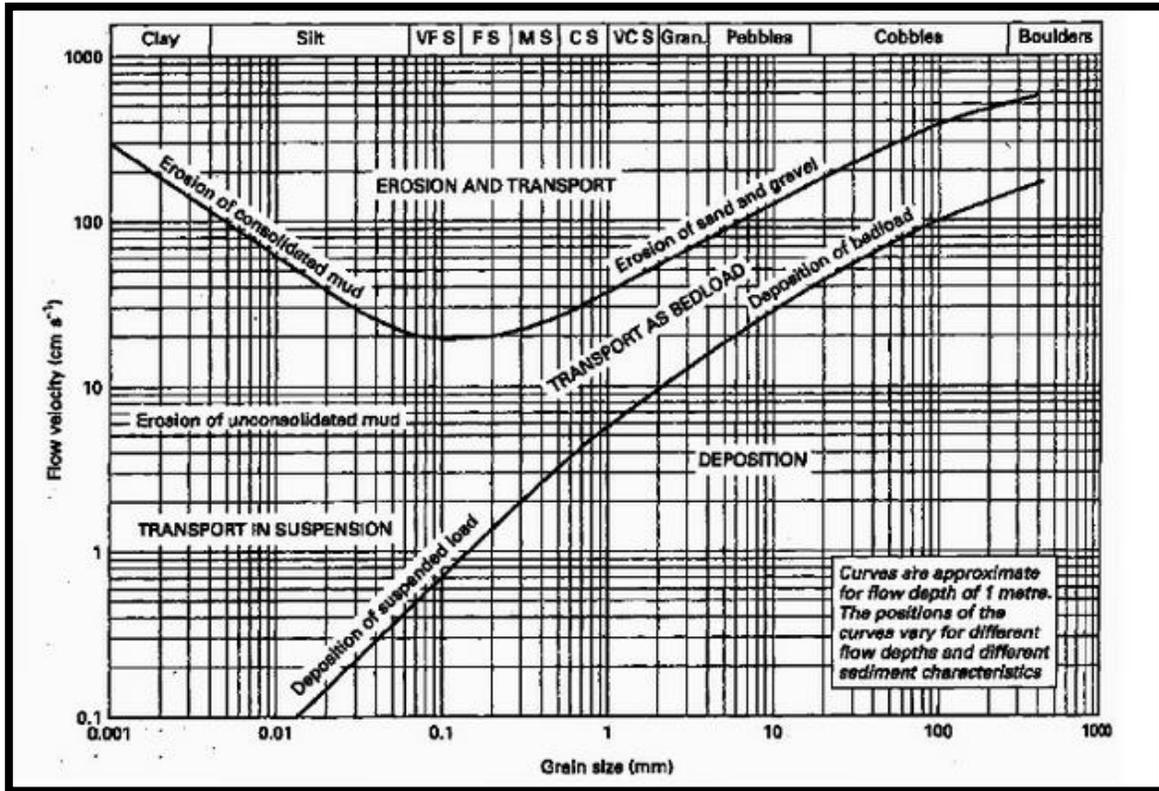


Figura 16. Diagrama de Hjulström

Posteriormente los diámetros obtenidos se analizaron con el diagrama de Shields (Figura 17), con el fin de saber si las partículas de sedimento se encuentran en movimiento o no. Para esto se utilizaron las fórmulas del número de Reynolds granular ( $R'_c$ ) y el esfuerzo cortante de la partícula ( $\tau'_c$ ).

$$R'_c = \frac{U'D}{\nu}$$

$$\tau'_c = \frac{0.097}{R'_c} + 0.077 \exp \left[ -\frac{19.58^{0.3191}}{R'_c} \right]$$

\*Para valores de  $R'_c$  mayores a 1500,  $\tau'_c$  es igual a 0.06

donde:

$R'_c$ : Número de Reynolds granular

$U'$ : Velocidad

$D$ : Diámetro de la partícula

$\nu$ : Viscosidad cinemática del agua a temperatura ambiente

$\tau'_c$ : Esfuerzo cortante crítico

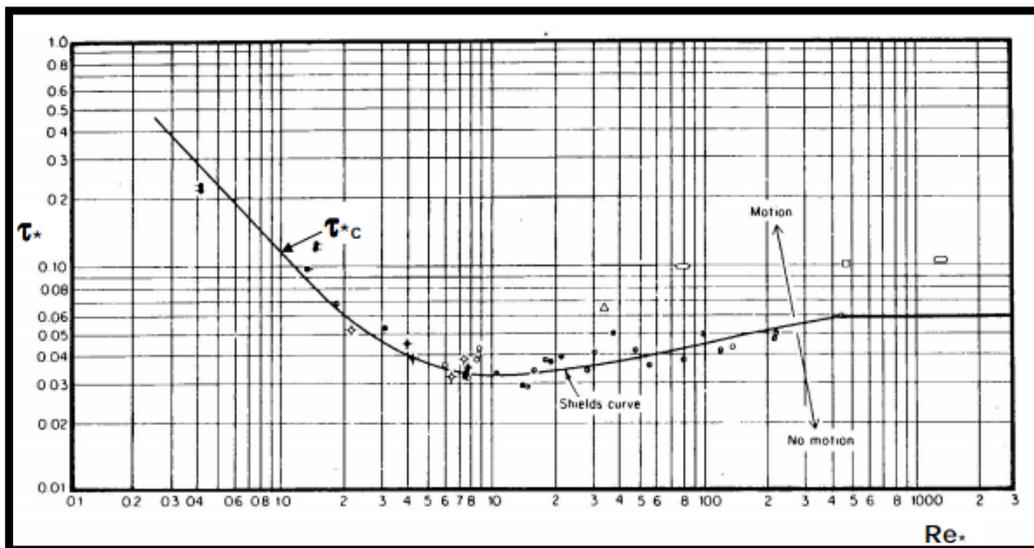


Figura 17. Diagrama de Shields.

La velocidad es indispensable para conocer el gasto que pasa por la sección del río, conociendo la velocidad y el área de la sección transversal se puede calcular el gasto utilizando la ecuación de continuidad.

$$Q = A * V$$

donde:

$Q$ = Gasto

$A$ = área de la sección transversal

$V$ = velocidad del agua en la sección transversal

## Cueva

Sólidos sedimentables totales: Se tomaron muestras del agua para conocer la cantidad de sedimento que contenía, se llenaron botellas de 1 litro aproximadamente y se marcaron con etiquetas para ser identificadas después.

Velocidad del cauce: Se midió la velocidad media y máxima del agua del cauce y el ancho de la sección la cual fue de 71 cm así como el tirante de (42 cm).

<b>A 20% de la profundidad del tirante</b>	<b>Velocidad</b>
Velocidad Media	0.15 m/s
Velocidad Máxima	0.20 m/s

<b>A 60% de la profundidad del tirante</b>	<b>Velocidad</b>
Velocidad Media	0.14 m/s
Velocidad Máxima	0.20 m/s

## Escanelilla

Sólidos sedimentables totales: Se tomaron muestras del agua para conocer la cantidad de sedimento que contenía, se llenaron botellas de 1 litro aproximadamente y se marcaron con etiquetas para ser identificadas después.

Velocidad del cauce: En el Puente Escanelilla, se midió el ancho de la superficie libre del río, así como las diferentes secciones que pudieran presentarse en caso de que el nivel de aguas subiera, también se midió la altura del puente y la velocidad del agua en el cauce. La Figura 18 muestra el lugar donde se tomaron los registros de velocidad, así como las dimensiones de la sección.



**Figura 18. Fotografía de perfil de Puente Escanelilla**

Las alturas del tirante se tomaron utilizando un tubo de pvc hueco marcado cada centímetro. Las siguientes tablas contienen los registros de velocidad tomados en la sección a distintas profundidades dependiendo del tirante y a distintas distancias tomadas a partir de la columna del puente:

A 2.25 metros de la columna (1/4 del ancho de la sección) con un tirante de 26 centímetros.

A 20% de la profundidad del tirante	Velocidad
Velocidad Media	0.45 m/s

A 60% de la profundidad del tirante	Velocidad
Velocidad Media	0.49 m/s
Velocidad Máxima	0.60 m/s
Velocidad Máxima	0.50 m/s

A 4.5 metros de la columna (a la mitad de la sección) con un tirante de 53 centímetros.

A 20% de la profundidad del tirante	Velocidad
Velocidad Media	0.07 m/s
Velocidad Máxima	0.10 m/s

A 60% de la profundidad del tirante	Velocidad
Velocidad Media	0.10 m/s
Velocidad Máxima	0.20 m/s

A 6.75 metros de la columna (1/4 del ancho de la sección) con un tirante de 46 centímetros.

A 20% de la profundidad del tirante	Velocidad
Velocidad Media	0.09 m/s
Velocidad Máxima	0.10 m/s

A 60% de la profundidad del tirante	Velocidad
Velocidad Media	0 m/s
Velocidad Máxima	0 m/s

Una vez hecho lo anterior, se pusieron marcas con pintura de aerosol en un monolito de concreto situado sobre el cauce. Dichas marcas fueron a cada 10 centímetros hasta los 2 metros y haciendo énfasis con otra marca a cada 50 centímetros. Dichas marcas se hicieron de modo que fueran visibles desde arriba del puente o la calle que está a un costado de este.

De igual forma se tomaron las coordenadas con ayuda del GPS en la parte central del puente así como en los extremos, para conocer la ubicación geográfica.

### **Ahuacatlán de Guadalupe**

Solidos sedimentables totales: Se tomaron muestras del agua para conocer la cantidad de sedimento que contenía, se llenaron botellas de 1 lt aproximadamente y se marcaron con etiquetas para ser identificadas después.

Velocidad de Cauce: El último sitio visitado fue un puente ubicado en la comunidad de Ahuacatlán de Guadalupe. La velocidad a 50 centímetros de la columna del puente con un tirante de 1.05 metros fue:

A 60% de la profundidad del tirante	Velocidad
Velocidad Media	0.20 m/s
Velocidad Máxima	0.23 m/s

A 20% de la profundidad del tirante de agua, la velocidad fue cero.

Al igual que en el Puente Escanelilla se marcó una de las columnas para observar el incremento del nivel del agua en caso de tormenta y se tomó una sola medición de la velocidad en el cauce por la imposibilidad de usar el instrumento de medición en otro sitio debajo del puente, debido a la profundidad del río.

Como descripción a groso modo de la sección del río, cabe decir que del borde a la columna central, el suelo estaba seco, después de la primera columna se encuentra una zona de 0.8 m a 1 m de profundidad hasta una distancia de 2 m de la columna, luego 3.7 m con 2.22 de profundidad.

La profundidad en la parte más honda fue medida utilizando una cubeta amarrada con una cuerda, la cubeta contenía una roca, la cubeta fue arrojada al río y luego se midió la cuerda desde un punto conocido y se le sumo la altura de la cubeta y del aro de esta última. La

Puente Ahuacatlan

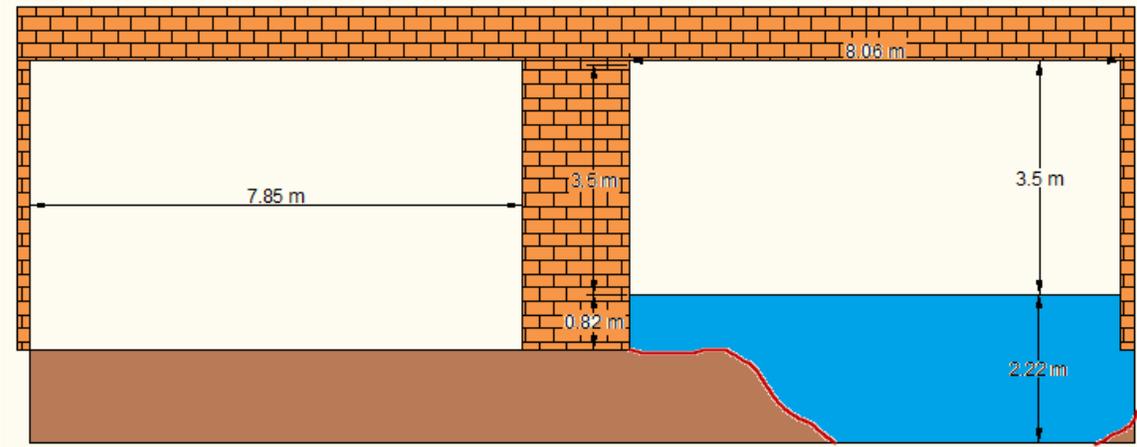


Figura 19 muestra la configuración de la sección y sus dimensiones.

Puente Ahuacatlan

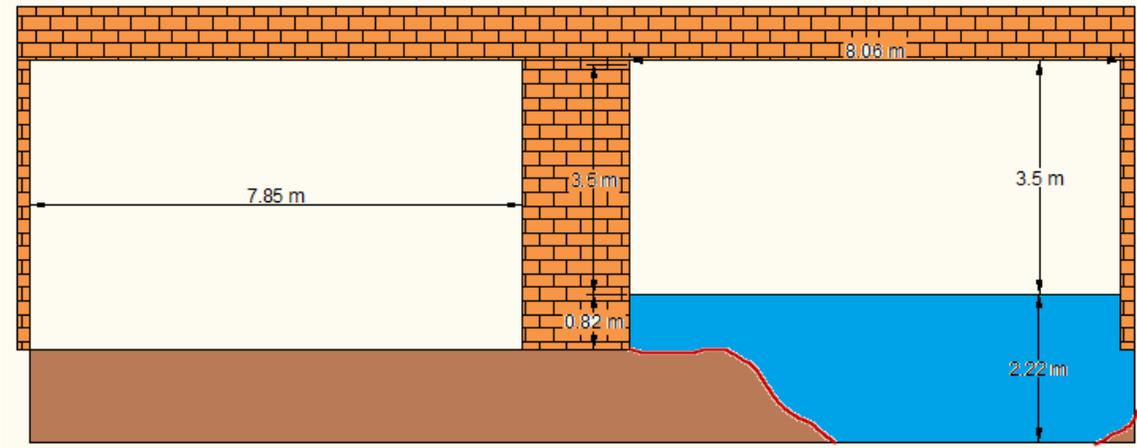


Figura 19. Puente Ahuacatlán, sus dimensiones y configuración

### **3.4.2 Aplicación del método RUSLE**

Para obtener el aporte de sedimentos hacia la presa Jalpan, se empleó el método RUSLE, los cálculos fueron realizados en una hoja Excel. Las ecuaciones empleadas se muestran en el capítulo de resultados.

#### ***Construcción de escenarios***

Los valores obtenidos con el método RUSLE nos darán una aproximación del fenómeno de erosión y pérdida de suelo en el área de estudio para el momento actual, sin embargo se consideró que para fines de retroalimentación del proceso de planeación en el sitio, sería pertinente construir algunos escenarios.

Los escenarios son herramientas de prospección que nos permiten generar conjuntos de futuros alternativos siendo cada uno, un ejemplo de lo que puede llegar a ocurrir bajo ciertas circunstancias; los escenarios son útiles como un proceso para pensar acerca de futuros inciertos y complejos (Reid *et al.*, 2002) como es el caso del tipo de proceso que se analiza en esta sección del trabajo, ya que además de los factores naturales, existen factores de tipo social que inciden en el resultado (por ejemplo, la implementación de prácticas de manejo).

En cuanto al número de escenarios, se considera que estos deben representar aquellas opciones o situaciones que presenten diferencias significativas en los futuros que describen, por lo tanto, no habría un número correcto o incorrecto de escenarios, dado que teóricamente, las opciones de futuro serían infinitas (Scenarios for Sustainability, 2005). El proceso de construcción de escenarios también puede tomar en cuenta la aparición de eventos emergentes, es decir, aquellos que aunque sus posibilidades de ocurrencia son bajas, de presentarse tendrían un impacto profundo en la sociedad y/o el medio ambiente

(Ratcliffe,1999.).

### **Escenarios propuestos**

Para este trabajo de investigación, se contemplaron 8 escenarios en los cuales se modificaron dos parámetros; en 6 de estos escenarios se modificó el factor de uso de suelo cambiando principalmente la cobertura de bosque de pino, encino, agricultura de temporal y zonas sin vegetación; en dos escenarios se modificó el factor de conservación de suelos y en los dos restantes, se modificó el factor R, específicamente la intensidad de la lluvia, cuyos valores se obtuvieron del análisis de precipitación a distintos periodos de retorno y duraciones y el caudal máximo se obtuvo de los resultados obtenidos mediante el empleo del LAANRUN.

La ecuación empleada para el cálculo del factor R en los últimos dos escenarios es:

$$Rw = 9.05 (Ve Qp)^{0.56}$$

donde:

Rw Factor hidrológico de erosivo por lluvia, en (ton) tormenta

Ve Volumen de escurrimiento directo, en m<sup>3</sup>

Qp Caudal máximo del escurrimiento directo, en m<sup>3</sup>/s

Los escenarios que se contemplaron fueron los siguientes:

- Escenario 1. Se incrementa en 30% la cobertura del bosque de pino.
- Escenario 2. Se incrementa en 30% la cobertura del bosque tropical y disminuye la agricultura de temporal.
- Escenario 3. El 10% de la zona de estudio no tiene vegetación, disminuye el bosque de pino.
- Escenario 4. Se incrementa en 25% la superficie sin vegetación de la cuenca, disminuye el bosque de pino.

- Escenario 5. Se incrementa a 50% las áreas sin vegetación de la cuenca, disminuyen la agricultura de temporal y el bosque de pino.
- Escenario 6. Se incrementa en un 70% las áreas sin vegetación, disminuyen el bosque de pino y encino.
- Escenario 7. Hay prácticas de manejo (cultivo en contorno).
- Escenario 8. Hay prácticas de manejo (terraceo).

## **CAPÍTULO 4. MODELACIÓN DEL FENÓMENO LLUVIA-ESCURRIMIENTO**

A lo largo del tiempo se han desarrollado una gran cantidad de modelos que tratan de explicar la relación lluvia-escorrimento. La representación de los escurrimientos se da a través de un hidrograma, el cual, si se estudia con detalle puede llegar a definir las características fisiográficas y climáticas que rigen las relaciones entre la lluvia y el escurrimiento. La forma de los hidrogramas para tormentas particulares varía no solo de una cuenca a otra sino que también de tormenta a tormenta. Propuesto por Sherman en 1932 se define como el escurrimiento resultante de un milímetro de exceso de lluvia generado uniformemente sobre el área de una cuenca a lo largo de una duración efectiva. Partiendo de esta definición, se pueden desarrollar un sinnúmero de relaciones que representan la relación lluvia-escorrimento (Chow et al. 1994 en Laguna y Gutiérrez, 2004)

El estudio de la precipitación sin embargo, ha sido desarrollado más a profundidad que el fenómeno del escurrimiento; esto porque la lluvia es más fácil de entender que el proceso de escurrimiento ya que en este intervienen mayor número de variables (Arrijoja, 1975 Chow et al., 1994 en Laguna-Ocampo y Gutiérrez-López, 2004). Los modelos lluvia-escorrimento se pueden clasificar dependiendo de la cantidad de datos que se requieran para su operación en (Arrijoja, 1975 Chow et al., 1994 en Laguna-Ocampo y Gutiérrez-López, 2004): Modelos para los cuales se requiere del conocimiento de algunas características generales de la cuenca comúnmente el área de la cuenca. Modelos basados en un análisis de frecuencias y del conocimiento detallado de sus características fisiográficas. Asimismo, para poder calibrar las relaciones que dan origen a los modelos de lluvia-escorrimento es necesario contar con el mayor número de registros posibles en cuanto a precipitación y escurrimientos de la cuenca en estudio; por esta razón los modelos de lluvia-escorrimento pueden ser tan complejos como se deseé. Por ejemplo, se pueden cuantificar los niveles de incertidumbre que producen estos modelos debido a errores en los registros

hidrológicos y climáticos y a la influencia en el uso del suelo dentro del modelo (Nandakumara y Meina, 1997 Chow et al., 1994 en Laguna-Ocampo y Gutiérrez-López, 2004). Se han creado también métodos para modelar estas incertidumbres asociadas al campo aleatorio de las variables que intervienen en los modelos lluvia-escurrimiento (Kottegoda et al., 2000 Chow et al., 1994 en Laguna-Ocampo y Gutiérrez-López, 2004).

Actualmente los modelos lluvia-escurrimiento están siendo desplazados por los modelos de predicción del clima, los cuales pueden cuantificar de manera muy precisa el rol de la topografía de la cuenca en el escurrimiento (Bruijn y Brandsma, 2000 Chow et al., 1994 en Laguna-Ocampo y Gutiérrez-López, 2004). A continuación se describen algunos de los modelos que se han utilizado en la predicción del fenómeno lluvia-escurrimiento.

#### **4.1 Métodos basados en envolventes**

La envolvente se basa en una curva que cubre a todos los puntos que se grafican a partir de relacionar los gastos máximos anuales de una región con el área de drenaje de la cuenca. Proporciona evidencia de las magnitudes máximas de los gastos esperados. No relaciona con frecuencia de ocurrencia probable (Ramírez, *et al.* 2005) y son útiles en estimaciones gruesas de caudales máximos probables. (Aparicio, 2001 y Ghosh, 1997 , en Laguna-Ocampo y Gutiérrez-López 2004).

Estos modelos son útiles en estimaciones gruesas de caudales máximos probables, sólo toman en cuenta el área de la cuenca y no analizan la relación lluvia escurrimiento. La fórmula general de este tipo de métodos es:

$$Q = \alpha A_c^\beta$$

donde:

- Q caudal máximo
- $A_c$  área de la cuenca, en  $\text{km}^2$
- $\alpha$  y  $\beta$  parámetros empíricos

Comúnmente se le asigna a  $\beta$  un valor de 0.75 para cuencas de área menor de 1500 km<sup>2</sup> y un valor de 0.5 para cuencas mayores, y  $\alpha$  se obtiene de la expresión:

$$\alpha = \frac{0.936}{A_c^{0.048}}$$

▪ **Fórmula general en India**

$$Q = 0.0139 \frac{700A_c}{(A_c + 4)^{0.5}}$$

donde

$A_c$  área de la cuenca, en km<sup>2</sup>

$Q$  caudal máximo en m<sup>3</sup>/s

▪ **Fórmula de Dickens**

$$Q = 0.139CA_c^{0.75}$$

donde

$A_c$  área de la cuenca en km<sup>2</sup>

$Q$  caudal máximo en m<sup>3</sup>/s

$C$  coeficiente (Cuadro 9)

**Cuadro 9. Valores para el coeficiente de escurrimiento C para la fórmula de Dickens**

Características topográficas de la cuenca	Para precipitaciones de 10 cm en 24 horas	Para precipitaciones de 15 cm en 24 horas
Terreno Plano	200	300
Con lomerío suave	250	325
Con mucho lomerío	300	350

Tomando en cuenta la cantidad de lluvia y asignando valores a los coeficientes empíricos de  $\alpha$  y  $\beta$ , Dickens propone una clasificación de la ecuación general:

Para una lluvia de aproximadamente 2,540 mm:

$$Q = 24.9505A_c^{0.75}$$

donde

$A_c$  área de la cuenca en  $\text{km}^2$

$Q$  caudal máximo en  $\text{m}^3/\text{s}$

Para lluvias entre 760 y 1,015 mm:

$$Q = 2.0711A_c^{0.75}$$

donde

$A_c$  área de la cuenca en  $\text{km}^2$

$Q$  caudal máximo en  $\text{m}^3/\text{s}$

#### ▪ **Fórmula de Ryves**

Propone una nueva clasificación asigna nuevos valores a los coeficientes empíricos de  $\alpha$  y  $\beta$  de acuerdo a si la ecuación sería aplicada en cuencas de montaña o cuencas costeras, quedando de la siguiente forma:

Para cuencas de montaña:

$$Q = 10.125A_c^{0.67}$$

donde

$A_c$  área de la cuenca en  $\text{km}^2$

$Q$  caudal máximo en  $\text{m}^3/\text{s}$

Para cuencas costeras:

$$Q = 0.015 \cdot \lambda A_c^{0.67}$$

donde

$A_c$  área de la cuenca en  $\text{km}^2$

$Q$  caudal máximo en  $\text{m}^3/\text{s}$

$\lambda$  560 para cuencas entre 80 y 160 km del mar

$\lambda$  450 cuencas con distancia al mar  $< 80$  km

#### ▪ **Fórmula de Madras**

Propone una fórmula en la cual el coeficiente empírico  $\beta$  se ve afectado por una función logarítmica:

$$Q = 2000(A_c / 2.589)^{\left(0.92 - \frac{1}{15} \log(A_c / 2.589)\right)} \cdot 0.0283$$

donde

$A_c$  área de la cuenca en  $\text{km}^2$

$Q$  caudal máximo en  $\text{m}^3/\text{s}$

#### ▪ **Fórmula de Hyderabad**

La ecuación propuesta, es una modificación a la propuesta por Madras en la cual, los valores empíricos de  $\alpha$  y  $\beta$  se modifican:

$$Q = 49.554(0.3861A_c)^{\left(0.92 - \frac{1}{14} \log A_c\right)}$$

donde

$A_c$  área de la cuenca en  $\text{km}^2$

$Q$  caudal máximo en  $\text{m}^3/\text{s}$

#### ▪ **Fórmula de Baird y McIllwraith**

$$Q = \frac{131000(A_c / 2.589)}{[107 + (A_c / 2.589)]^{0.78}} \cdot 0.0283$$

donde

$A_c$  área de la cuenca en  $\text{km}^2$

$Q$  caudal máximo en  $\text{m}^3/\text{s}$

- **Fórmula de Leopold y Miller:**

Esta ecuación relaciona el área de la cuenca para la obtención del gasto en donde los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  se les asigna un valor de 12 y 0.79 respectivamente. Desarrollada en el año de 1956 y probada en Nuevo México, Estados Unidos. Relaciona La ecuación queda de la siguiente manera:

$$Q_{2.33} = 0.1668 \cdot A_c^{0.79}$$

donde

$A_c$  área de la cuenca en  $\text{km}^2$

$Q_{2.33}$  es el gasto máximo para un periodo de retorno  $Tr = 2.33$  años en  $\text{m}^3/\text{s}$

- **Fórmula de Baird y McIlwraith**

La fórmula propuesta es utilizada para obtener el gasto máximo aplicable en cualquier parte del mundo.

$$Q = \frac{131000 \cdot (A_c / 2.589)}{[107 + (A_c / 2.589)]^{0.78}} \cdot 0.0283$$

donde

$A_c$  área de la cuenca en  $\text{km}^2$

$Q$  caudal máximo en  $\text{m}^3/\text{s}$

- **Método de Creager**

Para la obtención de esta fórmula se graficaron los gastos máximos por unidad de área observados en cuencas de todo el mundo, contra el área misma de la cuenca. Posteriormente se trazó una curva envolvente para todos los puntos graficados obteniéndose la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{1.303 \cdot C_c \cdot (0.386 \cdot A_c)^\alpha}{A_c}$$

donde

$A_c$  área de la cuenca en  $\text{km}^2$

$Q$  es el gasto unitario en  $\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$

$C_c$  es el parámetro que depende de la región considerada

$\alpha$  se calcula con la ecuación:

$$\alpha = \frac{0.936}{A_c^{0.048}}$$

A pesar de que el método es muy sencillo y rápido, no toma en cuenta las características fisiográficas y de precipitación de la cuenca sujeta a estudio. Otra de las desventajas es que se desconoce el periodo de retorno asociado al gasto obtenido por este procedimiento, por último, es pertinente mencionar que el método no está muy fundamentado para áreas entre los 0 a  $30 \text{ km}^2$ .

- **Método de Lowry**

Tiene como base el procedimiento establecido por Creager pero emplea una ecuación diferente para definir a la envolvente de los gastos máximos (SCT, 1984):

$$Q = \frac{C_L}{(A_c + 259)^{0.85}}$$

donde

$A_c$  área de la cuenca en  $\text{km}^2$

$Q$  es el gasto unitario en  $\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$

$C_L$  es el parámetro que depende de la región considerada

Por lo general este método da resultados más altos para cuencas comprendidas entre 100 y 1000 km<sup>2</sup>.

#### 4.2 Métodos basados en la fórmula racional

Es el modelo más antiguo de la relación lluvia-escorrimento, está basado en ciertas hipótesis que generalmente no se cumplen y que son más distantes de la realidad en cuanto mayor sea el el área de la cuenca (Aparicio, 2001).

$$Q = 0.278 \cdot C \cdot i \cdot A_c$$

donde

$A_c$  área de la cuenca en km<sup>2</sup>

$Q$  caudal máximo posible en m<sup>3</sup>/s

$i$  intensidad de la lluvia en mm/h

0.278 factor de homogeneidad de unidades

$C$  coeficiente de escurrimiento (Cuadro 10)

**Cuadro 10. Valores para el coeficiente de escurrimiento C para la fórmula racional**

Tipo del área por drenar	Pendiente (%)	Coeficiente C
Con césped		
Suelo arenoso	2	0.05 - 0.10
Suelo arenoso	2 a 7	0.10 - 0.15
Suelo arenoso	7	0.15 - 0.20
Suelo grueso	2	0.13 - 0.17
Suelo grueso	2 a 7	0.18 - 0.22
Suelo grueso	7	0.25 - 0.35
Zonas comerciales		
Áreas céntricas		0.70 - 0.95
Áreas vecinales		0.50 - 0.70
Zonas residenciales		
Áreas familiares		0.30 - 0.50
Áreas multifamiliares separadas		0.40 - 0.60
Áreas multifamiliares juntas		0.60 - 0.75
Áreas suburbanas		0.25 - 0.40
Áreas de apartamentos habitacionales		0.50 - 0.70

<b>Tipo del área por drenar</b>	<b>Pendiente (%)</b>	<b>Coefficiente C</b>
Zonas industriales		
Claros		0.50 – 0.80
Zonas densamente construidas		0.60 – 0.90
Parques y cementerios		0.10 – 0.25
Áreas de recreo		0.20 – 0.35
Patios de FF CC		0.20 – 0.40
Áreas provisionales		0.10 – 0.30
Calles		
Asfaltadas		0.70 – 0.95
De concreto		0.80 – 0.95
Enladrillado		0.70 – 0.85
Calzadas y banquetas		0.75 – 0.85
Azoteas y techados		0.75 – 0.95
Zonas rurales		
Campos cultivados		0.20 – 0.40
Zonas forestadas		0.10 – 0.30

El método se basa en las siguientes hipótesis (Laguna,2004):

- a) La duración de la precipitación coincide con el tiempo pico de escurrimiento.
- b) Todas las proporciones de la cuenca contribuyen a la magnitud del pico del escurrimiento.
- c) La capacidad de infiltración es constante en todo tiempo.
- d) La intensidad de precipitación es uniforme sobre toda la cuenca.
- e) Los antecedentes de humedad y almacenaje de la cuenca son despreciables.

▪ **Fórmula de Isakowski**

Este método, a diferencia de la fórmula general del método racional, utiliza el promedio de precipitación anual en la ecuación:

$$Q = K m P_m A_c$$

donde

$A_c$  área de la cuenca en  $\text{km}^2$

$Q$  caudal en  $\text{m}^3/\text{s}$

$P_m$  promedio de la precipitación anual en  $\text{m}$

$m$  coeficiente que varía de 1 a 10 para áreas de 1 a 25,000  $\text{km}^2$

$K_m$  coeficiente que depende de la morfología de la cuenca y varía de 0.017 a 0.80

#### ▪ **Métodos FAA**

El método se emplea de forma exclusiva en proyectos de drenaje interior de los aeropuertos (SCT, 1984), es decir del sistema de drenaje que evacúa las aguas pluviales que caen directamente sobre la superficie portuaria.

#### ▪ **Método ARMCO**

De la misma forma que el método FAA se utiliza de forma exclusiva en proyectos de drenaje interior de los aeropuertos (SCT, 1984). La fórmula que se utiliza para obtener el gasto es:

$$Q = \frac{A_c l i}{36f}$$

donde

$A_c$  área de la cuenca en  $\text{Ha}$

$Q$  caudal de proyecto en  $\text{m}^3/\text{s}$

$l$  factor de escurrimiento superficial o de impermeabilidad adimensional (es el mismo que el coeficiente  $C$  -Cuadro 11)

$i$  intensidad de lluvia en  $\text{cm}/\text{h}$

$f$  función de la pendiente del área drenada

Para el factor de escurrimiento  $l$  se proponen los siguientes valores:

**Cuadro 11. Valores para el coeficiente de escurrimiento C para el método ARMCO**

Tipo de terreno o superficie	Coeficiente I ó C
Techos impermeables	0.75 – 0.95
Pavimentos flexibles	0.80 – 0.95
Pavimentos rígidos	0.70 – 0.90
Empedrados o enladrillados con juntas bien hechas	0.35 – 0.70
Suelos impermeables (*)	0.40 – 0.65
Suelos impermeables con césped (*)	0.30 – 0.55
Suelos ligeramente permeables (*)	0.15 – 0.40
Suelos ligeramente permeables con césped (*)	0.10 – 0.30
Suelos moderadamente permeables (*)	0.05 – 0.20
Suelos moderadamente permeables con césped (*)	0.00 – 0.10

(\*) Con pendiente de 1 a 2%

Nota: el coeficiente de escurrimiento se designa con la letra C en el método FAA y con la I en el ARMCO.

Para el factor de pendiente f se proponen los siguientes valores (Cuadro 12):

**Cuadro 12 Valores para el factor de pendiente para el método ARMCO**

Pendiente s (%)	Factor de pendiente f (adimensional)
$s \leq 0.5$	3.0
$0.5 < s \leq 1$	2.5
$s > 1$	2.0

▪ **Modelo racional de Gregory-Arnold (CNA, 1987):**

Mediante investigaciones, comparaciones prácticas para evaluar el gasto máximo de una cuenca y su hidrograma y el análisis del método racional, se estableció un modelo matemático en el cual intervienen factores como las características físicas de una cuenca y del cauce y su geometría; las características climatológicas consideradas fueron la magnitud e intensidad de la precipitación y las condiciones previas de humedad de la cuenca.

La velocidad media de recorrido del escurrimiento, desde el punto más alejado de la cuenca hasta el sitio de estudio está dado por la ecuación:

$$V_m = \frac{L}{3.6t_c}$$

donde:

L longitud del cauce en km

T<sub>c</sub> el tiempo de concentración en horas

L

La intensidad de la lluvia está definida por:

$$i = \frac{K_a}{(1-e)t_c^e} = \frac{K_a(3.6V_m)^e}{(1-e)L^e}$$

donde:

e es un exponente adimensional

K<sub>a</sub> es el coeficiente de almacenaje en horas.

Finalmente, al sustituir la intensidad i en la fórmula general de Q=CiA<sub>c</sub> la fórmula final es la siguiente:

$$Q = CA_c i = \frac{CA_c K_a (3.6V_m)^e}{(1-e)L^e}$$

El valor de K es igual a:

$$K_a = i(1-e)t_c^e$$

Y la velocidad expresada por la fórmula de Chezy:

$$V_m = c(R_{Hs})^{0.5}$$

donde:

$V_m$  es la velocidad media

$c$  es un coeficiente de Chezy,

$R_H$  es el radio hidráulico

$s$  es la pendiente del canal

Sustituyendo se tiene:

$$Q = 3.6^e C A_c i t_c^e (c \sqrt{R_H})^e \frac{s^{e/2}}{1000^{e/2} L^e}$$

donde:

$A_c$  es el área de la cuenca en  $\text{km}^2$

$C$  es un coeficiente de escurrimiento que depende de la cuenca

$i$  es la intensidad de la lluvia en  $\text{mm/hr}$

$t_c$  es el tiempo de concentración en horas

$c$  es un coeficiente de Chezy

$R_H$  es el radio hidráulico

$L$  es la longitud del cauce en  $\text{km}$

$s$  es la pendiente

Las desventajas del método de la fórmula racional son que proporciona únicamente una estimación del gasto máximo y no toma en cuenta la forma del hidrograma y que el cálculo del tiempo de concentración se efectúa mediante fórmulas aproximadas que han sido probadas en regiones que en general no son semejantes a las cuencas en estudio.

### 4.3 Métodos basados en la forma del hidrograma

#### ▪ El hidrograma unitario

Este método fue propuesto por Sherman en el año de 1932 y está definido como el hidrograma de escorrentía directa que resulta de 1 pulgada de lluvia en exceso generado de manera uniforme sobre el área de drenaje a una tasa constante a lo largo de una duración efectiva.

Algunos de los supuestos de este método son:

- Existe una relación lineal entre la cantidad de agua que llueve y la cantidad de agua que escurre, es decir, el hidrograma resultante para a cierta cantidad de lluvia duplicará en número sus ordenadas ante una cantidad doble de lluvia.
- El hidrograma unitario toma en cuenta la altura total de precipitación, área de la cuenca, la forma, pendiente, vegetación, etc.
- Se verifica la hipótesis de superposición de causas y efectos mediante la cual es posible obtener el hidrograma de tormentas superpuestas al superponer sus hidrogramas correspondientes.

#### ▪ Curva S

La Curva S es un hidrograma dado por la superposición de un número de hidrogramas unitarios suficiente para llegar al gasto de equilibrio. Resulta de un exceso de lluvia continuo a una tasa constante de 1 cm/h (o 1 pulg/h) durante un periodo indefinido. Para alcanzar el equilibrio para un caudal constante el gasto debe ser igual a:

$$Q = \frac{0.166 \cdot 24 \cdot A_c}{t}$$

donde

$A_c$  área de la cuenca en  $\text{km}^2$

$t$  duración de la tormenta en horas

0.166 número de  $\text{m}^3 / \text{seg} / \text{día}$  en 1 cm de escurrimiento sobre un área de  $1 \text{ km}^2$

- **El hidrograma unitario instantáneo (IUH, por sus siglas en inglés)**

Aquel hidrograma que resulta de un exceso de lluvia en una cantidad unitaria y con duración infinitesimal, como una función impulso respuesta; puede determinarse utilizando métodos de inversión matemática como funciones ortogonales series de Fourier, etc. EL IUH caracteriza la respuesta de la cuenca a lluvia sin referencia a lo que esta tenga de duración. Para este tipo de hidrogramas, el exceso de lluvia se aplica al área de drenaje en tiempo cero.

- **Hidrograma Unitario de Clark**

Este hidrograma representa a los procesos críticos en la transformación de la precipitación en exceso a escurrimiento que son la translación y la atenuación. Toma en cuenta el tiempo de concentración obtenido mediante un modelo lineal de canales. La ecuación que representa este hidrograma es:

Deriva un hidrograma unitario representando dos procesos criticos en la transformación de la precipitación en exceso a escurrimiento, estos dos procesos son la translación y atenuación toma en cuenta el tiempo el tiempo de concentración y lo obtiene de un modelo lineal de canales. La ecuación es la siguiente:

$$Q = \frac{2.78 \cdot A_c}{\Delta t}$$

donde:

$A_c$  es el área de la cuenca en  $\text{km}^2$

$\Delta t$  es el incremento del tiempo en horas

- **El Método de Chow**

El método se basa en los conceptos de hidrograma unitario y del hidrograma unitario sintético. Este método solo proporciona el gasto pico y es

aplicable a cuencas no urbanas que tengan un área menor de 25 km<sup>2</sup>. La ecuación que representa a este método es:

$$Q = \frac{2.78A_c P_e Z}{t} + Q_b$$

donde

A<sub>c</sub> área de la cuenca en km<sup>2</sup>

Q<sub>b</sub> caudal base en m<sup>3</sup>/s

P<sub>e</sub> lluvia en exceso en cm

t duración de la tormenta en horas

Z factor de reducción del pico

#### ▪ Hidrograma unitario triangular

En el año de 1957 Víctor Mockus desarrolló un hidrograma unitario sintético de forma triangular, la ecuación que define a este método es (Aparicio, 2001)::

$$Q = \frac{0.208A_c}{\sqrt{t_c + 0.6t_c}}$$

donde

A<sub>c</sub> área de la cuenca en km<sup>2</sup>

Q caudal pico en m<sup>3</sup>/s/mm

t<sub>c</sub> tiempo de concentración en horas

#### ▪ Hidrograma adimensional SCS

En este tipo de hidrogramas, el caudal se expresa por la relación del caudal con respecto al caudal pico Q y el tiempo por la relación del tiempo t con respecto al tiempo de ocurrencia del pico en el hidrograma unitario, t<sub>0</sub>. El hidrograma sintético adimensional permite conocer el hidrograma unitario una vez dados el caudal pico y el tiempo de retardo para la duración de exceso de precipitación, el hidrograma unitario puede estimarse a partir del hidrograma sintético adimensional para la cuenca dada. El tiempo de recesión puede

estimarse como  $1.67t_0$ . Como el área bajo el hidrograma unitario debería ser igual a una escurrimiento directa de 1 cm (o 1 pulgada) puede demostrarse que (Chow *et al.*, 1994).

$$Q = \frac{CA_c}{(t/2) + t_r}$$

donde

C igual a 2.08 (483.4 en el sistema inglés)

$A_c$  área de drenaje en  $\text{km}^2$

$t_r$  tiempo de retardo ( $0.6t_c$ ) en horas

$t$  duración de la lluvia efectiva en horas

#### 4.4 Métodos empíricos

- **Método del departamento de puentes**

Este método fue desarrollado en México por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Con base en la información obtenida de las estaciones hidrométricas con registros más amplios dentro de cada región hidrológica y datos históricos y registros de estaciones de Estados Unidos cercanas a la frontera, fue elaborada una gráfica que proporciona el gasto de proyecto para puentes en función del área, la forma de la cuenca y la pendiente del cauce principal. (SCT, 1984).

- **Fórmula de Talbot (SCT, 1984)**

El método consiste en aplicar la ecuación empírica publicada por An.Talbot, la cual se dedujo de datos de escurrimiento. Se usa en la proyección de obras menores como las de alcantarillado y drenaje siempre y cuando tengan una longitud inferior a los 6 metros, supone que el área hidráulica de la alcantarilla será directamente proporcional al gasto y que este varía  $\frac{3}{4}$  del área de la cuenca.

La fórmula se basa en las características de precipitación de una región en particular, por tal motivo, no toma en cuenta la variación en la intensidad de precipitación, factor de frecuencia y velocidad del flujo cuando se requiere aplicar a otras localidades. La fórmula se aplica en cuencas que tengan un área máxima de 200 km<sup>2</sup>.

La fórmula que describe este método es:

$$A_h = 0.183C^4 \sqrt{A_c^3}$$

donde

A<sub>c</sub> área de la cuenca en Ha

A<sub>h</sub> área hidráulica que deberá tener

la alcantarilla en m<sup>2</sup>

C coeficiente de escurrimiento (Cuadro 13).

**Cuadro 13. Valores para el coeficiente de escurrimiento C para el método de Talbot**

<b>Características topográficas de la cuenca</b>	<b>Coeficiente C</b>
Montañosa y escarpada	1.00
Con mucho lomerío	0.80
Con lomerío	0.60
Muy ondulada	0.50
Poco ondulada	0.40
Casi plana	0.30
Plana	0.20

▪ **Fórmula de Bürkli-Ziegler**

Esta fórmula es empleada en el cálculo de colectores en los sistemas de drenaje de ciudades; se basa en observaciones realizadas en áreas menores a 20 Ha. Se emplea en proyectos de drenaje de carreteras y vías férreas (SCT, 1984).

$$Q = 0.022CA_c i^4 \sqrt{\frac{s}{A_c}}$$

donde

$A_c$  área tributaria o de la cuenca en Ha

$Q$  caudal de proyecto en  $m^3/s$

$C$  coeficiente de escurrimiento que depende de la clase de terreno de la cuenca o área tributaria de la alcantarila (Cuadro 14).

$i$  intensidad de precipitación en cm/h correspondiente a la lluvia más intensa.

$S$  pendiente del terreno en m/km

**Cuadro 14. Valores para el coeficiente de escurrimiento C para el método de Bürkli-Ziegler**

Clase de terreno	Coeficiente C
Calles pavimentadas y distritos comerciales	0.75
Calles ordinarias de la ciudad	0.65
Poblaciones con parques y calles con macádam	0.30
Terrenos de cultivo	0.25

▪ **Fórmula de Horton**

Éste método se basa en los estudios realizados por R.E. Horton en materia de escurrimientos superficiales y la ecuación propuesta por él mismo para determinar el gasto de diseño, fue desarrollado por ingenieros del ejército y la fuerza aérea de los Estados Unidos de América . Se aplica principalmente a proyectos de diseño de las obras de drenaje del interior de aeropuertos, en superficies prácticamente planas y de poca pendiente, en las que el escurrimiento no ha labrado cauces y fluye de forma laminar. (SCT, 1984)

$$Q = 0.0275\sigma \tanh^2 \left[ 0.3194t_{\text{crit}} \left( \frac{\sigma}{nL} \right)^{0.50} s^{0.25} \right]$$

donde

Q caudal máximo por unidad de área en el extremo inferior de una franja elemental de una superficie pavimentada, con césped o descubierta en  $m^3/s/ha$

$\sigma$  intensidad de precipitación en exceso en cm/h

i intensidad de precipitación correspondiente a la duración t en cm/h

$\phi$  capacidad de infiltración en cm/h (Cuadro 15)

$t_{crit}$  duración crítica de la tormenta en minutos

n coeficiente de retardo (Cuadro 16)

L longitud efectiva de la cuenca por drenar desde el punto más alejado del parteaguas hasta el punto de concentración en metros

S pendiente de la superficie en decimales

**Cuadro 15. Valores para el coeficiente de infiltración del suelo  $\Phi$**

Descripción del suelo	Símbolo S.U.C.S.	Infiltración $\phi$ (cm/hr)
Mezcla de arena y grava	GW, GP SW, SP	2.0 – 2.5
Gravas limosas y arenas limosas a limo orgánico y margas descubiertas	GM, SM, ML MH, OL	0.8 – 1.5
Arena limoarcillosa o arcilla arenosa	SC, CL	0.5 – 0.8
Arcillas, inorgánicas y orgánicas	CH, OH	0.25 – 0.5
Roca desnuda no demasiado fracturada	-	0.0 – 0.25

**Cuadro 16. Valores para el coeficiente de retardo n**

Superficie	Coeficiente n
Pavimentos y acotamientos	0.01
Suelo desnudo compacto libre de piedra	0.10
Cubierta de pasto escaso o superficie descubierta moderadamente rugosa	0.30
Cubierta de pasto normal	0.40
Cubierta de pasto denso	0.80

- **Fórmula de Sánchez Bribiesca (hasta 100 km<sup>2</sup>)**

Se aplica en cuencas que tienen un área máxima de 100 km<sup>2</sup>. La fórmula toma en cuenta factores fisiográficos y climatológicos que influyen en el escurrimiento resultante de una cuenca, sin embargo no asocia el periodo de retorno al cual se asocian las intensidades de precipitación establecidas en los mapas de isoyetas de la región sujeta a estudio; esto puede ajustarse con información de pluviómetros cercanos a la cuenca de estudio. La fórmula es la siguiente (SCT, 1994)

$$Q = \frac{f_D f_w P_e A_c}{4500}$$

donde

A<sub>c</sub> área de la cuenca en m<sup>2</sup>

Q caudal de diseño en m<sup>3</sup>/s

f<sub>D</sub> coeficiente de duración adimensional

f<sub>w</sub> coeficiente de precipitación (Cuadro 17).

**Cuadro 17. Valores para el coeficiente de precipitación f<sub>w</sub>**

Condición (según el autor)	Fuente de información: Cartas de clima	Valor de f <sub>w</sub>
Aguaceros aislados en zonas secas o de pluviosidad	Climas secos y semisecos	1.0
Aguaceros en época de lluvias en zonas de pluviosidad media	Clima subhúmedo	1.5
Aguaceros en zonas muy húmedas de fuerte pluviosidad y de tormentas frecuentes	Clima húmedo	2.0

- **Fórmula de Seschapa-Rao, Assenzo y Harp**

$$Q = -0.5217 + 0.7486i_{30} - 0.00302L_c + 0.00092L$$

donde

Q caudal unitario de diseño en m<sup>3</sup>/s

i<sub>30</sub> intensidad de precipitación d=30 minutos en cm/h

L<sub>c</sub> longitud de la recta desde el sitio en estudio al centroide del área drenada en m.

L longitud del cauce principal en m

### Fórmula de Waananen y Crippen

$$Q_{25} = 1.19(A_c / 2.589)^{0.81}(P_m / 25.4)^{1.81} \cdot 0.0283$$

$$Q_{50} = 1.50(A_c / 2.589)^{0.82}(P_m / 25.4)^{1.85} \cdot 0.0283$$

$$Q_{100} = 1.95(A_c / 2.589)^{0.83}(P_m / 25.4)^{1.87} \cdot 0.0283$$

donde

$A_c$  área de la cuenca en  $\text{km}^2$

$Q$  caudal en  $\text{m}^3/\text{s}$

$P_m$  precipitación media anual en mm

#### ▪ Métodos para obtener el caudal medio

· Fórmula de Gutiérrez-Reyes (Gutierrez y Reyes, 1998)

$$Q_{2.33} = 1.9324A_c^{0.8936} \quad A_c < 4200 \text{ km}^2$$

$$Q_{2.33} = 3.964 A_c - 0.0007 A_c^2 \quad A_c > 4200 \text{ km}^2$$

donde

$A_c$  área de la cuenca en  $\text{km}^2$

$Q_{2.33}$  caudal para  $Tr = 2.33$  años en  $\text{m}^3/\text{s}$

### Fórmula de Thomas

$$Q_{2.33} = 2.74 \times 10^{-8} \left( \frac{A_c}{2.589} \right)^{1.08} \left( \frac{P_m}{25.4} \right)^{3.93} F^{-0.61} \phi^{2.08} \cdot 0.0283 \text{ donde}$$

$A_c$  área de la cuenca en  $\text{km}^2$

$P_m$  precipitación media anual en mm

$F$  porcentaje de área plantada

$\phi$  infiltración del suelo (tabla 6)

### Fórmula de Rodda

$$Q_{2.33} = 1.08 \left( \frac{A_{c2.33}}{2.589} \right)^{0.77} \left( \frac{P_m}{25.4} \right)^{2.92} \left( \frac{D}{0.621} \right)^{0.81} \cdot 0.0283$$

donde

$A_c$  área de la cuenca en  $\text{km}^2$

$P_m$  precipitación media anual en mm

$D$  densidad del drenaje en  $\text{km}/\text{km}^2$

### Fórmula del Consejo de Investigación de la Naturaleza y Medio Ambiente

(NERC)

$$Q_{2.33} = 0.0607 A_c^{0.94} P_5^{1.03} I_{\text{soil}}^{1.23} FR^{0.27} I_{\text{slope}}^{0.16} (1 + L)^{-0.85}$$

donde

$A_c$  área de la cuenca en  $\text{km}^2$

$P_5$  precipitación en 24 horas en cm  $Tr= 5$  años

$I_{\text{soil}}$  índice del suelo

$FR$  frecuencia de descarga en número/ $\text{km}^2$

$I_{\text{slope}}$  índice de la pendiente

$L$  longitud del meandro del río en m

### Fórmula de Mosley

(Maidment, 1992)

$$Q_{2.33} = 3.741 A_s^{1.015} R_{\text{asp}}^{-0.515}$$

donde

$A_s$  área de la sección del canal en  $\text{km}^2$

$R_{\text{asp}}$  radio máxima / profundidad promedio

### Fórmula de Mosley

$$Q_{2.33} = 0.00055 L^{1.96}$$

donde

$L$  longitud del meandro del río en metros

### Fórmula de Leopold y Miller

(Maidment, 1992)

$$Q_{2.33} = 0.1668A_c^{0.79}$$

donde

$A_c$  área de la cuenca, en  $\text{km}^2$

### Fórmula de Beable

$$Q_{2.33} = 1.48 \times 10^{-4} A_c^{0.82} P_2^{2.18}$$

donde

$A_c$  área de la cuenca en  $\text{km}^2$

$P_2$  precipitación en 24 horas en mm  $Tr = 2$  años

## ▪ Fórmulas que relacionan características de la cuenca

### Fórmula de Burge

(Ghosh, 1997)

$$Q = \frac{C(A_c / 2.589)}{(L / 1.609)^{2/3}} \times 0.0283$$

donde

$A_c$  área de la cuenca en  $\text{km}^2$

$C$  igual a 1300

$L$  longitud de la superficie de la cuenca en km

### Fórmula de Kinninson y Colby

$$Q = \frac{\left( 0.000036 \left( \frac{h}{0.3048} \right)^{2.4} + 124 \right) (A_c / 2.589)^{0.95}}{r^{1.7}} \cdot 0.028$$

donde

$A_c$  área de la cuenca en  $\text{km}^2$

$h$  altitud media de la cuenca en m

r porcentaje de cuerpos de agua en la cuenca

### Fórmula de Pettis

$$Q = C \cdot \left( \frac{P}{25.4} \right) \cdot \left( \frac{B}{1.609} \right)^{-1.25}$$

donde

Q caudal pico para  $T_r = 100$  años en  $m^3/s$

P lluvia en 100 horas en mm

B ancho de la cuenca  $x = A_c/l$  en km

C coeficiente que varía de 310 en zonas húmedas a 40 en zonas desérticas

### Fórmula de Potter

$$Q = 0.038 \cdot \left( \frac{A_c}{0.00405} \right) \cdot \left( \frac{L/1.609}{\sqrt{[s/0.1894]}} \right) \cdot R$$

donde

$A_c$  área de la cuenca en  $km^2$

L longitud del canal principal en km

s pendiente en m/km

R factor de lluvia (entre 0.2 y 1)

### Fórmula de Mc Math

$$Q = C(i \cdot 0.10)(A_c / .00405)^{4/5} s^{1/5}$$

donde

$A_c$  área de la cuenca en  $km^2$

C igual a 0.75

i intensidad de la lluvia en mm/h

s pendiente de la cuenca

### Fórmula de Possentis

$$Q = \frac{H_m}{L} \left( A_m + \frac{A_c}{3} \right) K$$

donde

$A_c$  área de la cuenca en  $\text{km}^2$

$Q$  caudal en  $\text{m}^3/\text{s}$

$A_m$  área de la parte montañosa en  $\text{km}^2$

$L$  longitud del canal principal en  $\text{km}$

$K$  coeficiente que varia entre 700 y 800

### Fórmula de la Comisión de Energía y Central de Agua de India

$$Q = C(A_c / 2.589)^{3/4} s^{1/4} \frac{C_p}{C_2} \left( \frac{0.6L}{L_c} \right)^{1/4} \cdot 0.0283$$

donde

$A_c$  área de la cuenca en  $\text{km}^2$

$Q$  caudal pico en  $\text{m}^3/\text{s}$

$C = C_2/3.0$  y  $C_2$  es igual a 2.75

$C_p$  y  $C_2$  coeficientes como los propuestos por Zinder para un hidrograma unitario de 1 h

$s$  pendiente de la cuenca

$L$  longitud del canal principal en  $\text{km}$

$L_c$  distancia al centroide de la cuenca en  $\text{km}$

### Fórmula de Fuller

$$Q_m = \left( 1 + \frac{266}{A_c^{0.3}} \right) C \left( \frac{A_c}{2.589} \right)^{0.8} (1 + 0.8 \log T)$$

donde

$A_c$  área de la cuenca en  $\text{km}^2$

$Q_m$  caudal medio diario en  $\text{m}^3/\text{s}$

$T$  intervalo de recurrencia

Fórmula de El Instituto de Investigaciones de Irrigación (India)

$$Q = \frac{Q_{\min}}{0.0283} + 2.303 \left( \frac{Q_s / 0.0283}{N_e} - \frac{Q_{\min}}{0.0283} \right) \log_{10} \left( \frac{N_e T}{T_r} \right)$$

donde

$Q_{\min}$  caudal pico mínimo en  $m^3/s$

$Q_s$  suma de los caudales picos en  $m^3/s$

$N_e$  número de eventos

$T$  intervalo de ocurrencia

$T_r$  número de años de registro

## **CAPÍTULO 5. METODOLOGÍAS PARA ESTIMAR LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS EN CUENCAS**

En este capítulo se describen distintas metodologías para estimar la producción de sedimentos. En términos generales, dichas metodologías se agrupan en: los métodos con base en medición directa y los métodos con base de modelación matemática. Estos últimos a su vez se dividen en métodos: empíricos, estocásticos y de simulación de procesos físicos.

### **5.1 Métodos con base en medición directa**

Este tipo de métodos para estimar la producción de sedimentos se fundamentan en mediciones directas hidrológicas, hidráulicas y de sedimentos en la sección de estudio.

Se pueden dividir en tres categorías: muestreo sobre el cauce, sedimentación en embalses y análisis regionales (USACE, 1995). A continuación se describen los métodos: registro de descarga diaria de sedimentos, periodo de acumulación de carga de sedimentos por periodos, curva de descarga de sedimentos y duración de flujo, y curvas de producción de sedimentos y volumen de agua anual.

#### **Registro de descarga diaria de sedimentos**

Se obtiene de comparar los hidrogramas con los registros de concentración diaria de sedimentos. Los registros expresan la concentración de los sedimentos en mg/l, que pueden convertirse a Ton/día, por medio de la Ecuación 3- 1 (USACE, 1995):

$$Q_s = 0.0864QC_k$$

$Q_s$ : descarga de sedimentos (Ton/día)

0.0864: convierte  $m^3/s$  a Ton/día

$Q$ : gasto líquido diario de descarga ( $m^3/s$ )

C: concentración de sedimentos por día (ppm)

k: convierte ppm a mg/l

Si:  $C < 16,000$  ppm entonces  $k=1$

$$C \geq 16,000 \text{ ppm entonces } k = \frac{\frac{10^6}{C S_w} \frac{1}{S_w + 1}}{C S_c}$$

C: concentración de sedimentos por día (ppm)

Ss: peso específico de las partículas de sedimento.

Sw: peso específico del agua.

Mediante este método normalmente es registrada solo la carga de sedimentos, no obstante, los muestreadores no miden los últimos 10-15 cm de la columna de agua, lo que representa entre el 5-15% de la concentración de sedimentos, por lo tanto este porcentaje es añadido a la carga suspendida para así obtener el valor (USACE; 1995).

### **Periodo de acumulación de carga de sedimentos por periodos**

Este método calcula la producción de sedimentos después que los valores de concentración de sedimentos han sido medidos ya sea por día o por hora. Una vez teniendo estos valores, se suma el promedio de la producción de sedimentos descargada para la estimación de periodos que van de horas a años (USACE, 1995).

### **Método de la curva de descarga de sedimentos y duración del flujo**

Este método consiste en una integración de la curva de duración de flujo con la curva de descarga de sedimentos en un punto a la salida de la cuenca. Mediante este método es posible estimar la cantidad de material sólido que pasará

en un mismo punto de aforo durante un año, para ello es necesario contar con registros en un mismo punto de aforo.

### **Curvas de producción de sedimentos y volumen de agua anual**

En lugares en donde se llevan a cabo batimetrías de forma periódica en presas, es posible calcular el sedimento que se ha depositado mediante la sustracción de los resultados de las batimetrías. De igual forma, si se conoce el volumen de agua que llega a un embalse en un cierto periodo, es posible comparar gráficamente los sedimentos depositados con el volumen de agua generado para un periodo común y observar su evolución.

Los sedimentos que se depositan en un embalse, se encuentran relacionados con la producción de los mismos en una cuenca a través de un concepto conocido como eficiencia de atrapamiento de sedimentos, el cual expresa el porcentaje de sedimentos que son retenidos por una presa. La metodología de Brune es de las más aceptadas para calcular la eficiencia de atrapamiento. De acuerdo a este método, la producción de sedimentos que entra a un vaso ( $S_a$ ) será el volumen de material azolvado ( $S_R$ ) entre la eficiencia de atrapamiento de sedimentos ( $T_e$ ), así:

$$T_e = \frac{q_{S_{in}} - q_{S_{out}}}{q_{S_{in}}}$$

$T_e$ : Eficiencia de atrapamiento

$q_{S_{in}}$ : Carga de sedimentos entrante al embalse.

$q_{S_{out}}$  : Carga de sedimentos saliente.

$$S_a = \frac{S_R}{T_e}$$

$S_R$ : Material depositado en el vaso.

$S_a$ : Producción de sedimentos que entra al vaso

Si no se cuenta con datos en la presa de la cuenca que se desea estudiar, se recurre a información del embalse más cercano que tenga características similares en cuanto a clima, topografía, uso de suelo y superficie de cuenca. Considerando este dato, se tiene dato un aproximado de los sedimentos que podrían producir en la cuenca de estudio. De acuerdo a algunas agencias de investigación en los Estados Unidos, este es uno de los mejores métodos de estimación de producción de sedimentos. Existen algunas recomendaciones para transferir datos de una cuenca a otra, por ejemplo, que el área de una cuenca de estudio esté entre 0.50 y 2 veces la superficie de la cuenca de donde se tomarán los datos (producción de sedimentos en cuencas).

Es importante considerar que resulta engañoso comparar la concentración de sedimentos de dos o más puntos sobre una misma corriente dado que la velocidad del flujo será diferente, lo que alterará la concentración de dichos sedimentos. En este caso, lo recomendable es comparar la producción de sedimentos acumulada para un mismo periodo.

## **5.2 Métodos de modelación matemática**

Estos métodos se dividen en: métodos empíricos o de agrupación de variables, métodos estocásticos y métodos de simulación de procesos físicos. Los más empleados debido a su simplicidad, son los métodos empíricos, no obstante los más acertados son los métodos de procesos físicos.

### **Métodos empíricos o de agrupación de variables**

Dentro de estos métodos, los más populares son el método de Dendy y Bolton, método del Comité Interinstitucional del Pacífico Suroeste, método Tatum para el sur de California, ecuación de Anderson, ecuación de Branson, ecuación de Flaxman, ecuación universal de pérdida de suelo (USLE, por sus siglas en inglés), USLE modificada (MUSLE por sus siglas en inglés), MUSLE revisada (RUSLE por sus siglas en inglés), segunda versión de RUSLE (RUSLE2), tasa de descarga de sedimentos y la eficiencia de atrapamiento de sedimentos.

### ***Método de Dendy y Bolton***

Empleando datos de aproximadamente 800 datos de embalses en los E.U.A., Dendy y Bolton desarrollaron una ecuación para estimar la producción de sedimentos en cuencas, empleando aquellas cuyas superficies se encontraban entre los 2.5 a 75,000 km<sup>2</sup> de superficie y precipitaciones menores a 2 pulgadas. La ecuación presenta buenos resultados en cuencas grandes (de acuerdo a la superficie indicada en párrafos anteriores) y no montañosas.

Algunos valores de la ecuación se modifican dependiendo de la superficie y el escurrimiento medio anual, esto es:

$$\begin{array}{ll} \text{Si } Q < 2 \text{ pulg:} & S = 1280 Q^{0.46}(1.43 - 0.26 \log A) \\ \text{Si } Q \geq 2 \text{ pulg:} & S = 1958 Q^{0.46}(1.43 - 0.26 \log A) \end{array}$$

Donde:

S: producción de sedimentos en la cuenca (Ton/milla<sup>2</sup>)

Q: escurrimiento medio anual (inch))

A: área de la cuenca (millas<sup>2</sup>)

### ***Método del Comité Interinstitucional del Pacífico Suroeste (PSIAC por sus siglas en inglés)***

Con fines de planeación de estructuras hidráulicas, se diseñó este método para cuencas del Oeste de E.U.A. con superficies mayores a 10 mi<sup>2</sup>, dicho método depende de nueve parámetros que afectan la producción de sedimentos en cuencas, estos son clima, topografía, geología, edafología, superficie del suelo, erosión de las zonas altas, erosión-transporte-depósito, escurrimientos y uso del suelo.

A cada uno de los factores se le asigna un valor numérico que va de 25 a -10, estos valores se suman; la producción de sedimentos se obtiene comparando el total de la suma de los valores los cuales a su vez se relacionan con la producción de sedimentos (Ton/ha/año) (Cuadro 18). Para estimar cada factor de forma objetiva Johnson y Gebhard propusieron una serie de relaciones (Walling et al, 1985). Este método es capaz de evaluar cambios en la producción de sedimentos debido al uso de suelo. El método ha sido probado comparando sus resultados con los obtenidos en campo y se ha encontrado una relación satisfactoria.

**Cuadro 18. Valores numéricos del PSIAC respecto a la producción de sedimentos.**

<b>Rangos de la suma de factores PSIAC</b>	<b>Producción de sedimentos (Ton/ha/año)</b>
>100	>18.3
75-100	6.1-18.3
50-75	3.0-6.1
25-50	1.2-3.0
0-25	<1.2

***Método Tatum para el Sur de California***

Este método, empleado para estimar la producción de sedimentos en regiones áridas y montañosas de California, utiliza nomogramas mediante los cuales se llevan a cabo los cálculos empleándose una ecuación con factores de ajuste para el tamaño, forma y pendiente de la superficie de drenado, precipitación en 3 horas, porcentaje de superficie incendiada y los años transcurridos entre el incendio y el flujo (USACE, 1995).

### ***Ecuación de Anderson (NO)***

El estudio de la respuesta de la carga de sedimentos suspendidos descargados en cuencas de superficie variada, llevó al desarrollo de este método. La zona de estudio fueron las montañas y valles de la zona oeste de Oregon, en la cual se analizaron los registros de carga suspendida de sedimentos en 29 cauces durante un periodo comprendido entre 1 y tres años (PSIAC, 1974).

Para relacionar el cálculo del promedio anual de la descarga de sedimentos suspendidos con las características de la cuenca se efectuó un análisis de multi-regresión. El método incluye la predicción de la diferencia entre la erosión actual con la erosión potencial considerando variaciones en el uso del suelo. Las ecuaciones generadas por el desarrollo del método son:

$$\text{Log ss} = 3.721 + 0.116\text{LogA} + 1.673\text{LogFQp} + 1.244\text{LogMAq} + 0.401\text{LogS} + 0.0486 \text{ SC} + 0.482 \text{ S/A} + 0.0280 \text{ BC} - 0.0036 \text{ OC} + 0.942 \text{ R} + 0.0086 \text{ RC}$$

$$\text{SS} - \text{SSf} = 1.639 + 0.240 \text{ C} + 0.00514 \text{ EB}$$

Donde:

A: área de la cuenca (mi<sup>2</sup>)

S/A: tasa de acumulación de la superficie (cm<sup>2</sup>/gm pct)

BC: porcentaje de la cuenca cultivada de granos.

OC: porcentaje de la cuenca cultivada de no granos.

R: porcentaje de la cuenca que cubren las carreteras.

RC: porcentaje de la cuenca talada en los últimos 10 años.

ss: promedio anual de la carga de sedimentos suspendidos (decenas de Ton/mi<sup>2</sup>/año)

FQp: descarga pico promedio del mes con mayor descarga, dividido entre la descarga promedio anual.

MAq: escurrimiento medio anual (ft<sup>3</sup>/mi<sup>2</sup>)

S: pendiente de las corrientes.

SC: porcentaje de limo y arcilla. Porcentaje de partículas de diámetro menor que 0.05mm

SS: promedio anual de la carga de sedimentos suspendidos (miles de Ton/año)

SSf: promedio anual de la carga de sedimentos suspendidos de zonas forestadas (miles de Ton/año)

C: área de la cuenca sin vegetación y cultivada (mi<sup>2</sup>).

EB: longitud del cauce principal (ft).

### ***Ecuación de Branson (SI)***

Para el desarrollo de esta ecuación, se emplearon 6 años de mediciones de cobertura vegetal y 15 años de registros hidrológicos en 17 cuencas cercanas a Grand Junction, Colorado; en ellas, Branson realizó una investigación entre las variables geomorfológicas (tasa del relieve, ángulo de la intersección del cauce, la pendiente principal, la densidad de drenaje y la forma de la cuenca), cobertura de la cuenca y mediciones hidrológicas (PSIAC, 1974).

Empleándose un análisis de regresión estadística, se desarrolló una ecuación de producción de sedimentos, la cual relaciona la producción de sedimentos con la tasa de relieve y el porcentaje de suelo sin vegetación en una cuenca (PSIAC, 1974).

$$\hat{Y} = 40.87X_1 + 0.03X_2 - 1.27$$

Donde:

$\hat{Y}$ : producción de sedimentos promedio anual estimada (acre ft/mi<sup>2</sup>)

$X_1$ : tasa de relieve

$X_2$ : porcentaje de suelo sin vegetación en la cuenca

### ***Ecuación de Flaxman (NO)***

Esta ecuación fue obtenida mediante un análisis de regresión múltiple y es utilizada para estimar la producción de sedimentos media anual derivada de la erosión laminar.

Los datos obtenidos de mediciones de cuatro características de la cuenca, explican las variaciones existentes en la generación de sedimentos; los parámetros que se emplean son el factor climático (precipitación media anual y temperatura promedio anual), la pendiente media de la cuenca y dos factores relacionados con el suelo (diámetro de partículas y porcentaje de acumulación del suelo).

Si las tasas de sedimentos medidas son bajas, no se obtiene una buena correlación entre la producción de sedimentos calculada y la observada. El nivel de correlación se incrementa al tener una mayor cantidad de muestras de suelo, al ajustar el factor de cobertura vegetal por medio de la experiencia o el trabajo en campo y al realizar cálculos de producción de sedimentos para un plazo largo (PSIAC, 1974).

$$\text{Log}(Y + 100) = 524.372 - 270.565 \text{Log}(X1 + 100) + 6.417 \text{Log}(X2 + 100) - 1.702 \text{Log}(X3 + 100) + 4.033 \text{Log}(X4 + 100) + 0.992 \text{Log}(X5 + 100)$$

Donde:

Y: producción de sedimentos media anual (Ton/mi<sup>2</sup>)

X1: tasa de la precipitación media anual y la temperatura promedio anual (inch/°F).

X2: pendiente de la cuenca.

X3: porcentaje del diámetro de las partículas del suelo mayores que 1.00 mm.

X4: porcentaje de acumulación del suelo, porcentaje del diámetro de las partículas menores que 0.002mm.

X5: 50% de probabilidad de la descarga pico (ft/s/mi<sup>2</sup>)

### ***Ecuación de Pérdida de Suelo (USLE por sus siglas en inglés)***

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) desarrollada por Wischmeier y Schmidt en el año de 1978, es un modelo empírico usado para evaluar las pérdidas de suelo por erosión laminar y surcos. Su bondad depende del rigor con que sus componentes multiplicativas reproduzcan las condiciones del medio físico.

Dicha ecuación cuantifica el material sólido que se puede erosionar:

$$A = R * K * SL * CP$$

En donde: A (ton/ha) es la pérdida anual de suelo,

R (ton/ha) es el índice de erosividad asociado a la lluvia,

K (ton/ha) es el factor de erodabilidad del suelo,

L (m) es la longitud de la pendiente,

S (%) es el porcentaje de pendiente,

C (adimensional) es un factor relativo a la cobertura vegetal u otros materiales que impidan el impacto de la lluvia en el suelo desnudo,

P (adimensional) son las prácticas mecánicas de control de la erosión y conservación de suelos.

Para cada uno de los componentes de la fórmula, existen varios métodos de cálculo de acuerdo con el tipo de información disponible y las características de la zona de estudio (Escalante, C.A.2005).

### ***Tasa de descarga de sedimentos (DR)***

La tasa de descarga de sedimentos (DR) establece la relación existente entre la producción de sedimentos en un determinado punto ( $Y_s$ ) y la erosión superficial que sufre la cuenca medida en el mismo punto ( $A$ ).

$$Dr = \frac{Y_s}{A}$$

El DR se ve afectado por la textura del material erosionado, el uso del suelo, clima, corrientes locales y el relieve. Esta relación arroja valores con una aproximación muy baja, debido a que la erosión y las concentraciones de sedimentos pueden variar en gran medida para cada cuenca.

Se han propuesto distintas relaciones para el cálculo del DR, cada una involucra distintos parámetros como el área de la cuenca, la pendiente media del curso principal expresada en (%), el área forestada, entre otros.

### ***Eficiencia de atrapamiento de sedimentos (Te)***

Como ya se mencionó en el apartado en donde se describe al método “Curvas de producción de sedimentos y volumen de agua anual”, la eficiencia de atrapamiento de sedimentos ( $Te$ ) resulta de la relación entre la parte de material que entra a un embalse y es depositado o atrapado y el material entrante y se define con la siguiente ecuación:

$$Te = \frac{q_{S_{in}} - q_{S_{out}}}{q_{S_{in}}}$$

Donde:

$Te$ : Eficiencia de atrapamiento

$q_{S_{in}}$ : Carga de sedimentos entrante al embalse.

$q_{S_{out}}$  : Carga de sedimentos saliente.

La eficiencia de atrapamiento depende de varios factores, estos son la velocidad de caída de las partículas y el tiempo de retención del escurrimiento y de los sedimentos. A su vez, la velocidad de caída de las partículas se rige por los diámetros de las mismas. Por otro lado, el tiempo de retención del escurrimiento y de los sedimentos, dependerá del volumen de la avenida, el gasto base, el gasto pico y las características del embalse.

Existen métodos empíricos y métodos teóricos para determinar  $T_e$ , cabe mencionar que la eficiencia de atrapamiento, es particular para cada embalse.

- Métodos empíricos:

- Curva de  $T_e\%$  y la tasa de capacidad de la cuenca de Brown.

- Curva de  $T_e\%$  y la tasa de capacidad de volumen de entrada de Brune.

- Curva de  $100\%-T_e\%$  y el índice de sedimentación de Churchill.

- Curva de  $100\%-T_e\%$  y el índice de sedimentación de Borland.

- Curva de  $T_e\%$  y el índice de sedimentación de Trimble y Bube.

- Métodos empíricos:

- Descarga constante.

- Descarga variable.

- Modelos teóricos mediano plazo.

La mayoría de los métodos empíricos fueron desarrollados para cuencas grandes, otra observación importante es que muchos de los datos empleados en el desarrollo de estos métodos tienen periodos de muestreo que va de meses a

algunos años, por lo que quizás no fue registrado ningún evento extremo, lo que ocasionaría que el Te no corresponderá al que fue estimado.

### **Métodos estocásticos**

Dado que la producción de sedimentos tiene como un factor determinante a la precipitación, es posible modelarla de forma estocástica. Sin embargo, la desventaja es que los métodos agrupados en esta categoría, no muestran de forma adecuada lo que sucede en una cuenca cuando se tienen distintos usos de suelo.

### **Métodos de Simulación de Procesos Físicos**

En este tipo de métodos, la precipitación y la erosionabilidad del suelo son los procesos principales que controlan la producción de sedimentos; dichos procesos son analizados por separado para que el modelo sea más sensible. La medición en campo es un factor importante para tener un modelo confiable, además de un claro entendimiento del mismo.

Algunos de los métodos de simulación de procesos son SHETRAN, ANSWERS; EUROSEM, proyecto de predicción de erosión hídrica (WEEP por sus siglas en inglés) y el método de Negev. A continuación se describen brevemente cada uno de ellos.

#### ***SHETRAN***

Se trata de un modelo de distribución espacial con base física, puede utilizarse para construir y/o modelar el ciclo hidrológico completo o por partes para cualquier zona geográfica. Se fundamenta en el hecho de que varios caudales y procesos de transporte pueden ser modelados por medio de representaciones de diferencias finitas de las ecuaciones diferenciales parciales de masa, momento y conservación de energía o por ecuaciones empíricas producto de la

experimentación. Los parámetros que se incluyen en el modelo pueden ser medidos y tienen un significado físico (resumen la medición de sedimentos en México).

### ***ANSWERS***

Este modelo se desarrolló para la planeación y evaluación del efecto del manejo de uso del suelo y la calidad del agua, así como para evaluar la problemática referente a la contaminación de fuentes no puntuales y también para definir el costo de soluciones para cuencas agrícolas (Beasley et al., 1980).

Este programa está estructurado con un modelo hidrológico, uno de desprendimiento-transporte-depósito de sedimentos y rutinas para describir el movimiento del agua superficial, subsuperficial y el flujo en cauces. (Beasley et al., 1980).

### ***EUROSEM***

Este modelo cuyas siglas significan European Soil Erosion Model (EUROSEM) o Modelo Europeo de Erosión de Suelo, simula el transporte de sedimentos, erosión y depósito en canalillos y entre canalillos durante una tormenta, tanto al nivel de parcela como de cuenca. El modelo proporciona valores para el escurrimiento total, la pérdida de suelo total, el hidrograma de la tormenta y su sedimentograma. La simulación que presenta el EUROSEM se considera muy buena en comparación con otros modelos de erosión.

### ***Método de Negev***

Este método, propone la simulación de la carga suspendida de sedimentos partiendo de datos de lluvia y gasto total así como la simulación del flujo superficial mediante el Modelo de la Cuenca de Stanford. El modelo se desarrolló a partir de mediciones realizadas en los ríos Napa y San Antonio ambos

en California, E.U.A. Otras condiciones consideradas a nivel de cuenca fueron características de suelo (toneladas de suelo salpicado, suelo salpicado removido, área de la cuenca que es impermeable, etc.), escurrimiento y sedimento (carga de lavado, de fondo, tamaño de grano, etc.).

En el caso de la simulación de la carga suspendida de sedimentos, se modela tanto la producción de sedimentos, como el proceso de transporte, empleándose para ello, una computadora. Cabe destacar que este modelo identifica las dos fuentes principales de sedimentos; la superficie de la cuenca y los escurrimientos, siendo el flujo total el parámetro más significativo en este último.

El modelo fue probado en dos cuencas con resultados muy aproximados del registro medido de la carga suspendidas de sedimentos, modificando únicamente los coeficientes empleados (PSIAC, 1974).

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS

### Caracterización morfométrica.

La microcuenca es de tipo exorréico, tiene como punto de salida la Presa Jalpan. La microcuenca tiene elevaciones máximas superiores a los 3500 metros y las mínimas son superiores a los 700 metros, lo cual en algunos puntos marca un drástico cambio en la pendiente.

Mediante el empleo del software ArcView GIS 3.2 y el uso de la extensión DetermHidro, el cual se alimenta de los valores de altitud (en este caso con curvas de nivel cada 20 metros y la delimitación del área de estudio) se determinó que el cauce principal tiene una longitud de 35,449.75 m (Figura 20), el coeficiente de compacidad es de 1.83 y el índice de forma de 0.31. El perfil del cauce principal nos muestra un cambio drástico en la pendiente en los primeros 10 000 metros, tendiendo después a estabilizarse.

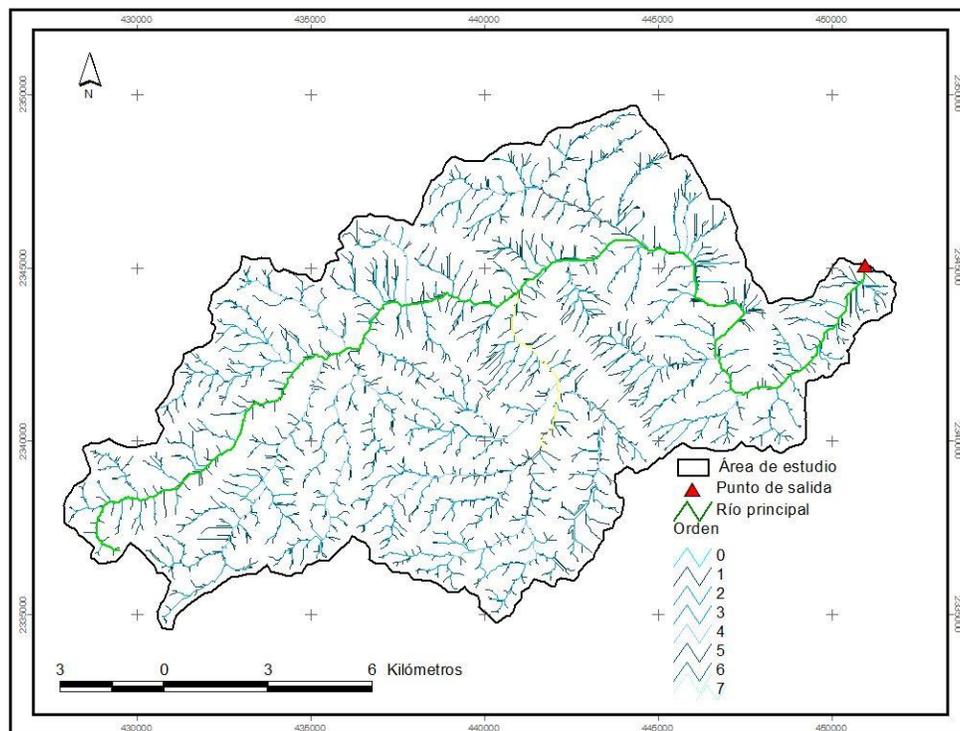


Figura 20. Sistema de drenaje y cauce principal

## Trazo de polígonos en el mapa de uso de suelo y vegetación base

El mapa de uso de suelo y vegetación generado se muestra en la Figura 21) y las superficies que abarcan cada uno de dichos usos de suelo y vegetación se muestra en el Cuadro 19.

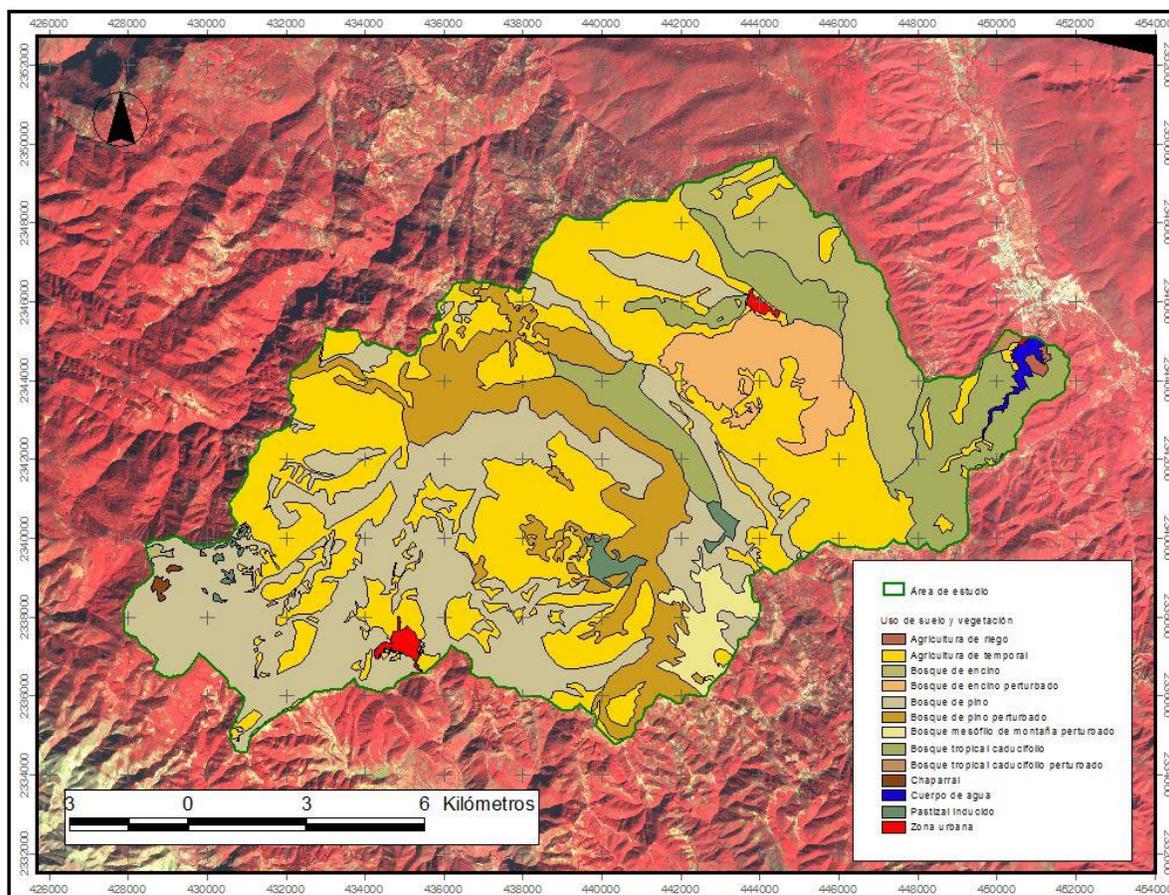


Figura 21. Mapa de uso de suelo y vegetación.

Cuadro 19. Uso de suelo y vegetación.

USO DE SUELO Y VEGETACIÓN	Hectáreas	Porcentaje
Agricultura de riego	25.51	0.13
Agricultura de temporal	6,548.01	34.57
Bosque de encino	1,325.74	7.00
Bosque de encino perturbado	883.82	4.67
Bosque de pino	5,469.24	28.88
Bosque de pino perturbado	2,104.91	11.11

<b>USO DE SUELO Y VEGETACIÓN</b>	<b>Hectáreas</b>	<b>Porcentaje</b>
Bosque mesófilo de montaña perturbado	365.11	1.93
Bosque tropical caducifolio	1,850.45	9.77
Bosque tropical caducifolio perturbado	25.50	0.13
Chaparral	20.48	0.11
Cuerpo de agua	67.97	0.36
Pastizal inducido	171.04	0.90
Zona urbana	82.81	0.44
<b>TOTAL</b>	<b>18,940.59</b>	<b>100.00</b>

### Resultados del programa LAANRUN

En el Cuadro 20 se muestran los métodos que fueron empleados para el cálculo del gasto; en la columna de observaciones se señala el motivo por el cual no fueron aplicados algunos de los métodos. En la sección de Anexos se presentan las hojas de resultados de cada una de las variantes de los métodos utilizados.

**Cuadro 20. Métodos empleados.**

<b>MÉTODO</b>	<b>Variante</b>	<b>Aplicado (A) No aplicado (NA)</b>	<b>Observaciones o falta de disponibilidad de datos</b>
Envolventes	General	A	
	Fórmula para estimar el gasto (Q) en la India	A	
	Dickens	A	
	Ryves	A	
	Madras	A	
	Hyderabad	A	
	Leopold y Miller	A	
	Baird y McIlwraith	A	
	Creager	A	
Lowry	A		
Racional	General	A	Intensidad de la precipitación mm/hr Coeficiente C

<b>MÉTODO</b>	<b>Variante</b>	<b>Aplicado (A) No aplicado (NA)</b>	<b>Observaciones o falta de disponibilidad de datos</b>
	Isakowski	NA	Coeficiente de la morfología de la cuenca
	FAA	NA	El método se usa exclusivamente en el proyecto del drenaje interior de los aeropuertos
	ARMCO	NA	El método se usa exclusivamente en el proyecto del drenaje interior de los aeropuertos
	Gregory-Arnold	NA	Coeficientes C y E Precipitación en 24 horas
Hidrograma	Curva S	NA	Duración de la lluvia (tiempo de concentración)
	Clark	NA	Intervalo de tiempo
Hidrograma unitario sintético	Chow	NA	Este método es aplicable a cuencas no urbanas con un área menor de 25 km <sup>2</sup>
	Triangular	A	
	Adimensional SCS	NA	Tiempo de retraso Duración de la lluvia (tiempo de concentración)
	Snyder	NA	C <sub>p</sub> coeficiente basado en cuencas instrumentadas en la misma región
Empíricos	Talbot	NA	Éste método se usa de forma casi exclusiva, en el proyecto de obras “menores” como lo son las de drenaje y alcantarillado, aquellas cuya longitud sea menor de 6m

MÉTODO	Variante	Aplicado (A) No aplicado (NA)	Observaciones o falta de disponibilidad de datos
	Bürkli-Ziegler	NA	La fórmula se utiliza para el cálculo de atarjeas y colectores en los sistemas de drenaje ciudadanos
	Horton	NA	Este método es aplicable especialmente al diseño de las obras de drenaje del interior de los aeropuertos
	Sánchez Bribiesca	NA	calcular el gasto máximo de una cuenca pequeña (hasta 100 km <sup>2</sup> )
	Seschapa-Rao, Asenzo y Harp	NA	Se aplica a cuencas menores de 13 km <sup>2</sup>
	Gutiérrez-Reyes	A	Método empírico aplicable a ríos con planicie de inundación
	Thomas	A	
	Waananen y Crippen	A	
TR=2.33 años	Rodda	NA	Densidad de drenado km/km <sup>2</sup> Precipitación media
	NERC	NA	Frecuencia de descarga Coeficiente (de suelo y de pendiente)
	Mosley	NA	Área de la sección transversal del canal Radio de profundidad máxima/profundidad promedio
	Beable	NA	Precipitación en 24 horas para un periodo de retorno de dos años
Mosley	Gasto medio anual	NA	Se aplica en bordos y/o canales
	Descarga de los bordos	NA	Se aplica en bordos y/o canales

<b>MÉTODO</b>	<b>Variante</b>	<b>Aplicado (A) No aplicado (NA)</b>	<b>Observaciones o falta de disponibilidad de datos</b>
Relacionan el área de la cuenca y otras características	Burge	A	
	Kinninson y Colby	A	
Relacionan características de la cuenca y lluvia	Pettis	NA	Coeficiente C
	Potter	NA	Factor de lluvia
	Mc Math	NA	Intensidad de la precipitación
	Possentis	NA	Valor de K Coeficiente HM
Relacionan la frecuencia de los gastos y área de la cuenca	Fuller	NA	Coeficiente C, intervalo de ocurrencia
	Comisión de Energría y Central de Agua de la India	NA	Coeficiente Cp
	Instituto de Investigaciones de Irrigación	NA	Suma de los gastos pico, número de eventos,

## Resultados de las mediciones en campo

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la determinación de los sólidos sedimentables en la presa.

<b>Análisis de agua- Determinación de sólidos sedimentables en aguas naturales (NMX-AA-004-SCFI-2000)</b>	
<b>Muestra</b>	<b>Sólidos sedimentables (mL/L)</b>
P. Ahuacatlán	0
P. Escanelilla (7:47am)	0
P. Escanelilla (11:24am)	0
P. Escanelilla (1:08pm)	1,6
P. Escanelilla- muestra alterada (etiqueta roja)	0.9
P. Escanelilla (31jul13)	0
Entrada cueva- muestra 1 (11:00am)	0
Entrada cueva-muestra 2 (11:10am)	0
Entrada cueva-muestra 3-alterada	0.25
Salida cueva	0
P. Jalpan (4:21pm)	0

Los resultados obtenidos del análisis de los diagramas de Hjulström y Shields se muestran a continuación:

<b>SITIO</b>	<b>V<sub>med</sub> (m/s)</b>	<b>D (m)</b>	<b>R'<sub>c</sub></b>	<b>t'<sub>c</sub></b>	
<b>Muestra 1- entrada cueva (Tirante 20%)</b>					
Orilla (tirante 42cm)	0.1	0.002	00	.0483	
Centro (tirante 37cm)	0.1	0.002	00	.0483	

SITIO	$V_{med}$ (m/s)	D (m)	$R'_c$	$t'_c$	
Orilla (tirante 42cm)	0.07	0.0015	05	.0438	
<b>Muestra 1- entrada cueva (Tirante 60%)</b>					
Orilla (tirante 42cm)	0.05	0.0008	0	.0372	
<b>Muestra 2- entrada cueva</b>					
Prueba 1	1.17	0.1	17000	.0723	<b>.06</b>
Prueba 2	1.62	0.11	78200	.0729	<b>.06</b>
Prueba 3	1.49	0.105	56450	.0727	<b>.06</b>
<b>Muestra Ahuacatlán</b>					
Prueba 1	0.23	0.007	610	.0603	<b>.06</b>
Prueba 2	0.06	0.001	0	.0399	
<b>Muestra Bado</b>					
Prueba 1	0.14	0.003	20	.0531	
<b>Puente Escanelilla (Tirante 20%)</b>					
Tirante 26cm	0.45	0.02	000	.0669	<b>.06</b>
Tirante 35cm	0.42	0.017	140	.0661	<b>.06</b>
Tirante 40cm	0.1	0.002	00	.0483	
Tirante 46cm	0.09	0.0018	62	.0469	
Tirante 53cm	0.07	0.0015	05	.0438	
<b>Puente Escanelilla (Tirante 60%)</b>					
Tirante 26cm	0.49	0.025	2250	.0677	<b>.06</b>
Tirante 35cm	0.42	0.017	140	.0661	<b>.06</b>

SITIO	$V_{med}$ (m/s)	D (m)	$R'_c$	$t'_c$
Tirante 40cm	0.09	0.0018	62	.0469
Tirante 53cm	0.1	0.002	00	.0483

Los valores graficados en el diagrama de Shields se muestran en la Figura 22.

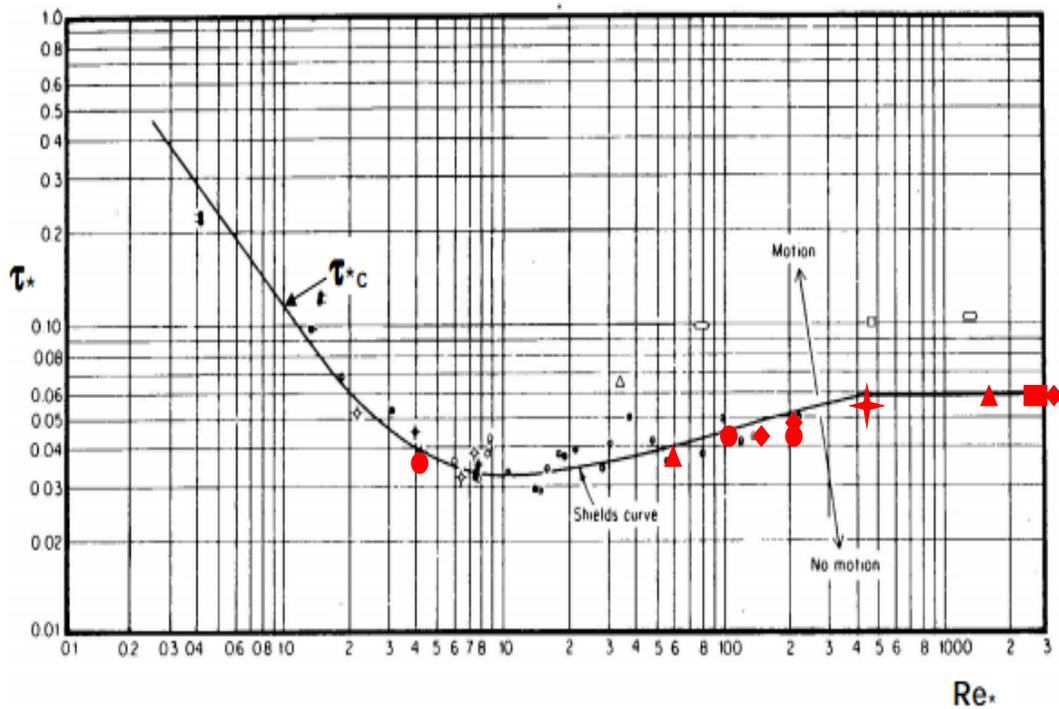


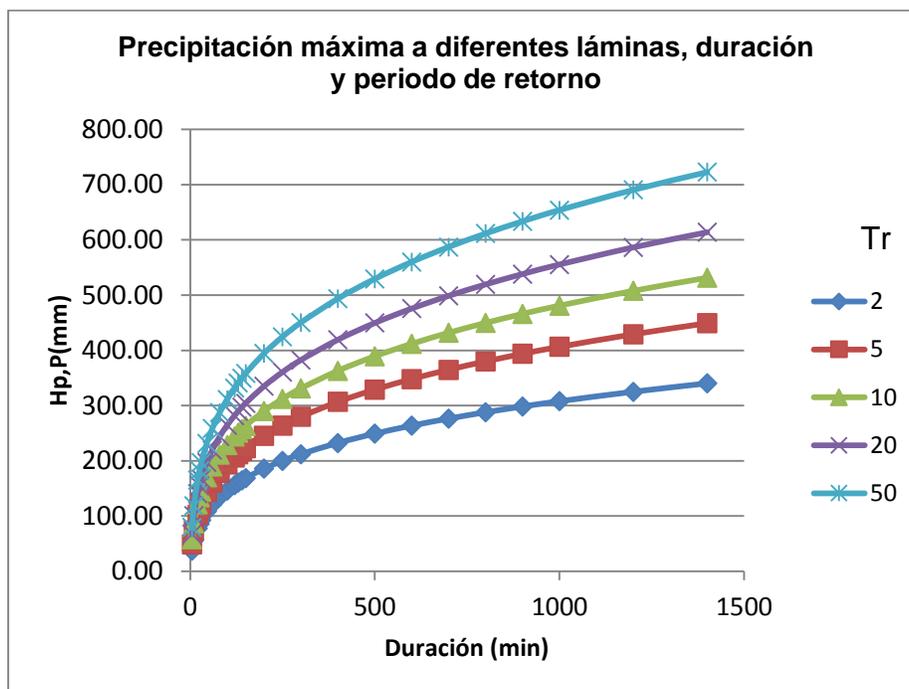
Figura 22. Resultados en diagrama de Shields.

## Tratamiento de los datos de lluvia

En el Cuadro 21 se muestra las intensidades de la precipitación obtenidas para diferentes periodos de retorno y duración, mientras que en la Figura 23 se muestra la gráfica correspondiente a estos valores.

**Cuadro 21. Intensidad de la precipitación (mm) a diferentes duraciones y periodos de retorno.**

Duración (minutos)	Periodo de retorno					
	2	2.33	5	10	20	50
5	37.32	39.31	49.26	58.29	67.33	79.26
10	55.87	58.85	73.74	87.26	100.78	118.65
20	77.92	82.08	102.85	121.70	140.56	165.48
25	85.88	90.45	113.34	134.12	154.90	182.37
30	92.71	97.65	122.37	144.80	167.23	196.89
45	109.08	114.89	143.97	170.36	196.75	231.64
60	121.74	128.23	160.67	190.13	219.59	258.53
80	135.34	142.55	178.63	211.38	244.13	287.42
100	146.59	154.40	193.47	228.94	264.41	311.30
120	156.25	164.58	206.23	244.04	281.85	331.83



**Figura 23. Precipitación (mm) estimada a distintos periodos de retorno y duraciones.**

## Resultados RUSLE

### DATOS DISPONIBLES EN LA CUENCA

A continuación se muestran los datos básicos siguientes para realizar la estimación del aporte de sedimentos en la unidad base de estudio.

#### Datos topográficos

Área total de la unidad base de estudio	AT (km <sup>2</sup> )	189.41
Agricultura de riego	km <sup>2</sup>	0.26
Agricultura de temporal	km <sup>2</sup>	65.48
Bosque de encino	km <sup>2</sup>	13.26
Bosque de encino perturbado	km <sup>2</sup>	8.84
Bosque de pino	km <sup>2</sup>	54.69
Bosque de pino perturbado	km <sup>2</sup>	21.05
Bosque mesófilo de montaña perturbado	km <sup>2</sup>	3.65
Bosque tropical caducifolio	km <sup>2</sup>	18.50
Bosque tropical caducifolio perturbado	km <sup>2</sup>	0.25
Chaparral	km <sup>2</sup>	0.20
Cuerpo de agua	km <sup>2</sup>	0.68
Pastizal inducido	km <sup>2</sup>	1.71
Zona urbana	km <sup>2</sup>	0.83
Longitud del cauce principal	L (m)	35,449.75
Pendiente topográfica equivalente	S (%)	6.58
	S (m)	(0.0658)
Desnivel máximo entre cotas	$\Delta h$ (m)	2,333.56

### Datos hidroclimatológicos Datos

Temperatura media anual	T grados Centígrados	19.00
Precipitación media anual	Hp (mm)	883.33
Tiempo de concentración	Tc (hr)	2.95
Intensidad máxima en 30 minutos	I30 (mm/h)	89.00
Condiciones medias de tormentas I30	Al año	10.00

### PÉRDIDA DE SUELO

En todo estudio de sedimentos se aconseja iniciar el cálculo con la formulación general presentada por el Departamento de Conservación de Suelos de Estados Unidos, en donde el aporte de sedimentos está en función del área de la cuenca (Strand, 1977; Gottschalk, 1964). Los detalles de esta estimación se detallan el Cuadro 22.

**Cuadro 22. Aporte de sedimentos en función del área de la cuenca**

<b>Área de la cuenca, en km<sup>2</sup></b>	<b>Aporte medio de sedimentos, en m<sup>3</sup> año / km<sup>2</sup></b>
< 25.9	1810
25.9 a 259.0	762
259.0 a 2590.0	481
> 2590.0	238

Según la relación anterior para un área de 189.41 km<sup>2</sup> se tiene un aporte medio de sedimentos de 762 m<sup>3</sup> por año por unidad de área; lo que daría un total de **144,330.42 m<sup>3</sup> al año**.

Asimismo, este mismo departamento de conservación de suelos utiliza los estudios presentados por Gottschalk, (1964) y González (2006) y proponen utilizar un criterio definido por la ecuación:

$$A_s = 1421.8 A_T^{-0.229}$$

D

onde

A<sub>s</sub> Aporte de sedimentos, en m<sup>3</sup> año / km<sup>2</sup>

A<sub>T</sub> Área de la cuenca, en km<sup>2</sup>

Sustituyendo los valores en esta expresión se estima que el volumen de sedimentos aportado por el área de estudio será del orden de 427.87 m<sup>3</sup> año / km<sup>2</sup>, para el área total se tendrán **81,043.12 m<sup>3</sup> al año**.

Un criterio más es el propuesto por Owen y Branson (1988), que propone que el aporte de sedimentos hasta el sitio de proyecto estará dado por:

$$A_s = 19465 \left( \frac{\Delta h}{L} \right) + 14.29 P_s - 604.8$$

donde:

A<sub>s</sub> = Aporte de sedimentos, en m<sup>3</sup> año / km<sup>2</sup>

Δh = Desnivel máximo entre cotas, en m

L = Longitud del cauce principal en metros

P<sub>s</sub> = Porcentaje de suelo desnudo en la cuenca (en este caso, se utilizará el valor obtenido del mapa de uso de suelo y vegetación para zonas urbanas).

$$As = 19465 \left( \frac{2,333.56}{35,449.75} \right) + 14.29(0.44) - 604.8$$

$$As = 1281.33 + 6.29 - 604.8$$

$$As = 682.81 \text{ m}^3 \text{ año} / \text{km}^2$$

Así pues, considerando toda el área de estudio (189.41 km<sup>2</sup>) se tiene que (682.81 x 189.41) representa un total de **129,331.64 m<sup>3</sup> al año**.

Por lo tanto tenemos los siguientes valores calculados con las distintas ecuaciones:

<b>Ecuación</b>	<b>m<sup>3</sup> al año</b>
Departamento de Conservación de Suelos de Estados Unidos	<b>144,330.42</b>
Gottschalk, (1964) y González (2006)	<b>81,043.12</b>
Owen y Branson (1988)	<b>129,331.64</b>

Si hacemos un promedio entre los valores más cercanos (Departamento de Conservación de Suelos de Estados Unidos y Owen y Branson) tenemos que el aporte de sedimentos promedio estimado es de: **136,831.03 m<sup>3</sup> al año**.

De esta forma se tiene ya un estimado del aporte de sedimentos de la unidad de estudio, ahora será necesario conocer cuál es la erosión total que se presenta dentro de ésta. La comparación de estos dos valores, permitirá estimar la cantidad de material que realmente transita dentro de la superficie de la unidad base de estudio.

### **FORMULA UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELO**

Para estimar el volumen de sedimentos susceptible de ser erosionado el área de estudio y que eventualmente será transportado, se puede emplear la Formula Universal de Pérdida de Suelo (USLE). Si bien esta formulación se utiliza como valor de referencia en estudios de sedimentación de embalses, originalmente fue desarrollada para cuantificar la pérdida de suelo en parcelas agrícolas. La formulación general para estimar la pérdida de suelo está en función de la fuerza erosiva de las gotas de lluvias que impactan en el suelo, de la longitud y pendiente del cauce principal, la cobertura vegetal, el tipo de suelo y un componente muy importante que se relaciona con las actividades de conservación de suelos y cultivos que se realizan dentro de la cuenca (Wischmeier y Schmidt, 1958). La expresión general de este procedimiento puede escribirse como:

$$A = R K SL C P$$

donde

A = Pérdida de suelo anual, en ( kg / m<sup>2</sup> ) año

R = Factor erosivo de la lluvia, en ( N / h ) año

K = Factor de tipo de suelo, en ( kg h / N m<sup>2</sup> ) o ( ton h / N ha ) SL Factor de longitud y pendiente del terreno, adimensional.

C = Factor de cobertura vegetal, adimensional

P =Factor de conservación de suelos y prácticas de cultivos, adimensional

Es importante señalar que la formula Universal de Pérdida de Suelo, estima valores de erosión del suelo (A) cuantificando el material que se pone en movimiento durante una tormenta en un cierto periodo de tiempo, generalmente un año. Mientras que las utilizadas anteriormente estiman el aporte de sedimento (As) cuantificado el material sólido que aporta la cuenca y es cuantificable a la salida de la misma (Gracia, 1997). De lo anterior se deduce que la USLE, generalmente arrojará valores superiores a los estimados por los criterios de Gottschalk y Owen y Branson.

A continuación se efectuarán los cálculos de cada uno de los términos que forman la ecuación para las condiciones del área de estudio.

### **Factor erosivo de la cuenca (R)**

Este término toma en cuenta las propiedades cinéticas de las gotas de lluvia que provocan el desprendimiento de las partículas de suelo, se sabe que el desprendimiento máximo ocurre para una tormenta tipo caracterizada por una intensidad de 30 minutos, lo que se conoce como  $EI_{30}$  o también como Índice de Wischmeier, cabe mencionar que cuando la duración de la tormenta tipo es menor a 30 minutos, se utiliza como indicador  $I_{30}$  igual al doble de la precipitación. La expresión que se muestra a continuación se obtuvo para tormentas aisladas y originalmente se obtiene en unidades  $Elu$  al año que son equivalentes a 100 (ton/acre) (in/h). Para utilizar los resultados en el sistema métrico (N /h) por tormenta, se debe multiplicar por 1.702.

$$R = 1.702 \left[ \frac{(\sum (1.213 + 0.890 \log I_j)(I_j T_j)) I_{30}}{173.6} \right]$$

donde

R = Factor erosivo de la lluvia, en (N / h) tormenta

$I_j$  = Intensidad de lluvia para un incremento de tiempo seleccionado, en mm/h

$T_j$  = Incremento de tiempo seleccionado, en h

$I_{30}$  = Intensidad máxima de una tormenta de 30 minutos de duración, en mm/h

Para nuestro sitio de estudio se tomó como referencia el dato del Programa de Manejo de la Reserva de la Biósfera en el cual se menciona que la intensidad de lluvias promedio para Ahuacatlán y Jalpan de Serra es de 48.9 mm/24 hr. A partir de esta información se realizaron los cálculos para obtener la

caracterización que pudiera tener una tormenta con una duración de 1 hora y 10 minutos, posteriormente se trazó el hietograma (Figura 24) y se calculó la intensidad máxima para 30 minutos.

Tiempo	Duración (horas)	Lamina de lluvia (mm)	Precipitación acumulada (mm)	Intensidad (mm/h)	Intensidad de lluvia en 30 minutos (mm/h)
01:40	0.167	9.73	9.73	58.28	
01:50	0.167	28.49	38.22	170.57	89
02:00	0.167	6.41	44.63	38.38	74
02:10	0.167	2.14	46.76	12.79	20
02:20	0.167	1.42	48.19	8.53	8
02:30	0.167	0.47	48.66	2.84	4
02:40	0.167	0.00	48.66	0.00	1
02:50	0.167	0.24	48.90	1.42	89

En donde la intensidad de lluvia para 30 minutos (0.5 horas) se obtiene por ejemplo, para las 2:00 horas por:

$$\text{Intensidad de lluvia en 30 minutos} = (9.73+28.49+6.41)/0.5 = \mathbf{89.26 \text{ mm/h}}$$

Viendo la tabla anterior se concluye que la intensidad máxima que ocurre en 30 minutos es de  $I_{30} = \mathbf{89 \text{ mm/h}}$  para esa tormenta en particular y aplicando la ecuación anterior se tiene que:

$$[1.213 + 0.890 \log(58.28)](58.28 \times 0.167) = 27.10$$

$$[1.213 + 0.890 \log(170.57)](170.57 \times 0.167) = 91.14$$

$$[1.213 + 0.890 \log(38.38)](38.38 \times 0.167) = 16.81$$

$$[1.213 + 0.890 \log(12.79)](12.79 \times 0.167) = 4.70$$

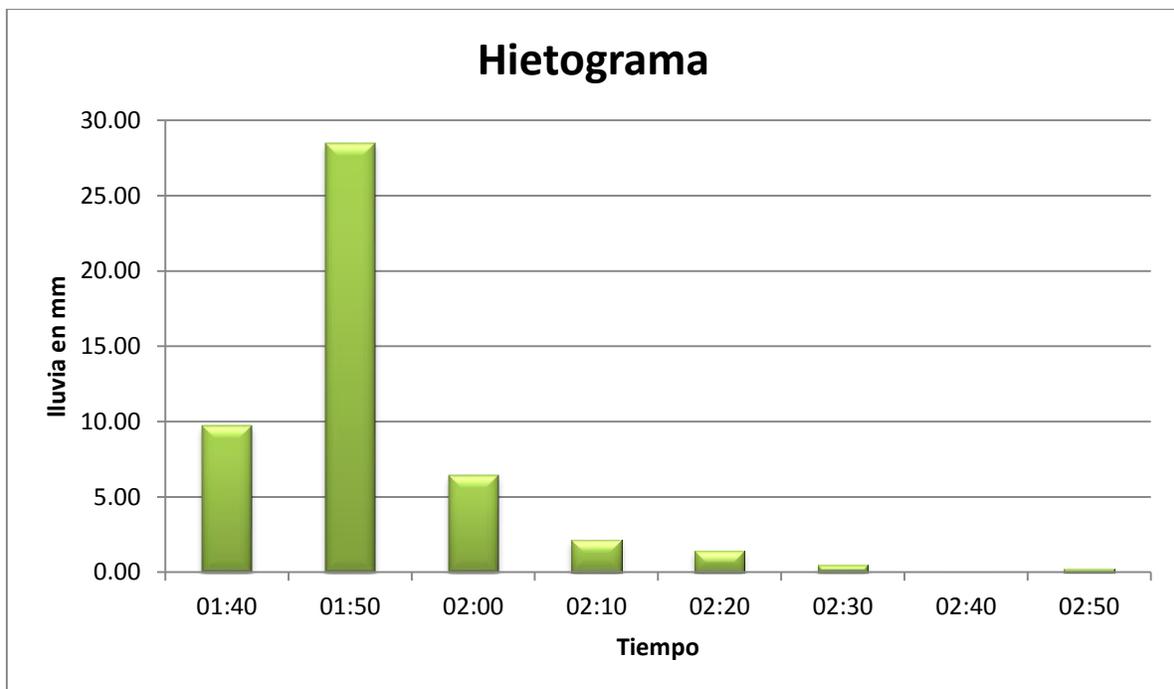
$$[1.213 + 0.890 \log(8.53)](8.53 \times 0.167) = 2.91$$

$$[1.213 + 0.890 \log(2.84)](2.84 \times 0.167) = 0.77$$

$$[1.213 + 0.890 \log(1.42)](1.42 \times 0.167) = 0.32$$

$$\text{Así pues } R = 1.702((142.74 \times 89)) / 173.6 = \mathbf{125.78 \text{ N/h tormenta}}$$

Lo anterior representa la condición de una tormenta, para una condición media anual de 10 tormentas, se tendrá entonces: **R = 1257.79 N / h] año**



**Figura 24. Hietograma de precipitación máxima**

Otra forma alternativa de obtener un valor estimado del aporte de sedimentos, para una tormenta, se tiene con la expresión siguiente (Haan., *et. al.*, 1982).

$$R_h = 0.5 R + 0.35 V_e Q_p^{0.33}$$

donde

$R_h$  = Factor hidrológico de erosivo por lluvia, en (N / h) tormenta

$V_e$  = Volumen de escurrimiento directo, en mm

$Q_p$  = Caudal máximo del escurrimiento directo, en mm/h

Así pues, en esta ecuación, pueden sustituirse los valores de caudal obtenidos por los distintos métodos y sus variantes mediante el empleo del software LAANRUN, con lo cual se obtendrán distintos resultados dependiendo del método empleado. Para el efecto de los siguientes cálculos se empleará el valor  $R = 1257.79 \text{ N / h]$  año que se obtuvo anteriormente.

### **Factor de tipo de suelo (K)**

El factor que se relaciona con el tipo de suelo fue propuesto por Wischmeier y Smith (1965) con base en estudios de parcelas cultivadas con pendientes de terreno de 9%. Este parámetro de la ecuación varía de 0.02 para suelos arenosos con materia orgánica, hasta valores de 0.60 para suelos con poco contenido de materia orgánica y del tipo limosos. El Cuadro 23 muestra los valores del factor K, para diferentes tipos de suelos (Gracia, 1997). La tabla original en donde se encuentra el detalle de los sitios, en Estados Unidos, en donde fueron realizadas las mediciones para obtener este factor, puede consultarse en (Wischmeier y Smith. 1965). Es importante mencionar que las unidades de estos valores están en unidades del sistema inglés en donde K tiene unidades de (ton / acre) Elu. Si se desean valores de K en el sistema métrico ( $\text{kg h} / \text{N m}^2$ ) es necesario multiplicar por 0.1317 (Gracia, 1997).

Para obtener un correcto valor de esta factor K, no es suficiente seleccionar el valor de la tabla 3; es necesario conocer la zona de estudio. Para este trabajo, se consideraron los datos la carta edafológica de INEGI y los recorridos en campo.

**Cuadro 23. Valores generales del factor K (en sistema inglés)**

Textura	Contenido de materia orgánica			Textura	Contenido de materia orgánica		
	0.5 %	2.0 %	4.0 %		0.5 %	2.0 %	4.0 %
Arena	0.05	<b>0.03</b>	0.02	Migajón	0.38	0.34	0.29
Arena fina	0.16	0.14	0.10	Migajón limoso	0.48	0.42	0.33
Arena muy fina	0.42	0.36	0.28	Limo	0.60	<b>0.52</b>	0.42
Arena migajonosa	0.12	0.10	0.08	Migajón arcilloso arenoso	0.27	0.25	0.21
Arena fina migajonosa	0.24	0.20	0.16	Migajón arcilloso	0.28	0.25	0.21
Arena muy fina migajonosa	0.44	0.38	0.30	Migajón arcilloso limoso	0.37	0.32	0.26
Migajón arenoso	0.27	0.24	0.19	Arcilla arenosa	0.14	0.13	0.12
Migajón arenosos fino	0.35	0.30	0.24	Arcilla limosa	0.25	0.23	0.19
Migajón arenosos muy fino	0.47	0.41	0.33	Arcilla	0.29	<b>0.21</b>	0.13

A lo largo del recorrido sobre el cauce del río (en los sitios de muestreo), en el lecho o fondo se observaron tanto sedimentos finos como limos y arcillas no consolidadas y consolidadas, arenas y gravas que iban de subangulosas a redondeadas, así como canto rodado y grandes fragmentos de roca. Derivado de estas observaciones se eligieron valores de la tabla correspondientes a arena, limo y arcilla, asumiéndose un contenido de materia orgánica medio.

De acuerdo a la Guía para la Interpretación Cartográfica - Edafología (INEGI;2004) el suelo presente en el área de estudio tiene predominantemente

una textura fina (clase textural 3) y en menor grado, una textura media (también llamados francos, clase textural 2), por lo anteriormente señalado se asume que está conformado principalmente por materiales finos como arcillas y también por material medio con un contenido equilibrado entre arena, arcilla y limo, de esta forma, se ha considerado una distribución proporcional (aproximadamente el 25%) de cada tipo de material, por lo que el factor K, quedaría de la siguiente forma:

$K = (0.25 \cdot 0.03) + (0.25 \cdot 0.52) + (0.25 \cdot 0.21) + (0.25 \cdot 0.14) = 0.225$ , convirtiendo este valor al sistema métrico quedaría de la siguiente forma:

$$K = (0.225 \cdot 0.1317) = 0.03 \text{ kg h / N m}^2$$

### **Factor de longitud y pendiente del terreno (SL)**

Este factor toma en cuenta la longitud (L) del tramo de cauce analizado y la pendiente del terreno (S). En estas dos características está implícita la condición de velocidad y propagación del flujo por el cauce; considerando que el proceso lluvia-escurrimiento produce el desprendimiento de las partículas de suelo convirtiéndolo en sedimento una vez que es transportado. La longitud (L) se considera desde el punto en donde el flujo inicia el movimiento de las partículas, hasta el punto en donde ocurre el primer depósito de sedimento. La formulación original propuesta por Wischmcicr y Smith (1965, 1978) fue desarrollada en cauces con longitud de hasta 400 pies (120 metros) y pendientes entre 3% y 20%.

$$SL = \left(\frac{\lambda}{72.6}\right)^m (65.41 \sin^2 \theta + 4.56 \sin \theta + 0.065)$$

donde

SL= Factor de longitud y pendiente del terreno, adimensional

$\lambda$  = Longitud del tramo con pendiente  $\theta$ , en pies

$\theta$  = Ángulo de la pendiente

m = Exponente que depende de la pendiente del terreno adyacente

El Servicio de Conservación de Suelo de Estados Unidos (SCS) en su nota técnica No.28 para el estado de Nuevo México extiende la ecuación anterior a pendientes entre 0.2% y 60% y para cauces con longitudes mayores a 600 metros.

$$SL = \left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^m (0.0065\theta^2 + 0.045\theta + 0.065)$$

donde

SL= Factor de longitud y pendiente del terreno, adimensional

$\lambda$  = Longitud del tramo con pendiente  $\theta$ , en metros

$\theta$  = Pendiente del terreno, en decenas de porcentaje

m = Exponente que depende de la pendiente del terreno adyacente

El exponente m se selecciona en función de la pendiente del cauce, según los valores siguientes:

$$\theta \geq 5\% \rightarrow m = 0.5$$

$$5\% < \theta < 3\% \rightarrow m = 0.4$$

$$3 \leq \theta \leq 1\% \rightarrow m = 0.3$$

$$\theta < 1\% \rightarrow m = 0.2$$

Aplicando los datos para nuestra zona de estudio, utilizando la ecuación anterior, es decir la de cauces con longitudes mayores a 600 metros , se tiene que:

$$SL = \left(\frac{35,449.75}{22.13}\right)^{0.5} (0.0065 * 6.58^2 + 0.045 * 6.58 + 0.065)$$

$$SL = 25.73$$

### **Factor de cobertura vegetal (C)**

Los valores del factor C de uso del suelo se deducen de la cobertura de usos del suelo, para ello se utilizaron los valores propuestos por SEDESU

(Secretaría de Desarrollo Sustentable) para Querétaro (Cuadro 24). Este factor es de gran importancia pues representa el grado de cobertura y protección que representa la vegetación para el suelo.

**Cuadro 24. Factor C.**

<b>Uso de suelo y vegetación</b>	<b>Factor C</b>
Agricultura riego.	0.528
Agricultura temporal	0.528
Bosque de encino	0.044
Bosque de encino - pino perturbado	0.044
Bosque de encino perturbado	0.025
Bosque de pino	0.045
Bosque de pino - encino	0.044
Bosque de pino perturbado	0.025
Bosque de táscate	0.43
Bosque de táscate perturbado	0.43
Bosque mesófilo de montaña	0.11
Bosque mesofilo de montaña perturbado	0.11
Bosque mixto	0.04
Bosque tropical caducifolio	0.315
Bosque tropical caducifolio perturbado	0.325
Bosque tropical perenifolio	0.11
Bosque tropical subperenifolio	0.11
Bosque tropical subperenifolio perturbado	0.11
Chaparral	0.065
Cuerpo de agua	0
Matorral crasicaule	0.065
Matorral crasicaule perturbado	0.025
Matorral espinoso	0.065
Matorral espinoso perturbado	0.025

<b>Uso de suelo y vegetación</b>	<b>Factor C</b>
Matorral inerme	0.065
Matorral inerme perturbado	0.025
Matorral micrófilo	0.065
Matorral micrófilo perturbado	0.025
Matorral rosetófilo	0.065
Matorral rosetófilo perturbado	0.025
Matorral subinerme	0.065
Matorral subinerme perturbado	0.025
Pastizal inducido	0.549
Pastizal natural	0.549
Cauce	0.78
Sin vegetación	1
Zona industrial	0
Zona urbana	0

Empleando las condiciones de cobertura vegetal y efectuando una ponderación respecto a las áreas que ocupa cada uno de los tipos de vegetación (de acuerdo a mapa elaborado para este trabajo) se presentan los resultados en el Cuadro 25.

**Cuadro 25. Factor C en área de estudio.**

<b>Uso de suelo y vegetación</b>	<b>Factor C</b>	<b>Km<sup>2</sup></b>	<b>Total</b>
Agricultura riego.	0.528	0.26	0.13
Agricultura temporal	0.528	65.48	34.57

<b>Uso de suelo y vegetación</b>	<b>Factor C</b>	<b>Km<sup>2</sup></b>	<b>Total</b>
Bosque de encino	0.044	13.26	0.58
Bosque de encino perturbado	0.025	8.84	0.22
Bosque de pino	0.045	54.69	2.46
Bosque de pino perturbado	0.025	21.05	0.53
Bosque mesofilo de montaña perturbado	0.11	3.65	0.40
Bosque tropical caducifolio	0.315	18.50	5.83
Bosque tropical caducifolio perturbado	0.325	0.25	0.08
Chaparral	0.065	0.20	0.01
Cuerpo de agua	0	0.68	0.00
Pastizal inducido	0.549	1.71	0.94
Zona urbana	0	0.83	0.00
<b>Total</b>		<b>189.41</b>	<b>0.24*</b>

\*ponderado para el área de estudio

### **Factor de conservación de suelos y prácticas de cultivos (P)**

El objetivo de este parámetro es tomar en cuenta las actividades que se realizan para proteger y conservar los suelos susceptibles a ser erosionados dentro de una cuenca. A estas actividades se les llama prácticas de conservación de suelos y tratan de disminuir el escurrimiento directo que provoca el transporte de partículas de suelo que al ser transportadas por la superficie se convierten en sedimentos. Algunos ejemplos de prácticas de conservación en las tierras cultivables son, por ejemplo, la labranza, camellones y las franjas realizadas en contorno, las barreras de muros vegetativos, los muros de piedra, y los sistemas de terrazas, etc. El factor es una relación entre la pérdida de suelo en una zona en donde se realiza una práctica de conservación y la pérdida de suelo trabajando en sentido de la pendiente del terreno. Entre algunas de las técnicas que se utilizan para validar este factor en campo, se pueden mencionar: diques-parcelas de erosión, método altimétrico, reglillas escalonadas, estaciones de aforo y técnicas

radiactivas. En todos los casos la medición se basa en cuantificar la altura de los sedimentos como valor del grueso del aporte de sedimentos. En el caso del área de estudio, no se conoce con precisión el dato relacionado con este factor, por lo que para efectos prácticos se asignó a este coeficiente el valor de 1.0. Cabe mencionar que si hubiera alguna buena práctica de conservación del suelo, el aporte se podría reducir entre en un porcentaje considerable del volumen estimado por la formula universal de pérdida de suelo, tal como se muestra en el Cuadro 26.

**Cuadro 26. Factor de método de control de la erosión.**

<b>Pendiente del terreno %</b>	<b>Cultivo en contorno</b>	<b>Cultivo en franjas de contorno y surcos irrigados</b>	<b>Terraceo</b>
1 a 2	0.60	0.30	0.12
3 a 8	0.50	0.25	0.10
9 a 12	0.60	0.30	0.12
13 a 16	0.70	0.35	0.14
17 a 20	0.80	0.40	0.16
21 a 25	0.90	0.45	0.18

### **Cálculo de la erosión**

Aplicando la ecuación de la pérdida Universal del Suelo, se tiene:

$$A = R K S L C P$$

A Pérdida de suelo anual, en (ton / hectárea) año

R Factor erosivo de la lluvia;  $R = 1257.79N / h]$  año

K Factor de tipo de suelo;  $K = 0.03 \text{ kg h} / N \text{ m}^2$

SL Factor de longitud y pendiente del terreno; SL = 25.73

C Factor de cobertura vegetal; C = 0.24

P Factor de conservación de suelos y prácticas de cultivos; P=1

$$A = (1257.79)(0.03)(25.73)(0.24)(1)$$

$$A = 232 \text{ kg / m}^2$$

Es importante relacionar este valor con el tipo de material de nuestra área en estudio. Es decir, cuantificar el peso del material existente en dicha área por cada metro cúbico de suelo; a esto se le conoce como *densidad* (masa/volumen) Cabe recordar que para el caso de pérdida de suelo en cuencas, se debe tomar el peso seco; a esto se le conoce como *densidad aparente* del suelo (peso seco del suelo /volumen). Esta característica del suelo depende de varios factores, como por ejemplo, la materia orgánica y la compactación del suelo; en este último factor es importante conocer la profundidad y cantidad de raíces de las plantas o incluso la cantidad de animales que excavan en la tierra; todo esto conforma la característica de compactación del suelo. Se deben tomar en cuenta las características utilizadas para determinar el factor K de tipo de suelo y en su caso utilizar la textura de los materiales observados durante los recorridos de campo, para obtener un valor aproximado de la densidad aparente. El Departamento de Conservación de Recursos Naturales de Estados Unidos (*Natural Resources Conservation Service, USDA, NRCS*) ofrecer una aproximación del valor de la densidad aparente de varios materiales que conforma los principales suelos; así con el uso de una tabla que puede consultarse en el sitio <http://www.mn.nrcs.usda.gov/> se tiene el Cuadro 27.

**Cuadro 27.Densidad aparente.**

<b>Clases texturales</b>	<b>(Ton/m<sup>3</sup>)</b>
Arena (Sands)	1.70-1.80
Arena gruesa (Coarse sand)	1.60-1.70
Arena y arena fina (Sand and Fine Sand)	1.55-1.65

Clases texturales	(Ton/m <sup>3</sup> )
Arena muy fina (Very fine sand)	
Arena franca (Loamy sands)	1.60-1.70
Arena franca gruesa (Loamy coarse sand)	1.55-1.65
Arena franca, Arena franca fina (Loamy sand, Loamy fine sand)	1.55-1.60
Arena franca muy fina (Loamy very fine sand)	
Franco arenosa (Sandy loams)	1.55-1.60
Franco arenosa gruesa (Coarse sandy loam) Franco arenosa y Franco arenosa fina (Sandy loam Fine sandy loam)	1.50-1.60
Franco arenosa muy fina (Very fine sandy loam)	1.45-1.55
Franca y franco limosa (Loam and Silty loam)	1.45-1.55
Limo (Silt)	1.40-1.50
Franco arcillosa (Clay loam)	1.40-1.50
Franco arcillo arenosa y franco arcillo limosa (Sandy clay loam Silty clay loam)	1.45-1.55
Arcilla arenosa (Sandy clay)	1.35-1.45
Arcilla limosa (Silty clay)	1.40-1.50
Arcilla (Clay 35-50%)	1.35-1.45
(Clay 50-65%)	1.25-1.35

Fuente: [www.mn.nrcs.usda.gov](http://www.mn.nrcs.usda.gov)

### Entrega de sedimentos.

Una vez que se ha obtenido el total de aporte de sedimentos de la cuenca (As), es muy importante estimar la cantidad de estos que se pondrán en movimiento (A), a esto se le llama entrega de sedimentos. Es decir, la cantidad de suelo erosionado que realmente transita por la cuenca (en nuestro caso las tres microcuencas objeto de estudio) en donde por obras o en forma natural será susceptible de ser depositado (Gracia, 1997). Con los resultados anteriores se pueden obtener valores medios, por ejemplo, para el cálculo del **sedimento que puede aportar el área de estudio**, se tiene valor de 136,831.03 m<sup>3</sup> al año

(obtenido por ecuaciones), mientras que el material que es susceptible de ponerse en movimiento es de 29,260 m<sup>3</sup> al año (obtenido por USLE), lo que arroja una condición favorable, la erosión del suelo es aproximadamente **cinco veces menor** que el aporte teórico que tendría la cuenca. Sin embargo, es importante estimar el porcentaje de estos materiales que se ponen en movimiento, que se recomienda ser retenido por obras (conservación de cuenca u obras hidráulicas de retención). De esta forma se utiliza la formulación propuesta por Maner, que nos permite estimar la cantidad de suelo erosionado susceptible de ser depositado dentro de la cuenca (área de estudio), una vez que ha sido transitado por la superficie y cauces de la misma (Gracia, 1997).

$$\log CES = 1.9354 - 0.1419 \log \text{Area}$$

donde

CES porcentaje anual de entrega de sedimentos

Area Área de la cuenca, en km<sup>2</sup>

Sustituyendo para los valores de nuestra área de estudio en estudio se tiene que:

$$\log CES = 1.9354 - 0.1419 \log(189.41)$$

$$\log CES = 1.9354 - 0.323164721 \quad \log CES = 1.612236528$$

$$CES = 40.95\%$$

Lo anterior significa que en promedio, para conservar el equilibrio de sedimentos del área de estudio es necesario atrapar o realizar obras de conservación del 40.95% del total de 29,260 m<sup>3</sup> al año; esto es **11,982 m<sup>3</sup> de sedimentos al año**. Ahora lo importante es garantizar que las obras diseñadas mantendrán esta condición de equilibrio y en su caso localizar sitios dentro de la

zona en donde se desarrollen prácticas de conservación de suelo y un buen manejo de zonas de cultivo.

### Escenarios.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para los distintos escenarios considerando en el primer caso, el valor de precipitación de 48.9 mm/24 mm/24 horas (

Cuadro 28) y en el segundo, el valor obtenido del análisis de la serie de precipitación para un evento con un periodo de retorno de 20 años y una duración de 10 minutos (100.78 mm) (Cuadro 29).

**Cuadro 28. Aporte de sedimentos del área de estudio en kg/m<sup>2</sup> al año (48.9 mm/24 horas).**

Año	Escenarios								
	Actual	1	2	3	4	5	6	7	8
0	232	192	226	323	461	531	684	116	23
5	1,159	958	1,129	1,617	2,303	2,657	3,421	579	116
10	2,317	1,916	2,257	3,233	4,607	5,314	6,841	1,159	232
15	3,476	2,874	3,386	4,850	6,910	7,971	10,262	1,738	348
20	4,634	3,832	4,515	6,466	9,214	10,628	13,682	2,317	463
25	5,793	4,790	5,643	8,083	11,517	13,285	17,103	2,897	579
30	6,952	5,748	6,772	9,699	13,821	15,942	20,523	3,476	695
35	8,110	6,706	7,901	11,316	16,124	18,599	23,944	4,055	811
40	9,269	7,664	9,029	12,932	18,427	21,257	27,364	4,634	927
45	10,427	8,622	10,158	14,549	20,731	23,914	30,785	5,214	1,043
50	11,586	9,580	11,287	16,165	23,034	26,571	34,205	5,793	1,159

**Cuadro 29. Aporte de sedimentos del área de estudio en kg/m<sup>2</sup> al año (100.78 mm).**

Año	Escenarios								
	Actual	1	2	3	4	5	6	7	8
0	1,078	891	1,050	1,504	2,143	2,472	3,182	539	108
5	5,389	4,456	5,250	7,519	10,714	12,359	15,910	2,695	539
10	10,778	8,912	10,500	15,038	21,428	24,718	31,821	5,389	1,078
15	16,167	13,368	15,750	22,557	32,142	37,077	47,731	8,084	1,617
20	21,557	17,824	21,000	30,077	42,856	49,436	63,641	10,778	2,156

<b>25</b>	26,946	22,280	26,250	37,596	53,571	61,795	79,551	13,473	2,695
<b>30</b>	32,335	26,736	31,499	45,115	64,285	74,154	95,462	16,167	3,233
<b>35</b>	37,724	31,192	36,749	52,634	74,999	86,513	111,372	18,862	3,772
<b>40</b>	43,113	35,647	41,999	60,153	85,713	98,872	127,282	21,557	4,311
<b>45</b>	48,502	40,103	47,249	67,672	96,427	111,231	143,192	24,251	4,850
<b>50</b>	53,891	44,559	52,499	75,191	107,141	123,590	159,103	26,946	5,389

## CAPÍTULO V. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

Se han realizado numerosas investigaciones para cuantificar la tasa de erosión bajo diferentes usos de suelo a nivel de cuenca hidrográfica y para evaluar la efectividad de diferentes coberturas vegetales en el control de la erosión en terrenos agrícolas utilizando parcelas de erosión o lotes de escurrimiento, pero pocos estudios se han enfocado a la predicción de la erosión con fines de planeación y diseño de prácticas de conservación de suelos (Santacruz, 2011).

El conocimiento de la tasa de erosión en un sitio es fundamental para tomar decisiones sobre el tipo de manejo y las medidas de conservación de suelo más adecuadas; por ello, es importante obtener datos confiables acerca del proceso y la velocidad a la que se está perdiendo el suelo (Pando Moreno M., *et al*, 2003).

Los métodos directos para la evaluación de la erosión hídrica suelen proporcionar datos precisos, requieren mucho tiempo y son costosos. Los métodos indirectos son relativamente fáciles de aplicar, pero su precisión no ha sido ampliamente probada para los diferentes usos de suelo (Pando Moreno M., *et al*, 2003).

La pendiente de una cuenca tiene una relación importante y compleja con la infiltración, la escorrentía superficial, la humedad del suelo y la contribución de agua subterránea a la escorrentía. Este factor, junto con otros, controla el tiempo de escurrimiento y concentración de la lluvia en los canales de drenaje, y tiene una importancia directa en relación a la magnitud de las crecidas.

El crecimiento poblacional, aunado a las crecientes expectativas de desarrollo, constituyen una enorme presión de uso sobre los recursos naturales. De igual forma, el desplazamiento de los habitantes de pequeñas localidades rurales a zonas urbanas en donde se ofrecen distintos servicios, trae consigo

algunos impactos en la dinámica de la cuenca no solo a nivel socioeconómico, sino también en el aspecto medioambiental, ya que ante la necesidad de transportación, se van abriendo caminos en el terreno o ampliando los mismos; en muchas ocasiones estas vialidades no se encuentran planeadas ni se ponen en práctica estrategias de mitigación de impactos, para evitar, por ejemplo, que se incremente la tasa de erosión hídrica debido a la pérdida y/o modificación de la cobertura vegetal.

El estudio de la dinámica espacio-temporal de uso del suelo se cita como una manera confiable para medir el grado de conversión ambiental antropogénica, dado que permite conocer las modificaciones en la vegetación debido al uso humano, así como la distribución e incremento (o decremento) de las tierras dedicadas a actividades antrópicas, ya sea productivas o como asentamientos humanos (Castelán, 2007).

El crecimiento de la población humana y la demanda de mayores espacios para realizar las actividades para la producción de alimentos, bienes y servicios, genera una fuerte presión sobre la tierra, propiciando cambios en el uso de suelo y transformando selvas y bosques en zonas agrícolas y ganaderas.

Urbanizaciones: su proceso de construcción aporta importantes cantidades de sedimentos, dado que actividades como la remoción de las coberturas vegetales, la excavación y la explanación entre otras, dejaron grandes masas de suelo expuestas al acción de la lluvia provocando su desprendimiento y arrastrero transporte. Una vez urbanizadas, la producción de sedimentos es por lo general mínima.

Construcción de carreteras: en el proceso de su concepción puedan dar de alta tasa de erosión al ser removido la cubierta vegetal y quedar al descubierto el terreno, así como dejarse cortes y selecciones protegidas.

Obras de control en ríos y corrientes: cambios en la dirección del flujo o aumento de la profundidad, duración y velocidad de éste, pueden promover procesos erosivos; se citan entre otros: el alineamiento de canales que aumenta la pendiente y la velocidad del flujo entre otros.

También deben considerarse aquellas actividades como la minería de superficie ya que el terreno queda desprovisto de cubierta vegetal.

La diferencia que existe entre la tasa de formación y pérdida de suelo plantea que se desarrollen programas que prevenga la aparición de la erosión en su diferentes formas. Wishmeier y Smith (1978) definen el concepto de tolerancia de pérdida de suelo como " máximo nivel de erosión del suelo que permite un elevado nivel de productividad del cultivo, sostenible económica e indefinidamente." Sin embargo, surge la pregunta ¿cuál es el máximo nivel de erosión permitible que a su vez está condicionado por la tasa de formación de suelo?

La pérdida de suelo conlleva pérdidas económicas de forma directa para quien le da el uso al terreno, sin embargo en el entorno no inmediato también se presentan daños, entre estos el deterioro de cuerpo de agua, la vida útil embalses, el incremento del riesgo por inundaciones, entre otros.

La zona serrana se ha mantenido marginada de la dinámica industrial y comercial, ya que la producción industrial del municipio se ha limitado a pequeñas talleres familiares o negocios como carpinterías, materiales para la construcción, huaracherías y fabricación de petate (Meneses, 2010).

El turismo podría ser una de las actividades de mayor productividad para los municipios tanto de Jalpan como de Pinal de Amoles, sin embargo la oferta hotelera aún es pequeña comparada con otros sitios del estado de Querétaro. La marginación y la desigualdad de Jalpan de Serra se puede observar en la falta de

oportunidades que tienen los habitantes de la región, entre ellas la educación (Meneses, 2010).

Las partículas más finas son más difíciles de erosionar dada la cohesión de las arcillas minerales que la retiene, una vez que una partícula se encuentra el movimiento no se deposita sí no hasta que la velocidad caiga por debajo de la velocidad umbral, así pues se requiere menor fuerza para mantener un el movimiento que para que lo inicie (Morgan 1986)

Uno de los principales problemas de las presas y embalses es la sedimentación que ocurre en el interior de estos. El proceso de asolve de una presa se encuentra sumamente ligado al proceso de erosión hídrica de los suelos (el cual incluye la ruptura de los agregados de suelo y su posterior transporte y depósito a lo largo de laderas y cauces).

Los sedimentos son trasladados por los cauces de distinto orden en su recorrido por la cuenca y se mantienen en suspensión mientras el agua está en movimiento, pero tan pronto como la velocidad disminuye, los sedimentos comienzan a depositarse, como por ejemplo cuando el agua del cauce entra a la presa; una vez que los sedimentos se precipitan producto de la disminución de la velocidad, estos se van acumulando en el fondo del embalse. Si estos sedimentos no se remueven, la presa termina por colmatarse.

De los resultados obtenidos de la prueba referente a la norma NMX-AA-004-SCFI-2000, se puede observar claramente que, debido a la escasa lluvia que se tuvo antes de los muestreos realizados, los sólidos sedimentables en el flujo del río son nulos en la mayoría de las muestras; lo que nos impide saber con claridad si la presa realmente esta sufriendo el proceso de azolvamiento.

En cuanto a los resultados obtenidos del análisis de los diagramas de Hjulström y Shields podemos observar, que al cruzar los parámetros de  $R_c$  y  $t'_c$

obtenidos de los cálculos realizados, el punto de intersección se encuentra en la parte de “no movimiento” en el diagrama de Shields, lo cual corrobora lo analizado con el diagrama de Hjulström, pues los diámetros obtenidos son los que separan la sedimentación del transporte.

Así, podemos concluir que las velocidades obtenidas de los muestreos son muy bajas para poder mover los sedimentos que existen en esa parte del río.

La sedimentación de la presa Jalpan generaría un abanico de impactos ecológicos y económicos al interior de la cuenca como la reducción en la vida útil del embalse, eutroficación, incremento en el riesgo por inundaciones, pérdida de la denominación RAMSAR, entre otros de índole económica como pérdidas económicas y de fuentes de empleo dado que en el embalse se realizan actividades de ecoturismo y pesca; mientras que entre los efectos al exterior de la cuenca podrían incluirse emisiones de gases de efecto invernadero.

Dentro de las soluciones existentes para evitar que se llenen las presas de sedimento, se encuentran la elevación de la presa, dragarla o construir una presa secundaria aguas arriba con el fin específico de capturar los sedimentos, pero todas éstas son soluciones con altos costos económicos. Si se tiene en cuenta que la mayor parte de los sedimentos que se depositan en la presa, son producto de la erosión de la cuenca, entonces como conclusión, se puede considerar que la solución debería enfocarse a efectuar prácticas adecuadas de suelos y control de escurrimientos.

## LITERATURA CITADA

Abad Cuevas, N.G. 2006. Modelación hidrológica de las cuencas El Chuveje y Arroyo Real como herramienta en la implementación de pago por servicios ecológicos en la Reserva de La Biosfera Sierra Gorda, Querétaro, México. TESIS. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.

Alatorre, L.C. y Beguería, S. 2009. Los modelos de erosión: una revisión. Revista C. & G., 23 (1-2), 29-48.

Aparicio M, F. J. 2009. Fundamentos de hidrología de Superficie. LIMUSA. México.

Breña Puyol, A.F. y Jacobo Villa M. 2006. Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial Universidad Autónoma Metropolitana.

Carvajal Ramírez, F. y Giráldez Cervera, J.V. 2000. Análisis de la producción de sedimentos en una cuenca con un sistema de información geográfica. El Sistema Cubillas-Colomera. Revista Ingeniería del Agua. Volúmen 7, No. 3, páginas 225-236.

Castelán Vega *et al.* 2007. Dinámica de cambio espacio-temporal de uso del suelo de la subcuenca del río San Marcos, Puebla, México. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM ISSN 0188-4611, Núm. 64, 2007, pp. 75-89.

Centro Queretano de Recursos Naturales. 2006<sup>a</sup>. Vegetación, Uso de Suelo y Unidades de Paisaje en la Sierra Gorda Queretana. Tomo XI. Reporte técnico.

Centro Queretano de Recursos Naturales. 2006<sup>b</sup>. Caracterización de los ecosistemas, cambios en el uso del suelo y unidades paisajísticas en la Reserva de la Biósfera "Sierra Gorda" de Querétaro". Tomo XII Reporte Técnico

CONANP, 2006. Los Humedales Prioritarios de México. Comisión de Áreas Naturales Protegidas.

CONANP. Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar. Presa Jalpan., [en línea]. <http://ramsar.conanp.gob.mx/documentos/fichas/39.pdf>

CONAGUA. Tarjeta informativa de la Presa Jalpan, Municipio de Jalpan de Serra, Qro., [en línea]. <http://www.conagua.gob.mx/DLQro07/Noticias/jalpan.pdf>

Cotler, H. y A. Priego. 2006. El análisis del paisaje como base para el manejo integrado de cuencas: el caso de la cuenca Lerma-Chapala. En: Cotler, H. (comp.) El manejo integral de cuencas en México. 2° ed. SEMARNAT-INE, México.

Cotler, H. y G. Caire. 2009. Lecciones aprendidas del manejo de cuencas en México. INE-SEMARNAT-WWF-FGRA. México.

Diario Oficial de la Federación, 1997. Poder Ejecutivo. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. DECRETO por el que se declara área natural protegida con carácter de reserva de la biosfera, la región denominada Sierra Gorda localizada en los municipios de Arroyo Seco, Jalpan de Serra, Peñamiller, Pinal de Amoles y Landa de Matamoros, Qro. 19 de Mayo de 1997.

Dourojeanni, A. 2006. Si sabemos tanto sobre qué hacer en materia de gestión integrada del agua y cuencas ¿por qué no lo podemos hacer? En: Cotler, H. (comp.) El manejo integral de cuencas en México. 2° ed. SEMARNAT-INE, México.

Escalante Sandoval, C.A. 2005. Efecto en la estimación del factor erosivo de la lluvia en el aporte de sedimentos, Capítulo 5, 18 pp. En: Rivera-Trejo F., Gutiérrez-López A., Val-Segura R., Mejía-Zermeño R., Sánchez-Ruiz P.A., Aparicio-Mijares, Fco.J., Díaz-Flóres L.L. (Editores). «La medición de sedimentos en México». Ediciones IMTAUJAT, Jiutepec, Morelos / Cunduacán, Tabasco, México, 318 pp.

Henríquez Cristián, *et al.* 2006. Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile. Revista Geografía del Norte Grande, número 36, páginas 61-74.

INE. 1999. Programa de Manejo Reserva de la Biósfera Sierra Gorda. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAP. México.

INE. 2002. Hergt et al. "Consideraciones Geohidrológicas de la Relación Bosques-Aguas en la región de Sierra Gorda Querétaro.

INEGI (2004). Guía para la Interpretación Catográfica. Edafología. Aguascalientes, Aguascalientes, México.

Laguna Ocampo O. y Gutiérrez López A. 2004. Análisis de sensibilidad del proceso lluvia-escurrimiento en las cuencas que drenan la ciudad de Morelia (Partes I, II y III). XVIII Congreso Nacional De Hidráulica San Luis Potosí, S.L.P. 2004.

Laguna Ocampo O. y Gutiérrez López A. 2004. Laguna Analysis Runoff. Software. Modelos de escurrimiento. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Leguía, Héctor. 2004. "El bosque nativo como referente del deterioro de los suelos agrícolas". LEISA Revista de Agroecología. Abril.

López Alonso, R., J. Barragán-Fernández y M.A. Colomer-Cugat. 2008. Predicción de la velocidad media del flujo en ríos de montaña. Ingeniería del agua Vol. 15 (2): 81-93.

Lu, D. and Weng, Q. 2007. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance, International Journal of Remote Sensing, 28:5, 823-870

Mass, M. 2006. La investigación de procesos ecológicos y el manejo integrado de cuencas hidrográficas: un análisis del problema de escala. En: Cotler, H. (comp.) El manejo integral de cuencas en México. 2° ed. SEMARNAT-INE, México.

Maas, M. y H. Cotler. 2006. El protocolo para el manejo de ecosistemas en cuencas hidrográficas. En: Cotler, H. (comp.) El manejo integral de cuencas en México. 2° ed. SEMARNAT-INE, México.

Meneses Moreno, A.B. 2010. Jalpan de Serra Querétaro y sus mujeres migrantes. Ensayo. Consultado en [www.http://www.mujeresnet.info/](http://www.mujeresnet.info/)

Montoya Jaramillo, L.J. y Montoya Ramírez, R.D. 2005. Transporte de sedimentos en las corrientes del departamento de Antioquía. Revista de Ingenierías Universidad de Medellín. Año/Vol. 4, Número 007. Páginas 101-109.

Morgan, R.P.C., 1986. Soil erosion and conservation. Longman Group UK Ltd., Essex: 295 pp.

Nandakumara, N., y Meina, R. G. 1997. Uncertainty in rainfall-runoff model simulations and the implications for predicting the hydrologic effects of land-use change, *Journal of Hydrology*, Vol. 192, (1-4) pp. 211-232.

Palmierin A., Shahn F. and Dinar, A. 2001. Economics of reservoir sedimentation and sustainable management of dams. *Journal of Environmental Management* (2001) 61, 149-163.

Pando Moreno, M. *et al.* 2003. Comparación de métodos en la estimación de erosión hídrica *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. Num. 51, 2003, pp. 23-36

Pereyra Díaz, D. *et al.* 2005. Pérdida de suelo por erosión hídrica. Capítulo 2 - 24 pp. En: Rivera-Trejo F., Gutiérrez-López A., Val-Segura R., Mejía-Zermeño R., Sánchez-Ruiz P.A., Aparicio-Mijares, Fco.J., Díaz-Flóres L.L. (Editores). «La medición de sedimentos en México». Ediciones IMTAUJAT, Jiutepec, Morelos / Cuauacán, Tabasco, México, 318 pp.

Pineda L., R., M. A. Domínguez C., E. Quintanar Q., M. del C. Gilio M., P. Roitman G., A. L. Fonseca T., M. del P. García F., M. E. Briceño, G. Vázquez S y J. Rickards G. 2006. Hacia una gestión integrada de cuencas en el estado de Querétaro, México. En: Cotler, H. (*comp.*) *El manejo integral de cuencas en México*. 2° ed. SEMARNAT-INE, México.

Reid, W., *et al.* (2002). *Millennium Ecosystem Assessment Methods*. Millennium Assessment. Disponible en <http://www.millenniumassessment.org>

Ratcliffe, J. 1999. Scenario Building: A suitable Method for Strategic Property Planning? The property research conference of the RICS, St Johns College, Cambridge. September 5th – 7th

Ramírez Orozco, A., J. F. Gómez Martínez y D. F. Campos Aranda. 2005. Actualización de las envolventes regionales de gastos máximos para la república mexicana. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XX. Núm. 1. Pp. 99-108.

Rivera Fabián, J.G. *et al.*, 2005. Aspectos de la medición de sedimentos en México, Capítulo 1 - 6 pp. En: Rivera-Trejo F., Gutiérrez-López A., Val-Segura

R., Mejía-Zermeño R., Sánchez-Ruiz P.A., Aparicio-Mijares, Fco.J., Díaz-Flóres L.L. (Editores). «La medición de sedimentos en México». Ediciones IMTAUJAT, Jiutepec, Morelos / Cunduacán, Tabasco, México, 318 pp.

Rosette Vergés, F.A. 2008. Modelos predictivos de cambio de uso del suelo en la Península de Baja California, México. Tesis de Doctorado en Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Filosofía y Letras. Instituto de Geografía.

Santacruz De León, G. 2011. Estimación de la erosión hídrica y su relación con el uso de suelo en la cuenca del Río Cahoacán, Chiapas, México. Revista Aqua-LAC, Volúmen 3, No. 1. Páginas 45-54.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).1984. Métodos hidrológicos para predicción de escurrimientos, México.

Secretaría de Ramsar, 2010. Manuales. Manuales Ramsar para el Uso Racional de los humedales. CD. 4ª Edición.

UAQ, 2010. Sistema Información Geográfica. Mapas. Programa de Ordenamiento Ecológico Local. Estado de Querétaro de Arteaga.

UNESCO, 2010. Procesos de erosión – sedimentación en cauces y cuencas. Daniel Brea, Francisco Balocchi. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N° 22

Valtierra, J.G., 2007. Desarrollo de una herramienta computacional para el diagnóstico hidrológico de cuencas. Tesis Maestría en Gestión Integrada de Cuencas. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro.

# ANEXOS

## Anexo 1. SPOT 5

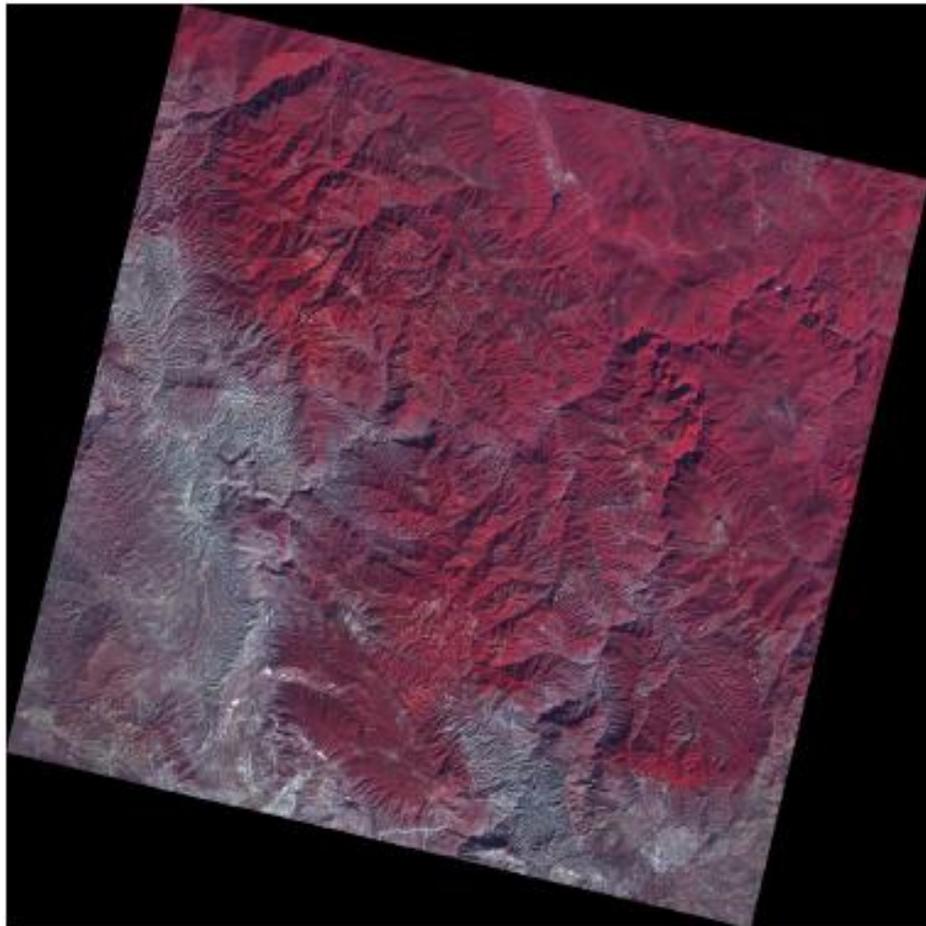


E55873081001192J2A07003

5 587-308 10/01/19 17:20:01 2 J 2A L4.108891



1 N21 20 23 W99 45 17; 2 N21 12 58 W99 11 34; 3 N20 41 13 W99 19 37; 4 N20 48 36 W99 53 10



E55873081001192J2A07003

## Anexo 2. Resultados software LAANRUN

### *Método de envolventes*

Modelos de Esguerrimiento Método de Envolventes

### Método General

Introduzca los valores:

Área de la cuenca	189.41	(km <sup>2</sup> )
Beta	.5	

Q =	10.015	m <sup>3</sup> /s	Q =	353.685	ft <sup>3</sup> /s
-----	--------	-------------------	-----	---------	--------------------

 <b>Calcular</b>	 <b>Menú Principal</b>	 <b>Regresar</b>
---	---	---

## Fórmula para estimar el gasto (Q) en la India

Introduzca el valor:

Área de la cuenca  (km<sup>2</sup>)

Q =  m<sup>3</sup>/s

Q =  ft<sup>3</sup>/s

 **Calcular**

 **Menú Principal**

 **Regresar**

## Método de Dickens

Introduzca los valores:

Área de la cuenca  (km<sup>2</sup>)Coeficiente C 

Valores para el Coeficiente C		
	Precipitaciones de 10 cm en 24 horas	Precipitaciones de 15 cm en 24 horas
Terreno Plano	200	300
Con lomerío suave	250	325
Con mucho lomerío	300	350

Q =  m<sup>3</sup>/s      Q =  ft<sup>3</sup>/sLluvias de aprox. 100 pulg.      Q =  m<sup>3</sup>/s      Q =  ft<sup>3</sup>/sLluvias entre 30 y 40 pulg.      Q =  m<sup>3</sup>/s      Q =  ft<sup>3</sup>/s

## Método Ryves

Introduzca los valores:

Área de la cuenca  (km<sup>2</sup>)

Cuencas cerca de montañas:

Q =  m<sup>3</sup>/s

Q =  ft<sup>3</sup>/s

Áreas entre 50 y 100 millas de distancia del mar:

Q =  m<sup>3</sup>/s

Q =  ft<sup>3</sup>/s

Áreas entre 0 y 50 millas de distancia del mar:

Q =  m<sup>3</sup>/s

Q =  ft<sup>3</sup>/s

 **Calcular**

 **Menú Principal**

 **Regresar**

## Método Madras

Introduzca el valor:

Área de la cuenca  (km<sup>2</sup>)

Q =  m<sup>3</sup>/s

Q =  ft<sup>3</sup>/s







## Método Hyderabad

Introduzca el valor:

Área de la cuenca  (km<sup>2</sup>)

Q =  m<sup>3</sup>/s

Q =  ft<sup>3</sup>/s

 **Calcular**

 **Menú Principal**

 **Regresar**

## Método Leopold y Miller

Introduzca el valor:

Área de la cuenca  (km<sup>2</sup>)

Q =  m<sup>3</sup>/s

Q =  ft<sup>3</sup>/s

 **Calcular**

 **Menú Principal**

 **Regresar**

## Método Baird y McIlwraith

Introduzca el valor:

Área de la cuenca  (km<sup>2</sup>)

Q =  m<sup>3</sup>/s

Q =  ft<sup>3</sup>/s

 **Calcular**

 **Menú Principal**

 **Regresar**

## Método Creager

Introduzca los valores:

Área de la cuenca  (km<sup>2</sup>)

Cc

Se recomienda un valor Cc=100 como envolvente mundial

Q =  m<sup>3</sup>/s

Q =  ft<sup>3</sup>/s







## Método Creager

Introduzca los valores:

Área de la cuenca  (km<sup>2</sup>)

Cc

Se recomienda un valor Cc=100 como envolvente mundial

Q =  m<sup>3</sup>/s

Q =  ft<sup>3</sup>/s

 **Calcular**

 **Menú Principal**

 **Regresar**

## Método Lowry

Introduzca los valores:

Área de la cuenca  (km<sup>2</sup>)

$C_L$

$C_L$  depende de la región hidrológica considerada

Q =  m<sup>3</sup>/s

Q =  ft<sup>3</sup>/s

 **Calcular**

 **Menú Principal**

 **Regresar**

## Métodos racional

### Método General

Introduzca los valores:

Área de la cuenca  (km<sup>2</sup>)    Intensidad de la Precipitación  (mm/hr)

Coefficiente C

VALORES PARA EL COEFICIENTE C	
Tipo de área por drenar	Coefficiente C
Suelo arenoso con césped (s=2%)	0.05 - 0.10
Suelo arenoso con césped (2% < s < 7%)	0.10 - 0.15
Suelo arenoso con césped (s=7%)	0.15 - 0.20
Suelo grueso con césped (s=2%)	0.13 - 0.17
Suelo grueso con césped (2% < s < 7%)	0.18 - 0.22
Suelo grueso con césped (s=7%)	0.25 - 0.35
Áreas familiares	0.30 - 0.50
Áreas de recreo	0.20 - 0.35
Campos cultivados	0.20 - 0.40
Zonas forestadas	0.10 - 0.30
Techos impermeables	0.75 - 0.95
Pavimentos flexibles	0.80 - 0.95
Pavimentos rígidos	0.70 - 0.90
Suelos impermeables (1% < s < 2%)	0.40 - 0.65
Suelos ligeramente permeables	0.15 - 0.40
Suelos ligeramente permeables con césped	0.10 - 0.30
Suelos moderadamente permeables	0.05 - 0.20

Q =  m<sup>3</sup>/s

Q =  ft<sup>3</sup>/s







## Método de Gregory-Arnold

Introduzca los valores:

Área de la cuenca  (km<sup>2</sup>)Longitud del cauce  (km)Coeficiente C Pendiente del cauce % Coeficiente E Precipitación en 24 hrs  (mm)

## VALORES PARA EL COEFICIENTE C

Tipo de área por drenar	Coficiente C
Suelo arenoso con césped (s=2%)	0.05 - 0.10
Suelo arenoso con césped (2% < s < 7%)	0.10 - 0.15
Suelo arenoso con césped (s=7%)	0.15 - 0.20
Suelo grueso con césped (s=2%)	0.13 - 0.17
Suelo grueso con césped (2% < s < 7%)	0.18 - 0.22
Suelo grueso con césped (s=7%)	0.25 - 0.35
Áreas familiares	0.30 - 0.50
Áreas de recreo	0.20 - 0.35
Campos cultivados	0.20 - 0.40
Zonas forestadas	0.10 - 0.30
Techos impermeables	0.75 - 0.95
Pavimentos flexibles	0.80 - 0.95
Pavimentos rígidos	0.70 - 0.90
Suelos impermeables (1% < s < 2%)	0.40 - 0.65
Suelos ligeramente permeables	0.15 - 0.40
Suelos ligeramente permeables con césped	0.10 - 0.30
Suelos moderadamente permeables	0.05 - 0.20

## VALORES PARA EL COEFICIENTE E

Cuencas muy grandes con tc > 48 hrs	0.45 - 0.50
Cuencas grandes 24 hrs < tc < 48 hrs	0.50 - 0.55
Cuencas medianas 6 hrs < tc < 24 hrs	0.55 - 0.60
Cuencas chicas 1 hr < tc < 6 hrs	0.60 - 0.70
Cuencas muy pequeñas tc < 1 hr	0.70 - 0.80

Q =  m<sup>3</sup>/sQ =  ft<sup>3</sup>/s

Calcular

Menú Principal

Regresar

## Métodos empíricos

Modelos de Escurrimiento Métodos Empíricos

### Método de Gutiérrez-Reyes

Introduzca el valor:

Área de la cuenca  (km<sup>2</sup>)

Q =  m<sup>3</sup>/s      Q =  ft<sup>3</sup>/s

## Método de Thomas

Introduzca los valores:

Área de la cuenca  (km<sup>2</sup>)  
 Precipitación media  (mm)  
 Porcentaje de área plantada   
 Coeficiente de infiltración del suelo

VALORES DEL COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN DEL SUELO	
Tipo de suelo	Coefficiente PHI
Mezcla de arena y grava	2.00 - 2.50
Gravas limosas y arenas limosas	0.80 - 1.50
Arena limoarcillosa	0.50 - 0.80
Arcillas, inorgánicas y orgánicas	0.25 - 0.50
Roca desnuda (no fracturada)	0.00 - 0.25

$$Q = 2.62692064 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 9.27688271 \text{ ft}^3/\text{s}$$

 **Calcular**

 **Menú Principal**

 **Regresar**

## Método de Waananen y Crippen

Introduzca los valores:

Área de la cuenca  (km<sup>2</sup>)

Precipitación media  (mm)

Para un periodo de retorno de 25 años: Q =  m<sup>3</sup>/s Q =  ft<sup>3</sup>/s

Para un periodo de retorno de 50 años: Q =  m<sup>3</sup>/s Q =  ft<sup>3</sup>/s

Para un periodo de retorno de 100 años: Q =  m<sup>3</sup>/s Q =  ft<sup>3</sup>/s

 **Calcular**

 **Menú Principal**

 **Regresar**

## Métodos que relacionan el área de la cuenca y otras características

### Método de Burge

Introduzca los valores:

Área de la cuenca  (km<sup>2</sup>)

Longitud del área  (km)

Q =  m<sup>3</sup>/s

Q =  ft<sup>3</sup>/s

 **Calcular**

 **Menú Principal**

 **Regresar**