



00369
21

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS
EDAFOLOGIA

**Análisis y Evaluación de los Procesos de
Erosión y Sedimentación en una región de
la Sierra de Guanajuato**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS
(EDAFOLOGIA)

PRESENTA:

BIOL. SARA SOLIS VALDEZ

Director de tesis

Dr. GILBERTO HERNANDEZ SILVA

Cd. Universitaria D.F., septiembre de 1997

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

RECONOCIMIENTOS

Debo agradecer a un buen número de personas, compañeros y amigos, que de una u otra manera han compartido su tiempo, conocimientos y su persona conmigo y me han enseñado lecciones muy valiosas, he podido aprender de cada uno la virtud y grandiosidad del ser humano. A todos y cada uno de ellos les dedico muy sinceramente este trabajo, y les doy las gracias por permitirme y brindarme su amistad.

Agradezco a los integrantes del jurado sus sugerencias, su tiempo y sus conocimientos compartidos: Doctores. Gilberto Hernández Silva, Norma Eugenia García Calderón, José López García y Jorge López Blanco, Maestros. en Ciencias Lourdes Flores Delgadillo, Amada Laura Reyes Ortigoza y Jorge Lugo de la Fuente.

Al Biól. Jorge Báez Jiménez, por la ayuda ofrecida y brindada en los momentos oportunos, por confiar y creer en mí. Gracias.

A mis queridos amigos: José López, Paty Lina, Esther, Anita, Raúl, Daniel, Humberto, Julieta, Juan, René, José I. Bojórquez, Guillermo, Maru, a mis compañeros de trabajo del Instituto Nacional de Ecología y Dirección General de Administración Escolar, y del Departamento de Edafología del Instituto de Geología, por los momentos compartidos. Gracias.

A la familia Pastor Mireles, por la incomparable ayuda recibida, por compartir su hogar, su mesa, sus momentos familiares y sobre todo por permitirme ser su amiga. Gracias.

A la Lic. María Eugenia Valdez Pérez, por su ayuda en la edición de los mapas.

Al pas. de Biól. Raúl Bravo López, por su paciencia, enseñanza y ayuda en el trabajo estadístico.

A la familia Oregón Loyola, por abrirme las puertas de su casa, brindarme su amistad y recibirme en su hogar. Gracias.

Dedico esta tesis a mis padres y hermanos, y agradezco su paciencia y tolerancia para conmigo.

A Abelardo, con amor. Por compartir tu vida conmigo, por el amor que he recibido y por ser quien eres. Gracias

De manera muy especial, dedico este trabajo, a la memoria del Maestro Nicolás Aguilera Herrera, fundador y eje guía de la Ciencia del Suelo en nuestro país, por su tenacidad y lucha en el quehacer académico de esta ciencia.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme ser, por brindarme la oportunidad de formar parte de su comunidad; y por la responsabilidad que se adquiere al formar parte de la gran familia Universitaria.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico otorgado para la realización de los estudios de maestría.

ÍNDICE

	Pág.
Resumen.....	1
Introducción.....	1
Objetivos.....	4
Marco Teórico	
3.1 Concepto de erosión	5
3.2. Concepto de erosión del suelo.....	6
3.3 Procesos de producción de sedimentos.....	8
3.3.1 Tipos de sedimentos producidos.....	11
3.4 Métodos para cuantificar la erosión y sedimentos.....	13
3.4.1 Métodos para cuantificar la erosión.....	13
3.4.2 Métodos para cuantificar la producción de sedimentos.....	18
3.4.3 Importancia de la cuantificación de sedimentos.....	24
3.4 Unidades de estudio.....	24
Antecedentes	
4.1 Descripción de la zona de estudio.....	26
4.1.1 Localización geográfica.....	26
4.1.2 Provincias fisiográficas.....	26
4.1.3 Topografía.....	29
4.1.4 Geología.....	29
4.1.5 Litología.....	32
4.1.6 Clima.....	33
4.1.7 Hidrología.....	37
4.1.8 Suelos.....	37
4.1.9 Vegetación.....	41
4.1.10 Actividades productivas.....	42
4.2 Antecedentes históricos del problema hídrico en la región.....	43

Metodología

5.1. Fase	
5.1.1 Definición de las unidades de estudios.....	45
5.1.2 Caracterización de las unidades de estudio	45
5.1.3 Muestreo de suelos y sedimentos.....	45
5.1.4 Análisis de laboratorio.....	48
5.1.5 Aplicación de la EUPS.....	48
5.2. Fase II	
5.2.1 Estimación de la producción de sedimentos.....	50
5.2.2 Estimación de la pérdida de nutrientes.....	51

Resultados y Discusión

6.1 Aplicación de la EUPS para estimar la pérdida de suelo.....	52
6.1.1 Obtención del factor R.....	52
6.1.2 Obtención del factor K.....	55
6.1.3 Obtención del factor LS.....	57
6.1.4 Obtención del factor C.....	60
6.1.5 Obtención del factor P.....	63
6.2 Estimación de la producción de sedimentos	66
6.2.1 Obtención del factor Q.....	67
6.2.2 Obtención del factor q_p	74
6.3 Estimación de la pérdida de nutrientes	79
6.3.1 Nutrientes en suelos	79
6.3.2 Nutrientes en sedimentos	82

Conclusiones	85
--------------------	----

Bibliografía.....	87
-------------------	----

Anexos A	91
Anexo B	95
Anexo C	98

ÍNDICE DE FIGURAS

	Págs.
3.1. Formación de pedestales por procesos de erosión	13
3.2. Uso del método de clavos y rondanas	14
3.3. Lotes de escurrimiento	15
3.4. Dispositivo muestreador de sedimentos	22
4.1. Localización geográfica de la zona de estudio	27
4.2. Provincias y subprovincias fisiográficas de la zona de estudio	28

ÍNDICE DE MAPAS

	Págs.
1. MAPA DE RELIEVE SOMBREADO	30
2. MAPA GEOLÓGICO	34
3. REGIONALIZACIÓN CLIMÁTICA DE LA ZONA DE ESTUDIO	36
4. MAPA HIDROLÓGICO	38
5. MAPA DE SUELOS	39
6. MAPA DE MICROCUENCAS	46
7. MAPA DE SITIOS DE MUESTREO	47
8. MAPA DE VEGETACIÓN	61

ÍNDICE DE TABLAS

	Págs
6.1. Valores de erosividad de la lluvia	53
6.2. Número de días lluviosos al mes por año	54
6.3. Número de días con intensidades de lluvia mayores a 25 mm/hr	55
6.4. Clasificación de inclinaciones de pendientes	58
6.5. Valores del factor LS para cada microcuena	58
6.6. Porcentajes de cobertura vegetal por microcuena	62
6.7. Valores de cada factor de la EUPS por microcuena	64
6.8. Coeficientes de correlación de los factores de la EUPS	65
6.9. Tiempos de concentración por microcuena	68
6.10. Intensidades máximas de lluvia en duraciones por minutos para la Estación Guanajuato	70
6.11. Número de orden de intensidades máximas de lluvia en duraciones por minutos	70
6.12. Intensidades máximas de lluvia para un periodo de retorno de 14 años	72
6.13. Valores de escorrentía máxima (factor Q por microcuena	73
6.14. Estimación del escurrimiento superficial (factor q_p)	74
6.15. Valores estimados de la producción de sedimentos por microcuena	75
6.16. Coeficientes de correlación para la estimación de sedimentos (factores de la MUSLE).....	76
6.17. Relación vegetación-contenido de M.O.	78
6.18. Contenido de nutrimentos en suelos por microcuena.....	79
6.19. Contenido de nutrimentos en sedimentos por microcuena	82
6.20. Correlación de nutrimentos en suelos y sedimentos	83

ÍNDICE DE GRÁFICAS

	Págs
6.1. Valor anual del factor R para el periodo de estudio	52
6.2. Balance hídrico de la estación Guanajuato	54
6.3. Valores del factor K para cada microcuenca	57
6.4. Relación pérdida de suelo-factor S de la EUPS	59
6.5. Relación pérdida de suelo-factor C de la EUPS	63
6.6. Curva de Intensidad-Duración-Período de Retorno de la Estación Guanajuato	72
6.7. Relación superficie-área-producción de sedimento	76
6.8. Relación producción de sedimentos-factor Qq_p	77

RESUMEN

En la Sierra de Guanajuato los factores causantes de erosión de suelos se acentúan drásticamente, ocasionando su pérdida y deterioro gradual de sus recursos naturales, reduciendo el posible potencial productivo de la zona y aumentando el azolve de las numerosas presas de agua que rodean el área y que son fuente de abastecimiento de agua potable para la población de la Ciudad de Guanajuato, lo que agudiza notablemente el problema.

El área de estudio abarca el Municipio de Guanajuato ubicado en la sierra del mismo nombre, la mayor parte corresponde a la región conocida como Distrito Minero de Guanajuato. Se localiza al noroeste del Estado dentro de la cuenca del Río Lerma; ubicada en la parte alta de la Subcuenca del Río Guanajuato.

Los objetivos del estudio fueron:

- estimar la pérdida de suelo en la Sierra de Guanajuato aplicando la EUPS
- estimar la producción de sedimentos en el marco de influencia de las principales presas de la región
- correlacionar la pérdida de suelo con las características físicas del área y la influencia antrópica en la misma, mediante el uso del Sistema de Información Geográfica ILWIS (versión 1.4).

Se definieron las áreas de influencia de cada una de las presas de la región, formando las microcuencas de estudio. A cada microcuenca se le realizó la caracterización física ambiental realizando el muestreo de suelos y sedimentos con un total de 72 sitios. Los análisis de laboratorio fueron: textura por el método de Bouyoucos modificado por Villegas *et al.*, (1978); contenido de materia orgánica por el método de Walkley y Black (Jackson, 1982); contenido nitrógeno total por el método Kjeldhal (Jackson, 1982); fósforo total (Jackson, 1982; Littau y Engelhar, 1990; Ortiz, 1993), sodio y potasio por flamometría (Jackson, 1982), así como las determinaciones de permeabilidad y pH.

Se calcularon cada uno de los factores exigidos por la EUPS: el factor R (erosividad de la lluvia), utilizando los registros de lluvia diaria (pluviograma) de los últimos 14 años. Para el factor K (erodabilidad del suelo), se utilizó el nomograma de Wischmeier. El factor LS se obtuvo a través del valor promedio de las pendientes en cada microcuenca, con el uso del mapa topográfico. Para el factor C se hizo el mapa de vegetación con la interpretación de fotografías aéreas vuelo SINFA escala 1:75,000 de 1994. Se aplicó la metodología propuesta por Dissmeyer y Foster (1981) para zonas forestales. Para estimar la producción de sedimentos se utilizó la metodología propuesta por Williams (MUSLE, 1975), calculando el escurrimiento máximo (factor Q) y la escorrentía superficial (factor q_p). El tratamiento estadístico fue por análisis de regresión lineal y varianza. Para la elaboración de mapas se usó el Sistema de Información Geográfica ILWIS (versión 1.4).

Los resultados son: existe una alta erosividad de la lluvia (1963.588 Mj.mm/ha/año), con suelos medianamente erodables ($K = 0.183$ a 0.357); topografía de fuerte a accidentada con inclinaciones de 19 a 34% en promedio; la cubierta vegetal varía en cada microcuenca entre agricultura y bosque por lo que el valor del factor C oscila entre 0.007 a 0.590. Respecto a los factores para la estimación de la producción de sedimentos, se encontró gran producción, relacionada con los la longitud de las pendientes y la superficie de la microcuenca. En cuanto a la valoración química y cuantificación de nutrimentos, se encontraron altos valores de materia orgánica en las microcuencas con mayores porcentajes de bosque. Los pH varían de

ligeramente ácidos a ligeramente alcalinos. Respecto al contenido de nitrógeno total, se encontraron valores que oscilan de 1.710 kg/ha (La Peregrina) hasta 5.840 kg/ha (La Esperanza) que los ubica entre medianamente buenos en cuanto al contenido de este elemento. En los sedimentos se presentan condiciones muy similares a las encontradas en los suelos, comprobándose mediante el análisis estadístico, que no existen diferencias significativas de estos elementos en suelos y sedimentos.

Las microcuencas con mayor nivel de erosión son: Peregrina, Montelongo, Campuzano, La Quinta, La Olla, Sombrerete y Río Guanajuato con niveles de erosión de alta a muy alta (> 200 ton/ha/año), menor superficie de bosque como tipo de cubierta vegetal, así como mayores longitudes e inclinaciones de pendientes. Cuatro de estas microcuencas poseen las más grandes superficies agrícolas, lo cual beneficia la pérdida de suelo y producción de sedimentos, lo que evidencia que el factor C (uso de suelo) es un elemento primordial en la pérdida de suelo.

La mayor producción de sedimentos se presenta en las microcuencas Campuzano, Montelongo, Río Guanajuato, Sombrerete y La Quinta. En la zona de estudio no se encontró la existencia de pérdida de nutrientes de los suelos por efectos de erosión y arrastre de sedimentos, no evidenciándose por consiguiente, un excesivo denudamiento de estos elementos en los suelos de la región.

INTRODUCCIÓN

Los procesos de erosión de suelo se presentan, en la mayoría de los casos, en forma lenta y casi imperceptible; sin embargo, su presencia es continua, lo que ocasiona que el transporte de partículas de la superficie del suelo sea permanente. Dependiendo de la cantidad de partículas de suelo desprendidas y transportadas, es como se cuantifica el grado de deterioro que origina en una región determinada, es la alarma que causa y son las medidas que se toman en cuenta para contrarrestar el proceso. Si a ello aunamos las devastaciones de cubierta vegetal que son tan frecuentes en nuestro país, encontramos que amplias y variadas regiones del territorio, presentan características de degradación de suelos tanto en forma física (remoción y transporte de las partículas de suelo), como en forma química (contaminación).

La existencia de este fenómeno ocurre, en la mayoría de los casos, a consecuencia del mal manejo y poco cuidado que se tiene respecto a la conservación y utilización de los recursos naturales, que propician la gradual pérdida de regiones potencialmente susceptibles de aprovechamiento, ya sea desde un punto de vista agrícola o desde el punto de vista ecológico, por su riqueza en biodiversidad y propiedades intrínsecas que dificultan la cuantificación de las mismas.

No hay que olvidar que la erosión es un fenómeno natural que permite delinear, junto con otros procesos, las características del paisaje de una región determinada, de manera que forma parte de la dinámica y evolución de la superficie terrestre. Pero hay que recordar, también, que dentro de los tipos de erosión que existen, ocurre la provocada por las alteraciones que el hombre realiza en su entorno de manera progresiva, acelerando los procesos que se llevan a cabo y, la mayoría de las veces no son congruentes con los procesos naturales de construcción del paisaje.

La principal alteración, por su frecuencia y daños secundarios, la constituye la remoción de la vegetación, factor principal que determina la aceleración del proceso de pérdida de suelo por efectos del arrastre que sufren las partículas del suelo por el agua y el viento. En este sentido el proceso de deforestación que han venido sufriendo las distintas regiones forestales del país se ha agudizado en los últimos años, algunos autores (Maass y García-Oliva, 1990; Masera-Ordoñez, 1992; Toledo, 1989) han realizado estimaciones de la tasa de deforestación que sufre

el país, indicando que varía entre 30 mil hectáreas por año hasta 1 millón 500 mil hectáreas y afirman que una de las principales razones para ello, se debe al cultivo intensivo de maíz y al cambio de uso de suelo por la introducción de actividades ganaderas en zonas en donde no existe un adecuado manejo agropecuario. Esto ha ocasionado la paulatina transformación de los extensos bosques y selvas del país, dando como resultado el aumento en la degradación de los suelos por efectos de erosión hídrica.

En el Estado de Guanajuato, la estimación de pérdida de suelo por procesos de erosión es un tema de investigación que se ha venido desarrollando desde hace algún tiempo (Hernández, S. 1984; Hernández, A. 1996), especialmente en la región de la Sierra, sitio en el cual los factores causantes de erosión se acentúan drásticamente, ocasionando la pérdida gradual y deterioro del posible potencial productivo de la zona, así como -y quizá sea el factor más importante desde un punto de vista social- el azolve de las numerosas presas que rodean el área y que son fuente de abastecimiento de agua potable para la población de la región y especialmente de la Ciudad de Guanajuato, lo que agudiza notablemente el problema.

La alta riqueza minera de la zona de estudio, ha sido la fuente principal de deterioro y degradación paulatina del entorno físico, puesto que a través del tiempo y, debido al auge minero y consecuente crecimiento demográfico, fueron y han sido devastadas considerables extensiones de cubierta vegetal debido, entre otras cosas, a la elevada demanda de madera para ademes y combustibles para las actividades mineras.

Por otra parte, el sobrepastoreo que sufre la región ha contribuido al detrimento de sus recursos vegetales, paulatinamente se han realizado sustituciones de especies vegetales y los efectos se hacen sentir mayormente en el suelo, ya que al cambiar el contenido de materia orgánica, se disminuye la capacidad de infiltración del suelo y aumenta el flujo superficial del agua, lo que incrementa la pérdida de suelo (Figueroa, 1991); esta situación se manifiesta todavía más en las áreas boscosas en donde la explotación selectiva e irracional, aunada a la topografía abrupta y a los cambios de uso de suelo coadyuvan a la pérdida de suelo en forma alarmante.

No hay que olvidar que dentro de los factores que favorecen la erosión de los suelos en forma acelerada lo constituyen los aspectos sociales y económicos de la región, en la Sierra de Guanajuato, caracterizada por ser un sitio en el cual han confluído desde tiempo atrás factores

de alteración de tipo social, como lo son la falta de agua potable y la reducción de la riqueza mineralógica, han ocasionado el empobrecimiento del nivel de vida de una gran parte de la población.

OBJETIVOS

- 1.- Estimar la pérdida de suelo en el área de influencia de las principales presas que abastecen de agua potable a la ciudad de Guanajuato, mediante la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS).
2. - Estimar la producción de sedimentos en el área de influencia de las presas de la región.
- 3.- Correlacionar la pérdida de suelo y producción de sedimentos con las características físicas del área y la influencia antrópica en la misma, mediante la aplicación del Sistema de Información Geográfica ILWIS (versión 1.4).

MARCO TEÓRICO

3.1 Concepto de erosión

Erosión es la acción de roer, gastar y provocar pérdidas de sustancias del relieve, originando una disminución de volumen. El proceso de erosión esta conformado por tres fases principales:

- la acción de desprendimiento de partículas
- el transporte o desplazamiento de los materiales desgastados
- la acumulación o finalización del transporte, depositación de los materiales transportados en lagos, océanos o áreas continentales (Gregory y Walling, 1973).

Lugo (1989) define la erosión como el conjunto de procesos que originan separación de los productos del intemperismo del sustrato original. Los agentes actuantes pueden ser el agua en sus distintas manifestaciones (superficial, hielo, subterránea, olas, etc.), el viento y los organismos. La intensidad del proceso depende de factores tales como topografía, clima, litología, estructura geológica o actividad tectónica.

La erosión es un término amplio aplicado a las diversas maneras como los agentes móviles (agua, viento, etc.) desprenden y transportan los productos del intemperismo y sedimentación (Villota, 1991). De manera que, el proceso general puede clasificarse en dos grandes formas: la erosión geológica o natural y la erosión acelerado o antrópica; en ambas categorías intervienen los mismos agentes solo que la intensidad en su actuación es distinta, así como su interacción con otros factores y agentes que también intervienen en el proceso, por lo que los resultados de su acción son diferentes.

La erosión geológica o natural consiste en el desgaste y remodelado del paisaje terrestre original a largo plazo, sin intervención del hombre. Se presenta por la acción del agua, viento, temperatura, gravedad y glaciares. Este tipo de erosión es lo suficientemente lenta como para permitir el desarrollo de suelos en constante rejuvenecimiento. Su acción se pone de manifiesto por las características morfológicas de los patrones de drenaje (Gómez y Alarcón, 1975; Villota, 1991).

Por otro lado, se presenta con frecuencia alarmante, la erosión acelerada o antrópica. La erosión acelerada también puede ser originada por factores naturales por ejemplo: remoción en masa, avance de desiertos, deforestación por incendios forestales, etc. Afecta principalmente al suelo y es un proceso denudativo más fuerte y rápido que la erosión geológica, debido a un cambio brusco en las condiciones imperantes de una zona, generalmente influenciado por actividades humanas (Gómez y Alarcón, 1975; Villota, 1991).

3.2. Concepto de erosión del suelo

La erosión del suelo consiste en la remoción del material no consolidado de la superficie terrestre, por la acción del agua o el viento y que conduce a la desaparición o alteración del suelo (Lugo, 1989).

Propiamente dicha la erosión del suelo consiste en el acarreo o transporte de partículas sólidas y elementos nutritivos que contiene el suelo, provocando que el potencial productivo y la fertilidad del mismo disminuya (Figueroa, 1991). El acarreo de dichas partículas puede darse por agentes como agua o viento; la fuerza de acción con la que actúan tales agentes, está directamente relacionada con los cambios que sufre el paisaje.

El proceso de erosión está influenciado por una gran cantidad de factores que al interactuar entre sí, provocan el desprendimiento y esparcimiento de las partículas del suelo. Dentro de los factores físicos que intervienen en dicho proceso están, en primer término, la pérdida de la cubierta vegetal, ya que ésta establece un límite a la acción erosiva de las gotas de lluvia y al escurrimiento. Las características de la pendiente del terreno afectan la velocidad y cantidad de escurrimiento, así como la erosividad en sí misma, además de las propiedades y características de erodabilidad del suelo (Walling, 1988).

La erosión del suelo puede ser altamente favorecida por las actividades que realiza el hombre, por ejemplo la tala de bosques, quema de vegetación, construcción de vías y obras de comunicación inadecuados sistemas de cultivo, etc. Todas estas actividades pueden aumentar el poder de acción de agentes como agua y viento (Gómez y Alarcón, 1975).

La erosión rápida del suelo propiciada por el hombre ocurre cuando éste rompe su equilibrio entre los factores que intervienen en el mencionado proceso. Para que podamos entender el concepto de erosión en términos de la importancia que representa para el hombre, es necesario incluir en la definición de erosión de suelo la cantidad de suelo perdido en un tiempo y área específicos; se expresa en unidades de masa por unidad de área como ton/ha o kg./m² (Gómez y Alarcón, 1975; Nearing *et al.*, 1994).

Así que, en el proceso de erosión acelerada favorecida por factores antrópicos y de acuerdo con los agentes erosivos más importantes que actúan en el proceso, se conocen las siguientes formas: erosión hídrica y erosión eólica.

La erosión hídrica se ve altamente favorecida por las condiciones de topografía, intensidad de la precipitación, destrucción de la cubierta vegetal y grado de alteración del ecosistema en general. De acuerdo a la forma como el agua actúa en el suelo, pueden distinguirse tres clases o tipos de erosión hídrica: pluvial, por escorrentía y remoción en masa (Villota, 1991).

Los tipos o formas de hidroerosión en el suelo por escorrentía son:

- erosión laminar: consiste en la remoción más o menos uniforme de una lámina delgada de suelo de una superficie inclinada, sin que se formen claramente canales de desagüe, el suelo es arrastrado de manera paulatina y casi imperceptible (Villota, 1991).
- erosión en surcos: ocasionada por el escurrimiento concentrado del agua en surcos más o menos paralelos, independientes y durables. El desprendimiento de partículas se origina principalmente por la energía del flujo de agua. La formación del surco es frecuente en suelos medianamente susceptibles a la erosión (Gómez y Alarcón, 1975).
- erosión en cárcavas: se origina cuando hay mayor concentración en el escurrimiento, pueden unirse varios surcos y formar zanjas de gran tamaño (cárcavas). Se presenta en suelos susceptibles a la erosión. Este tipo de erosión disecta tan profundamente el suelo que el terreno no puede nivelarse (Gómez y Alarcón, 1975; Villota, 1991).

La erosión hídrica alcanza su máximo donde la lluvia intensa y la cubierta vegetal están desfasadas, es decir, hay mayor cantidad de agua precipitada y menor superficie de suelo cubierta con vegetación, de manera que el grado máximo de erosión coincide con el punto máximo de precipitación pluvial (Figueroa, 1991). Las variaciones en las tasas de erosión

aumentan conforme disminuye la protección vegetal, de manera que los valores más altos de erosión se encuentran en áreas con suelos desnudos.

La mayoría de los eventos erosivos del suelo, originados por la salpicadura de las gotas de lluvia se presentan con lluvias entre 30 y 60 mm; sin embargo, la intensidad de la lluvia crítica para iniciar el proceso erosivo varía, dependiendo de las condiciones climáticas presentes (Figueroa, 1991). La severidad de la erosión cambia con el tiempo y el espacio, depende de la topografía local, de las condiciones y uso del suelo y del clima, de manera que estos factores producen variaciones regionales que pueden llegar a ser muy marcadas.

Desde el punto de vista edáfico, cualquiera que sea el agente erosivo del suelo, las alteraciones que ocasiona, son muy diversas. El primer efecto significativo, redundando en el cambio de la textura y estructura de los agregados del suelo, disminución de la infiltración del agua de lluvia y la cantidad que pueda ser almacenada en el suelo, que a su vez, puede aumentar los valores de escorrentía. Por otra parte, la paulatina pérdida de suelo ocasiona al mismo tiempo la pérdida de nutrimentos para las plantas, decreciendo el potencial de fertilidad del suelo. El impacto de las gotas de lluvia y agua de escurrimiento poseen la energía necesaria para separar y transportar las partículas de suelo; en consecuencia, la erosión separa los granos individuales del suelo, acarreándolos o simplemente esparciéndolos (Kirby, 1984; Foster, 1988; Walling, 1988).

3.3. Proceso de producción de sedimentos

La producción de sedimentos puede entenderse como el flujo total de partículas de una cuenca hidrológica, en un tiempo determinado, es decir, es el material que se transporta hacia algún punto de interés dentro de la misma cuenca (Mitchell y Bubenzer, 1980).

El movimiento del suelo por el agua ocurre en tres fase: separación de las partículas individuales del suelo; transporte o movimiento de esas partículas separadas, sobre la superficie del suelo o terreno; y la depositación de dichas partículas en nuevos sitios cercanos o no al sitio original de donde fueron desprendidas (Troeh *et al*, 1991). De manera que los sedimentos se producen mediante la acción de los procesos erosivos llevados a cabo en toda

la superficie terrestre. Generalmente se habla de una sedimentación cuando las partículas transportadas son depositadas en lagos, río u océanos. Desde un punto de vista edáfico, el proceso de producción de sedimentos es el siguiente:

a) desprendimiento de las partículas del suelo; esta primer fase del proceso se lleva a cabo cuando las gotas de lluvia impactan en el suelo y lo disgregan; la facilidad de separación o desagregación de tales partículas, está estrechamente relacionada con las propiedades de erodabilidad, características intrínsecas del propio suelo, así como la densidad de la cubierta vegetal.

b) arrastre o transporte de las partículas de suelo; la segunda fase del proceso se origina una vez que han sido desprendidas las partículas del suelo, el arrastre es influenciado por las características del terreno donde se verifique el proceso; en este último aspecto influye decisivamente la forma, tipo e inclinación de la pendiente, y la cubierta vegetal. La distancia que las partículas erodadas -sedimentos- recorren, está determinada por la longitud de la pendiente y por la fuerza de flujo hídrico, que se relaciona con la intensidad y frecuencia de la precipitación. El arrastre o transporte de sedimentos por el agua puede darse en tres formas:

- Como flujo de masas de sedimentos pobremente mezcladas, que fluyen como un cuerpo cohesivo cuando están saturadas de agua. Requieren una pendiente pronunciada y abundancia de partículas clásticas de alta descarga inicial, originadas por intemperismo mecánico. Estas condiciones son comunes en ambientes áridos y semiáridos o en lugares en donde ha sido removida la vegetación (Miall, 1986).
- Como carga de base o flujo hídrico; esta forma de transporte se origina cuando los sedimentos son transportados como granos individuales a lo largo de la base de la corriente. La carga de base puede consistir en arena, gravas o ambas. La distribución del tamaño del grano está gobernada por el poder del flujo y su variación se debe a la velocidad del mismo. Esta carga no es cohesiva y da como resultado una amplia variedad de estructuras sedimentarias (Miall, 1986).
- Como carga suspendida; esta forma de transporte se presenta en partículas del tamaño de los limos, arcillas o arenas muy finas (Miall, 1986).

El sistema de transporte completo incluye el movimiento inicial del suelo desde el punto de impacto de la gota de lluvia, a pequeños o grandes canales y a canales efímeros, así como a ríos de flujo continuo. Por otro lado, la distancia que recorren las partículas del suelo desprendidas por la erosión depende del tamaño, la densidad y forma de tales partículas, así como de la velocidad del agua de escurrimiento. Dicho proceso es altamente selectivo, tomando en cuenta que la erosión hídrica moviliza y transporta preferencialmente fracciones específicas y constituyentes del suelo de importancia particular, como los nutrimentos para las plantas, lo que permite considerar el tamaño de partículas características, materia orgánica, nutrimentos y contenido mineral de sedimentos transportados (Walling, 1994).

De esta manera y en forma general, la textura de los sedimentos determina su origen; cuando proceden de erosión laminar suelen ser de textura fina y desplazarse en suspensión; cuando la erosión es en surcos lo probable es que el sedimento sea de grano grueso y forme materiales de arrastre (FAO, 1967). Por otra parte, también existen diferencias en el tamaño de los sedimentos de acuerdo a la forma en que son transportados, de manera que, los elementos transportados por acarreo son de mayor tamaño que los elementos transportados en suspensión. Además, el tamaño del material transportado en suspensión está estrechamente ligado al grado de turbulencia de la corriente (Oropesa, 1980).

c) depositación de las partículas transportadas: la tercer fase del proceso se lleva a cabo cuando la fuerza del flujo pierde su energía de transporte y las partículas son depositadas en sitios de escasa pendiente, sitios deposicionales o en donde termina el afluente, que puede ser un río, un lago o un embalse, pero también pueden depositarse en una parcela o áreas bajas de una cuenca. En la mayoría de las situaciones la producción de sedimentos está limitada por la capacidad de transporte de la escorrentía y a su vez, el flujo de escorrentía está condicionado por los cambios en la topografía, vegetación y características del suelo, lo que origina varias oportunidades de depositación. Las partículas gruesas de arena recorren menos distancia y se depositan primero, después lo hacen la arena fina y el limo, algunos limos muy finos se sedimentan únicamente en agua quietas, la arcilla finísima y el humus coloidal pueden permanecer en suspensión indefinidamente en agua quieta y sólo precipitan cuando alcanzan una concentración determinada de electrolitos o si existe un descenso de temperatura (FAO, 1967).

Los factores físicos que intervienen en la producción de sedimentos de un área determinada, son los mismos que participan en el proceso de erosión hídrica: precipitación (cuánto llueve, en qué época y con qué intensidad); erodabilidad (qué capacidad tiene el suelo para ser desprendido y transportado); cubierta vegetal (cómo aumenta o disminuye la pérdida de suelo y grado de erosión de un área, de acuerdo a la superficie de vegetación cubierta y tipo de la misma); geoforma (cómo afectan las características de la pendiente del terreno, la velocidad y cantidad de escurrimiento además de la erosividad en sí misma) (Walling, 1988); de tal manera que la depositación y almacenamiento temporal o permanente puede ocurrir sobre las laderas, particularmente donde declinan los gradientes, en la base de la pendiente, en áreas planas o incluso en los mismos canales. La magnitud relativa de esta pérdida tiende a aumentar cuando aumenta el tamaño de la cuenca (Mutchler, 1994).

3.3.1 *Tipos de sedimentos producidos*

El concepto fundamental de la producción de sedimentos puede basarse en la cantidad de sedimentos disponibles generados por el proceso de separación o por la capacidad de transporte de la escorrentía (Foster, 1988).

En el estudio de la producción de sedimentos se han creado varios parámetros, uno de ellos lo constituye el parámetro SY (producción de sedimentos) que se define como la cantidad total de material erodado que completa su viaje desde el área origen hasta un punto específico del flujo de la corriente en un tiempo determinado (Lal, 1990; Romero *et al*, 1992). Si el punto específico de control es un embalse, SY es la acumulación de sedimentos en el mismo. Este parámetro representa la fracción remanente de la erosión total originada en el área de estudio, tomando en cuenta que algunas de las partículas llegan como coluviones, aluviones, bancos de material y otros materiales erodados que deben ser sustraídos (Romero *et al*, 1992). Los sedimentos - partículas de suelo erodadas- son acarreadas por escorrentía, generalmente las cantidades de esta fracción del total de sedimentos del proceso erosivo, son menores que los sedimentos producidos dentro de la cuenca (Foster, 1988).

Otro parámetro utilizado es el llamado SDY definido como el rango de liberación de sedimentos y representa la erosión neta liberada en el punto de control o medición; puede referirse a un

embalse, un río o la salida de una cuenca. Es un parámetro muy complejo dentro del proceso de erosión, puesto que depende del área, relieve, pendiente y precipitación. SDY es la tasa de liberación o descarga de sedimentos y corresponde a la fracción de la erosión neta, que se espera descargar en el punto de la zona de drenaje que se está considerando. La erosión neta abarca la erosión interarroyuelar, en arroyuelos, en cárcavas y en corrientes (Mitchell y Bubenzer, 1980).

La eficiencia de atrape se conoce como el porcentaje total de sedimentos que llegan y son retenidos en los cuerpos de agua, particularmente en los embalses. Este parámetro resulta de vital importancia si recordamos que no todos los sedimentos que se producen van a ser retenidos en los embalses. El valor de este parámetro depende de: la velocidad de caída de los sedimentos, el rango de flujo a través del embalse, del tamaño y localización de la estructura de salida, de la operación del embalse, de las condiciones de floculación y evolución de los procesos de sedimentación. Además, los métodos para estimar este parámetro son completamente empíricos lo cual restringe su uso (Romero *et al*, 1992).

Respecto a los sedimentos que son depositados en los cuerpos de agua, pueden diferenciarse por su tamaño, de tal manera que se clasifican como:

- ◆ Sedimentos suspendidos: aquella porción de carga de sedimentos en la columna de agua cuyo diámetro es menor de 0.1 mm, lo que nos lleva a considerar a las arcillas, limos y arenas muy finas (Mac Donald, 1991).
- ◆ Carga lavada de sedimentos: se define como las partículas lavadas dentro del arroyo durante eventos de escorrentía y que son más finas que las partículas que forman la base del arroyo. Sus diámetros normalmente son menores de 0.062 mm lo que corresponde a limos y arcillas (MacDonald, 1991).
- ◆ Carga de base: es el material transportado corriente abajo por deslizamiento o saltos a lo largo de la base del canal. Sus diámetros varían entre 0.1 y 1.0 mm por lo que pueden ser transportados como carga suspendida o carga de base (MacDonald, 1991).

3.4. Cuantificación de la erosión y sedimentos

3.4.1. Métodos para cuantificar la erosión

En la actualidad existen gran variedad de métodos empleados para el estudio de la degradación ambiental, así como métodos para estimar la erosión superficial; el problema que algunos de ellos presentan, es que no reflejan con exactitud el avance o estado del proceso en sí. Los métodos de estudio de la erosión pueden ser directos e indirectos; es decir, aquéllos que nos permiten conocer con mediciones exactas hechas en campo, la cantidad de suelo que ha sido desprendido y arrastrado; FAO (1980) incluye estas técnicas en observaciones y mediciones directas, y aquellas que nos permiten conocer cantidades de suelo arrastrado sin que ello signifique la medición exacta en campo de tales situaciones.

Un método conocido es la formación de pedestales en las raíces de las plantas, se usa para cuantificar la erosión superficial del suelo. Como la remoción de suelo forma pedestales en los sitios en donde la superficie original ha sido protegida por las copas de las plantas y por sus raíces, esto permite que pueda medirse la cantidad de suelo perdido. Debe cuidarse no confundir los montículos por acumulación alrededor de las plantas, causada por el transporte del suelo dentro del área protegida por la cobertura o por las actividades orgánicas. Esto resulta fácil de detectar con sólo examinar la textura, estructura y contenido orgánico tanto de los montículos como del suelo alrededor de la planta (Kirby, 1984). En la Figura 3.1 se muestra la situación mencionada.

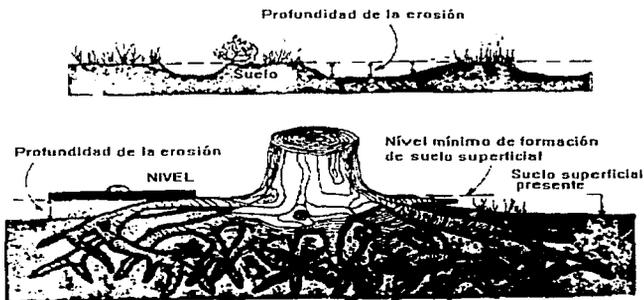


Figura 3.1.- Formación de pedestales por procesos de erosión. (Fuente: Lal, 1990)

Otro de los métodos empleado es el de clavos, rondanas o corcholatas de botella. Se insertan estacas o agujas perpendiculares a la superficie del terreno. La cabeza del clavo brinda la marca a partir de la cual, pueden medirse las alteraciones del terreno con una regla milimétrica. Los clavos, deben ser largos para asegurar su permanencia y delgados para evitar una alteración intensa del suelo; es común usar clavos de acero de 25 cm de longitud, lo importante es que su longitud permita fijarlos con firmeza al suelo y evite su deslizamiento superficial. En áreas en donde se espera una acumulación, el clavo debe ser insertado siguiendo la línea de lavado del terreno, la acumulación posterior, puede medirse como el espesor de sedimentos extendidos sobre la superficie de lavado. El propósito de la rondana es marcar cortes en el terreno ocasionados por erosión y de esta manera medir el espesor de la capa de suelo a intervalos de tiempo regulares. Se presenta un esquema del método en la figura 3.2.

El método de tapas o corcholatas de botella consiste en colocar éstas con el lado interno hacia el suelo, de manera que se formen pedestales similares a los formados naturalmente bajo piedras o raíces. Es importante por lo tanto remover, antes de hacer la medición, los pedestales que se hayan formado a fin de evitar errores (De Ploey y Gabriels, 1980; Tolba, 1988; Anaya et al, 1991).

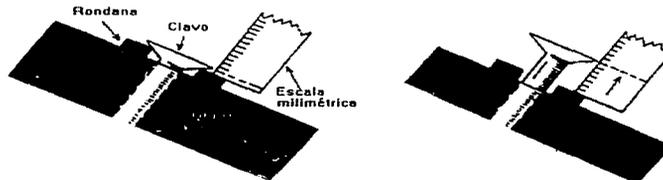


Figura 3.2.- Uso del método de clavos y rondanas. (Fuente: Lal, 1990)

Los lotes de escurrimiento es otro método de uso común, consiste en adaptar un dispositivo en un área determinada de manera que permita cuantificar tanto los flujos como los sedimentos generados. La forma y tamaño pueden variar, siendo el más utilizado el de 2 x 10 m, colocado en el sentido de la pendiente principal del terreno y aislado con algún material (lámina de metal, asbesto, cemento o madera). Estos dispositivos pueden ubicarse ya sea en pendientes, en

áreas abiertas o en parcelas delimitadas. En la parte baja del lote se coloca algún recipiente que capte los escurrimientos y sedimentos. El inconveniente de este método es el costo económico que incluye (De Ploey y Gabriels, 1980; Tolba, 1988; Anaya *et al.*, 1991). Algunos de los dispositivos utilizados se muestran en la Figura 3.3.

Dentro de la categoría de métodos indirectos utilizados para conocer el proceso de avance de la erosión, se encuentra el uso de la interpretación de fotografías aéreas e imágenes de satélite que consiste únicamente, en reconocer los indicios de una posible erosión. Actualmente, también se utiliza como método de estudio de la erosión el procesamiento digital de imágenes de satélite, así como el uso de imágenes digitales de video, a fin de obtener una evaluación espacial del avance del proceso erosivo (Palacio-Prieto y López-Blanco, 1992).

En esta misma categoría encontramos la aplicación de modelos matemáticos y paramétricos. Estos métodos dan un valor a cada uno de los factores que intervienen en el proceso de erosión y la relación que existe entre ellos. Los resultados obtenidos proporcionan una aproximación de la magnitud del evento y, al mismo tiempo, permiten planear las medidas de control y la efectividad de las mismas.

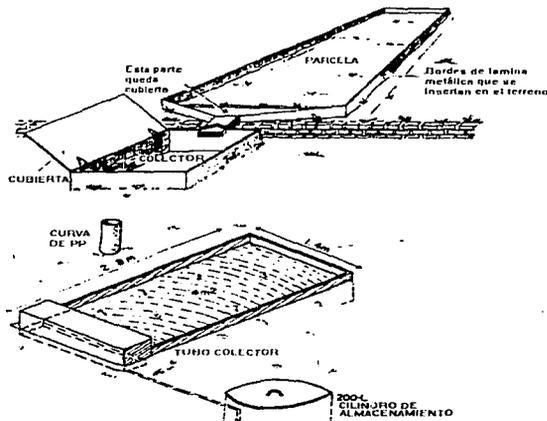


Figura 3.3.- Ejemplo de lotes de escurrimiento usados. (Fuente: Lal, 1990)

Existen tres tipos básicos de modelos de erosión de suelo de acuerdo a sus bases metodológicas que son: 1) empíricos, 2) conceptuales y 3) físicos. Los modelos empíricos se basan en observaciones y suponen una naturaleza estática; parten de una lógica inductiva y, generalmente, se aplican para aquellas condiciones para los que han sido calibrados los parámetros, como es el caso de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo. El papel central que han desempeñado los modelos empíricos, ha sido en la predicción promedio de pérdida de suelo, desarrollándose adaptaciones para estimar la producción de sedimentos. Los modelos conceptuales se colocan en medio de los modelos físicos y empíricos y están basados en ecuaciones continuas que involucran agua y sedimento. La atención principal de estos modelos ha sido estimar la producción de sedimentos usando el concepto de unidades hidrológicas. Los modelos físicos intentan representar los mecanismos esenciales de la erosión. Representan una síntesis de los componentes individuales que afectan la erosión, incluyendo la interacción compleja entre varios factores y su variabilidad temporal y espacial. El resultado es sinérgico, el modelo como un todo que representa más que la suma de las piezas individuales. El desarrollo de estos modelos permite conocer qué parte del sistema es más importante en el proceso para brindar así más atención a este punto (Nearing *et al*, 1994).

El desarrollo de modelos empíricos ha permitido a su vez, la expansión de métodos predictivos que permiten estimar las pérdidas de suelo en una región; uno de tales métodos es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) desarrollada y propuesta por Weischmeier y Smith en 1965.

El uso de esta ecuación sirve para predecir la pérdida de suelo ocasionada por el agua, además de permitir evaluar las necesidades de conservación que se requieren para un suelo en particular, a partir de la medición de una serie de factores. La ecuación y sus factores son los siguientes:

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

donde

E, es la cantidad de suelo erosionado expresado en ton/ha/año

R, representa el factor de erosividad de la lluvia; para obtener su valor, es necesario conocer la energía cinética de la lluvia así como la intensidad máxima de la misma, representados ambos parámetros como el índice EI_{30} . Dicho índice es una relación estadística que muestra la interacción entre la energía de caída y la intensidad máxima para separar y

transportar las partículas del suelo. Su valor se expresa en $Mj/ha\text{-año}$. (Weischmeier y Smith, 1978; Kirby, 1984; Foster, 1990).

K, es el factor que expresa las características de erodabilidad del suelo, las cuales se obtienen conociendo las propiedades de textura, permeabilidad, estructura y contenido de materia orgánica.

LS, es el factor que representa la acción que tiene la pendiente dentro del proceso de erosión. Su medición toma en cuenta la longitud de la pendiente así como su inclinación. El valor de inclinación se expresa en porcentaje y la longitud en metros. Ambas medidas se computarizan y se obtiene un solo valor, que es adimensional (Foster, 1990).

C, es el factor que tiene que ver con el tipo de cubierta vegetal, estado de crecimiento y manejo de suelo y cultivos. Este factor representa el rango entre la cantidad de suelo que se pierde bajo condiciones de manejo de cultivo específicas y la pérdida de suelo cuando es barbechado y cultivado regularmente. Una estimación de este factor puede hacerse sumando los productos de rango de pérdida de suelo y el porciento anual de R para cada estado de crecimiento para una secuencia de cultivos (Kirby, 1984; Foster, 1990). Para el caso de vegetaciones forestales en donde la valoración de este factor ha sido escasa, se han realizado algunos trabajos al respecto (Dissmeyer y Foster, 1981; Hernández, 1996), en donde se han implementado modificaciones a este factor, a fin de estar en condiciones de aplicar la EUPS en zonas con vegetación arbórea (bosques templados).

P, es el factor relacionado con las prácticas de cultivo más comunes. Este factor indica la cantidad fraccionaria de erosión que ocurre cuando se usan esas prácticas, comparadas con lo que pasaría sin el uso de ellas.

La gran crítica a la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo ha sido la ineffectividad de su aplicación en sitios fuera del rango de condiciones para las cuales fue desarrollada. Las adaptaciones de la EUPS para nuevos ambientes requiere mayores recursos y tiempo, a fin de desarrollar las bases de datos necesarias para manejar el modelo; ello no significa que no puedan ser utilizadas ni probadas para otros ambientes y, a este respecto, se han llevado a cabo estudios con el objeto de determinar los parámetros requeridos para la aplicación de este modelo en regiones montañosas, forestales o en superficies de terreno de dimensiones muy

distintas a las estipuladas en el modelo original (Nearing *et al.*, 1994). También se ha realizado la extensión y adaptación de sus parámetros a fin de estimar la producción de sedimentos para una región en particular (Walling, 1976; Rodríguez, 1980; Foster, 1988).

3.4.2. Métodos para cuantificar la producción de sedimentos

De manera categórica, se podría afirmar que el mejor método para medir la producción de sedimentos, es la medición directa de los sedimentos suspendidos en la corriente de agua y en el lecho de la corriente en el punto de interés de la cuenca: la metodología incluye instrumentos cuya aplicación puede llegar a ser muy costosa y deben algunas veces los resultados deben corresponder a toma de datos durante un largo tiempo, con mucha frecuencia es preferible estimar la producción de sedimentos usando metodologías alternativas, tomando en cuenta los datos disponibles para el área del proyecto. Mitchell y Bubbenzer (1980) afirman que son tres los métodos usados para conocer la producción de sedimentos de un área determinada:

- * a través del uso de ecuaciones predictivas
- * a partir del cálculo de la erosión neta y de la tasa de depósito de sedimentos
- * por la medición de la carga de sedimentos en suspensión o deposición de sedimentos en lagos, presas, etc.

En general, los métodos usados para conocer la producción de sedimentos de un área determinada, están muy relacionados con los modelos desarrollados para conocer la erosión que presenta esa misma área, ya que la erosión del suelo es un proceso simultáneo con la producción de sedimentos. Sin embargo, también se han desarrollado métodos que se emplean en la evaluación de cada uno de los parámetros definidos tanto en el transporte como en la deposición de sedimentos, algunos de ellos son los siguientes:

Para evaluar la producción de sedimentos (factor SY), es necesario que la erosión hídrica laminar y por arroyuelos sean los contribuyentes mayoritarios en el desprendimiento y transporte de los sedimentos y, donde el sistema de cárcavas ejerza una influencia menor. Los modelos empleados varían ampliamente, desde una regresión simple, basada en la variación espacial de la producción anual de sedimentos y variables climáticas y fisiográficas, hasta complejos modelos de simulación (Romero *et al.*, 1992).

En la cuenca del Río Segura, España, Romero *et al* (1992) estimaron la producción de sedimentos usando datos de clima (precipitación), relieve, longitud de la cuenca, área de la cuenca, diferencias extremas de elevación, rango de elongación, pendiente promedio de la cuenca, promedio de lluvia anual, flujo promedio anual y erosión neta. Estas variables se relacionaron mediante una ecuación de regresión múltiple, combinándolas para generar cuatro componentes principales: tamaño, pendiente, erosividad y forma. Un análisis posterior permitió incluir en la regresión sólo el área (A) y el flujo promedio anual (MAF) como variables independientes. De dicho análisis se obtuvo la siguiente ecuación:

$$SY = 0.007731 A^{0.3882} MAF^{0.2832}$$

Los resultados obtenidos de esta manera fueron comparados con los resultados observados y se concluyó que existe una correlación adecuada. Otra manera de analizar este parámetro, es mediante el uso de la EUPS con sus modificaciones para tal fin. Dichas modificaciones consisten, en su mayoría, en la adición de parámetros a la versión original de la ecuación.

Renard *et al* (1974) aplicaron la EUPS para estimar la producción de sedimentos de pequeñas cuencas hidrográficas, describiendo dicha producción como:

$$A = 0.224 (RKLSCP)Ec$$

donde

Ec = factor de erosión del canal

0.224 = constante relacionada con la longitud de la pendiente

La ecuación universal modificada (MUSLE) por Williams (1975), reemplaza el factor R, índice de erosividad de la lluvia, por los factores escorrentía y caudal punta o tasa máxima de escorrentía correspondiente de una tormenta, con vistas a predecir los sedimentos emitidos por la cuenca. Este método podría aplicarse a grandes cuencas, siempre y cuando las fuentes de sedimentos estén uniformemente distribuidas por la cuenca y las más importantes subcuencas tributarias sean hidráulicamente similares. Sin embargo, ninguna de estas condiciones suelen presentarse en las grandes cuencas.

Williams y Berndt (1976) realizaron la modificación a la EUPS para predecir la producción de sedimentos en cuencas hidrográficas, considerando que no era necesaria una proporción de depósito de sedimentos cuando es sustituido el valor de la energía de la precipitación, en la EUPS, por el valor de escorrentía. La modificación realizada consiste en:

$$Y = 11,8(Qq_p)^{0,56}KCPLS$$

donde

Y = producción de sedimentos en una tormenta individual en kg.

Q = volumen de escurrimiento durante una tormenta en m³

q_p = tasa máxima de escorrentía en m³/seg.

Foster *et al* (1978), realizaron una modificación a la EUPS cuyo componente principal fue un modelo de producción de sedimentos para cuencas hidrológicas pequeñas. La modificación realizada consiste en:

$$A = (0.224)WKCPSL$$

donde

W = término hidrológico definido como $W = aR_{st} + (1-a)0.40Qq_p$

donde:

R_{st} = factor de precipitación durante la tormenta (unidades EI de la EUPS)

Q = volumen de escorrentía en mm

q_p = tasa máxima de escorrentía en mm/h

a = coeficiente que representa la importancia relativa de la energía de la precipitación comparada con la energía del suelo que se desprende por escorrentía

También se han desarrollado modelos empíricos que relacionan la producción de sedimentos con las características de precipitación y escorrentía de la cuenca. Fournier (1960) relacionó la producción de sedimentos (SY) con el coeficiente climático p²/p, altitud y pendiente a través de la siguiente ecuación:

$$\log E = 2.65 \log p^2/p + 0.46 \log H \tan \alpha - 1.56$$

donde

E = sedimentos producidos en suspensión t/(km² año)

H = peso promedio del sedimento

α = pendiente promedio de una cuenca de drenaje

p = precipitación promedio anual

Pero hay que tomar en cuenta que en muchos sitios, la topografía del lugar causa la depositación de sedimentos de un área cualquiera de la cuenca y no necesariamente son

transportados todos los sedimentos producidos hacia el punto final, de manera que pueden ser retenidos o depositados en laderas o áreas deposicionales dentro de la misma cuenca y no en el punto de salida o fuera de ella, por lo que este hecho influye en la cuantificación en la producción de sedimentos. Es por ello que se han encontrado varios problemas respecto a la evaluación del rango de liberación de sedimentos, puesto que sus valores serán distintos en las partes bajas de la cuenca respecto a los valores que puedan encontrarse en las partes altas de la misma. Además el rango de producción de sedimentos dentro de una cuenca, generalmente disminuyen al aumentar el área de la cuenca (Walling, 1988; Foster, 1988).

Una forma simple de estimar la producción de sedimentos consiste en multiplicar la erosión estimada por cualquiera de los métodos conocidos, por el valor de SDR. Pero en la práctica, no existe una guía para predecir el valor de SDR (rango de producción de sedimentos) en una cuenca específica (Foster, 1988; Walling, 1988). Como la liberación de sedimentos tiene una alta correlación con el volumen y rango máximo de escorrentía, algunas veces puede usarse el factor de erosividad de escurrimiento con el factor de erosividad de la EUPS para estimar la producción de sedimentos; por lo que se requiere, el cálculo de los valores de escorrentía.

Walling (1988) afirma que la magnitud del valor de SDR está influenciado por factores geomorfológicos y ambientales, incluyendo la naturaleza, extensión, localización y origen de los sedimentos, características del relieve y pendiente, patrones de drenaje y condiciones de canal, cobertura vegetal, así como uso y textura del suelo.

Algunos de los métodos empleados en el muestreo de sedimentos depositados en el agua, suspendidos, lavados y los que forman parte de la carga de base, son los siguientes:

- **Carga suspendida:** para colectar muestras de sedimentos se utiliza un dispositivo conocido como DH48 o muestreador de profundidad integrada. Consiste en una botella a través de la cual pasa el agua a la velocidad de flujo, así se muestrea cada porción del flujo de acuerdo a su proporción de descarga total. Otro dispositivo, llamado muestreador de punto integrado, está diseñado con una descarga que permite obtener muestras a una profundidad particular. Las muestras se analizan por peso y filtrado para determinar la concentración de sedimentos o para medir la turbidez usando un medidor de turbidez. Para la localización del muestreo debe tenerse una relación bien definida entre la concentración de sedimentos y la turbidez. Ocasionalmente, se utilizan contadores de turbidez en arroyos, que pueden dar un registro

continuo de la turbidez de corriente a una profundidad determinada lo cual puede usarse como índice de la calidad del agua o penetración de la luz para estudios ecológicos (Kirby, 1984; Tolba, 1988).

- **Carga de base:** este término incluye a los sedimentos que son arrastrados y rodados a lo largo de la corriente por el flujo de arrastre. La carga de base raramente se muestrea por lo difícil que resulta. Existen dos tipos de muestreo que pueden utilizarse; el más común es una variación de canasta de grandes pesos, disminuyendo hacia la base y en un tiempo establecido de medición. Cada muestreador altera el rango de transporte local; sin embargo, como el flujo puede ser retardado y el rango de transporte medido, los resultados pueden ser uniformemente bajos. El dispositivo de Halley-Smith representa un diseño básico en el cual se sobrelleva este problema. Consiste en un armazón de metal pesado con una abertura al frente, se introduce en dirección a la fuerza del agua y a través de la velocidad de flujo del fluido. El orificio se coloca sobre la cama del arroyo y las partículas se atrapan en una capa adhesiva al final del dispositivo. La eficiencia de la trampa para un muestreador con un orificio de 7.6 cm se ha mostrado cercano al 100% para partículas más pequeñas que la grava fina. La medida usada se expresa como volumen de sedimentos o masa por unidad de tiempo, en ton/m/día (Kirby, 1984; Tolba, 1988). En la figura 3.4 se muestra uno de estos.

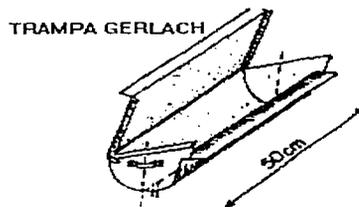


Figura 3.4.- Dispositivo muestreador de sedimentos (Fuente: Lal, 1990)

- * **Observaciones de depósitos de sedimentación:** la carga total de sedimentos (la suma de carga de base y carga suspendida) puede obtenerse por observaciones repetidas de la base

del depósito de agua (lagos, ríos o embalses). La medición debe hacerse al menos por varios años (10 o más) y la acumulación total de sedimentos da, solamente, un promedio a largo plazo para un período de mediciones. Para evaluar la cantidad de suelo erosionado representado por el depósito o por comparación con la medición de transporte de sedimentos en la corriente, el volumen puede ser convertido en masa. Esto puede hacerse estimando la densidad aparente de los depósitos y midiendo el peso seco de los sedimentos por unidad de volumen. Los pequeños cuerpos de agua no son capaces de atrapar todos los sedimentos en ellos, de manera que, la proporción de entrada que se determina sobre la base se llama eficiencia de atrape del depósito (Tolba, 1988).

Actualmente, se brinda gran importancia al papel que juegan las tormentas en el transporte de sedimentos, utilizando para ello modelos matemáticos de regresión simple. El estudio de este tipo de sedimentos también incluye, además de la información cuantitativa tradicional como concentración y carga o producción de sedimentos, el examen de las características físicas y químicas de los mismos (Olive y Rieger, 1992).

Tradicionalmente los estudios sobre transporte de sedimentos suspendidos, se han llevado a cabo en arroyos o corrientes de agua con el empleo de técnicas desarrolladas para esos lugares; sin embargo, también se ha examinado el transporte de sedimentos en términos cortos, tomando en cuenta cuencas o embalses de depositación, de manera que la producción de sedimentos se asocia con la alteración de la cuenca. También se ha estudiado el almacenaje de sedimentos en cuencas, reconociendo la importancia del tiempo de residencia de los sedimentos en el sistema y la removilización del material previamente depositado (Craig *et al*, 1992).

En este sentido la predicción de sedimentos puede realizarse con mayor precisión dividiendo la cuenca en subcuencas, de preferencia con superficie no superior a los 25 km² para compensar la falta de uniformidad en la distribución de los parámetros que la definen. Así, es posible también incluir el efecto de las características hidráulicas y el tamaño de las partículas de los sedimentos, calculando el transporte de esos sedimentos de las subcuencas, hasta la salida de la cuenca completa. El cálculo de este transporte, no solo aumenta la precisión de la predicción, sino que también determina la contribución de cada subcuenca, al sedimento total (Tragsatec, 1994).

3.4.3. Importancia de la producción y cuantificación de sedimentos

En el estudio sobre el manejo de cuencas ha aumentado la importancia de la erosión, el transporte de sedimentos y su asociación con la calidad del agua y alteraciones en el paisaje, tomando en cuenta su gran importancia económica (Olive y Rieger, 1992; Craig *et al*, 1992).

En los procesos de erosión del suelo, la evaluación de sedimentos se relaciona con la selectividad de la erosión y los procesos de transporte, ya que la erosión hídrica puede movilizar y transportar fracciones específicas y constituyentes del suelo de importancia particular para su fertilidad. Además, los cambios sobre la producción de sedimentos en el punto de salida de una cuenca pueden brindar una perspectiva acerca del grado de erosión y pérdida de suelo en sus partes altas. Los cambios en las condiciones climáticas, vegetación y uso de suelo pueden afectar el intemperismo, transporte e introducción de sedimentos a las corrientes de agua, originando un aumento en la depositación local, erosión y carga de sedimentos (Walling, 1988; MacDonald, 1991).

3.4 Unidades de estudio

Es importante recordar que la liberación y producción de sedimentos es un problema de la erosión acelerada a corto plazo, por lo que debe tomarse en cuenta la variabilidad que existe en el transporte de sedimentos y sus importantes implicaciones en la alteración climática de la región a analizar. Por tal razón, la definición del área, unidad o superficie de trabajo en la que se desea realizar el estudio es de suma importancia, dado que con base a este factor existe una variación en la escala de tiempo que se requiere en el propio análisis (Campbell, 1992).

Para fines de este trabajo, se definió como área de estudio la cuenca hidrológica. El uso de esta unidad presenta amplias ventajas: debido a que la red hidrológica de la zona drena hacia un punto único común de acuerdo a las características topográficas de la misma, nos permite definir los puntos de medición que deben llevarse a cabo, facilitando el muestreo de los mismos.

Sarukhán y Maass (1990) sostienen que debido a que la cuenca hidrológica tiene una salida única y localizable, esto las convierte en unidades de estudio y manejo de recursos que permiten detectar y cuantificar rápidamente los efectos que tienen en el ecosistema el manejo de recursos, así como el flujo de nutrimentos; el hecho de presentar una organización jerárquica facilita su manejo.

Además, es importante tener presente que, para que los resultados de los estudios de erosión sean válidos es necesario tener muestras representativas del paisaje. El conocer la producción de sedimentos en estas áreas posee la ventaja de brindar una evaluación espacialmente integrada de los rangos de erosión en el área de captación de la cuenca y evita muchos de los problemas de muestreo asociados con medidas directas. Así en principio, la medición de producción de sedimentos en un punto simple de la salida de la cuenca brinda información promedio acerca de los rangos de erosión dentro de la cuenca (Nearing *et al*, 1994).

ANTECEDENTES

4.1. Descripción de la zona de estudio

4.1.1. Localización geográfica

El Estado de Guanajuato está situado en la parte central del país; limita al norte con San Luis Potosí, al sur con Michoacán, al oeste con Jalisco y al este con Querétaro. Al interior, casi en la zona centro del Estado, se localiza el municipio de Guanajuato, y la zona de estudio abarca la totalidad de este municipio. Las coordenadas geográficas de esta región son: 101°05'-101°20' LW y 21°08'-20°05' LN. La representación espacial de la región se presenta en el Figura 4.1.

4.1.2. Provincias Fisiográficas

El área de estudio se localiza en la parte noroeste del Estado, dentro de la cuenca del Río Lerma, subcuenca del Río Guanajuato, cuyas provincias fisiográficas son: provincia de la Altiplanicie o Mesa Central y Eje Neovolcánico.

La provincia de la Mesa Central está constituida por enormes planicies con altitud promedio entre 1900 y 2200 m. Se encuentra rodeada por la Sierra Madre Occidental, Oriental y Eje Neovolcánico, que sirven de barreras naturales y que han determinado sus características más sobresalientes. Las condiciones climáticas de esta provincia son: secas en el centro, semisecas en las márgenes, escurrimientos escasos en el borde de la Sierra Madre Occidental y, de temporal y con características torrenciales en el resto del territorio (García, 1992). al interior de esta zona, de estudio la provincia de la mesa central se divide en tres subprovincias: hacia el norte, las llanuras y sierras del norte de Guanajuato; al centro de la zona, los valles paralelos del sureste de la sierra de Guanajuato y en el extremo sur, el Bajío Guanajuatense.

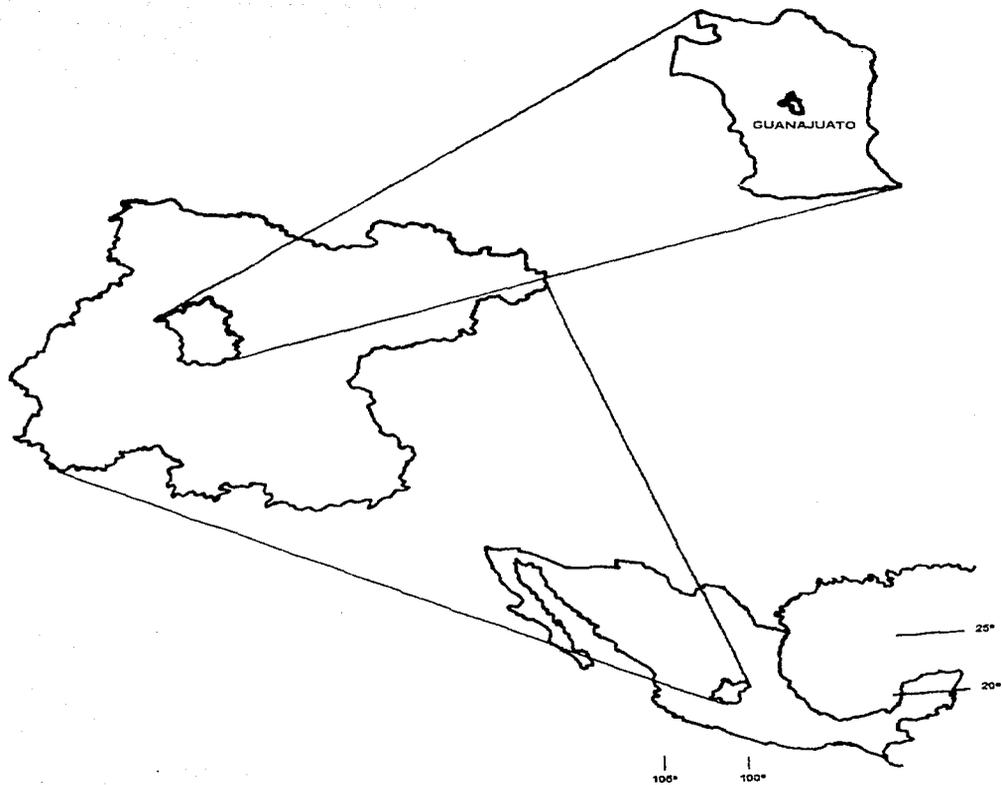


Figura 4.1.- Localización geográfica de la zona de estudio



Figura 4.2.- Provincias y subprovincias fisiográficas de la zona de estudio.

La subprovincia de las llanuras y sierras del norte de Guanajuato ocupa partes importantes del Municipio de Guanajuato; presenta una gran complejidad fisiográfica con sierras, mesetas, lomeríos, valles y llanuras. En forma general, las llanuras y mesetas de erosión se ubican prácticamente al centro de la subprovincia, conformando un sistema montañoso que, junto con las discontinuidades centrales, forman la Sierra de Guanajuato (SPP, 1980; García, 1992).

Los valles paralelos del sureste de la sierra de Guanajuato constituyen una discontinuidad localizada en las laderas suroccidentales de dicha sierra abarcando los municipios de León y Guanajuato. Los valles se caracterizan por su convexidad (SPP, 1980).

4.1.3. *Topografía*

En cuanto a sus características topográficas, la zona de estudio puede ser dividida en dos grandes regiones: la primera de ellas se puede considerar como un sistema denudatorio de montaña en donde se localizan las mayores elevaciones de la zona. Inicia en los 2000 msnm, en la Ciudad de Guanajuato, y llega hasta los 2750 m snm constituyendo el límite hidrológico de la Subcuenca del Río Guanajuato.

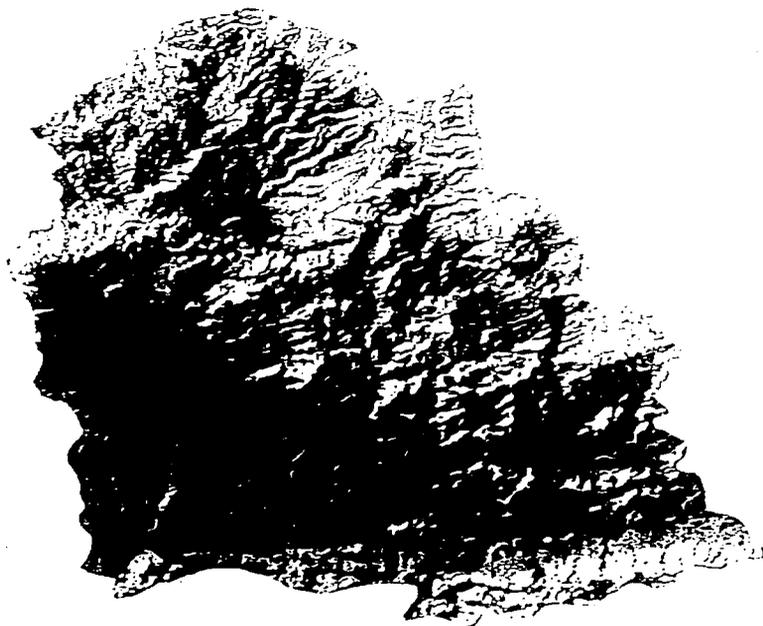
La segunda zona corresponde a las áreas deposicionales que pueden ser consideradas como zonas acumulativas aluviales y cuyas elevaciones van de los 1850 m snm, en la salida de la Presa La Purísima, hasta los 2000 m snm en los alrededores de la Ciudad de Guanajuato. La figura 4.3 muestra un mapa de relieve sombreado generado mediante el Modelo Digital de Terreno elaborado en el Sistema de Información Geográfica ILWIS (versión 1.4) a partir de las cartas topográficas Aldama y Guanajuato escala 1:50,000, el cual nos brinda una idea aproximada de las condiciones y características topográficas de la zona de estudio.

4.1.4. *Geología*

En la provincia de la Mesa del Centro existen numerosos afloramientos de secuencias metamórficas que pueden haber correspondido al Triásico o a las postrimerías del Paleozoico. La historia geológica reconocible principia al final del Triásico, con depósitos de lutita como rocas más antiguas, la mayoría de ellas muy metamorizadas formando pizarras con edades aproximadas de 67 millones de años (Antúnez, 1964; Medina, 1982).

Debido a que la mayor parte del área de trabajo se ubica dentro del Distrito Minero de Guanajuato, gran número de estudios realizados en esta zona han sido enfocados hacia el aspecto minero y metalúrgico del Distrito, olvidando el aspecto geológico de la Sierra de

MAPA DE MODELO SOMBREADO DE TERRENO A PARTIR DEL MODELO DIGITAL DE TERRENO



de la Sierra de Guanajuato, extendiéndose desde El Bajío hasta Santa Rosa. La importancia geológica del distrito se basa en que es el principal productor de oro y plata, así como la explotación de otros minerales (SPP, 1980; Martínez-Reyes, 1987).

Los principales eventos geológicos que dieron origen a la conformación de esta zona pueden ser resumidos de la siguiente manera:

Durante el Triásico comienza la depositación marina, formando las rocas más antiguas del Distrito que Antúnez (1964) cataloga como pizarras y esquistos con intercalaciones de cuarcita y caliza marmolizada. Al final de este período se presentó la actividad volcánica con emisión de corrientes lávicas ácidas y básicas.

En el Jurásico la región estuvo sujeta a transgresiones y regresiones marinas, comenzando una segunda fase de sedimentación, dando lugar a depósitos de lutitas carbonosas y lutitas más calcáreas. Los movimientos orogénicos fueron más intensos, produciendo derrames andesíticos y basálticos, originando fracturas y plegamientos de estructuras sedimentarias existentes. En el Jurásico Superior hubo dos deformaciones compresivas; la última, acompañada por intrusiones relacionadas con la orogenia Laramide. Se depositaron clastos marinos carbonatados y carbonáceos en condiciones de aguas profundas (Medina, 1982; Martínez-Reyes, 1991).

En el Cretácico hubo mayor actividad volcánica con emisión de corrientes de lava ácida y básica. Las rocas triásicas formaron pliegues suaves. Probablemente en este período hubo mayores condiciones continentales (Antúnez, 1964).

Durante el Terciario, a fines del Paleoceno debió ocurrir la intrusión granítica con la secuencia de rocas básicas y ultrabásicas. Hubo otro período de volcanismo continental con emisión de materiales riolíticos y tobáceos seguidos por derrames básicos, siendo a principios del Eoceno cuando las rocas sedimentarias y volcánicas sufrieron fracturas y fallas. Las rocas más antiguas de este período corresponden al Conglomerado rojo de Guanajuato derivado, en su mayor parte, de las rocas subyacentes del Cretácico y Triásico. En este período se produjo la segunda deformación compresiva que originó el anticlinal que forma el núcleo de la Sierra de Guanajuato. Al final de este período, las rocas ya falladas, estuvieron expuestas a los agentes

erosivos más o menos intensos. Todavía hubo actividad volcánica con emisión de corrientes lávicas (Antúnez, 1964; Medina, 1982).

Al final del Cuaternario y Reciente la acción erosiva originó la formación de arroyos superpuestos entre sí, abruptos y valles estrechos en forma de V, lo cual evidencia la acción erosiva de las corrientes de agua. En el Eoceno hubo acumulación detritica de origen volcánico que relleno los valles además de un volcanismo continental generalizado, alternando con períodos de depositación de terrígenos acompañado de intrusiones y fallamiento normal pre-Basin and Range.

En el Oligoceno y Mioceno decrece el volcanismo y la deformación Basin and Range afecta toda la región; El Bajío y la Sierra de Guanajuato toman su morfología actual. Hay fallamiento en toda la secuencia litoestratigráfica. Las depresiones son rellenas por clastos. Hay intrusión de basaltos (Martínez-Reyes, 1991).

Finalmente, durante el Plioceno finaliza el período de volcanismo, sólo se presentan volcanismos esporádicos, continuando la deformación Basin and Range. El período culminó con eventos de construcción de montañas (Martínez-Reyes, 1991). En el Cuadro 4.1 se resumen los principales eventos geológicos que dieron origen a esta región de la República Mexicana, que marcaron decisivamente el desarrollo edáfico de la zona.

4.1.5. Litología

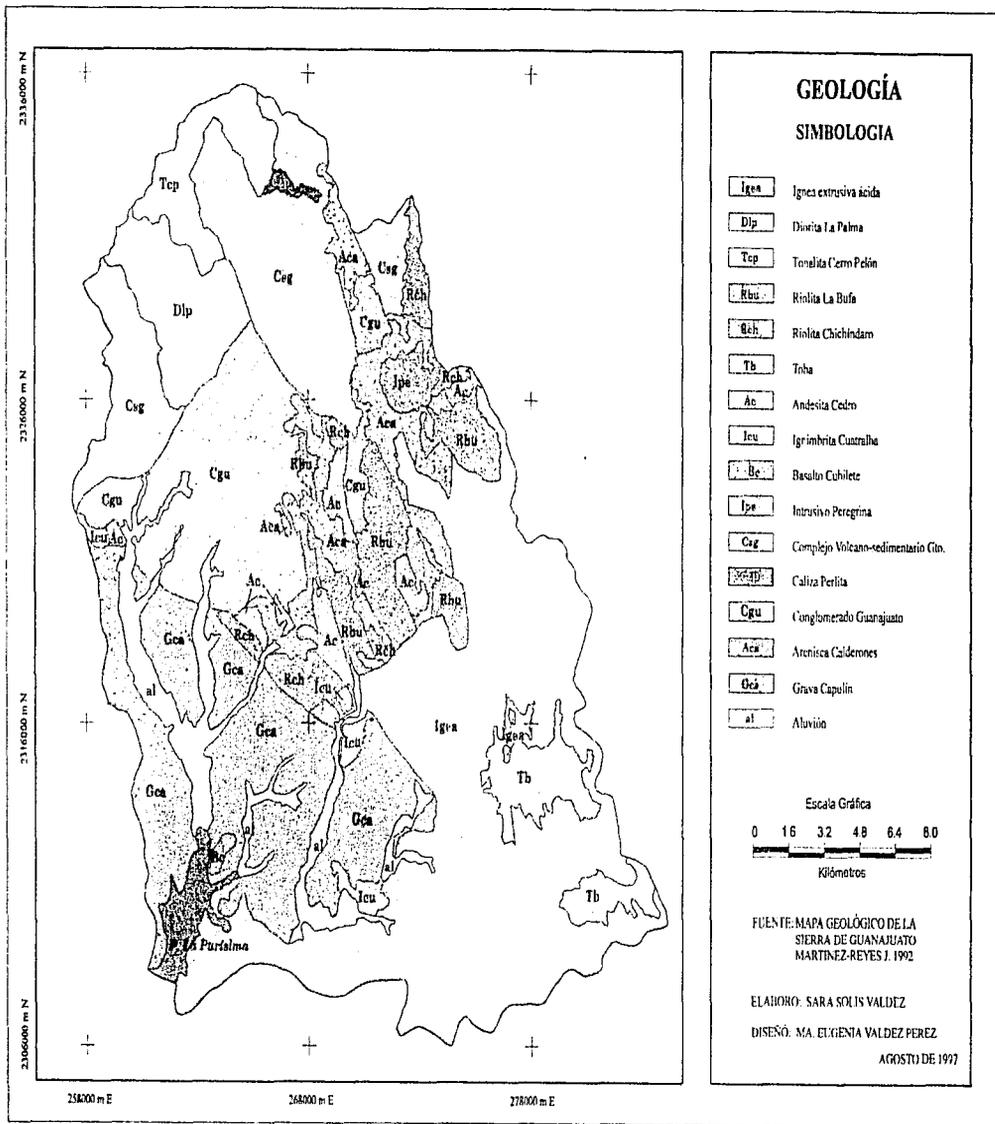
La litología de la región en estudio señalada por Martínez-Reyes (1992), está representada de la siguiente manera: Tonalita del Jurásico, Diorita La Palma, complejo Volcanosedimentario Sierra de Guanajuato, Caliza La Perlita, Conglomerado Guanajuato, Riolita La Bufa, Arenisca Calderones, Andesita El Cedro, Intrusivo Peregrina, Riolita Chichíndaro, Ignimbrita Cuatralba, Grava El Capulín y Aluvión. La mayor parte del material geológico de la región presenta características de ligeramente ácidos a ligeramente alcalinos o casi neutros: Muchas de ellas presentan un alto grado de resistencia al intemperismo debido al contenido y tipo de minerales como cuarzo, plagioclasa, biotita, lo que ha influido notoriamente en el desarrollo de los suelos de la región (Mapa 1 Geología).

Cuadro 4.1.- Principales eventos geológicos del Distrito Minero de Guanajuato

Era	Período	Época	Evento geológico	Formación geológica
Ceno zóico	Cuaternario	Reciente	El Bajío y la sierra de Guanajuato toman su morfología actual.	Aluvión
	Terciario	Plioceno	Finaliza el periodo de volcanismo. Eventos de formación de montañas.	Basalto
		Mioceno	Decrece el volcanismo y la deformación basin y range afecta toda la región.	Formación Chichindaro
		Oligoceno	Fallamiento en toda la secuencia litoestratigráfica. Depresiones rellenas por clastos.	Formaciones Cedros y Calderones
		Eoceno	Acumulación detrítica de origen volcánico. Volcanismo continental generalizado alternando con periodos de deposición de terrigenos con intrusiones	Formación La Bufa
		Paleoceno	Segunda deformación compresiva que forma el anticlinal que constituye el núcleo de la Sierra de Guanajuato. Se establecen las condiciones continentales	Conglomerado Rojo de Guanajuato
Meso zóico	Cretácico		Mayor actividad volcánica marina originando las secuencias vulcanosedimentarias. Emisión de lava ácida y básica.	
	Jurásico		Transgresión y regresión marina relacionada con zona de eusinclinal, fracturas y plegamientos de estructuras sedimentarias, segunda deposición marina. Primera deformación compresiva que produjo metamorfismo de bajo grado.	Formación Rocas Verdes
	Triásico		Deposición marina. Periodos de actividad volcánica. Emisión de lava ácida y básica	Formación Esperanza

4.1.6. Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por García (1988), en el Estado de Guanajuato existen tres tipos de clima, que corresponden a: semiseco (BSs), templado (Cw) y semicálido (A(C)). En la mitad norte, específicamente en la región de las sierras, prevalece un clima templado semiseco cuyas temperaturas varían entre 15° y 20°C, y precipitación media anual de 400 a 800 mm. En la Sierra de Guanajuato se reporta el clima templado subhúmedo con lluvias en verano y muy poca precipitación en invierno. En los alrededores de Santa Rosa la precipitación media es mayor de 800 mm, los rangos térmicos son menores de 16°C. La



máxima precipitación se presenta en agosto con 180 mm. El mes más cálido es mayo con temperatura media entre 17° y 18°C y el mes más frío es enero con temperatura entre 11° y 12°C (SPP, 1980).

Izaguirre y Domínguez (1979) realizaron la delimitación mesomicroclimática del Estado, correspondiendo al Municipio de Guanajuato 3 categorías:

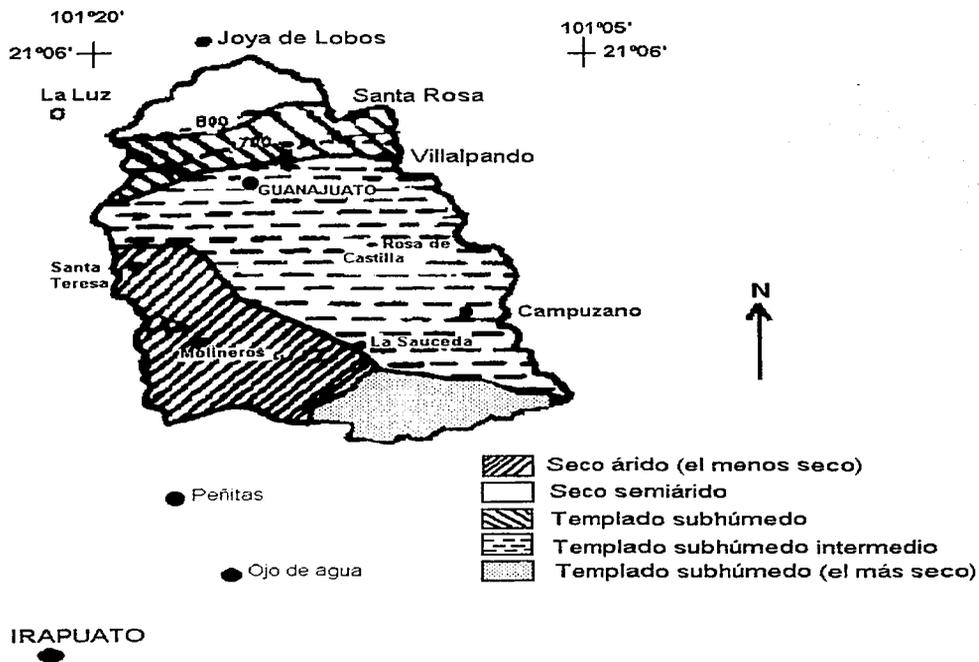
C(w₂)(w)b: Representa al grupo de climas intermedio en cuanto a humedad, con lluvias de verano porcentaje de lluvia invernal menor de 5 respecto a la lluvia anual.

C(w₂)(w)h(i'): Este grupo de climas representa al más húmedo de los templados subhúmedos con lluvias de verano, porcentaje de lluvia invernal menor de 5.0, invierno fresco, la temperatura del mes más frío es menor a 18°C y poca oscilación térmica.

BS₁ h w (w)(e) Representa a los más húmedos de los BS, invierno fresco con temperatura media anual entre 18° y 22°C, régimen de lluvia de verano, con al menos 10 veces más lluvia en el mes más húmedo en la mitad caliente del año que en el mes más seco, pueden llegar a presentarse oscilaciones térmicas extremosas pero no de manera sistemática ni prolongada. (Mapa 3).

Las variaciones climáticas en la zona de estudio se deben más a las condiciones de humedad que a las condiciones de temperatura. La amplitud térmica en la sierra de Guanajuato es de 3.7°C, con precipitación promedio de 496 mm (Terrones y Mejía, 1989).

Mapa 3.- Regionalización climática de la zona de estudio.



Elaboro: S.Solís V.

Fuente: Izaguirre y Dominguez, 1979.

4.1.7 *Hidrología*

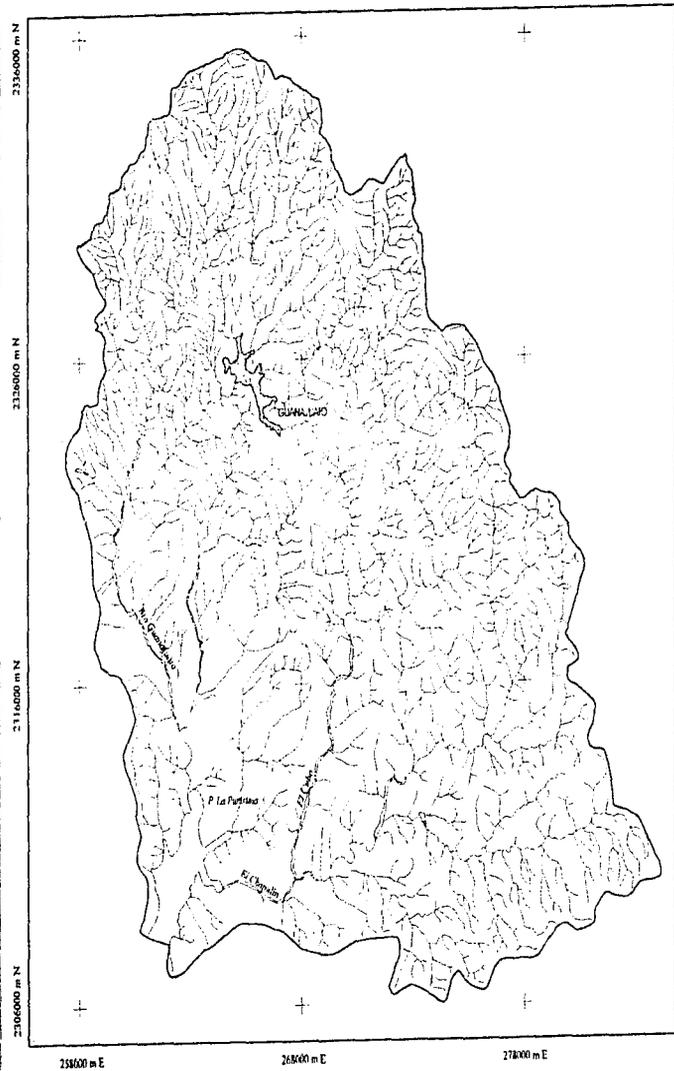
La Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos calificó a esta región del país como la Región Hidrológica número 12, correspondiente a la Cuenca Lerma-Balsas perteneciente a la vertiente del Pacífico del Sistema Lerma-Chapala-Santiago.

El área de estudio se localiza en la cuenca del Río Lerma-Salamanca dentro de la Subcuenca del Río Guanajuato-Silao, ríos que constituyen los afluentes del centro del Estado. Esta subcuenca resalta su importancia por poseer dos de los cuatro almacenamientos más importantes del estado que son: Presa La Purísima (con 400 ha de riego) y Presa La Gavia; también recibe las aguas del Río Turbio-Presa Palote y Río Turbio-Corrales.

El afluente más importante de esta subcuenca es el Río Guanajuato el cual inicia en Cerro Pelón depositando aguas residuales de la Ciudad de Guanajuato con un grado mayor de contaminación que las expulsadas por las minas de la localidad, que se depositan en la presa La Purísima (SPP, 1980). En el mapa 4 se representa la red hidrológica de la zona de estudio.

4.1.8 *Suelos*

La distribución y desarrollo de los suelos de cualquier región del mundo están determinados grandemente por las características orogénicas de la propia región, de manera que la evolución del paisaje conlleva la evolución de los suelos que abarca, esto se evidencia por la presencia de unidades de suelos con poco desarrollo genético, producto además de las condiciones climáticas y del relieve de la zona. Conforme a la clasificación FAO/UNESCO (1988), las unidades de suelos dominantes en la zona de estudio son: en la mitad norte, a partir de la Sierra de Guanajuato predominan los Feozems lúvicos, en la Altiplanicie Central Feozems háplicos asociados a Litosoles y Regosoles que se presentan en los abanicos aluviales; en las llanuras paleolacustres predominan Feozems lúvicos asociados a Castañozems calcáricos. En estas mismas llanuras, en áreas aledañas a basaltos, calizas y lutitas se encuentran Vertisoles pélicos (SPP, 1980).



HIDROLOGIA

SIMBOLOGIA

-  *Rio Intermittente*
-  *Rio Permanente*
-  *Cuerpo de Agua*
-  *Zona Urbana*

Escala Gráfica

0 16 32 48 64 80

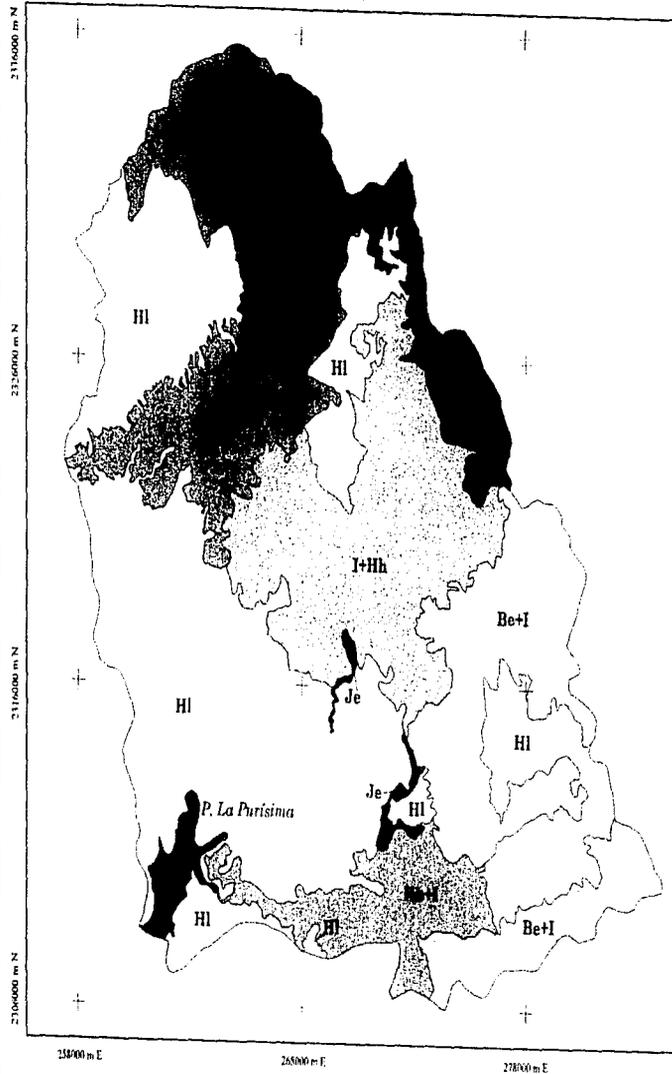


Kilómetros

FUENTE: CARTA TOPOGRAFICA
E14C43 Y E14C53
CENENAL, 1972

ELABORO: SARA SOLIS VALDEZ
DISEÑO: MA. EUGENIA VALDEZ PEREZ

AGOSTO DE 1997



SUELOS

SIMBOLOGIA

-  Feozem lúvico + Litosol
-  Luvisol órtico + Litosol
-  HI Feozem lúvico
-  HI Feozem calcárico
-  I+Hh Litosol + Feozem háplico
-  Be+I Cambisol eútrico - Litosol
-  Je Fluvisol eútrico
-  HI+I Feozem háplico + Litosol
-  Presa La Purísima

Escala Gráfica



ELABORO: SARA SOLÍS VALDEZ

DISEÑO: MA. EUGENIA VALDEZ PÉREZ

AGOSTO DE 1997

En las cimas de la Sierra de Guanajuato se encuentran Luvisoles órticos, Regosoles éútricos, Planosoles éútricos, Cambisoles éútricos, Rendzinas y Litosoles (SPP, 1980). En el mapa 5 se presenta la distribución de los suelos en el área de estudio. Las características generales de las principales unidades edáficas de la zona de estudio son las siguientes:

Feozem: tienen un horizonte mólico gris muy oscuro, a gris o café oscuro, sobre un horizonte cámbico o argílico con bajas concentraciones de limo. Se presenta en topografías de planas a moderadamente onduladas en áreas de estepa, estepa-bosque o bosques y praderas. Se desarrollan sobre materiales básicos no consolidados, principalmente sedimentos de loess. Poseen condiciones físicas y químicas favorables como son: estructura estable, alta porosidad y alta capacidad de agua disponible, gran contenido de materia orgánica y relativamente rico en nutrimentos (FAO, 1989; Spaargaren, 1994).

Litosoles: su denominación más adecuada y actualizada corresponde a la unidad de suelos Leptosoles, que se caracterizan por estar limitados en profundidad por roca consolidada o material altamente calcáreo, o bien presentar una capa cementada en los 30 cm superficiales, o tener menos de 20% de tierra fina en los primeros 75 cm superficiales (FAO, 1989). Los horizontes diagnóstico que pueden presentar son mólico, úmbrico u ócrico, con o sin horizonte B cámbico. Generalmente, estos suelos representan la fase inicial en la formación del suelo. Este concepto engloba a todos los suelos poco profundos, muy pedregosos, con rocas sobreyacentes, parcialmente alterada o material altamente calcáreo (Spaargaren, 1994).

Regosoles: suelos derivados de materiales no consolidados, exclusivamente de textura cuarzosa y con propiedades flúvicas. No tienen otro horizonte diagnóstico que un a ócrico o úmbrico. FAO (1994) incluye a estos suelos en la unidad de los Leptosoles como una interfase importante. Tienen buen drenaje, de textura media, desarrollados a partir de depósitos recientes o materiales terrosos recientemente expuestos con una mínima expresión de desarrollo. La unión de estos suelos con los Leptosoles está controlada principalmente por la profundidad y la textura.

Luvisoles: tienen un horizonte B argílico, con saturación de bases de 50 % o más medido con acetato de amonio en el horizonte B a una profundidad de 125 cm. Su característica dominante es una diferenciación textural en el perfil, mostrando un horizonte superficial sin arcilla y consecuentemente un horizonte argílico. Presentan de moderada a alta actividad de arcilla y

baja saturación de aluminio. Las propiedades físicas y químicas de este orden de suelos son en muchos casos favorables para el crecimiento de cultivos así como un buen drenaje. La topografía característica es de sitios planos o pendientes muy suaves (Spaargaren, 1994).

Cambisoles: tienen un horizonte cámbico y un A ócrico o úmbrico. Suelos poco a moderadamente intemperizados. No tienen cantidades apreciables de arcilla iluvial. Los ciclos de erosión y depositación son la principal razón de por qué estos suelos ocurren, frecuentemente, en áreas montañosas con intemperismo moderado, debido a que el material parental limita el movimiento de arcilla. Representan suelos con un mínimo grado de desarrollo. Su principal característica es la presencia de un horizonte de alteración que es el inicio de la formación de suelo, muchos de estos suelos representan un estado transicional de desarrollo desde un suelo joven a uno maduro (FAO, 1989; Spaargaren, 1994)

4.1.9 Vegetación

De acuerdo con Zaragoza (1978) las principales asociaciones vegetales presentes en la Sierra de Guanajuato son:

Pastizal amacollado abierto: se caracteriza por la predominancia de especies herbáceas graminiformes y amacolladas con una altura de 50 a 80 cm. Algunas de las especies dominantes son *Bouteloa grandulosa*, *B. curtipendula*, *Heteropogon contortus*, *Muhlenbergia lanata*, *M. emerleyi*, *Andropogon scoparius*, *Dasylirium cendrosanum*.

Bosque esclerófilo: caracterizado por poseer árboles medianos de 8 a 15 m de alto con hojas esclerotizadas que se pierden por un breve periodo. Las especies más características son: *Quercus laceyi*, *A. canbyi*, *Q. fusiformis*, *Q. intricata*, *Q. oleoides*, *Q. polymorpha*.

Pastizal amacollado con nopalera: se caracteriza por la predominancia de especies gramináceas y herbáceas amacolladas, también arbustivas como nopales. Algunas especies son: *Bouteloa filiformis*, *Heteropogon contortus*, *Opuntia robusta*, *O. guilanchi*, *Mimosa biuncifera* y *Dasylirium cendrosanum*.

4.1.10. Actividades productivas

Agricultura: Existe una tendencia relativamente alta a diversificar la producción agrícola, de manera que en la superficie de riego, se cosecha fresa, ajo, cebolla, col de bruselas y espárragos como principales productos externos; como productos internos se siembra chile y jitomate principalmente. En las zonas de agricultura de temporal, se cultivan fundamentalmente productos básicos como maíz y frijol. Un producto que ha venido adquiriendo importancia en los últimos años es el sorgo.

Ganadería: se distinguen dos tipos de ganaderías: la extensiva que se desarrolla básicamente en la región norte con cría de ganado bovino y caprino; y la intensiva, relacionada a la ganadería lechera y porcicultura que es la de mayor importancia y se practica en El Bajío. Las actividades pecuarias de mayor relevancia económica son la bovina, porcina y caprina dándose un fuerte impulso a la explotación de la ganadería ovina. El ganado caprino constituye una de las ramas ganaderas de mayor importancia dado que representa una fuente complementaria de ingresos para la población rural. El municipio de Guanajuato destaca es uno de los que posee mayor ganado caprino.

Minería: La principal zona minera está constituida por el Distrito Minero de Guanajuato, caracterizado principalmente por la producción de oro y plata, notable especialmente por la "veta madre" (estructura en la que se basa el distrito por 400 años). Las minas que se ubican en este distrito son: La Valenciana, Reyes, Sirena, Cedros y Santo Niño. En el extremo norte se ubican las minas de San Nicolás del Monte y pequeñas explotaciones en las vetas de Santa Rosa. La explotación en el distrito ha sido variable debido a las fluctuaciones en el precio de los minerales.

Silvicultura: la actividad forestal se basa principalmente en las especies de los géneros *Pinus* y *Quercus* predominando el segundo. La espesura de la zona boscosa varía de aclarada a excesiva con desarrollos de latizal, medio y viejo fustal. De acuerdo con sus características silvícolas el género pino se usa para productos aserrados, papel, pilotes para minas, leñas, etc., el encino se utiliza para carbón, pilos para minas y leña.

4.2 Antecedentes históricos del problema hídrico en la región

Los cambios causan los procesos de erosión en general, con sus ciclos de desprendimiento, transporte y acumulación de partículas de suelo y otros materiales, pueden también ser observados a partir de los daños ocasionados en la calidad de las aguas, por ejemplo en la calidad de agua de los ríos, arroyos, lagunas o presas existentes en la región, o bien en el grado de azolvamiento de esos mismos depósitos.

La calidad del agua, así como la disponibilidad de la misma, son factores que interceptan e influyen en forma decisiva en el desarrollo de los pueblos y comunidades humanas. El agua es, en esencia, la fuente principal de vida y aún cuando existen grandes cantidades de ella en el planeta, paradójicamente no todas las formas en que se encuentra resultan ser posibles de utilización para los humanos. Siendo tan importante, es indispensable mantener su disponibilidad en condiciones óptimas y, con ello, contribuir al desarrollo de las comunidades implicadas, así como a mejorar el nivel de vida de las mismas. Particularmente en la Ciudad de Guanajuato, la escasez de agua es un tema de gran interés dado que, por una parte las condiciones topográficas limitan su cantidad y, por la otra, las actividades antrópicas disminuyen la disponibilidad de las cantidades existentes, debido principalmente a la contaminación que sufren.

A fin de tener una idea de los efectos en términos sociales y económicos, que ocasionan la escasez de agua y producción de sedimentos como consecuencia de la erosión de suelos, para los pobladores del área, a continuación se brinda una breve reseña histórica del problema de escasez de agua en la Ciudad de Guanajuato y poblaciones aledañas.

Desde sus orígenes la Ciudad de Guanajuato ha sufrido escasez de agua potable y prolongadas sequías, lo que ha originado en el transcurso de su historia, hambre y desequilibrios sociales. Este hecho ha orillado a sus pobladores a realizar obras de infraestructura que permitan la concentración del vital líquido para las actividades inherentes a la economía y desarrollo de la población, lo que se ha verificado en la construcción de numerosas presas situadas estratégicamente.

Desde 1791, cuando estaba a punto de ser nombrada noble y real ciudad, hubo una escasez de agua, lo que condujo a la construcción de una presa de agua potable en el sitio conocido

como La Olla Grande. Dicha obra se concluyó en 1749; sin embargo, a pesar de su construcción la ciudad continuó padeciendo por falta de agua. Aunado a lo anterior, el crecimiento vertiginoso de la población agudizó el problema del agua. Debido a ello, el 1º de agosto de 1777 se proyectó la construcción de una nueva presa de agua potable en la cañada llamada De Ponce y en punto denominado "Los Pozuelos", las principales razones para su construcción fueron:

1. Asegurar el vital líquido a la población
2. Posibilidad de una extensión rápida de la ciudad hacia el punto de construcción.
3. Disminuir la distancia de recorrido para el transporte del líquido.

La obra se concluyó en 1791, pero a pesar de su existencia, la Ciudad de Guanajuato siguió sufriendo hambre y pestes distintas, todas agudizadas u originadas por la escasez de agua, o bien por la falta de potabilización de ésta. De esta manera, a fines del siglo XVIII y principios del XIX, se construyeron otras presas, todas en forma particular, entre las que se destacan las siguientes: San Pedro de Rocha, San Renovato, Saucillo, Santa Gertrudiz y Zaragoza.

En 1852, después de tres siglos de construida, la Ciudad de Guanajuato tenía agua potable por primera vez. La afluencia de inversionistas extranjeros y empresas mineras beneficiadoras de metales por flotación, provocaron el progreso y la estabilidad social de la ciudad, agudizándose, a su vez, la carencia de agua. Debido a ello, el gobierno porfirista determinó la construcción de un nuevo almacenamiento en la cañada del Río Esperanza, a fin de brindar agua a la población y a las nuevas industrias mineras. La construcción de la obra La Esperanza comenzó en mayo de 1888 y concluyó en 1893.

Pese a todo lo anterior, a mediados del siglo XX, nuevamente la Ciudad de Guanajuato padeció de escasez de agua. En 1949, se construyó la Presa La Soledad a fin de resolver los problemas de agua de la población.

En 1974 se construyó la presa de La Purísima en la parte alta del Bajío Guanajuatense, ubicada exactamente en la parte media de la subcuenca del Río Guanajuato, vertiendo su vital líquido hacia la zona de regadío y de mayor importancia agrícola del país, que corresponde al Bajío (Gobierno del Estado, 1992).

METODOLOGÍA

5.1.Fase I. En esta primera fase se pretendió reconocer y estimar la pérdida de suelo por efectos de erosión acelerada, a través de:

5.1.1.- Definición de las unidades de estudio. En la definición de las áreas de estudio se tomó como primer parámetro las características geológicas de la zona, la topografía y red de drenaje de la misma. De esta manera se delimitaron las unidades hidrológicas o microcuencas en el marco de cada presa, ya que los límites de una cuenca hidrológica están definidos por las áreas de mayor elevación topográfica que constituyen las cabeceras y origen de los afluentes, constituyendo una unidad ecológica natural bien establecida (Urbina,1974; Sarukhán, 1990) (Mapa de microcuencas).

5.1.2.- Caracterización de las unidades de estudio. La caracterización de las unidades hidrológicas establecidas (que en adelante denominaremos microcuenca), se llevó a cabo tomando en cuenta la información proporcionada por la cartografía temática de INEGI escala 1:50,000, así como la bibliografía existente para la región, además de la información obtenida a partir del análisis fotográfico, caracterizando los tipos de suelos, clima, geología, uso de suelo y topografía.

5.1.3.- Muestreo de suelos y sedimentos. Para llevar a cabo la toma de muestras de los suelos y sedimentos de la región, se procedió de la siguiente manera: se realizó la sobreposición del mapa geológico con el mapa de topografía, edafología y uso de suelo; con la sobreposición de estos mapas se generó un mapa único que delimitó áreas con condiciones físicas semejantes. De ellos, finalmente se realizaron 34 perfiles de suelo con un total de 51 muestras más 32 muestras superficiales de sedimentos (0-30 cm de profundidad) procurando, en este último caso, que la toma de muestra se realizara en el lecho del afluente (Mapa 7 de sitios de muestreo).

Cabe aclarar que para el caso de los perfiles de suelo, la facilidad de acceso al sitio de muestreo influyó en la toma de muestras, debido a que en algunos de ellos los caminos reportados en el mapa fueron cerrados o simplemente ya no existían, por lo que tuvieron que

2336000 m N

2326000 m N

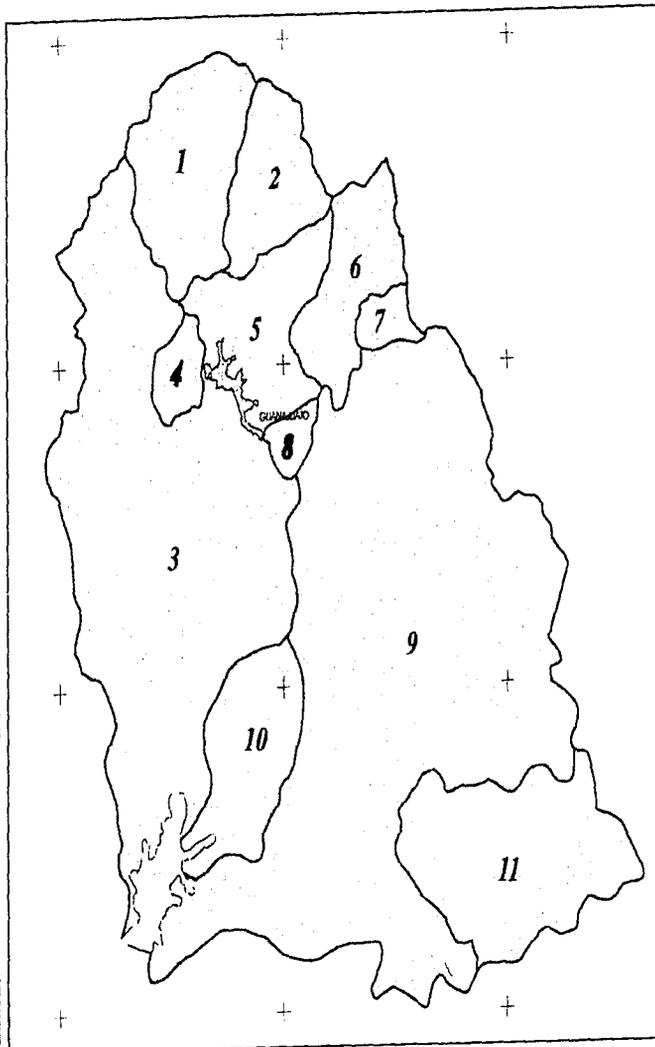
2316000 m N

2306000 m N

258000 m E

268000 m E

278000 m E



MICROCUENCAS

SIMBOLOGIA

- 1 *La Soledad*
- 2 *La Esperanza*
- 3 *Río Guanajuato*
- 4 *La Quinta*
- 5 *Presa Durán*
- 6 *Presa de Mata*
- 7 *La Peregrina*
- 8 *La Olla*
- 9 *Campuzano*
- 10 *Sombrete*
- 11 *Montelongo*

Escala Gráfica

0 16 32 48 64 80

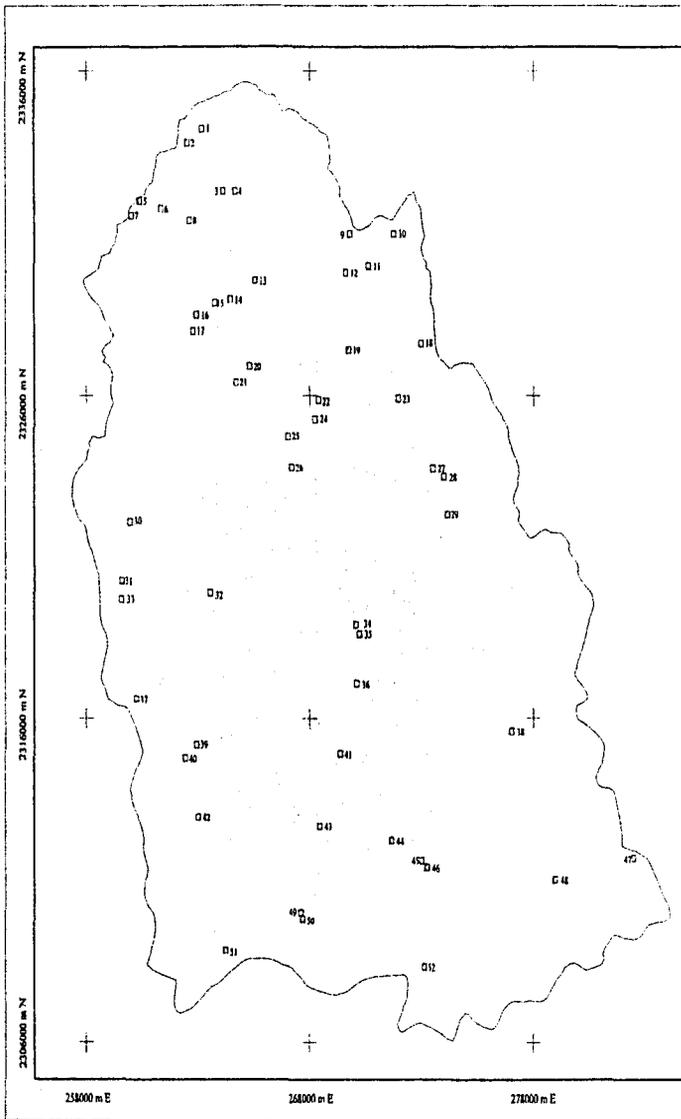


Kilómetros

ELABORO: SARA SOLÍS VALDEZ

DISEÑO: MA. EUGENIA VALDEZ PÉREZ

AGOSTO DE 1997



SITIOS DE MUESTREO

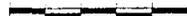
SIMBOLOGIA



SITIO

Escala Gráfica

0 1.6 3.2 4.8 6.4 8.0



Kilómetros

ELABORO: SARA SOLIS VALDEZ

DISEÑO: MA. EUGENIA VALDEZ PEREZ

AGOSTO DE 1997

ser eliminados, no obstante, se tuvo cuidado de contar, con al menos, una muestra representativa de las unidades fisiográficas observadas en campo.

5.1.4.-Análisis de laboratorio de las muestras de suelo. A las muestras de suelo y sedimento obtenidas se les realizaron los análisis de rutina. Dichos análisis se llevaron a cabo en el Departamento de Edafología del Instituto de Geología de la UNAM. Los análisis físicos y químicos realizados a cada una de las muestras de suelos y sedimentos fueron: composición granulométrica del suelo por método de Bouyoucos modificado por Villegas *et al*, (1978); contenido de materia orgánica por el método de Walkley y Black (Jackson, 1982); permeabilidad del suelo, acidez del suelo o pH en relación 1:2.5 (Jackson, 1982).

Para conocer el contenido de nutrimentos del suelo y sedimentos (fósforo total, potasio total y sodio total) se realizó la digestión ácida de la muestra, mediante el uso de horno de digestión de microondas. Una vez que la muestra quedó digerida y en estado líquido se llevó a cabo la valoración de cada elemento; para el caso del fósforo por el método colorimétrico convencional (Bray I), y para sodio y potasio por flamometría (Jackson, 1982, Littau y Engelhart, 1990).

5.1.5.- Aplicación de la EUPS, para estimar la pérdida de suelo en cada unidad hidrológica o microcuenca establecida. La estimación de cada uno de los factores de la ecuación se realizó de la siguiente manera:

5.1.5.1. Factor R: en virtud de que únicamente existe una estación meteorológica con datos pluviográficos de la región, se delimitó el área de influencia de la misma, utilizando el método de polígonos de Thiessen (Aparicio, 1994) a partir del cual se observó que el área de influencia de la estación meteorológica de Guanajuato abarca la mayor parte de la zona de estudio, por lo que se decidió que el valor del factor R fuera el mismo para toda la zona. Sin embargo, hay que aclarar que aún cuando, aparentemente, se presentan las mismas condiciones climáticas en toda la zona, debemos esperar variaciones locales, que pueden estar influenciadas por las condiciones topográficas del lugar (Terrones y Mejía, 1989).

Se obtuvieron los registros pluviográficos de la zona, correspondientes a los últimos 22 años, pero después de realizar el análisis de los datos se utilizaron, solamente, los registros de los últimos 14 años, de 1981 a 1994, debido a que, en los años anteriores el papel usado para los pluviógrafos presenta divisiones cada 2 horas y la lectura de la intensidad de la lluvia por

minutos resulta demasiado imprecisa y por lo tanto inadecuada. Con estos datos se calculó el índice de erosividad de la lluvia, representado por los valores de EI_{30} . La metodología empleada para el cálculo de este factor es la propuesta por Weishmeier y Smith (1975) y Rey-Contreras (1986). En el apéndice A se presentan dos ejemplos (los dos años más lluviosos del período de estudio) del procedimiento seguido. También se obtuvieron los cálculos de intensidad de la lluvia por duraciones de tiempo, los cambios interanuales de la lluvia, estacionalidad y frecuencia de la misma.

5.1.5.2. Factor K: para obtener el valor de este factor se utilizaron los datos de los análisis de las muestras de suelo correspondientes a la estructura (obtenida en campo), permeabilidad, textura (composición granulométrica) y contenido de materia orgánica (porcentaje). Los valores se introdujeron en el nomograma propuesto por Weischmeier y Smith (1978), y a partir de ellos se pudo estimar el valor del factor K para cada microcuenca.

5.1.5.3. Factor LS: para la obtención del factor LS de la ecuación correspondiente a longitud y porcentaje de inclinación de la pendiente, se procedió a calcular la pendiente promedio para cada microcuenca, siguiendo el método tradicional reportado por Lugo (1991); para ello, se utilizaron los mapas topográficos escala 1:50,000 INEGI cartas Guanajuato y Aldama. La clasificación se realizó mediante el trazo de 50 perfiles topográficos distribuidos en las distintas microcuencas de la siguiente manera: La Soledad (6), La Esperanza (6), P. Durán (3), P. Mata (3), Peregrina (2), Campuzano (10), Montelongo (3), La Quinta (2), La Olla (2), Sombreroete (2) y Río Guanajuato (11). El método consiste en transformar las distancias entre curvas de nivel en valores de pendientes, procurando que la distancia medida entre pendientes sea entre 3 y 6 mm en el mapa, a fin de obtener mayor precisión. Posteriormente, por métodos matemáticos se obtiene el valor de la pendiente expresado en grados o porcentaje (Lugo, 1991). El método de clasificación de pendientes utilizado fue el propuesto por Urbina (1974); con la clasificación realizada se aplicó la fórmula de la EUPS para este factor, propuesta por Wischmeier y Smith (1976) que es la siguiente:

$L = (x/22.13)^{0.5}$ $S = 0.065 + 0.045 s + 0.0065 s^2$ donde s corresponde a la inclinación de la pendiente.

5.1.5.4. Factor C: en lo referente a la cubierta vegetal de la región, se realizó el análisis de fotografías aéreas pancromáticas vuelo SINFA escala 1:75,000 del año 1994. Se

determinó el tipo de vegetación presente, porcentaje de superficie cubierta y área desprovista de vegetación, llevando a cabo verificaciones en campo. Mediante restitución semidetallada, dicha información se integró al mapa base, posteriormente se elaboró el mapa de uso de suelo para toda la zona de estudio.

A fin de conocer el tipo y superficie abarcada por cada asociación vegetal definida, se sobrepusieron, en el Sistema de Información Geográfica ILWIS (versión 1.4), el mapa de microcuencas y vegetación. La valoración del factor C para cada asociación vegetal se realizó de la siguiente manera: en el caso de la superficie forestal, se utilizó el método modificado por Dissmeyer y Foster (1981); este método toma en cuenta otros elementos de la vegetación tales como: contenido de materia orgánica, cobertura, porcentaje de suelo desnudo, etc., los cuales son valorados como subfactores del factor C, específico para áreas con vegetación forestal. En la superficie agrícola se utilizó la metodología propuesta en la EUPS. Al final se ponderaron los valores obtenidos por superficie ocupada para cada microcuenca.

5.1.5.5 Factor P: la determinación del factor P, únicamente se realizó para las microcuencas que presentan superficies con uso de suelo agrícolas que son Campuzano, Montelongo, Sombrerete y Río Guanajuato. La metodología empleada es la propuesta en la EUPS así como las modificaciones realizadas para su aplicación en nuestro país (Wischmeier y Smith, 1972; Ríos-Berber, 1987). En las áreas con vegetación forestal y de matorral, se usó un valor de P igual a 1.

5.2. Fase II: En esta fase se estimó el volumen de sedimentos producidos en cada microcuenca, así como la pérdida de nutrimentos en las mismas.

5.2.1. Estimación de la producción de sedimentos : para estimar la producción de sedimentos se utilizó la metodología propuesta por Williams (1976), que consiste en una Modificación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (MUSLE), en la cual el factor Qq_p (factor de escorrentía) sustituye al factor R (erosividad de la lluvia) de la EUPS; la estimación de los otros factores de la ecuación permanecen inalterados. A fin de realizar el cálculo de sedimentos producidos, se define a la escorrentía o escurrimiento, como el flujo superficial de la porción de la precipitación que fluye o corre hacia un cauce (río, lago, etc) (Aparicio, 1994). Para conocer el valor del factor de escorrentía se calculó la escorrentía máxima para cada

microcuenca, el período de retorno de las tormentas con máxima precipitación en la zona de estudio, mediante la lectura pluviográfica de las intensidades máximas por minutos, construyendo la curva de intensidad-duración-período de retorno, así como el cálculo del caudal de punta o máxima escorrentía esperable.

5.2.2. Estimación de la pérdida de nutrimentos: a los valores de los análisis de laboratorio de las muestras de suelos y sedimentos se les realizaron los tratamientos estadísticos de varianza y análisis de correlación simple, a fin de estimar la pérdida de nutrimentos (nitrógeno N, fósforo P, y potasio K) .

5.3. Fase III .Mediante el uso del Sistema de Información Geográfica ILWIS (versión 1.4), se correlacionaron la pérdida de suelo con las características del medio físico (clima, geología, suelos, relieve, hidrología) y la influencia antrópica, en el marco del área de influencia de cada presa. En esta parte del trabajo se realizó la entrada de datos al sistema, de los mapas temáticos del área de estudio

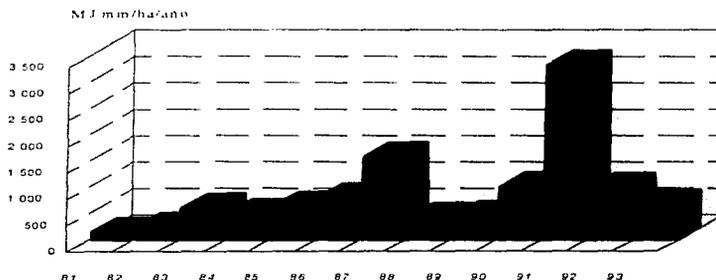
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Aplicación de la EUPS para estimar la pérdida de suelo

6.1.1. Obtención del factor R

El valor promedio obtenido para el factor R fue de 1963.588 MJ.mm/ha/año, que corresponde a una erosividad de lluvia muy alta (FAO, 1980). En la Tabla 6.1 se presentan los valores mensuales y anuales de este factor en el periodo de estudio. En la Gráfica 6.1 se muestran los valores del factor R durante los últimos 14 años, en donde podemos observar la variación en la intensidad de la precipitación, encontrando que el año de mayor erosividad corresponde a 1991.

El problema en la obtención del factor R reside por un lado, en la escasez de pluviógrafos confiables y por otra, que no toma en cuenta la distribución estacional de los máximos de precipitación, ya que para un mismo valor de R, los procesos erosivos serán distintos, tanto si las lluvias tienen lugar en un momento del año en el que el suelo está o no cubierto de vegetación, como si existe humedad antecedente del suelo, por lo que los efectos erosivos de una misma lluvia serán distintos (Porta, *et al.*, 1994).



Grafica 6.1.- Valor anual del factor R durante los últimos 14 años

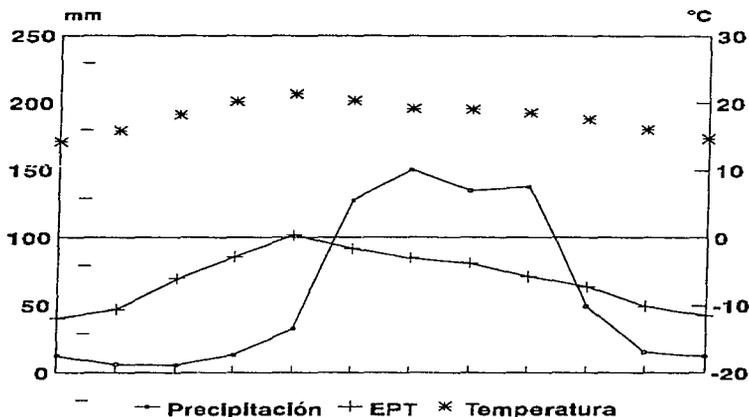
Tabla 6.1. Valores de erosividad de la lluvia en la zona de estudio.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1981	0,00	0,00	8,60	0,00	6,80	93,07	474,30	238,59	46,87	365,61	0,00	13,69	1247,52
1982	0,00	19,04	0,00	0,04	25,49	146,81	636,42	101,44	0,00	56,03	127,50	13,55	1126,31
1983	38,42	2,25	3,26	0,00	85,97	19,14	169,16	306,45	1031,35	4,86	4,00	1,53	1666,39
1984	15,14	2,29	0,00	0,00	60,47	409,12	425,84	299,88	310,73	2,80	0,00	4,67	1530,93
1985	0,09	10,43	0,00	11,41	241,83	674,16	876,67	88,72	137,79	137,90	109,62	0,00	2288,61
1986	0,00	0,58	0,00	0,48	76,71	371,88	260,90	59,43	165,32	41,72	10,18	0,00	987,20
1987	9,14	3,74	0,00	7,13	12,57	144,59	224,94	56,62	271,80	0,00	0,00	0,00	730,52
1988	7,51	0,00	14,79	24,68	0,00	169,64	1031,41	517,96	56,96	146,39	0,18	0,00	1969,52
1989	0,00	0,06	0,00	2,69	0,68	1381,61	481,01	862,49	47,60	34,89	34,21	8,00	2853,24
1990	5,38	0,00	32,00	27,50	32,12	435,71	439,40	567,16	229,00	58,22	0,00	0,00	1826,49
1991	0,00	9,22	0,00	0,00	10,49	1011,12	1788,94	371,23	433,97	24,37	40,36	7,71	3697,42
1992	159,89	21,94	0,45	0,00	398,19	169,14	1078,79	528,35	103,15	136,74	1,14	0,00	2597,78
1993	2,45	0,00	0,00	10,07	0,00	1461,54	1272,96	111,39	107,99	38,33	0,00	0,00	3004,73
Total	238,01	69,56	59,10	83,99	951,31	6487,52	9160,74	4109,70	2942,52	1047,85	327,19	49,15	25526,65
Total del periodo:											1963,59	Mj.mm/ha/año	

Respecto a las características generales de los factores hidrológicos, se encontró que el promedio anual de precipitación vertida a la zona es de 690.3 mm. Los meses de mayor precipitación se concentran a la mitad del año, iniciando el periodo de lluvias en mayo, intensificándose en julio, mes en el que se presenta el mayor número de días lluviosos y, noviembre y diciembre con la mayor acumulación de agua aprovechable (Gráfica 6.2).

La época de estiaje o secas va de enero a abril, siendo febrero y marzo los meses de mayor déficit de humedad en el suelo; esto resulta importante porque durante las primeras lluvias, el suelo presentará menor resistencia a la desagregación, dado que los pequeños agregados presentes en el suelo, no tienen la suficiente fuerza de atracción entre partículas para mantener su propia estabilidad, aunque esto depende en sí, de las características y propiedades de los suelos de la región. En teoría deberá haber mayor peligro de erosión por salpicadura en este periodo del año, dadas las condiciones mencionadas anteriormente.

Durante los meses de mayor lluvia (junio a septiembre, incluso octubre) se presentan mayores cantidades de agua en el suelo y ello conlleva a la colmatación de los poros, disminución del proceso de infiltración, etc., por lo que puede provocarse el movimiento en masa de grandes volúmenes de suelo o bien simplemente aumentar la escorrentía de la región.



Gráfica 6.2.- Balance Hídrico de la Estación Guanajuato

El promedio de días lluviosos al año es de 52, concentrándose durante el mes de julio. La oscilación interanual de los días con lluvia es de 42 entre el año más seco (1982) y el año más húmedo (1991) (Ver Tabla 6.2 y 6.3).

Tabla 6.2.- Número de días lluviosos al mes por año

ANO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Total
1981	0	0	3	0	2	0	7	8	2	7	0	1	38
1982	0	3	0	0	5	1	10	6	0	4	4	3	36
1983	4	1	1	0	5	6	10	8	13	2	2	1	53
1984	3	2	0	0	5	11	12	10	3	1	0	3	50
1985	0	1	0	2	8	11	13	8	6	6	2	0	57
1986	0	1	0	4	3	19	11	7	7	7	1	0	60
1987	1	2	1	1	0	8	21	10	6	0	0	0	54
1988	1	0	3	2	1	6	13	8	4	2	0	0	40
1989	0	1	0	2	2	7	11	18	5	3	2	3	54
1990	1	4	0	2	1	7	20	8	0	0	0	0	43
1991	1	1	0	0	4	10	25	7	11	4	2	3	68
1992	10	2	1	3	11	6	14	12	6	6	5	1	77
1993	2	0	0	1	0	8	13	8	8	3	0	0	43
1994	2	0	0	1	7	13	11	13	10	1	0	0	58
Total	25	18	9	18	54	113	191	131	81	46	18	15	731

Respecto a los datos de intensidades de la lluvia, se encontró que el mayor número de días con intensidades potencialmente erosivas de lluvia, es decir, aquellos eventos que sobrepasan una intensidad de 25 mm/h a los 30 minutos de iniciado el evento, se presentan durante el mes de julio, la mayor parte de ellos poseen intensidades fuertes (mayores de 25 mm/h) durante los primeros 10 minutos de iniciado el evento (ver Tabla 6.3). Esto resulta importante en la región, puesto que aunado a la topografía del lugar, el arrastre de las partículas desprendidas del suelo es más severo y, por lo tanto, la pérdida de suelo en la región se ve altamente favorecida por este factor, ya que las gotas de lluvia sobre superficies previamente saturadas, causan colapso y dispersión de agregados además, las partículas de limo o arenas finas que se encuentran debajo son nuevamente arregladas dentro de una capa cerrada, lo que favorece el escurrimiento y transporte de partículas desprendidas previamente (Troeh *et al*, 1991).

Tabla 6.3. - Número de días con más de 25 mm/h de intensidad de lluvia en duraciones por minutos

ANO	5	10	15	20	30	40	60	80	100
1981	12	8	6	4	2				
1982	13	9	6	5	3	2	1		
1983	22	9	8	5	3	1	1		
1984	19	11	7	6	2	0	1		
1985	25	8	3	1					
1986	23	13	11	4	2				
1987	20	13	8	5					
1988	21	12	8	6	3	2	1		
1989	19	9	9	7	7	4	1	1	1
1990	9	4	3	2	1	1			
1991	27	15	11	10	5	2	1	1	
1992	24	19	14	9	4	3			
1993	17	10	8	6	5	2	1	1	
1994		16	13	12	6	4	1	1	

6.1.2. Obtención del Factor K

Con base en los valores de K, que pueden variar de 0.10 a 0.45 se encontró que en las áreas de estudio, la erodabilidad de los suelos de las distintas microcuencas son medianamente erodables y que, los procesos, tanto de desprendimiento como de transporte de partículas de suelo, son favorecidos por factores como la cobertura vegetal, la inclinación de la pendiente, el contenido de humedad del suelo, etc., además de otras variaciones, entre las que se pueden

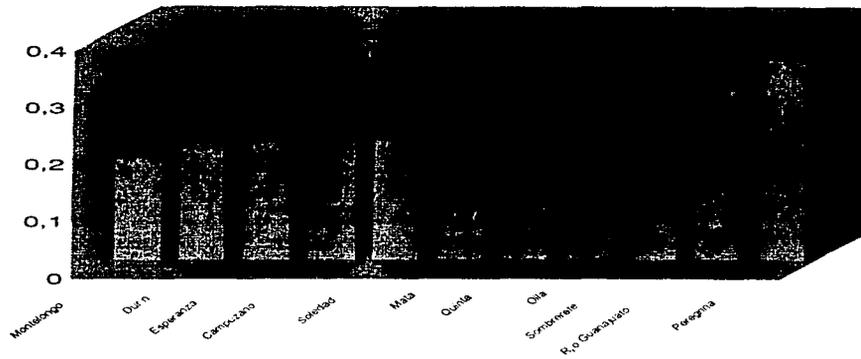
incluir el período o época en que se llevó a cabo el muestreo, puesto que el factor K, puede presentar variaciones estacionales muy marcadas, relacionadas con las condiciones climáticas de humedad en el perfil del suelo.

Los valores de erodabilidad de suelo en las microcuencas varían de 0.183 a 0.357 (ver Gráfica 6.3), la diferencia entre estos valores depende del suelo de que se trate. En la mayor parte de las microcuencas predominan los Feozems, suelos caracterizados por un escaso desarrollo, poca agregación y fácilmente erodables, aunado a ello se presenta una cubierta vegetal escasa, predominante en estas áreas, que promueven que las condiciones para el desprendimiento de las partículas de suelo sean altamente favorables. Por otra parte, algunos autores como Renard *et al* (1994) afirman que, casi de manera general, los suelos con altos contenidos de arenas y arcillas presentan valores bajos de K, esto puede deberse, entre otras causas, a la interacción química entre las arcillas y posibles grados de agregación, así como al tamaño relativo de las partículas de arena que retarda su transporte.

Asimismo se conoce que aquellos suelos con altos contenidos de limo tienen altos valores de K. En la microcuenca La Peregrina con un valor de $K = 0.357$ con textura de migajón limoso, se evidencia una predominancia en el suelo de limos y arenas que indica la probable existencia de una alta erodabilidad de estos suelos; sin embargo, el que posea un alto contenido de materia orgánica puede ayudar a contrarrestar dicho proceso. Los valores más bajos de K (0.183) se presentaron en la microcuenca Montelongo y se asociaron a características texturales, donde predominan las arenas y hay bajos contenidos de materia orgánica.

Los suelos más erodables son aquellos con un alto contenido de limo ($> 40\%$), bajo contenido de materia orgánica ($< 2\%$ de carbono orgánico) o bajo contenido de arcilla ($< 30\%$) debido a que sus agregados son débiles y se rompen fácilmente (Catt, 1988). En este caso, la mayor parte de los suelos de las microcuencas presentan características texturales que los ubican como suelos arenosos, limosos, o en el mejor de los casos, suelos de textura franca; sin embargo, el contenido de arcilla en casi todos ellos es menor al 30%, lo que indica la relativa facilidad con la que pueden ser desprendidas y transportadas sus partículas elementales.

Los valores obtenidos de K para cada microcuenca influyen en la producción de sedimentos, puesto que la facilidad para desprender y transportar las partículas del suelo está implícito en los valores estimados, debido a que este factor se obtiene a través de las características de



Gráfica 6.3. Valores del factor K de la EUPS por microcuenca

textura, agregación y contenido de materia orgánica, y todo ello nos brinda una idea acerca de los cementantes presentes en el suelo, aunque en dicho proceso intervienen marcadamente tanto el área de la cuenca, como la red de avenamiento o drenaje. Se sabe que la superficie de cubierta vegetal que tenga el suelo influirá en el contenido de materia orgánica de los mismos, lo que a su vez, juega un papel importante en la agregación y permeabilidad del suelo. La falta de ella reduce significativamente la humedad en el suelo. De manera que al disminuir la materia orgánica disminuye la capacidad de infiltración y aumenta el flujo superficial y en consecuencia la pérdida de suelo (Figueroa, 1991). La valoración estadística, no mostró una correlación alta entre este factor y los índices de pérdida de suelo en las distintas microcuencas (Tabla 6.8).

6.1.3. Obtención el factor LS

Para la clasificación de los valores de inclinación y longitudes de las pendientes, se tomó en cuenta la realizada por Urbina (1974).

Tabla 6.4.- Clasificación de inclinación de pendientes por microcuenca

MICROCUECNA	RANGOS DE PENDIENTES %	PROMEDIO (%)	CLASIFICACIÓN
I. La Soledad	16.0 - 36.0	25	Fuerte
II. La Esperanza	16.0 - 37.0	26	Fuerte
III. P. Durán	30.0 - 36.0	34	Fuerte
IV. P. Mata	19.0 - 37.0	31	Fuerte
V. La Peregrina	20.0 - 25.0	25	Fuerte
VI. Campuzano	16.0 - 46.0	29	Fuerte
VII. Montelongo	12.0 - 27.0	19	Accidentada
VIII. La Quinta	20.0 - 28.0	24	Fuerte
IX. La Olla	23.0 - 28.0	26	Fuerte
X. Sombrerete	10.0 - 16.0	13	Accidentada
XI. Río Guanajuato	11.0 - 33.0	21	Fuerte

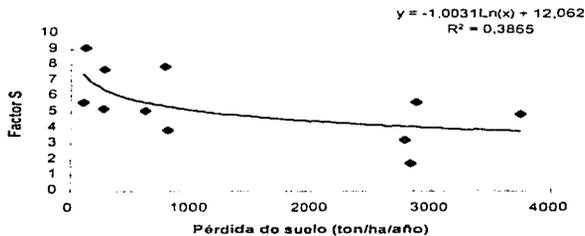
Tabla 6.5.- Valores del factor LS para cada microcuenca.

MICROCUECNA	LONGITUD (m)	VALOR DE LS
I. La Soledad	393.1	22.13
II. La Esperanza	401.5	23.97
III. P. Duran	405.7	38.98
IV. P. Mata	450.3	34.75
V. La Peregrina	475.0	23.64
VI. Campuzano	597.6	41.13
VII. Montelongo	1012.0	22.08
VIII. La Quinta	482.5	22.82
IX. La Olla	310.4	21.07
X. Sombrerete	652.0	9.49
XI. Río Guanajuato	478.4	18.02

El factor LS de la ecuación sigue siendo el más polémico de todos, debido, en esencia, a la longitud de la pendiente, ya que la forma en que se obtiene su valoración puede variar ampliamente y consecuentemente, obtener valores distintos de este factor. Renard *et al* (1994) opinan que para condiciones típicas de pendiente, un 10% de error en la medición de la longitud de la pendiente resulta en un 5% de error en el cálculo de pérdida de suelo. Además, la pérdida de suelo es mucho más sensible a cambios en la inclinación de la pendiente que a cambios en la longitud de la misma, por lo que debe ponerse mayor énfasis en obtener una buena estimación de la inclinación de la pendiente.

Tanto la longitud como la inclinación de las pendientes influyen en la producción de sedimentos, puesto que no todos los sedimentos producidos en un sitio determinado, una ladera por ejemplo, son transportados hasta el punto final, de manera que la cantidad de sedimentos en un área dada debe contabilizarse tomando en cuenta las partículas que se han ido depositando en las depresiones, en los piedemonte, a lo largo de los límites de parcelas y en los canales o terrazas (Wischmeier, 1976; Kirby, 1984).

La Gráfica 6.4 muestra la relación entre la pérdida de suelo y el factor-S. Los valores estadísticos se muestran en la Tabla 6.8



Gráfica 6.4.- Relación entre pérdida de suelo-factor S

6.1.4. Obtención del factor C

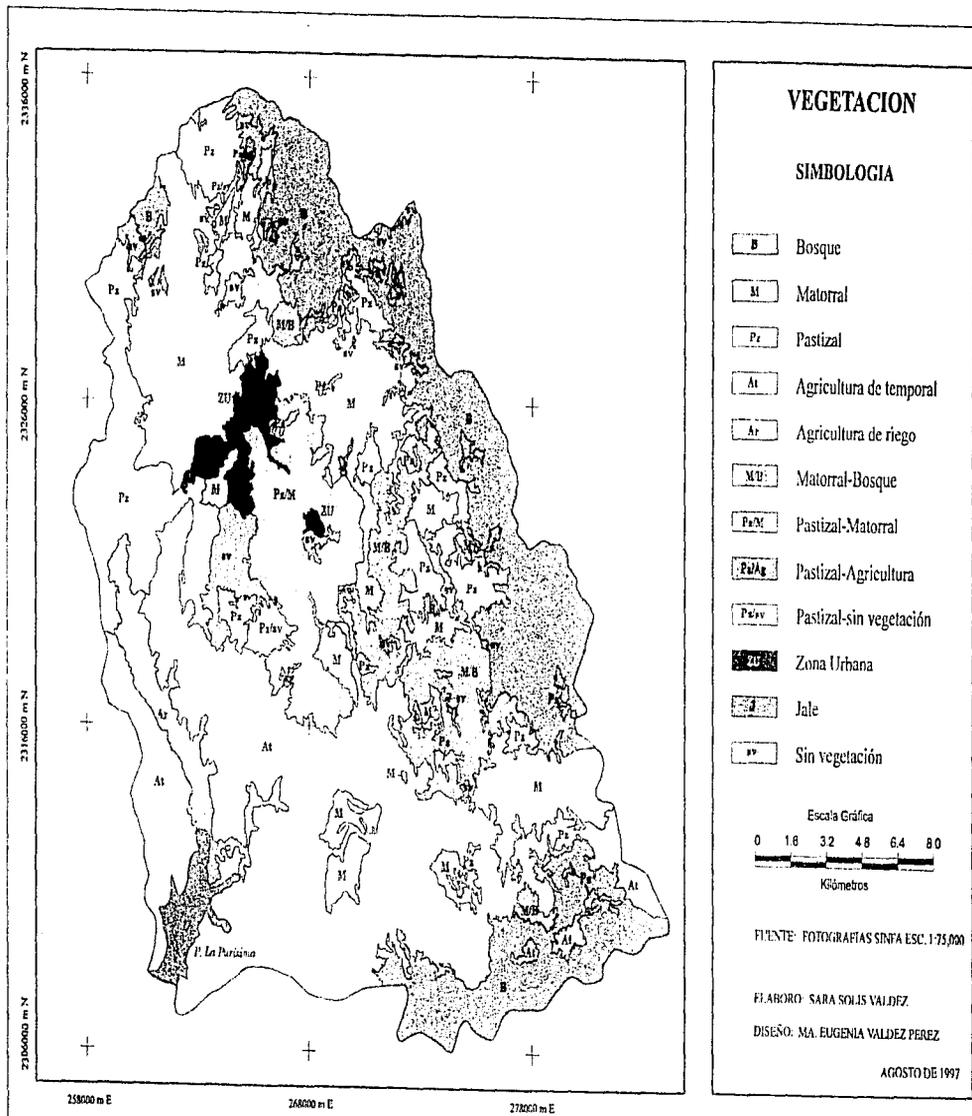
La interpretación de fotografías aéreas permitió delimitar cuatro grandes asociaciones vegetales para esta región, que son: bosque de latifoliadas (encinos), agricultura (de riego y de temporal), matorral, pastizal y áreas de superficie sin vegetación. Para cada una de ellas se obtuvo el valor del factor C en cada microcuenca.

El factor C de la EUPS es quizá el más importante, debido a que representa condiciones que pueden ser manejadas más fácilmente para reducir la erosión del suelo. Sus valores pueden variar desde cero, para suelos muy bien protegidos, hasta 1.5 para aquéllos que producen más escurrimiento y permiten mayor susceptibilidad de los suelos a la erosión por arroyuelos (Renard *et al*, 1994).

Como se puede observar, las diferencias en cuanto a cobertura vegetal, reflejan por un lado, el uso de suelo de cada región, pero también demuestran el grado de pérdida de suelo y producción de sedimentos que se espera encontrar en cada una de ellas; es concordante el hecho de que, mientras menor es la diversidad en el tipo de cubierta vegetal, mayor es el valor del factor C encontrado, y ello está relacionado con el hecho de que un mismo tipo de asociación vegetal de una zona, brinda, por sus características de cobertura y protección al suelo, barreras que limitan el desprendimiento y arrastre de las partículas de suelo.

Por otra parte, también limita la producción y/o contenido de materia orgánica lo que disminuye la posibilidad de que se produzcan cementantes entre los agregados del suelo y con ello facilitar su estabilidad. En el mapa 6 se muestra la distribución de las distintas asociaciones vegetales encontradas en la zona de estudio. Asimismo en la Tabla 6.6 se muestra el porcentaje de cubierta vegetal de cada asociación, por microcuenca, anotando, entre paréntesis, la superficie en hectáreas que cada una de ellas ocupa. Es necesario aclarar que no se incluyen las superficies clasificadas como zonas urbanas, depósitos de jales y áreas ocupadas por presas.

Debido a que la superficie sin vegetación es relativamente pequeña, no constituye un elemento importante pues no eleva marcadamente el valor del factor C, como sería el caso de las subcuencas Montelongo y Sombrerete en donde las áreas con suelo desnudo son muy pequeñas y sin embargo, se tienen los valores más altos en este factor (Ver Tabla 6.7). Lo que



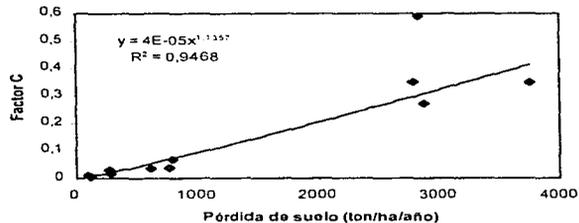
aquí influye en forma definitiva es el uso de suelo que se le dá a la cubierta vegetal en cada microcuenca, ya que gran parte de las mismas están dedicadas a labores agrícolas, y ello reviste especial importancia debido a que, las actividades de laboreo, pastoreo, etc., son estacionales y la pérdida de suelo, en consecuencia, será también mayor en la temporada en que se desarrollen tales actividades. Por otro lado, si estas condiciones se asocian con temporadas de altas precipitaciones, al iniciar los eventos lluviosos (mayo-junio), el suelo no

Tabla S.6.- Porcentajes de cobertura vegetal por microcuenca

MICROCUENCA	Bosque	Matorral	Pastizal	Agr. temp	Agr. rieg	Sin veg
La Soledad	8.20 (229.73)	49.45 (1385.02)	29.17 (817.02)	-----	-----	11.89 (333.11)
La Esperanza	84.54 (1,454.23)	5.29 (91.01)	6.07 (104.41)	-----	-----	4.08 (70.24)
Presa Durán	12.55 (301.01)	50.74 (1,217.28)	19.85 (476.10)	-----	-----	3.24 (77.75)
P. Mata	43.66 (824.97)	36.81 (695.53)	10.26 (193.95)	-----	-----	8.02 (151.53)
La Peregrina	52.21 (211.62)	34.26 (138.87)	-----	-----	-----	12.36 (49.92)
Campuzano	23.91 (4,557.09)	30.45 (5,803.42)	12.77 (2,434.43)	28.72 (5,473.36)	-----	2.66 (507.619)
Montelongo	41.76 (1,867.16)	7.72 (345.33)	3.49 (156.10)	45.25 (2,023.261)	-----	-----
La Quinta	-----	90.31 (507.32)	8.23 (46.24)	-----	-----	-----
La Olla	0.43 (1,473.00)	20.15 (68.92)	75.70 (258.89)	-----	-----	-----
Sombrerete	-----	-----	8.38 (197.04)	82.92 (1,949.48)	8.83 (207.49)	0.03 (0.74)
Río Guanajuato	1.37 (172.89)	8.77 (1,108.89)	41.05 (5,187.67)	33.24 (4,200.85)	8.42 (1,064.57)	3.74 (472.12)

tiene una apropiada cubierta vegetal dado que los cultivos comienzan su crecimiento después de las primeras lluvias, y al presentarse un índice alto de agresividad de lluvia, la separación y transporte de las partículas de suelo serán mayores, lo que redundará en un incremento tanto en los valores de erosión como en la producción de sedimentos.

Respecto al análisis estadístico se encontró una relación de moderada a fuerte, entre la pérdida de suelo y el factor C (con $r = 0.753$), lo que sugiere que lo aseverado anteriormente es correcto. En la Gráfica 6.5 se presenta la relación encontrada entre ambos parámetros.



Gráfica 6.5.- Relación entre pérdida de suelo-y el factor C de la EUPS

6.1.5. Obtención del factor P

En las microcuencas con superficie de uso de suelo agrícola (Campuzano, Montelongo, Sombrerete y Río Guanajuato), las actividades realizadas no son propiamente de conservación de suelos, sin embargo las prácticas que se llevan a cabo para la siembra, cultivo y cosecha conllevan mecanismos de cultura tradicional en el manejo de suelo que impiden, en muy baja escala tal vez, la pérdida de suelo.

En áreas boscosas y de matorral no existen actividades de manejo y/o explotación forestal intensiva, que aceleren o frenen la pérdida de suelo, aunque, la tala clandestina y los cambios de uso de suelo parecen favorecer el arrastre. Sin embargo, estas actividades no pudieron ser cuantificadas.

Tabla 6.7.- Resumen de los valores para cada factor de la EUPS por microcuenca

Microcuenca	R	K	L	S	C	P	E ton/ha/año
La Soledad	1963.6	0.216	4.213	5.253	0.028	1.00	262.82
La Esperanza	1963.6	0.211	4.258	5.629	0.010	1.00	99.30
P. Durán	1963.6	0.210	4.280	9.109	0.007	1.00	112.53
P. Mata	1963.6	0.236	4.509	7.707	0.017	1.00	273.77
Peregrina	1963.6	0.357	4.631	5.106	0.037	1.00	> 200 *
Campuzano	1963.6	0.216	5.197	7.918	0.044	0.90	> 200 *
Montelongo	1963.6	0.183	6.759	3.267	0.350	0.90	> 200 *
La Quinta	1963.6	0.240	4.667	4.889	0.348	1.00	> 200 *
La Olla	1963.6	0.257	3.743	5.629	0.270	1.00	> 200 *
Sombrerete	1963.6	0.257	5.425	1.749	0.590	0.90	> 200 *
Río Guanajuato	1963.6	0.316	4.647	3.877	0.071	0.90	> 200 *

* Clasificación FAO, 1988.

La producción de suelo erodado tiene que ver con las características del área en cuestión. En el área de trabajo, la mayor parte de las microcuencas presentan rangos de erosión que van de altas a muy altas; este proceso se ve especialmente favorecido en aquellas regiones con escasez de cobertura vegetal así como en la disminución de la agricultura de riego.

Los valores de la correlación realizada, demuestran que los factores que contribuyen marcadamente en el proceso de pérdida de suelo, son el uso de suelo (factor C), la inclinación de la pendiente (factor S) y en menor grado, la longitud de la misma (factor L). Coincidiendo con lo reportado con Hernández (1996). Es importante señalar que, aún cuando los valores obtenidos son estimaciones realizadas aplicando métodos paramétricos y estadísticos, es posible su uso para áreas de nuestro país.

Respecto a la metodología empleada en el cálculo de erosión de suelo, para algunos resulta muy discutible el uso de la EUPS por varias razones: 1) el hecho de haber sido diseñada para condiciones muy específicas, con gran cantidad de datos y para condiciones distintas a las

presentes en nuestro país, y 2) porque en nuestro país no ha habido una validación suficiente y exhaustiva que manifieste la utilización de esta metodología bajo las condiciones imperantes en el territorio; no obstante, existen trabajos (Oropeza, 1980; Arias, 1980; Aguilar, 1982; Jacques, 1987; Hernández, 1996; Figueroa *et al.*, 1996) realizados, que nos permiten afirmar que el uso de la EUPS es un buen elemento de predicción y diagnóstico para conocer el grado de pérdida de suelo de distintas áreas, y que es posible su uso en México, tomando en cuenta las variaciones y adaptaciones necesarias para las condiciones de nuestro país.

Tabla 6.8 - Coeficientes de correlación de los factores de la EUPS

	Suelo	K	L	S	C	P
Suelo	1.0000	-0.0608	0.3655	-0.5743	0.7533	-0.2410
K	0.0000	0.8590	0.2691	0.0646	0.0074	0.4754
L	-0.0608	1.0000	-0.2693	-0.2516	-0.1013	0.0368
S	0.8590	0.0000	0.4233	0.4554	0.7669	0.9144
C	0.3655	-0.2693	1.0000	-0.4584	0.6339	-0.7348
P	0.2691	0.4233	0.0000	0.1562	0.0362	0.0100
	-0.5743	-0.2516	-0.4584	1.0000	-0.7376	0.4670
	0.0646	0.4554	0.1562	0.0000	0.0096	0.1476
	0.7533	-0.1013	0.6339	-0.7376	1.0000	-0.4974
	0.0074	0.7669	0.0362	0.0096	0.0000	0.1195
	-0.2410	0.0368	-0.7348	0.4670	-0.4974	1.0000
	0.4754	0.9144	0.0100	0.1476	0.1195	0.0000

n = 11 Coeficiente nivel de significancia

Además, el uso de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo permite contar con una metodología estandar para la obtención de datos que nos posibilitan conocer las variaciones estacionales, temporales y espaciales que se presentan en el estudio de la pérdida de suelo y que puedan ser comparadas con los datos obtenidos en otras áreas de estudio.

Por otro lado, la aplicación de esta metodología a nivel de cuenca representa estudios pioneros en este renglón. Sin embargo, en México como en muchos otros países, la obtención de datos adecuados es uno de los serios problemas en la investigación de la erosión del suelo y ello puede dificultar la aplicación de la EUPS, pero no imposibilitar su uso.

A este respecto Foster (1988) afirma que aunque las características de los métodos de predicción de erosión en su extrapolación estén fuera del rango de datos de los que se derivaron; la capacidad de un método para formar una buena correlación, es un factor importante en la selección del mismo, especialmente en países con poco avance tecnológico, donde hay una base de datos pequeña. Físicamente, la erosión es difícil de medir y la variabilidad de climas requiere que al menos se tengan 10 años de registro para establecer las mejores condiciones a fin de obtener una medida exacta del promedio anual de erosión.

Los métodos de predicción no son perfectos. Cada método trabaja mejor para una aplicación particular, y debe tenerse claro que, cuando se intenta hacer la aplicación, las estimaciones no pueden ser exactas. El objetivo de la validación puede ser discutido tomando en cuenta la aplicabilidad, utilidad y exactitud del método utilizado; además, la exactitud puede ser discutida por intervalos de confiabilidad estadística cercanos a las estimaciones de los métodos predictivos, pero estas confiabilidades dependen a su vez, del problema específico, ya que muchos de los métodos predictivos de erosión no tienen requerimientos de exactitud bien establecidos para muchas aplicaciones (Foster, 1988).

6.2 Estimación de la producción de sedimentos

Para conocer la estimación de sedimentos producidos en el área de estudio, se calcularon los valores de escorrentía para cada microcuenca. La precipitación efectiva o escurrimiento directo es el flujo superficial que llega más rápido a la salida de la cuenca y está relacionado directamente con una tormenta en particular. Aunque, debe reconocerse que el agua precipitada no siempre llega a la salida de la cuenca tan solo como flujo superficial. El flujo superficial ocurre cuando es excedido el rango de infiltración de agua por el suelo, de manera que su valor estará determinado por los factores asociados a la precipitación y a la superficie del área de escurrimiento (Shwab *et al*; 1981). Lo que importa es la rapidez con que una cuenca responde a una tormenta (Aparicio, 1994).

En cuanto a las características que afectan el escurrimiento en una cuenca se toman en cuenta las siguientes: tamaño, forma, orientación, geología, uso de suelo y topografía. Las

características asociadas a la precipitación son: duración, intensidad de caída de la lluvia y frecuencia de aparición de los eventos.

6.2.1. *Obtención del factor Q (escorrentía máxima)*

El volumen total de agua de escorrentía generada por una tormenta es un dato importante para poder conocer el volumen de sedimentos producidos; sin embargo, existe dificultad para llevar a cabo medidas de escorrentía, pues deben corresponder a series de varios años. Por ello, se han propuesto cálculos empíricos que determinan la escorrentía esperable (Porta *et al.*, 1994). No obstante su uso es restringido a condiciones determinadas. En nuestro país el método empírico más utilizado es el conocido como fórmula racional, que se expresa como:

$$Q = 0.028CiA \quad ; \quad \text{donde}$$

Q= escurrimiento máximo (m^3/seg)

0.028 = constante numérica

C = coeficiente de escurrimiento que esta en función de la cubierta vegetal

i = Intensidad de la lluvia para un periodo de retorno o frecuencia dada (cm/h)

A = área de la cuenca (ha)

Para obtener el valor de cada factor se necesita el análisis de las características asociadas con la cuenca y la precipitación, incluyendo la intensidad máxima de lluvia, para cada evento y un tiempo de concentración de escurrimientos de acuerdo con las características de la cuenca, lo que implica el tiempo máximo en que el agua precipitada llegará desde la parte más alejada hasta el punto de salida considerado (Anaya *et al.*, 1991; Porta *et al.*, 1994).

El tiempo de concentración (T_c) se define como el mínimo necesario para que se alcance un caudal máximo en un determinado punto de la cuenca. Ya que el tiempo de concentración es característico de cada cuenca y depende de su tamaño, topografía y forma, el valor de T_c varía considerablemente para cada área o cuenca de estudio; sin embargo, se puede asumir que cuando la duración de una tormenta iguala el tiempo de concentración, todas las partes de la cuenca contribuyen simultáneamente a la salida de descarga, de tal manera que la relación entre las variables puede ser representada por la ecuación de Kirpich:

$$T_c = 0.02 L^{1.15} / H^{0.385}$$

donde:

T_c = Tiempo de concentración

L = distancia entre la diferencia altitudinal que equivale a conocer la longitud del cauce principal

H = diferencia altitudinal en m

Con la fórmula anterior se calculó, el tiempo de concentración en cada microcuenca, los resultados se presentan en el Tabla 6.9. Como puede observarse, el tiempo de concentración en cada microcuenca varía en función directa al área de la misma; además, durante el trayecto de concentración de la precipitación recibida, influye el tipo y cantidad de cobertura vegetal así como las condiciones de permeabilidad que presenta el suelo, lo cual disminuye su concentración en el cauce principal e influye a su vez, en la capacidad de escorrentía en la región (Shawb *et al*, 1974; Porta, 1994; Anaya *et al*, 1991).

Tabla 6.9.- Tiempos de concentración por microcuenca

Microcuenca	Cota mín.	Cota máx	H (m)	L (m)	T_c (min)
La Soledad	2200	2750	550	8,000	54.27
La Esperanza	2300	2750	350	5,450	41.53
Presa Durán	2000	2450	450	6,250	44.20
Presa de Mata	2250	2750	500	8,150	59.70
La Peregrina	2350	2800	450	2,750	17.16
Campuzano	1800	2800	1000	28,750	187.68
Montelongo	1930	2550	620	12,600	87.42
La Quinta	2010	2250	240	1,500	10.89
La Olla	2050	2500	450	2,300	13.97
Sombrerete	1800	2150	350	8,300	67.36
Río Guanajuato	1800	2550	750	24,050	170.78

La intensidad máxima de la lluvia es una de las características más importantes para determinar el flujo del agua que escurre, pues se requiere saber su valor para que, a su vez, se conozca el valor máximo de escorrentía en cada microcuenca. Los datos utilizados fueron las intensidades máximas de la lluvia de los últimos 14 años de registro. A partir de estos cálculos

se elaboró la curva de intensidad-duración-período de retorno, de la que se obtuvo el escurrimiento máximo para un tiempo de retorno de 14 años.

El proceso estadístico para obtener la curva de intensidad-duración -periodo de retorno se basó en una regresión simple. En el caso de la curva masa de lluvia se tiene una regresión no lineal, pero intrínsecamente lineal (esta situación se produce cuando las variables de la regresión, que no es lineal, pueden transformarse para realizar un análisis lineal, es decir, se puede obtener una línea recta). De manera que se requiere conocer la relación existente entre las variables i (intensidad), d (duración) y T (tiempo o período de retorno). La ecuación que relaciona estas variables es:

$$i = \frac{k T^m}{(d + c)^n}$$

donde:

i = intensidad

t = período o tiempo de retorno

d = duración

K es una constante de ajuste que puede valer 1

m es una constante que da el valor exponencial de la regresión con respecto a t

n es una constante que da el valor exponencial de la regresión con respecto a d

a es una constante de ajuste para la recta, casi siempre su valor es cero.

K , m , n y c son constantes que se calculan mediante el análisis de regresión. Los valores utilizados para obtener esta ecuación provienen de las lecturas de intensidades máximas de lluvia diaria, mensual y anual, que se muestran en la Tabla 6.10.

Partiendo de ello, se tomaron los datos de intensidad, duración y período o tiempo de retorno de catorce años (lo que da un período o tiempo de retorno de 15). El total de datos procesados fue de 140; dado que con ellos se encuentra una relación directa entre intensidad y período de retorno, e inversa entre intensidad y duración.

Tabla 6.10.- Intensidades máximas de lluvia por duración en minutos para la Estación Guanajuato

Año	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	40 min	60 min	80 min	100 min	120 min
1982	120,0	60,0	60,0	54,0	54,4	42,5	28,4	22,5	18,2	12,1
1983	73,2	60,0	60,0	54,0	40,0	30,0	30,0	12,8	10,6	8,9
1984	108,0	60,0	80,0	60,0	48,0	18,7	30,0	12,0	16,7	19,8
1985	120,0	60,0	30,0	28,5	21,0	7,3	10,0	13,3	16,7	15,8
1986	120,0	60,0	80,0	60,0	44,4	14,9	13,6	18,5	29,0	38,0
1987	87,6	48,0	36,0	30,0	20,0	22,5	20,0	15,5	13,2	11,2
1988	90,0	69,0	60,0	48,9	40,0	32,7	28,5	23,6	19,6	16,4
1989	120,0	108,0	80,0	90,0	68,0	60,0	46,0	36,0	29,1	24,6
1990	108,0	60,0	52,0	44,7	33,8	25,5	10,0	7,1	6,0	5,0
1991	120,0	90,0	48,0	60,0	50,0	46,7	35,9	28,4	23,4	20,0
1992	120,0	60,0	43,2	33,3	40,0	31,5	24,8	27,3	24,0	25,8
1993	114,0	111,0	80,0	54,5	45,0	40,5	30,0	25,5	22,2	20,0
1994	84,0	59,4	48,0	57,0	41,8	37,5	30,0	24,4	20,4	17,3

Estos datos deben ser ordenados en forma decreciente, a fin de obtener el tiempo de retorno de la precipitación vertida en la cuenca, para distintas intensidades de lluvia en duraciones por minutos. La Tabla 6.11 muestra los resultados obtenidos, con los que se llevó a cabo el procesamiento estadístico.

Tabla 6.11.- Número de orden de intensidades máximas de lluvia en duraciones por minutos

No. Orden	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	40 min	60 min	80 min	100 min	120 min	Tr
1	132,0	120,0	80,0	66,0	68,0	60,0	61,1	45,9	23,4	20,0	14
2	120,0	120,0	76,0	64,2	60,0	42,9	46,0	45,0	23,2	19,8	7
3	120,0	92,4	64,0	60,0	56,0	42,4	30,0	23,6	20,4	17,3	4,6
4	120,0	60,0	64,0	60,0	48,2	39,0	29,5	23,5	20,0	17,2	3,5
5	120,0	60,0	60,0	60,0	46,0	36,7	28,8	22,5	19,7	16,3	2,8
6	120,0	60,0	60,0	60,0	44,6	36,6	28,4	22,5	19,2	15,0	2,3
7	108,0	60,0	60,0	60,0	42,0	30,0	24,8	22,5	16,4	14,2	0,2
8	96,0	60,0	58,0	60,0	40,6	28,3	22,6	21,4	13,9	13,5	1,7
9	96,0	60,0	56,0	57,0	37,0	25,6	21,0	19,1	13,3	11,3	1,5
10	96,0	60,0	52,0	61,0	35,6	24,0	20,0	15,4	12,0	10,9	1,4
11	96,0	60,0	48,8	48,0	33,6	21,5	17,3	15,0	12,0	10,0	1,2
12	92,4	60,0	40,0	47,4	29,6	20,1	17,2	13,7	11,4	10,0	1,1
13	72,0	48,0	37,2	30,0	25,6	11,0	16,6	12,1	10,6	8,9	1
14	72,0	30,0	36,0	30,0	20,0	17,2	8,6	7,2	6,0	5,3	0,1

Los valores de la Tabla 6.11 se transformaron a fin de obtener un modelo de regresión lineal representado por la ecuación: $\log i = \log K + m \log T - n \log (d+c)$, si al graficar los datos de i y de T en papel logarítmico "los datos se agrupan lo suficiente en torno a líneas rectas, el valor de c puede tomarse como cero" (Aparicio, 1997); en este caso de análisis se consideró $c = 0$.

A fin de obtener el mejor modelo de ajuste para la ecuación anterior, se introdujeron los datos al procedimiento "nlin" (no lineal) del paquete estadístico SAS (Statistical Analysis System), en el que se inició la búsqueda de las incógnitas k , m y n , para obtener la suma de cuadrados de las desviaciones, y encontrar los parámetros que permitan un mejor ajuste de la curva a través de un procedimiento iterativo. Los valores calculados fueron:

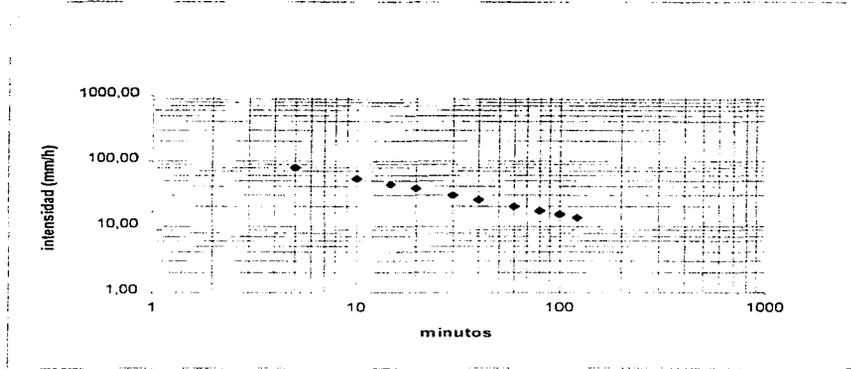
K	191.93
M	0.26
N	0.55

Para la estimación de los parámetros, también se realizó un análisis de varianza, obteniendo un valor de $R^2 = 0.90$, lo que nos indica que existe una alta relación entre las variables bajo análisis. Los valores del procesamiento completo se presentan en el anexo B.

Con los valores de m , n y K estimados, se construyó la tabla que presenta los valores estimados de la variable y . La Gráfica 6.6 muestra la curva de intensidad-duración-periodo de retorno para toda la zona de estudio obtenida con el procedimiento anterior.

Como dicha curva iguala el tiempo de concentración con el tiempo de duración de las tormentas, nos permite conocer el valor de la intensidad máxima de lluvia en cm /h, para un periodo de retorno dado (Anaya *et al*, 1991). Finalmente, sustituyendo los valores en la ecuación para cada microcuenca se obtuvo la Tabla 6.12.

El coeficiente de escurrimiento de las microcuencas se determinó por las características de la cubierta vegetal con relación a la topografía en la que se ubica, de manera que, a menor superficie de suelo cubierto con vegetación, mayor valor de coeficiente de escurrimiento, como se espera que ocurra. Para este fin se llevó a cabo la sobreposición de los mapas de uso de suelo y pendientes clasificadas en el Sistema de Información Geográfica ILWIS (versión 1.4); los valores obtenidos se utilizaron para calcular los coeficientes de escurrimiento, aplicando la fórmula del método racional anteriormente mencionada, pero realizando una modificación: para



Gráfica 6.6.- Curva de Intensidad-Duración-Periodo de retorno de la Estación Guanajuato

Tabla 6.12.- Intensidades máximas

Microcuenca	Tc = 14
La Soledad	42.4
La Esperanza	49.1
P. Durán	48.4
P. Mata	40.2
La Peregrina	79.9
Campuzano	74.4
Montelongo	32.6
La Quinta	102.5
La Olla	89.5
Sombrerete	37.6
Río Guanajuato	72.3

llevar a cabo el cálculo de escorrentía producida en las zonas con vegetación de matorral, se hizo una ponderación de los coeficientes de escurrimiento para áreas con pastizales y terrenos cultivados, tomando en cuenta el tipo de desarrollo de cada comunidad así como el desarrollo vegetativo, debido a que los matorrales presentan tipos de cobertura vegetal que puede

situarse como intermedia entre la cobertura que brindan los pastizales y áreas cultivadas al suelo en que se desarrollan, así como lo referente a porcentaje de cobertura foliar, crecimiento y desarrollo radicular, éstos son factores que influyen en el proceso de retención y agregación del suelo así como sus efectos posteriores en el escurrimiento.

En las áreas sin vegetación, se tomó el valor más alto indicado para los terrenos cultivados, considerando que, en estas áreas existen muy pocos elementos del paisaje que intervienen para disminuir el valor de su escorrentía; aunque algunas de ellas presentan pequeñas zonas con pastizales incipientes, posiblemente no tienen importancia cartográfica, por la superficie que ocupan y la escala a la que se trabajó; mientras que, otras zonas sólo presentan el afloramiento del material parental de manera que, para definir el área sin vegetación, se adoptaron ambas características como una sola categoría. Los datos obtenidos se presentan en la Tabla 6.13.

Tabla 6.13. Valores de escorrentía máxima en la zona de estudio

MICROCUENCA	Area (ha)	Intensidad de lluvia (cm/h)	Coefficiente de escurrimiento	Q (m ³ /seg.)
La Soledad	2801.05	3.88	0.40	121.72
La Esperanza	1,720.14	4.78	0.33	75.97
P. Durán	2398.88	4.35	0.34	99.340
P. Mata	1889.49	3.85	0.38	77.40
Peregrina	405.35	8.33	0.39	36.87
Campuzano	19,059.07	1.96	0.41	428.84
Montelongo	4470.78	2.71	0.37	125.52
La Quinta	561.73	9.83	0.40	61.84
La Olla	341.96	8.53	0.35	28.680
Sombrerete	2350.91	3.51	0.50	115.52
Río Guanajuato	12,637.50	2.07	0.40	292.99

6.2.2. *Obtención del factor q_p (escurrimiento superficial)*

Posteriormente y tomando en cuenta los datos obtenidos, se procedió a hacer el cálculo de escurrimiento superficial ocurrido en cada microcuenca. Para ello se utilizó la metodología propuesta en el Manual de Conservación de Suelos y Aguas (1991), considerando la definición de escurrimiento superficial como el volumen medio anual escurrido, que está en función del área de la cuenca, cubierta vegetal y precipitación recibida, de manera que:

$$Vm = A C Pm$$

donde Vm = volumen medio anual escurrido (miles m^3); A = Área de la cuenca (km^2); C = Coeficiente de escurrimiento; Pm = Precipitación media anual (mm). Los valores finales se presentan en el Tabla 6.14.

Tabla 6.14.- Estimación del escurrimiento superficial (Factor q_p)

Microcuenca	A (Km^2)	C	Pm	Vm (miles m^3)
La Soledad	28.0	0.40	690.3	7,731.4
La Esperanza	17.2	0.33	690.3	3,918.1
P. Durán	23.9	0.34	690.3	5,609.4
P. Mata	18.9	0.38	690.3	4,957.7
Peregrina	4.0	0.39	690.3	1,076.9
Campuzano	190.6	0.41	690.3	53,944.2
Montelongo	44.7	0.37	690.3	11,416.9
La Quinta	5.6	0.40	690.3	1,546.3
La Olla	3.4	0.35	690.3	821.5
Sombrerete	23.5	0.50	690.3	8,111.0
Río Guanajuato	126.4	0.40	690.3	34,901.6

Finalmente, con los datos anteriores se procedió a calcular la producción de sedimentos para cada microcuenca. Para ello, se utilizó la ecuación de Williams (MUSLE, 1976) en la cual se

propone el uso de los parámetros de la EUPS sustituyendo el factor R por el factor Qq_p de escorrentía. Los valores de predicción de sedimentos producidos se presentan en la Tabla 6.15.

Tabla 6.15.- Estimación de producción de sedimentos por microcuenca

Microcuenca	Qq_p	K	L	S	C	P	Sedimentos
La Soledad	26128.19	0.216	4.213	5.253	0.028	1.00	3497.20
La Esperanza	13713.99	0.211	4.258	5.629	0.010	1.00	693.56
P. Durán	19483.39	0.210	4.280	9.109	0.007	1.00	1116.60
P. Mata	15810.07	0.236	4.509	7.707	0.017	1.00	2204.25
Peregrina	4438.51	0.357	4.631	5.106	0.037	1.00	1386.32
Campuzano	156976.18	0.216	5.197	7.918	0.044	0.90	50229.43
Montelongo	33066.5	0.183	6.759	3.267	0.350	0.90	42090.24
La Quinta	7261.02	0.240	4.667	4.889	0.348	1.00	13837.13
La Olla	3108.04	0.257	3.743	5.629	0.270	1.00	4543.96
Sombrerete	26064.63	0.257	5.425	1.749	0.590	0.90	33749.61
Río Guanajuato	99383.19	0.316	4.647	3.877	0.071	0.90	35645.86

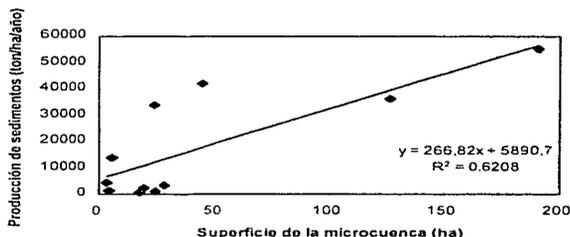
Los datos obtenidos son predicciones de la producción de sedimentos, es decir bajo las condiciones actuales se tiene que, en un plazo de tiempo no mayor a 14 años la producción de sedimentos podrá ser de tales magnitudes que implicará entonces, mayor devastación ambiental, así como la pronta pérdida de capacidad de almacenamiento y captación de agua de cada una de las presas que actualmente funcionan como bocas o salidas de las microcuencas.

Respecto al análisis estadístico realizado en la predicción de producción de sedimentos, se encontró una relación muy cercana entre el factor L (con $r = 0.722$) y el factor Qq_p (con $r = 0.7921$), lo que indica que, efectivamente, la longitud de la pendiente tiene una marcada influencia en el proceso de producción de sedimentos, aunque ello no implica necesariamente su salida de la microcuenca, ya que mientras más amplia sea la longitud del tramo recorrido por el flujo hídrico, mayor es la posibilidad de arrastre de partículas; de manera que, las microcuencas con mayor longitud de pendiente presentan mayores valores en la producción de sedimentos y, evidentemente, son estas microcuencas las que abarcan mayor superficie. Estadísticamente la relación entre estos factores se considera medianamente buena. (Ver Tabla 6.16 y Gráfica 6.7)

Tabla 6.16. - Coeficientes de correlación entre los factores de la EUPSM

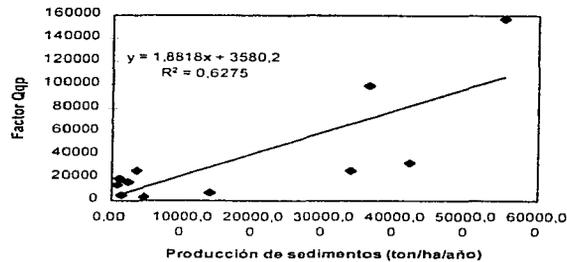
	Sedimentos	K	L	S	C	P	W
Sedimentos	1,0000	-0,1320	0,7220	-0,3224	0,4412	-0,9490	0,7921
K	0,0000	0,6988	0,0121	0,3335	0,1743	0,0000	0,0037
L	-0,1320	1,0000	-0,2593	-0,2516	-0,1013	0,0368	-0,0382
S	0,6988	0,0000	0,4233	0,4554	0,7669	0,9144	0,9112
C	0,7220	-0,2693	1,0000	-0,4584	0,6339	-0,7348	0,2660
P	0,0121	0,4233	0,0000	0,1562	0,0362	0,0100	0,4293
W	-0,3224	-0,2516	-0,4584	1,0000	-0,7376	0,4670	0,1508
	0,3335	0,4554	0,1562	0,0000	0,0096	0,1476	0,6581
	0,4412	-0,1013	0,6339	-0,7376	1,0000	-0,4974	-0,1261
	0,1743	0,7669	0,0362	0,0096	0,0000	0,1195	0,7117
	-0,9490	0,0368	-0,7348	0,4670	-0,4974	1,0000	-0,6956
	0,0000	0,9144	0,0100	0,1476	0,1195	0,0000	0,0175
	0,7921	-0,0382	0,2660	0,1508	-0,1261	-0,6956	1,0000
	0,0037	0,9112	0,4293	0,6581	0,7117	0,0175	0,0000

n = 11 Coeficiente nivel de significancia



Gráfica 6.7.- Relación entre área de la microcuenca-producción de sedimentos

En cuanto a la escorrentía, la Gráfica 6.8 muestra la relación entre esta variable (factor Qq_p de la MUSLE) y la producción de sedimentos; es claro que en esta relación intervienen otros factores tales como porcentaje de cobertura vegetal, porcentaje de fragmentos de rocas, calidad de la permeabilidad del sustrato, etc., para permitir que se lleve a cabo el flujo hídrico y el arrastre de partículas o producción de sedimentos.



Gráfica 6.8.- Relación producción de sedimentos-Factor Qq_p

Una de las características más importantes de los sedimentos es que éstos son los más grandes contaminantes de las aguas superficiales y de los grandes depósitos creados por el hombre, como las presas, ya que el enturbamiento de los arroyos y lagos reduce su uso en cualquier aspecto: industrial, recreacional o simplemente para la vida acuática. La erosión y su consecuente producción de sedimentos, también contamina los arroyos cuando los fertilizantes y pesticidas son disueltos en el agua de escorrentía o adsorbidos en las partículas de suelos erodados (Troeh *et al*, 1991).

Sin embargo, la sedimentación como parte del proceso de erosión puede ser tan benéfica como dañina. La erosión acelerada remueve inicialmente el suelo superficial, y pronto acarrea subsuelo menos productivo que se deposita en las áreas fértiles reduciendo su productividad; los piedemonte de las laderas en zonas montañosas desnudas, frecuentemente deposita varios cientos de toneladas de sedimento y suelo, roca y otros materiales cuarzosos. Los grandes depósitos de agua (presas), generalmente, se encuentran en estas zonas, por lo que la captación de sedimentación es muy alta. Cuando un depósito se llena con sedimentos su valor se pierde para siempre (Foster, 1988; Troeh *et al*, 1991).

Por otro lado, es claro que el proceso de desprendimiento y transporte de sedimentos está íntimamente influenciado por las condiciones topográficas del suelo; en la Sierra de Guanajuato, la mayor parte de las pendientes son de grandes inclinaciones y altos valores de

longitud, lo que a su vez favorece la detención de estas partículas en regiones diversas y no necesariamente en zonas deposicionales por excelencia. Aunado a ello, encontramos las características de erosividad de las lluvias que, para esta región, es de alta intensidad, así como las bajas posibilidades de resistencia que ofrece el suelo a ser desprendido, por presentar un escaso desarrollo edáfico y, en consecuencia, menor estructuración.

Además, la longitud de las pendientes es un factor que tiene que ver con la velocidad y superficie de recorrido de los elementos erodados, de manera que éstos pueden ser depositados en cualquier parte de la ladera, en sitios que tengan una leve depresión o inclusive una barrera cualquiera en el terreno (vegetación, rocas, etc) para que puedan ser detenidas dichas partículas y no necesariamente que sean arrastradas hacia las zonas más bajas de la propia ladera, en donde puede localizarse preferencialmente, la acumulación de sedimentos.

No hay que olvidar que el transporte de las partículas depende de su tamaño: las arenas cuarzosas comienzan a depositarse cerca de los piedemonte, en donde puede haber descenso en la velocidad del flujo; las arenas finas y limos se transportan más lejos y las arcillas, al tener menor diámetro y peso específico, se transportan mucho más lejos y decaen hasta que el flujo deposita en un lago temporal o permanente (Catt, 1988; Troeh *et al*, 1991).

Tabla 6.17.- Correlación de pérdida de suelo-área-producción de sedimentos

	Sedimentos	Suelo	Superficie
Sedimentos	1,0000	0,3016	0,7879
Suelo	0,0000	0,3673	0,0040
Superficie	0,3016	1,0000	-0,2204
	0,3673	0,0000	0,5149
	0,7879	-0,2204	1,0000
	0,0040	0,5149	0,0000

n = 11 Coeficiente nivel de significancia

6.3 Estimación de la pérdida de nutrimentos

6.3.1. Nutrimentos en suelos

Materia orgánica: las microcuencas con valores más altos de materia orgánica son Presa Durán (9.6%) y Presa de Mata (9.26%), los valores medios se sitúan en La Esperanza; los valores más bajos se encontraron en las microcuencas que son especialmente de mayor actividad agrícola como Campuzano, Río Guanajuato y Sombrerete, en consecuencia, sus suelos son los más utilizados y es mayor el gasto de nutrimentos por parte de las distintas especies vegetales. El tipo de vegetación también influye para el contenido de materia orgánica en los suelos. En la Tabla 6.18 se presenta la relación entre la vegetación predominante con el contenido de materia orgánica en cada microcuenca.

Tabla 6.18.- Relación vegetación-contenido de M.O.

Microcuenca	Vegetación dominante	M.O. (%)
La Soledad	Matorral	1.31
La Esperanza	Bosque	1.87
P. Durán	Matorral	5.50
P. Mata	Bosque-Matorral	4.99
Peregrina	Bosque	10.00
Campuzano	Matorral-Agric.tempor.	1.69
Montelongo	Agric.temp-Bosque	1.45
Quinta	Matorral	1.69
La Olla	Pastizal	0.37
Sombrerete	Agricultura de temporal	0.75
Río Guanajuato	Pastizal-Agricu.tempor.	1.58

Como puede observarse en el cuadro anterior las áreas con vegetación de bosque y matorral son las que presentan mayor contenido de materia orgánica, son sitios en donde el suelo tiene, teóricamente, mejores condiciones de desarrollo y mayor cubierta vegetal, que impide el desprendimiento y transporte de las partículas del suelo, y por otro lado son los sitios en donde

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

debería existir mayor contenido de nutrimentos ya que, como afirma Fassbender (1987) el papel que juega la materia orgánica en el suelo es muy grande y diverso, entre sus muchas aportaciones al edafosistema se encuentra el hecho de ser la principal fuente de nutrimentos para las plantas y los organismos. También interviene en la estructura del suelo favoreciendo la formación de agregados individuales, uso más eficiente del agua al mejorar la infiltración al reducir la evaporación y aumentar el drenaje.

Respecto al análisis estadístico para esta variable, el análisis de varianza demostró una diferencia significativa entre el contenido de materia orgánica en los suelos con respecto a los sedimentos, con un nivel de significancia de 0.0067 con 95% de nivel de confianza. En el anexo B se presentan los datos de los análisis de varianza realizados. El análisis de correlación no mostró diferencias significativas.

Reacción del suelo o pH: en lo que se refiere a pH, los valores se ubican en rangos más bien neutros, pasando desde los ligeramente ácidos hasta los ligeramente alcalinos. Evidentemente, existe concordancia entre el valor de pH y el contenido de materia orgánica; por ejemplo, Presa Mata presenta características ligeramente ácidas (6.3 a 7.2) con alto contenido de materia orgánica, y es sabido que la reacción del suelo influye en el contenido de la materia orgánica; en suelos ácidos, con pH menor que cinco, se produce una acumulación de la materia orgánica (Fassbender, 1987). Sin embargo, en el valor de pH en el suelo también influyen otros procesos como son: material parental, insumos agrícolas utilizados, calidad de las aguas de riego y posible aporte de los sedimentos acarreados; el análisis de correlación no mostró significancia alta entre los valores de suelos y sedimentos; el análisis de varianza, mostró diferencias entre los sedimentos y suelos, tanto en solución de agua como en solución con KCl, el análisis realizado muestra una ligera acidificación en los suelos respecto a los sedimentos, y esto puede deberse entre otras causas a la presencia de la materia orgánica en el sustrato. El nivel de significancia fue de 0.000 con un nivel de confianza del 95% (Ver anexo C).

Nitrógeno: en el contenido de nitrógeno total (NT) las concentraciones encontradas van desde medianamente pobres (con 0.0791%) en Río Guanajuato, a medianas en La Soledad (0.0505 a 0.1596), Presa Durán (0.0728 a 0.210) y Campuzano (0.0398 a 0.324), y de ricas a extremadamente ricas en la Esperanza (0.0825 a 0.800), La Peregrina (0.3839) y Presa de Mata (0.0655 a 0.3033). Estos valores son coincidentes con el contenido

de materia orgánica así como con el tipo y porcentaje de cubierta vegetal, ya que estas áreas son las que presentan mayor cobertura de bosque.

El nitrógeno del suelo puede ser eliminado por algunas de las siguientes causas: por erosión, por lixiviación de nitratos, por pérdida gaseosa en forma de amoníaco, óxido nitroso, etc. En el caso de la lixiviación el nitrógeno se pierde en forma de nitrato, ya que éstos permanecen en la solución del suelo y tienden a ser muy solubles (Fassbender, 1987; Boul, 1981; Wild, 1992). Sin embargo, la cuantificación del nitrógeno en forma de nitrato es muy difícil, precisamente por su alta solubilidad y por otro lado, gran parte del nitrógeno en el suelo es aportado, básicamente, por la descomposición de la materia orgánica aunque el proceso depende del clima, material parental y topografía. El análisis de varianza no mostró diferencia significativa entre los valores de nitrógeno en suelos y sedimentos.

Fósforo: respecto a la determinación de fósforo, los valores encontrados en suelos pueden ser catalogados como bajos en todas la microcuencas (variaciones desde 0.00 a 0.69 kg/ha). El contenido de fósforo en suelos aumenta a medida que se intensifica el intemperismo de las rocas subyacentes y al descender en el perfil, aunque el bajo contenido de este elemento también puede deberse a procesos de erosión (Wild, 1992). De manera general, la variación en el contenido total de fósforo en el suelo, está estrechamente ligado al tipo de roca subyacente así como a la textura del suelo, ya que a mayor fineza del material, el contenido de este elemento aumenta, y por otra parte, está íntimamente relacionado con el contenido de materia orgánica en el suelo, ya que entre el 25 y 75% de fósforo total, es aportado por el fósforo orgánico (Fassbender *et al.*, 1987).

Potasio: Los contenidos de potasio total en los suelos presentan valores bajos y variaciones marcadas entre las microcuencas que van de 1.720 kg/ha la más baja (La Peregrina) hasta 5.840 kg/ha la más alta (La Esperanza). El contenido de potasio en los suelos está en función del material parental y de los procesos de intemperismo; su contenido puede variar entre 0.04 y 3.0%. Ello implica que en suelos arenosos, pobres en micas y feldespatos, el contenido de potasio será también pobre. En la Sierra de Guanajuato la mayor parte de los suelos corresponden a las categorías de limosos y arenosos, con pobre contenido de arcilla. Sin embargo, sólo se cuantificó el potasio total, faltaría analizar más de una forma química presente. Aun así, la literatura al respecto afirma que el potasio en el suelo puede ser fácilmente perdido por efectos de percolación o bien, a consecuencia de arrastre de partículas

de suelo por efectos de erosión (Fassbender *et al.*, 1987; Aguilar *et al.*, 1987). Por otra parte, pueden existir cantidades elevadas de este elemento en el suelo, pero no por ello esos suelos son capaces de suministrar suficiente potasio para los cultivos, y el problema puede deberse no al contenido total, sino a la concentración de la solución del suelo en la zona radicular de las plantas y la velocidad de su renovación (Wild, 1992).

Respecto al análisis estadístico, no se encontró relación entre la pérdida de este elemento en suelos, con respecto a sedimentos; en cuanto al análisis de varianza, tampoco se presenta una diferencia significativa que pueda indicar que, efectivamente, tanto el fósforo como los otros nutrimentos están siendo transportados.

Tabla 6.19.- Contenidos de nutrimentos en suelos por microcuenca.

MICROCUENCA	SUPERFICIE ha	N total			P total			K total		
		máx.	min.	prom.	máx.	min.	prom.	máx.	min.	prom.
I. LA SOLEDAD	2901,05	0,16	0,05	0,11	0,80	0,34	0,61	2,77	0,55	1,74
		mediano			bajo			mediano		
II. LA ESPERANZA	1720,14	0,80	0,08	0,36	0,10	0,32	0,25	10,86	1,50	5,84
		Extrm. rico			bajo			rico		
III. PRESA DURAN	2398,88	0,21	0,07	0,12	0,23	0,66	0,41	6,90	2,31	4,60
		mediano			bajo			rico		
IV. P. MATA	1889,49	0,30	0,07	0,20	0,00	0,44	0,31	2,61	4,68	3,83
		mediano			bajo			mediano		
V. PEREGRINA	405,35	0,38	0,38	0,38	0,32	0,55	0,44	0,46	1,72	1,09
		extrm. rico			bajo			mediano		
VI. CAMPUZANO	19059,07	0,04	0,32	0,12	0,00	0,91	0,25	0,00	0,27	1,77
		mediano			bajo			mediano		
VII. MONTELONGO	447,08	0,05	0,08	0,07	0,45	0,69	0,57	1,83	3,89	2,86
		mediam. pobre			bajo			mediano		
X. RIO GUANAJUATO	12363,5	0,05	0,14	0,08	0,07	0,55	0,31	0,70	2,64	1,91
		mediam pobre			bajo			mediano		

6.3.2. Nutrimentos en sedimentos

La concentración de nutrimentos en los sedimentos analizados no demuestra valores muy distintos a las concentraciones encontradas en los suelos, lo que puede evidenciar que no existe un movimiento masivo de estos elementos que limiten su aprovechamiento en los suelos; no obstante, es claro que existe un movimiento y transporte dado que, los sedimentos son

erodados y acarreados de áreas en donde existen estos nutrientes, y además, la cantidad de nitrógeno, fósforo y potasio en los suelos, no son excesivos y ello implica que no sea excesiva su cuantificación en los sedimentos. Tanto el análisis de varianza como el análisis de correlación de N, P y K no mostraron, relación alguna entre sedimentos y suelos; lo que nos puede sugerir que no existe un enriquecimiento de estos elementos en las áreas en donde se depositan las partículas erodadas.

Tabla 6.20.- Contenidos de nutrientes en sedimentos.

MICROCUEENCA	SUPERFICIE ha	N total			P total			K total		
		máx.	min.	prom.	máx.	min.	prom.	máx.	min.	prom.
I. LA SOLEDAD	2801,05	0,77	0,05	0,30	0,00	0,55	0,18	0,21	0,80	0,34
		extrem.rico			mediano			mediano		
II. LA ESPERANZA	1720,14	0,32	0,03	0,15	0,23	0,23	0,23	1,93	0,46	0,92
		mediam.rico			mediano			mediano		
III. PRESA DURAN	2398,88	0,17	0,07	0,09	0,42	0,10	0,27	7,44	3,06	4,54
		extrem.rico			rico			rico		
IV. P. MATA	1889,49	0,11	0,07	0,09	0,44	0,00	0,22	4,15	2,61	3,38
		mediam.pobre			mediano			mediano		
V. PEREGRINA	405,35	0,11	0,11	0,11	0,23	0,23	0,23	5,71	5,71	5,71
		mediano			mediano			rico		
VI. CAMPUZANO	19059,07	0,32	0,02	0,14	0,80	0,00	0,29	0,62	8,62	4,20
		medianam.rico			mediano			rico		
VII. MONTELONGO	447,08	0,16	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	7,54	7,54	7,54
		rico			bajo			rico		
X. RIO GUANAJUATO	12363,5	0,27	0,02	0,07	0,80	0,00	0,36	7,54	0,26	2,94
		pobre			mediano			mediano		

Parte de estos resultados pueden deberse al muestreo realizado; también influye la forma de análisis químico utilizado, dado que se cuantificaron los elementos totales, y no las distintas formas químicas en que pueden presentarse en el suelo, ya sea adsorbidos a las partículas de suelos (arcillas o complejos químicos quelatantes con la materia orgánica, etc.) así como los procesos edafogénicos que ocurren en la formación y una idea bastante cercana de la situación que guardan estos elementos en el suelo.

Los sedimentos depositados en arroyos, estanques y lagos dispersan el agua en caminos que pueden ir totalmente en detrimento de éstos. Los depósitos llenos de sedimentos pierden su utilidad para controles de inundación, producción de energía eléctrica o recreación. Además, acarrean cantidades mucho más grandes de nutrimentos de plantas y otros químicos que son disueltos en el agua. Varios estudios han demostrado que la mayor parte del nitrógeno y cerca del 90% de fósforo que se mueve desde el campo hacia los arroyos son acarreados por sedimentos (Troeh *et al.*, 1991).

Por otro lado, los materiales parentales de los suelos ubicados en las zonas con mayor altitud son ricos en N, P y K, lo que ocasiona la acumulación de tales elementos en los suelos, y la posibilidad de pérdida por arrastre de partículas; sin embargo, hay que tomar muy en cuenta su dinámica y forma de disposición en el complejo de intercambio.

Los sedimentos erodados pueden tener una mayor fertilidad que los suelos que cubren, o ser ricos en arcillas y favorecer el crecimiento de plantas y cultivos; pero otros pueden tener las características contrarias, de manera que el daño de sedimentación en áreas agrícolas puede ser muy grande, aunque frecuentemente temporal, debido a que pueden establecerse nuevos cultivos.

Tabla 6.21.- Análisis de correlación de nutrimentos en suelos y sedimentos

Sedimento	S u e l o					
	pH H ₂ O	pH KCl	M.O.	N total	P total	K total
pH H ₂ O	0.3604	0.3251	-0.8305	-0.8158	0.0175	0.0311
	0.1296	0.1745	0.0000	0.0000	0.9433	0.8993
pH KCl	0.2632	0.2687	-0.5566	-0.6361	-0.1490	-0.2482
	0.2762	0.2660	0.0133	0.0034	0.5426	0.3056
M.O.	0.0445	0.0707	0.0185	-0.0293	0.0071	0.0535
	0.8565	0.7736	0.9401	0.9051	0.9770	0.8279
N total	0.0281	-0.0319	-0.1136	-0.0247	-0.0732	0.0569
	0.9090	0.8967	0.6432	0.9202	0.7659	0.8172
P total	-0.2635	-0.0841	0.0170	0.0258	-0.0661	-0.0310
	0.2757	0.7321	0.9448	0.9166	0.7882	0.8998
K total	0.2060	0.0961	0.2161	0.1348	0.0876	-0.1372
	0.3975	0.6954	0.3743	0.5822	0.7215	0.5754

n=19

CONCLUSIONES

1. La estimación de pérdida de suelo manifiesta que las microcuencas con mayor nivel de erosión de suelo son: Peregrina, Campuzano, Montelongo, La Quinta, La Olla, Sombrerete y Río Guanajuato con niveles altos a muy altos. Estas áreas son las microcuencas que presentan menor superficie de bosque, mayores longitudes de pendientes (475 m en Peregrina a 1012 m en Montelongo) y con mayores inclinaciones (12 - 46%). Cuatro de ellas presentan hasta el 50% de su superficie con cubierta vegetal de agricultura (Sombrerete, Río Guanajuato, Montelongo y Campuzano) factor que puede favorecer la pérdida de suelo. En las otra dos microcuencas, como La Olla la mayor parte de superficie está cubierta por pastizal, y en la Quinta, el 90% con matorral. Esto evidencia que el uso de suelo (factor C de la EUPS) es un elemento preponderante en la influencia que ejerce para la pérdida de suelo de estas regiones.
2. De acuerdo con los resultados obtenidos, la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo es una metodología adecuada en la predicción de pérdida de suelo en áreas definidas como cuencas.
3. Las microcuencas que mayor producción de sedimentos presentan y que constituyen un mayor riesgo de azolvamiento son: Campuzano > Montelongo > Río Guanajuato > Sombrerete y > La Quinta, en ese orden. El valor de producción de sedimentos está definido por la cantidad de escorrentía presente en el área, así como la longitud de sus pendientes, confirmándose además, que la superficie de la cuenca tiene una alta correlación con la producción de sedimentos.
4. La estimación de la producción de sedimentos mediante la Modificación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo resultó tener una buena correlación, por lo que puede decirse que es un método que posibilita su utilización en estudios relacionados con la pérdida de suelo y producción de sedimentos en áreas definidas como cuencas.

De manera general, de acuerdo con las valoraciones obtenidas, no se puede afirmar que exista pérdida de nutrimentos de los suelos por efecto de erosión y arrastre o transporte de sedimentos, entendiéndose que dicha pérdida puede significar el enriquecimiento de áreas deposicionales dentro de la misma cuenca. Lo que puede decirse es que existe un transporte

de partículas, y los nutrientes que ellas contienen no repercuten en el excesivo denudamiento de fertilidad de los suelos de las regiones ubicadas en las partes más altas de la misma zona.

5. En cuanto a la utilización del Sistema de Información Geográfica ILWIS (versión 1.4) resultó ser una excelente herramienta para la delimitación de áreas, sobreposición de mapas y trabajo cartográfico en general, disminuyendo el tiempo necesario para el análisis de esta parte del trabajo, por lo que su uso resulta adecuado en el estudio de los Recursos Naturales y, específicamente, en el estudio y análisis de los procesos de erosión y sedimentación.

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Aguilar, S.A., J.D. Etchevers, B. y J.Z. Castellanos, R. 1987. *Análisis químico para evaluar la fertilidad de los suelos*. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Publicación Especial No. 1. UACH, Chapingo, México.
- 2.- Aguilar, S.G. 1982. *Metodología para obtener y aplicar factores de la EUPS para condiciones de México*. Tesis Maestría. Colegio de Posgraduados. Chapingo. México
- 3.- Anaya, G. M., M.M. Martínez, C.A., Trueba, S.B. Figueroa y M.O. Fernández. 1991. *Manual de Conservación de Suelo y Agua*. Colegio de Posgraduados-SARH. México.
- 4.- Antúnez, E.F. 1964. *Monografía histórica y minera del Distrito de Guanajuato*. Consejo de Recursos Naturales no Renovables. Publicación 17E México.
- 5.- Aparicio, M.F. 1994. *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. LIMUSA. México. 303 p.
- 6.- Arias, R.H.M. 1980. *El factor R de la EUPS en la cuenca del Río Texcoco*. Tesis Maestría. Colegio de Posgraduados. Chapingo. México.
- 7.- Catt, B.J. 1988. *Quaternary Geology for Scientist and Engineers*. John Wiley & Sons. England.
- 8.- Campbell, I.A. 1992. *Spatial and Temporal variations in erosion and sediment yield*. in: Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins (Proceedings of the Oslo Symposium, August 1992). IAHS. Publication No. 210. 455-465 p.
- 9.- Comisión Nacional del Agua. 1990. Informe estadístico No. 6. Vol. II. Tomo I. México. p. 196
- 10.- De Ploey, J. and D. Gabriels. 1980. *Medición de la pérdida de suelo y estudios experimentales*. en: Erosión de Suelos. Kirby, M.J. y R.P.C. Morgan (editores). LIMUSA. México.
- 11.- Dissmeyer, E.G. and G.R. Foster. 1981. *Estimating the cover-management factor (C) in the Universal Soil Loss Equation for forest conditions*. Journal Soil and Water Conservation. Vol 36 No. 1 July-August. 235-240 p.
- 12.- FAO, 1967. La erosión del suelo por el agua. ONU-PNUMA. Roma.
- 13.- FAO, 1980. *Metodología provisional para la degradación de los suelos*. ONU-PNUMA. Roma.
- 14.- FAO, 1989. *Método para clasificación de suelos*. ONU-PNUMA. Roma.
- 15.- Fassbender, H.W. y E. Börnemiza. 1987. *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José de Costa Rica.
- 16.- Figueroa, S. B. 1991. *Agricultura sostenible y deterioro ambiental: la erosión del suelo*. en: Memorias del Primer Simposium Nacional sobre Agricultura sostenible: una opción para el desarrollo sin deterioro ambiental. Comisión de Estudios Ambientales. Colegio de Posgraduados, Chapingo, México.

17. Figueroa, S. B., A. Amante, H.G. Cortes, T., J. Pimentel, L., E.S. Osuna, C.J. Rodríguez, O. y F.J. Morales, F. 1996. *Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión*. Colegio de Posgraduados. Chapingo. México.
- 18.- Fournier, F. 1960. *Climat et erosion*. Presses Universitaires de France. París. Francia. 201 p.
- 19.- García, A. M.T. 1992. *Mapas topográficos representativos de la geomorfología de México*. Tesis Profesional. Facultad de Filosofía y Letras. UNAM. 82 p.
- 20.- García, E. 1986. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. LARIOS. UNAM.
- 21.- Gómez, A.A. y H. Alarcón, C. 1975. *Erosión. Capítulo III*. en: Manual de Conservación de Suelos de Ladera. CENICAFE. Litomoderna. Bogotá, Colombia 61-81 p.
- 22.- Gregory, K. L., y D.E.Walling. 1973. *Drainage Basin form and process. a geomorphological approach*. Arnold Press. U.S.A.
- 23.- Hernández, A.M.E. 1996. *Evaluación de la erosión de los suelos de la Subcuenca del Río Guanajuato*. Tesis Maestría. Facultad de Ciencias. UNAM. México. 101p.
- 24.- Izaguirre, M.M. y C. Domínguez, E. 1979. *Geografía moderna del Estado de Guanajuato*. Gobierno del Estado de Guanajuato México 304 p.
25. Jacques, C.L. 1987. *Evaluación de la capacidad erosiva de la lluvia en la cuenca del Río Texcoco*. Tesis Maestría. Colegio de Posgraduados. Chapingo. México 94 p.
- 26.- Jackson, M.L. 1982. Análisis químico de suelos. OMEGA Barcelona 254-281 p.
- 27.- Kirby, J.J. 1984. *Modelos de procesos de erosión hídrica*. en: *Erosión de suelos*. Kirby y Morgan (Eds). LIMUSA. México. 227-261 p.
- 28.- Lal, R. 1990. *Soil erosion in the Tropics*. Principles & management. Mc-Graw-Hill U.S.A.
- 29.- Lal, R. 1991. *Soil Management for sustainability*. Soil and Water Conservation Society. U.S.A.
- 30.- Littau, S.E. and W.G. Engelhart. 1990. *Microwave Sample Preparation for Total Nitrogen and Phosphorus Determination*. CEM. Presented at the 32nd Rocky Mountain Conference.
- 31.- Lugo, H.J.I. 1989. *Diccionario geomorfológico*. Instituto de Geografía. UNAM. México. 337p.
- 32.- Lugo, H.J.I. 1991. *Elementos de Geomorfología Aplicada (Métodos cartográficos)*. Instituto de Geografía. UNAM. México.
- 33.- Maass, M.J.M. y F. García-Oliva. 1990. *La conservación de suelos en zonas tropicales: el caso de México*. Ciencia y Desarrollo vol XV(90) Enero-Febrero 21-36 p.
- 34.- MacDonald, L.H. 1991. *Monitoring Guidelines to evaluate effects of forestry activities on streams in the Pacific Northwest and Alaska*. EPA University of Washington, Washington, D.C. 98-108 p.

- 35.- Martínez-Reyes, J. 1987. *Sobre la geología de la región de la Sierra de Guanajuato*. Simposium del Instituto de Geología. Resúmenes. UNAM.
- 36.- Martínez-Reyes, J. 1992. *Mapa geológico de la Sierra de Guanajuato*. Simposium del Instituto de Geología. UNAM México.
- 37.- Medina, R.F.J. 1982. *Estudio Geológico-Minero Regional del Área La Virgen-Manzanilla, Municipio de León, Guanajuato*. Tesis Profesional. Universidad de Guanajuato. México.
- 38.- Miall, A.D. 1986. *Analysis of Fluvial Depositional Systems*. University of Toronto, Canada.
- 39.- Mitchell, J.K. y G.D. Bubenzer, 1980. *Estimación de la pérdida de suelo*. en: *Erosión de suelos*. Kirby y Morgan (editores). LIMUSA. México. 35-87p.
- 40.- Mutchler, C.K., C.E. Murphree y C.C. McGregor. 1994. *Laboratory and field plots for erosion research*. in: *Soil erosion research method*. R. Lal (editor) Second edition. Soil and Water Conservation Society.
- 41.- Nearing, M.A., L.J. Lane y V.L. Lopes. 1994. *Modeling soil erosion*. in: *Soil erosion research method*. R. Lal (editor) Second edition. Soil and Water Conservation Society.
- 42.- Olive, L.J. y W.A. Rieger. 1992. *Stream suspended sediment. Why, how and what is being measured?*. in: *Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins*. Bogen, J., Walling, D.E. and Day T. (editors). IAHS. Publications No. 210. Great Britain.
- 43.- Oropeza, M.J.L. 1980. *Evaluación de la erosión hídrica (sedimentos en suspensión) en las cuencas de los ríos Texcoco y Chapingo*. Tesis de Maestría. Colegio de Posgraduados. Montecillos, México.
44. Palacio-Prieto, J.L. y López-Blanco, J. 1992. *Evaluación del avance de cabeceras de cárcavas mediante el procesamiento de imágenes multitemporales de video obtenidas desde un globo aerostático*. En: *Memorias del XIII Congreso Nacional de Geografía*. INEGI CONACYT. UNAM. México.
- 45.- Porta, C.J., M. López-Acevedo y C. Roquero. 1994. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- 46.- Renard, K.G., J.M. Laflen, G.R. Foster and D.K. McKool. 1994. *The Revised Universal Soil Loss Equation*. In: *Soil erosion research method*. R.Lal (editor) Second edition. Soil and Water Conservation Society.
- 47.- Rey-Contreras, J.A. 1986. *Índices de erosividad*. Folleto. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. México.
- 48.- Ríos-Berber, J.D. 1987. *Efectos de la cobertura vegetal en el proceso erosivo*. Tesis de Maestría. Colegio de Posgraduados. Montecillos. México.
- 49.- Rodríguez, C.N. 1980. *Predicción de sedimentos en cinco microcuencas del Río San Bernardino*. Tesis de Maestría. Colegio de Posgraduados. Montecillos. México.

- 50.- Romero-Díaz, M.A., F. Cabezas y F.López-Bermúdez. 1992. *Erosion and fluvial sedimentation in the River Segura Basin (Spain)*. Catena vol. 19: 379-392 p.
- 51.- SARH. 1991. *Inventario Nacional Forestal de Gran Visión. Reporte principal*. Subsecretaría Forestal. México.
- 52.- Sarukhán, J. y J.M. Maass. 1990. *Bases ecológicas para un manejo sostenido de los ecosistemas: el sistema de cuencas hidrológicas*. en: Medio Ambiente y Desarrollo en México. Volumen . UNAM. México.
- 53.- Shwab, O.G., R.K. Frevert, T.W. Edminster and K.K. Barnes. 1981. *Soil and Water Conservation Engineering*. Third edition. John Wiley & Sons. E.U.A.
- 54.- SPP. 1980. *Síntesis geográfica de Guanajuato*. INEGI. México.
- 55.- Terrones, R.R. y C. Mejía, A. 1989. *Estratificación agroclimática del Estado de Guanajuato*. TERRA. Vol 7(1): 40-49 p. Enero-Junio. México.
- 56.- Tolba, M.K. 1986. *The handbook of ecological monitoring*. Oxford Science Publications. Clarendon Press. Oxford. 298 pág.
- 57.- Tragsatec. 1994. *Restauración hidrológico-forestal de cuencas y control de la erosión*. Mundi-Prensa. España.
- 58.- Troeh, F.E., J.A. Hobbs and R.L. Donahue. 1991. *Soil and Water Conservation*. 2nd. edition. Prentice-Hall. U.A.A. 534 p.
- 59.- Urbina, C. 1974. *Manejo de cuencas hidrográficas*. Parte I y II. Bogotá, Colombia.
- 60.- Villegas, S.M., N. Aguilera, H. y L. Flores, D. 1978. *Método simplificado de análisis para la clasificación granulométrica de los minerales del suelo*. Revista del Instituto de Geología. UNAM. Vol II(2):188-193 p.
- 61.- Villota, H. 1991. *Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación física de las tierras*. Primera Parte. Instituto Geográfico "Agustín Codazzi". Bogota, D.C. 212 p.
- 62.- Walling, D.E. y K. L. Gregory. 1973. *Drainage Basin form and process . a geomorphological approach*. Arnold Press. U.S.A.
- 63.- Walling, D.E. 1988. *Measuring sediment yield from river basins*. in: Soil erosion research methods. Soil and Water Conservation Society. R. Lal (editors) U.S.A. 39-73 p.
- 64.- Wild, A. 1992. *Condiciones de suelo y desarrollo de las plantas según Russell*. Mundi-Prensa . Madrid.
- 65.- Wischmeier, W.H. y D.D. Smith. 1978. *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning*. Supersedes Agriculture Handbook No. 282 U.S.A.
- 66.- Zaragoza, M.L. 1978. *Análisis Agropecuario y Forestal del Estado de Guanajuato*. Econotecnia agrícola Vol.II (11) Noviembre. SARH. Subsecretaría de Agricultura y Operación. Dirección General de Economía Agrícola.

ANEXO A. EROSIVIDAD DE LA LLUVIA AÑO 1991

	vol (ml)	T (min)	t hr	l /mm/hr	Ec lluvia	Ec intervalo	I 30	R		vol (ml)	T (min)	t hr	l /mm/hr	Ec lluvia	Ec intervalo	I 30	R		
FEB																			
5-feb	5.3	50	0.83	6.36	0.189	1.002				2-jul	4	100	1.67	2.40	0.152	6.609			
						1.002	9.2	9.2226			10	70	1.17	8.57	0.200	2.005			
											0.8	20	0.33	2.40	0.152	0.122			
MAY											10	50	0.83	12.00	0.213	2.132			
11-may	0.2	10	0.17	1.20	0.126	0.025					4	40	0.87	6.00	0.187	0.748			
	4.7	25	0.42	11.28	0.211	0.991					5.5	30	0.50	11.00	0.210	1.155			
	0.1	10	0.17	0.60	0.100	0.010					5	30	0.50	10.00	0.206	1.032			
						1.026	9.8	10.0569			2.8	30	0.50	5.60	0.184	0.516			
29-may	0.2	10	0.17	1.20	0.126	0.025					2.1	30	0.50	4.20	0.173	0.364			
	1.1	15	0.25	4.40	0.175	0.193										12.4	107.6470		
						0.218	2	0.4357		3-jul	10	570	9.50	1.05	0.121	1.209			
JUN											10.2	60	1.00	10.20	0.207	2.112			
7-jun	1.5	30	0.50	3.00	0.161	0.241					5.2	120	2.00	2.60	0.155	0.807			
						0.241	3	0.7229			4.9	30	0.50	9.80	0.206	1.007			
8-jun	0.7	10	0.17	4.20	0.173	0.121					1.8	20	0.33	5.40	0.183	0.329			
	4	140	2.33	1.71	0.139	0.558					6	140	2.33	2.57	0.155	0.929			
	10	30	0.50	20.00	0.233	2.326					3.4	30	0.50	6.80	0.192	0.852			
	10	25	0.42	24.00	0.239	2.399					2.7	60	1.00	2.70	0.157	0.423			
	10	15	0.25	40.00	0.259	2.589					10.2	60	1.00	10.20	0.207	2.112			
	5	100	1.67	3.00	0.161	0.803					7.7	30	0.50	15.40	0.223	1.715			
	9.7	30	0.50	19.40	0.231	2.245					3.2	30	0.50	6.40	0.189	0.606			
						11.037	3.2	35.3169			2.9	30	0.50	5.80	0.186	0.538			
9-jun	7	30	0.50	14.00	0.219	1.533					1.8	40	0.67	2.70	0.157	0.282			
	8.8	20	0.33	26.40	0.243	2.139					1.3	30	0.50	2.60	0.155	0.202			
						3.673	18.6	68.3128			1.6	30	0.50	3.20	0.163	0.261			
10-jun	1.1	35	0.58	1.89	0.143	0.157										0.745	3.6	2.6811	
	0.7	50	0.83	0.84	0.112	0.079					10.2	20	0.33	30.60	0.249	2.537			
						0.236	2	0.4721								2.537	25.8	65.4488	
14-jun	0.8	60	1.00	0.80	0.111	0.088					5.6	60	1.00	5.60	0.184	1.032			
	0.5	40	0.67	0.75	0.108	0.054					4.2	20	0.33	12.60	0.215	0.903			
	8.5	160	2.67	3.19	0.163	1.385					10	20	0.33	30.00	0.248	2.480			
	3.5	30	0.50	7.00	0.193	0.675					2.1	30	0.50	4.20	0.173	0.364			
						2.202	1	2.2023			1.2	26	0.42	2.88	0.159	0.191			
16-jun	4.8	100	1.67	2.88	0.159	0.764					3.5	50	0.83	4.20	0.173	0.507			
	30	30	0.50	60.00	0.274	8.227					3.5	70	1.17	3.00	0.161	0.562			
	10	70	1.17	8.57	0.200	2.005					3.7	30	0.50	7.40	0.195	0.721			
	10	40	0.67	15.00	0.222	2.217										6.860	7.6	52.1386	
	10	180	3.00	3.33	0.165	1.048					10	150	2.50	4.00	0.172	1.716			
	0.5	50	0.83	0.60	0.100	0.050					1.2	30	0.50	2.40	0.152	0.183			
	1.8	160	2.67	0.68	0.104	0.187					10.2	15	0.25	40.80	0.260	2.648			
	10.2	30	0.50	20.40	0.233	2.380										4.548	45.6	207.3094	
	1.8	30	0.50	3.60	0.168	0.302										0.302			
						17.777	50	888.8611											
17-jun	1	10	0.17	6.00	0.187	0.187					30	30	0.50	60.00	0.274	8.227			
	0.9	40	0.67	1.35	0.130	0.117					10	440	7.33	1.35	0.131	1.308			
	0.8	20	0.33	2.40	0.152	0.122					0.9	80	1.33	0.68	0.104	0.094			
	1.1	30	0.50	2.20	0.149	0.164					6.1	30	0.50	12.20	0.214	1.304			
						0.590	2.4	1.4155			0.5	10	0.17	3.00	0.161	0.080			
24-jun	10	100	1.67	6.00	0.187	1.869					7.6	70	1.17	6.51	0.150	1.444			
	6.8	480	8.00	0.85	0.113	0.767					2	20	0.33	6.00	0.187	0.374			
	2.7	30	0.50	5.40	0.183	0.494					10	90	1.50	6.67	0.191	1.909			
						3.131	2.2	6.8872			5.0	30	0.50	11.80	0.213	1.254			
29-jun	0.8	30	0.50	1.80	0.141	0.127										15.995	12.4	198.3345	
						0.127	2.6	0.3306		10-jul	1.3	100	1.67	0.78	0.110	0.142			
						0.481					3	150	2.50	1.20	0.126	0.378			
30-jun	3.5	129	2.15	1.63	0.137	0.583					3.6	160	2.67	1.35	0.130	0.469			
	3.1	30	0.50	6.20	0.188	1.065					2.2	140	2.33	0.94	0.117	0.257			
						1.065	8.2	6.6500			1	30	0.50	2.00	0.145	0.145			
JUL																1.392	2	2.7834	
1-jul	3	10	0.17	18.00	0.229	0.685					11-jul	7.2	70	1.17	6.17	0.188	1.354		
	5.9	20	0.33	17.70	0.228	1.345					5	30	0.50	10.00	0.206	1.032			
	9	150	2.50	3.60	0.168	1.508					1.9	30	0.50	3.80	0.170	0.322			
	1	10	0.17	6.00	0.187	0.187										2.707	5.2	14.0783	
	6.7	60	1.00	6.70	0.191	1.260					12-jul	10	50	0.83	12.00	0.213	2.132		
	5	110	1.83	2.73	0.157	0.785					6.9	100	1.67	4.14	0.173	1.193			
	9.4	384	6.40	1.47	0.134	1.256					10	30	0.50	20.00	0.233	2.326			
	5.4	492	8.20	0.66	0.103	0.557										5.651	20	113.0137	
	1.3	20	0.33	3.90	0.171	0.222					14-jul	7.2	30	0.50	14.40	0.220	1.585		
	10	80	1.33	7.50	0.195	1.954					10.2	30	0.50	20.40	0.233	2.380			
	7.2	110	1.83	3.93	0.171	1.230										3.985	14.4	57.0942	
	4.4	30	0.50	8.80	0.201	0.868													
	1.8	30	0.50	8.20	0.199	0.815													
	1.8	30	0.50	3.60	0.188	0.302													
	4	30	0.50	8.00	0.198	0.791													
						13.804	10.6	146.3256											

ANEXO A. EROSIÓN DE LA LLUVIA AÑO 1991

	vol (ml)	T (min)	t hr	l mm/hr	Ec lluvia	Ec intervalo	I 30	R		vol (ml)	T (min)	t hr	l mm/hr	Ec lluvia	Ec intervalo	I 30	R		
15-jul	9	70	1.17	7.71	0.156	1.768				28/AG	1.1	30	0.50	2.20	0.149	0.184			
	10	30	0.50	20.00	0.233	2.328					4.1	30	0.50	8.20	0.199	0.815			
	3.4	310	5.17	9.66	0.103	0.351					0.5	10	0.17	3.00	0.161	0.680			
	10	40	0.67	15.00	0.222	2.217					10	30	0.50	20.00	0.233	2.326			
	1.2	20	0.33	3.60	0.168	0.201					3.8	120	2.00	1.90	0.143	0.545			
	10	15	0.25	40.00	0.259	2.589					4	100	1.67	2.40	0.152	0.609			
	10	115	1.92	5.22	0.182	1.816					1.2	30	0.50	2.40	0.152	0.183			
	9.2	30	0.50	18.40	0.229	2.111					4.2	10	0.17	25.20	0.241	1.014			
						3.927										5.735			
						0.141		1s	74.6128										
16-jul	0.9	20	0.33	2.70	0.157	0.141				SEPT									
	7.2	30	0.50	14.40	0.220	1.585				3-sep	2	15	0.25	8.00	0.198	0.396			
17-jul						1.726	15.6	26.9239			2.1	30	0.50	4.20	0.173	0.364			
						1.797				1.5	80	1.33	1.13	0.123	0.185				
	4.2	20	0.33	12.60	0.215	0.903				2.1	30	0.50	4.20	0.173	0.364				
	10	80	1.33	6.07	0.191	1.909									1.305	5.6	7.3315		
	4.8	150	2.50	1.92	0.144	0.690				4-sep	10	40	0.67	15.00	0.222	2.217			
	4.2	30	0.50	8.40	0.200	0.839				6.5	20	0.33	19.50	0.232	1.506				
	3.8	30	0.50	7.60	0.196	0.744				9.5	30	0.50	19.00	0.231	2.191				
					6.882		0.8	67.4468							5.913	27.4	162.0242		
18-jul	0.9	30	0.50	1.80	0.141	0.127				5-sep	1.8	50	0.83	2.16	0.148	0.267			
						1.564	2.6	0.3306		10	40	0.67	15.00	0.222	2.217				
20-jul	10	80	1.33	7.50	0.195	1.954				1	20	0.33	3.00	0.161	0.181				
	1.4	30	0.50	2.80	0.158	0.221				3.9	30	0.50	5.80	0.186	0.538				
	5.4	30	0.50	10.80	0.209	1.130				1.2	30	0.50	2.40	0.152	0.183				
					3.305	11.6	38.3375								3.365	3.2	10.7685		
21-jul	9.7	192	3.20	3.03	0.161	1.562				6-sep	3	30	0.50	6.00	0.187	0.501			
	5.7	20	0.33	17.10	0.227	1.292				10.2	30	0.50	20.40	0.233	2.380				
	2	30	0.50	4.00	0.172	0.343									2.941	20	58.8154		
					3.197	2.8	8.9519			7-sep	2.9	30	0.50	5.80	0.186	0.538			
24-jul	3	30	0.50	6.00	0.187	0.561				11 sep	4.4	20	0.33	13.20	0.217	0.954			
	20	40	0.67	30.00	0.248	4.959				2.9	60	1.00	2.90	0.159	0.462				
	2.6	10	0.17	15.60	0.223	0.580									1.416	8.6	12.1793		
	3.3	70	1.17	2.83	0.158	0.523				12 sep	1	15	0.25	4.00	0.172	0.172			
	1	10	0.17	6.00	0.187	0.187				3.1	10	0.17	18.60	0.230	0.712				
	10.2	10	0.17	61.20	0.275	2.805				2	10	0.17	12.00	0.213	0.426				
					9.615	28	269.2094			3.4	30	0.50	6.80	0.192	0.652				
25-jul	5.2	30	0.50	10.40	0.208	1.080				13-sep	1.8	60	1.00	1.60	0.137	0.219			
	1.2	40	0.67	1.80	0.141	0.170				3.9	30	0.50	7.80	0.197	0.788				
	5.4	40	0.67	8.10	0.198	1.071									0.987	7.0	7.4992		
	10	110	1.83	5.45	0.183	1.833				14-sep	10	80	1.33	7.50	0.195	1.954			
	2.9	30	0.50	5.80	0.193	0.538				1.1	40	0.67	1.65	0.138	0.152				
	5	60	1.00	5.00	0.180	0.900			4.5	30	0.50	9.00	0.202	0.910					
27-jul	0.5	30	0.50	1.00	0.119	0.060				3.3	30	0.50	6.60	0.191	0.629				
	3	10	0.17	18.00	0.229	0.686				2	30	0.50	4.00	0.172	0.343				
					0.745	10.2	7.6016								3.698	8.8	34.2968		
AGO						0.060				15-sep	2.1	30	0.50	4.20	0.173	0.364			
4-ago	0.5	30	0.50	1.00	0.119	0.060				10	70	1.17	8.57	0.200	2.005				
9-ago	0.9	40	0.67	1.35	0.130	0.117				9	170	2.83	3.18	0.163	1.465				
	2.6	20	0.33	7.80	0.197	0.512				3.3	30	0.50	6.60	0.191	0.629				
	1.8	40	0.67	2.70	0.157	0.282									4.483	6.6	29.4551		
	2.4	30	0.50	4.60	0.178	0.426				16-sep	0.7	20	0.33	2.10	0.147	0.103			
13-ago	4.9	30	0.50	9.80	0.206	1.340	4.8	6.4298		10	60	1.00	10.00	0.206	2.063				
	3.8	50	0.83	4.56	0.177	1.007				4.6	130	2.17	2.12	0.148	0.879				
	1.2	70	1.17	1.03	0.120	0.144				1.1	30	0.50	2.20	0.149	0.164				
3.4	30	0.50	6.80	0.192	0.652									3.008	15.0	46.9322			
17-ago						1.407	6.8	9.9728		17-sep	1.8	130	2.17	0.83	0.112	0.202			
	10	30	0.50	20.00	0.233	2.326				10	40	0.67	15.00	0.222	2.217				
	1.8	15	0.25	7.20	0.194	1.407				0.8	190	3.17	3.18	0.163	1.628				
	10	15	0.25	40.00	0.259	2.589				0.6	30	0.50	1.20	0.123	0.076				
	7.8	110	1.83	4.25	0.174	1.358				4.7	30	0.50	9.40	0.204	0.959				
	9.8	30	0.50	19.60	0.232	2.272									5.078	9.4	47.7368		
	1.7	30	0.50	3.40	0.165	0.281				28/09/	0.5	30	0.50	1.00	0.119	0.060			
8.5	30	0.50	17.00	0.226	1.925				29/sep/	0.9	50	0.83	1.08	0.122	0.110				
1.3	10	0.17	7.80	0.197	0.256				0.8	10	0.17	4.80	0.178	0.143					
					11.353	24	272.4764			0.9	50	0.83	1.08	0.122	0.110				
19-ago	0.6	30	0.50	1.20	0.126	0.076				1.3	40	0.67	1.95	0.144	0.188				
	2.7	30	0.50	7.40	0.195	0.721				0.9	30	0.50	1.80	0.141	0.127				
2-ago	3.6	30	0.50	5.20	0.182	0.472				OCT					0.677	0.6	0.4062		
						1.193	5	5.9649		10-oct	0.3	30	0.50	0.60	0.100	0.030			
														0.030	0.6	0.0179			

ANEXO A . EROSIVIDAD DE LA LLUVIA AÑO 1991

	vel (mi)	T (min)	t hr	lmm/h	Ec lluvia	Ec intervalo	I 30	R
21-oct	2.9	30	0.50	5.80	0.186	0.538		
	3.8	45	0.75	5.07	0.181	0.688		
30-oct	10	230	3.83	2.61	0.155	1.224	5.4	6.6116
	4.2	100	1.67	2.52	0.154	1.554		
	1.1	30	0.50	2.20	0.149	0.647		
31-oct	2.4	30	0.50	4.80	0.178	0.164	6.6	15.6044
	0.2	30	0.50	0.40	0.084	2.354		
						0.428		
NOV						0.017	4.8	2.1369
						0.445		
3-nov	1.5	40	0.67	2.25	0.150	0.225		
	0.8	30	0.50	1.60	0.137	0.109		
7-nov						0.334	1.8	0.6013
	9.3	30	0.50	18.60	0.230	2.137		
DIC						2.137	18.6	39.7557
7-dic	3.1	20	0.33	9.30	0.204	0.531		
	1.7	30	0.50	3.40	0.165	0.281		
24-dic						0.912	3.4	3.1014
	0.8	10	0.17	4.80	0.178	0.143		
	1.8	20	0.33	5.40	0.183	0.329		
	2.5	30	0.50	5.00	0.180	0.450		
						0.922	5	4.6106

ANEXO B

En el caso de la curva masa de lluvia se tiene una regresión no lineal, pero intrínsecamente lineal (esta situación se produce cuando las variables de la regresión, que no es lineal, pueden transformarse para realizar un análisis lineal, es decir, se puede obtener una línea recta). Para calcular la curva masa de lluvia, se utilizó el Sistema de Análisis Estadístico (AS: *Sistem Analysis Statistical*), en el que se incluyen varios paquetes de trabajo. En el primer análisis de regresión se utilizó el procedimiento de regresión (proc glm) con el siguiente programa:

```
infile "a:\dp_ret1.sas";
input i t d;
x1=log((14+1)/t);x2=log(d+0);y=log(i);
proc glm;
model y = x1 x2;
```

para ello fue necesario construir una nueva tabla de valores de período de retorno denominada para tal efecto "y", que consta de tres columnas i, d y T. El período de retorno T se obtiene como: número de orden + 1 entre el total de años con los que se establecerá el análisis, en este caso 14. Al correr el programa se obtienen los parámetros o valores de K, m y n denominados en la salida del programa como intercepto, x1 y x2 respectivamente.

Se presenta a continuación la salida del programa en donde además de la estimación de los parámetros, se tiene un análisis de varianza que nos muestra un el valor de $R^2 = 0.90$ relativamente cercano al 1, es decir, en principio hay una alta relación entre las variables bajo análisis.

General Linear Models Procedure					
Número de observaciones en el archivo de datos = 140					
Variable dependiente: Y					
Fuente	grados de libertad	suma de cuadrados	cuadrado medio	F calculado	Pr > F
Modelo	2	81.5263807	40.7631904	686.59	0.0001
Error	137	8.1337059	0.0593701		
Total corregida	139	89.6600867			
R ²	Coefficiente de Variación.	Raíz del cuadrado medio del error		Y media	
0.909283	7.022464	0.24366		3.46972	
Parámetro	Valor estimado				
Intercepto	5.450387539				
X1	0.444727113				
X2	-0.689743154				

Con los parámetros antes calculados se corrió otro programa pero ahora con el procedimiento no lineal (NLIN). El programa se muestra a continuación:

```
infile "c:\dp_ret1.sas";
input i t d; t1=(14+1)/t;
proc nlin method=dud;
parms m=1.55 n=0.50 k=232.76;
model i= k*(t1**m)/(d**n);
```

En este programa los parámetros (parms) corresponden a los antilogaritmos calculados en el programa anterior. m = X1; n = X2; K = intercepto

Este procedimiento requiere de valores iniciales para los parámetros involucrados. Este procedimiento busca los parámetros que permitan un mejor ajuste de la curva, a través de un proceso iterativo, que obtendrá el valor más bajo de la suma de cuadrados de los errores, para ello requiere de un punto de partida, ya que si no lo tiene puede iniciar en valores muy alejados de los reales y llegar a una conclusión nula. Los resultados de este procedimiento se muestran a continuación

Procedimiento no lineal de mínimos cuadrados

Variable dependent I DUD	M	N	K	Suma de cuadrados
-4	1.550000	0.500000	232.760000	139038677
-3	1.705000	0.500000	232.760000	316896690
-2	1.550000	0.550000	232.760000	108045697
-1	1.550000	0.500000	256.036000	169185466
0	1.550000	0.550000	232.760000	108045697
1	1.483229	0.498684	55.795561	4514115
2	1.099296	0.491872	65.871182	616335
3	0.648251	0.484121	93.602850	55713.032699
4	0.079102	0.478593	141.904423	44844.409863
5	0.185884	0.472084	121.029507	43713.557057
6	0.435452	0.514932	159.609051	27338.458240
7	0.344306	0.505406	151.153285	10294.132871
8	0.318177	0.501198	150.528761	10033.126977
9	0.327941	0.505347	151.820900	9931.428190
10	0.246241	0.553823	187.389058	8695.755632
11	0.257294	0.556570	194.919556	7760.445113
12	0.262972	0.549358	191.677926	7748.552679
13	0.264051	0.552281	192.281582	7741.580278
14	0.263184	0.551998	192.053130	7740.285199
15	0.263252	0.551810	191.928911	7740.270442
16	0.263251	0.551811	191.930561	7740.270391

Procedimiento no lineal de mínimos cuadrados. Resumen estadístico

Variable dependiente I			
Fuente	grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio
Regresión	3	368271.94961	122757.31654
Residual	137	7740.27039	56.49832
Total no corregido	140	376012.22000	
Total Corregido	139	124224.04971	

Parámetro	Valor estimado	Error estándar	Valor asintótico 95 %	
			asintótico	Confidence Interval
			bajo	superior
M	0.2632506	0.0142639851	0.235044	0.291456
N	0.5518109	0.0144576495	0.523221	0.580400
K	191.9305607	7.8748667180	176.3584	207.5027

Matriz de correlación asintótica

Correlación	M	N	K
M	1	-0.000335577	-0.437222091
N	-0.000335577	1	0.8473719408
K	-0.437222091	0.8473719408	1

El problema del modelo obtenido linealmente es que, aún los procedimientos estadísticos conocidos, no son fáciles de aplicar en este procedimiento: por ello, para regresiones no lineales es mejor no utilizar modelos linealizados ya que en estos, la suma de los cuadrados del error (varianza) no tiene una adecuada interpretación con las variables transformadas.

Los valores de m, n y K estimados permitieron construir la siguiente tabla, que presenta los valores estimados de la variable *i*

int=	191,93										
m=	0,26										
n=	0,55										
T=	10										
d=	0	5	10	15	20	30	40	60	80	100	120
i=	191,93	79,95	54,61	43,69	37,30	29,84	25,47	20,38	17,40	15,39	13,92

ANEXO C.- TABLAS DE ANÁLISIS DE VARIANZA PARA NUTRIMENTOS DE SUELOS Y SEDIMENTOS

Data: P total

Means plot: Tukey Confidence level: 95 Range test: Tukey
Analysis of variance

Source of variation	Sum of Squares	d.f.	Mean square	F-ratio	Sig. level
Between groups	0.2372257	1	0.2372257	3.676	0.0606
Within groups	3.4206902	53	0.0645413		

Total (corrected) 3.6579160 54
6 missing value(s) have been excluded.

Data: pH_KCl

Means plot: Tukey Confidence level: 95 Range test: Tukey
Analysis of variance

Source of variation	Sum of Squares	d.f.	Mean square	F-ratio	Sig. level
Between groups	25.655048	1	25.655048	53.130	0.0000
Within groups	28.006786	58	0.482876		

Total (corrected) 53.661833 59
1 missing value(s) have been excluded.

Data: K total

Means plot: Tukey Confidence level: 95 Range test: Tukey
Analysis of variance

Source of variation	Sum of Squares	d.f.	Mean square	F-ratio	Sig. level
Between groups	2.74123	1	2.7412262	0.455	0.5102
Within groups	325.55814	54	6.0288544		

Total (corrected) 328.29936 55
5 missing value(s) have been excluded.

Data: N lot log

Means plot: Tukey Confidence level: 95 Range test: Tukey
Analysis of variance

Source of variation	Sum of Squares	d.f.	Mean square	F-ratio	Sig. level
Between groups	0.1089509	1	0.1089509	0.847	0.3710
Within groups	7.4605696	58	0.1286305		

Total (corrected) 7.5695205 59
1 missing value(s) have been excluded.

Data: pH_H2O

Means plot: Tukey Confidence level: 95 Range test: Tukey
Analysis of variance

Source of variation	Sum of Squares	d.f.	Mean square	F-ratio	Sig. level
Between groups	7.894507	1	7.8945070	21.836	0.0000
Within groups	21.331067	59	0.3615435		

Total (corrected) 29.225574 60

Data: MOR2

Means plot: Tukey Confidence level: 95 Range test: Tukey
Analysis of variance

Source of variation	Sum of Squares	d.f.	Mean square	F-ratio	Sig. level
Between groups	3.167751	1	3.1677510	7.934	0.0067
Within groups	22.358669	56	0.3992619		

Total (corrected) 25.526420 57
3 missing value(s) have been excluded.