

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO  
EN INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
CAMPUS MORELOS**

**PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS EN CUENCAS:  
REVISIÓN DE CRITERIOS Y APLICABILIDAD  
A LA CUENCA DEL RÍO APULCO**

**T E S I S**

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**INGENIERÍA CIVIL - INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**P R E S E N T A :**

**JOSÉ MANUEL RAMÍREZ LEÓN**

**DIRECTOR DE TESIS:  
DR. FRANCISCO JAVIER APARICIO MIJARES**



**JIUTEPEC, MORELOS**

**MAYO, 2009**



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.

---

---

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Aldo Iván Ramírez Orozco  
Secretario: Dr. Martín Alfonso Gutiérrez López  
Vocal: Dr. Francisco Javier Aparicio Mijares  
1<sup>er</sup>. Suplente: M.I. Héctor Gregorio Cortés Torres  
2<sup>do</sup>. Suplente: Dr. Juan Carlos García Salas

Lugar en donde se realizó la tesis:  
DEPFI-UNAM, Campus Morelos.

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Francisco Javier Aparicio Mijares

---

**FIRMA**

---

---

---

---

Esta tesis corresponde a los estudios realizados con una beca otorgada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, y con el apoyo del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

---

---

---

---

*A mis padres*

---

---

---

---

## *Agradecimientos*

*Innumerables personas contribuyeron para la realización de esta tesis, ya sea de forma directa o indirecta, al aportar conocimiento, información, apoyo o inspiración. Por lo cual deseo hacerles un pequeño homenaje al nombrarlos en este apartado, a pesar del riesgo que implica omitir a alguno, aunque su servidor jamás olvidará la ayuda recibida, pero al escribir sus nombres serán recordados. De antemano les ofrezco una disculpa a todos aquellos que sin ser mi voluntad no fueron incluidos.*

*Le agradezco a mis sinodales:*

- *El Dr. Javier Aparicio, mi director de tesis y tutor de maestría, por todas sus enseñanzas y paciencia para este trabajo.*
- *El M.I. Héctor Cortés, por todo el interés mostrado y sus valiosas contribuciones.*
- *El Dr. Juan Carlos García, por sus acertados comentarios que enriquecieron este trabajo.*
- *El Dr. Aldo I. Ramírez debido a su interés en la tesis y disposición.*
- *El Dr. Alfonso Gutiérrez, por su deseo de participar y su sinceridad.*

*Por otro lado, les doy las gracias por la ayuda técnica prestada a: Cervando Castillo, Jessica Briseño, Roel Simuta, Vladimir Contreras, el Dr. René Lovato y el L.I. Indalecio Mendoza. Del mismo modo agradezco a aquellos que me facilitaron información y datos: el Lic. Antonio Chávez y el Ing. Gustavo Aceves de Sagarpa-Puebla, el Dr. Felipe Zapata de la IAEA y el Dr. José A. Salinas del IMTA.*

*Mi gratitud para el personal de la SPIFI-UNAM, Campus Morelos y la Coord. de Hidrología del IMTA, por todas las atenciones recibidas: Marilú Pineda, Angélica Aviles, Cristina García, la Sra. Marilú Barba, el Dr. Raúl Flores y el M.I. José Alfredo González.*

*Por su apoyo incondicional y paciencia, mi más sincero y profundo agradecimiento para Casandra Villava, cuyas palabras siempre me motivaron. Le doy las gracias a mis compañeros y amigos por haber hecho esta etapa especial y amena: Jermaine Braithwaite, Juan C. Pérez, Pedro Albornoz, Hugo Junes, Xochitl Peñaloza, Gabriela Mendoza, Marlé Reyes, Marco Moreno, Dante Hernández, David Rejón, Claudia Cervantes, Pauline Carreño, Luis Medel, Marco Pozos, Héctor Ballinas y Natalia Valencia. A mis tíos Marciano Martínez, Lenin León y Berenice León, les agradezco todo su apoyo.*

*José Manuel Ramírez León  
Jiutepec, Morelos. Mayo, 2009.*

---

---



---

3.1.2.1.9	USLE-M: Una versión modificada de la USLE .....	40
3.1.2.1.10	Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) .....	41
3.1.2.1.11	Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada, 2° VERSION (RUSLE2) .....	42
3.1.2.1.12	Tasa de descarga de sedimentos (DR) .....	43
3.1.2.1.13	Eficiencia de atrapamiento de sedimentos (Te).....	44
3.1.2.2	Métodos Estocásticos.....	45
3.1.2.3	Métodos de Simulación de Procesos Físicos .....	45
3.1.2.3.1	Proyecto de Predicción de Erosión Hídrica (Water Erosion Prediction Project, WEPP).....	46
3.1.2.3.2	SHETRAN .....	46
3.1.2.3.3	ANSWERS .....	46
3.1.2.3.4	EUROSEM .....	47
3.1.2.3.5	Método de Negev.....	47
3.2	Métodos empleados en México .....	48
3.3	Métodos de actualidad .....	50
3.3.1	Variación Temporal de la Producción de Sedimentos.....	50
3.3.2	Modelación de la Producción de Sedimentos por Redes Neuronales Artificiales.....	51
3.3.3	Métodos geológicos con base en radionúclidos ambientales.....	52
<b>4.</b>	<b>Información disponible en México .....</b>	<b>55</b>
4.1	Datos que existentes en el medio mexicano para la estimación de sedimentos en cuencas.....	55
4.1.1	Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS).....	56
4.1.2	Extractor Rápido de Información Climatológica III (ERIC III) .....	56
4.1.3	Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS) en México .....	57
4.1.4	Información que ofrece el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) .....	57
4.1.4.1	Modelo digital de elevación.....	58
4.1.4.2	Carta Topográfica .....	58
4.1.4.3	Carta Edafológica.....	59
4.1.4.4	Uso del Suelo y Vegetación.....	59
4.2	Análisis de los métodos para estimar la de producción de sedimentos para el medio mexicano .....	59
4.2.1	Métodos con base en medición directa .....	59
4.2.1.1	Registro de descarga diaria de sedimentos .....	59
4.2.1.2	Periodo de acumulación de carga de sedimentos por periodos.....	60
4.2.1.3	Método de la curva de descarga de sedimentos y duración de flujo.....	60
4.2.1.4	Curvas de producción de sedimentos y volumen de agua anual.....	60

---



---

4.2.2	Métodos empíricos o de agrupación de variables .....	61
4.2.2.1	Método de Dendy y Bolton.....	61
4.2.2.2	Método del Comité Interinstitucional del Pacífico Suroeste (PSIAC) .	61
4.2.2.3	Método Tatum para el Sur de California .....	61
4.2.2.4	Ecuación de Anderson .....	62
4.2.2.5	Ecuación de Branson.....	62
4.2.2.6	Ecuación de Flaxman.....	62
4.2.2.7	Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE).....	62
4.2.2.8	Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE).....	63
4.2.2.9	USLE-M: una versión modificada de la USLE .....	63
4.2.2.10	Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) .....	63
4.2.2.11	Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada, 2° VERSION (RUSLE2) .....	64
4.2.3	Métodos Estocásticos.....	64
4.2.4	Métodos de Simulación de Procesos Físicos .....	64
4.2.4.1	Proyecto de Predicción de Erosión Hídrica (Water Erosion Prediction Project, WEPP) .....	64
4.2.4.2	SHETRAN .....	65
4.2.4.3	ANSWERS .....	65
4.2.4.4	EUROSEM .....	65
4.2.4.5	Método de Negev .....	65
4.2.5	Métodos de actualidad para la producción de sedimentos.....	66
4.2.5.1	Variación Temporal de la Producción de Sedimentos.....	66
4.2.5.2	Modelación de la Producción de Sedimentos por Redes Neuronales Artificiales.....	66
4.2.5.3	Métodos geológicos por medio de radionúclidos ambientales .....	66
4.3	Selección de los métodos que pueden ser viables en nuestro medio .....	67

<b>5.</b>	<b>Aplicación del Método de la Variación Temporal de Producción de Sedimentos a la Cuenca del Río Apulco.....</b>	<b>69</b>
5.1	Antecedentes de la cuenca alta del río Apulco .....	69
5.3	Datos disponibles del proyecto .....	75
5.4	Aplicación.....	77
5.4.2	Cálculos y Resultados .....	81

---

---

<b>6. Conclusiones .....</b>	<b>101</b>
6.1 Resumen.....	101
6.2 Análisis .....	101
6.3 Logros y aportaciones.....	102
6.4 Recomendaciones .....	103
Referencias.....	105
<i>Apéndice A</i> .....	109
<i>Apéndice B</i> .....	127
<i>Apéndice C</i> .....	143
<i>Apéndice D</i> .....	173

---

---

## *Índice de Tablas*

Tabla 1- 1. Embalses con problemas de azolvamiento en México (Barragán, 2000).....	8
Tabla 2- 1. Respuesta del cauce a las alteraciones de la carga de sedimento y gasto líquido. Donde $Q_w$ es el cambio en el gasto líquido y $Q_s$ es el cambio en la descarga de sedimentos (Stott y Mount, 2004).....	20
Tabla 3- 1. Valores numéricos del PSIAC respecto a la producción de sedimentos.....	29
Tabla 3- 2. Valor del factor $K$ estimado en función de la unidad de suelo y su textura (Figuroa <i>et al.</i> , 1991).....	36
Tabla 3- 3. Ecuaciones regionales para México que estiman el valor.....	49
Tabla 5- 21. Represa 23, cálculos y resultados de la comparación de la producción de sedimentos anual calculado $S_a$ y el azolve en el embalse.....	97
Tabla 5- 22. Represa 24, cálculos y resultados de la comparación de la producción de sedimentos anual calculado $S_a$ y el azolve en el embalse.....	98
Tabla 5- 23. Represa 25, cálculos y resultados de la comparación de la producción de sedimentos anual calculado $S_a$ y el azolve en el embalse.....	98
Tabla 5- 24. Presa La Soledad, cálculos y resultados de la comparación de la producción de sedimentos anual calculado $S_a$ y el azolve en el embalse.....	99

## *Índice de Figuras*

Figura 2- 1 Erosión de superficie como resultado del impacto de las gotas de lluvia y la turbulencia de los escurrimientos (Brooks <i>et al.</i> , 1997).....	13
Figura 2- 2. Sistema típico de erosión y depósito de sedimentos en una cuenca (Vanoni, 1977).....	13
Figura 2- 3. Inicio de erosión por gotas de lluvia (Rivera Trejo <i>et al.</i> , 2006).....	15
Figura 2- 4. Tasa de sedimentación afectada por la capacidad de transporte y suministro de sedimentos para diferentes tamaños de partículas, para una corriente y flujo específica (Brooks <i>et al.</i> , 1997).....	19
Figura 3- 1. Nomograma del factor $K$ (Figuroa <i>et al.</i> , 1991).....	35
Figura 3- 2. Mapa de regiones de erosividad de la lluvia en México (Cortés, 1991).....	49
Figura 5- 1 . Ubicación de la cuenca del río Apulco, la presa La Soledad y las represas 5, 8, 9, 14, 18, 23, 24 y 25.....	69
Figura 5- 2. Esquema que muestra cómo están conectados el embalse de Atexcaco, La Soledad y la C.H. Mazatepec (JICA y CFE, 1993).....	70

---

Figura 5- 3. Vista en planta de la cortina de La Soledad, se observa la sección de arco y la de gravedad, así como su topografía original (JICA y CFE, 1993). .....	71
Figura 5- 4. Variación de la capacidad de almacenamiento. Para cada año se muestra la capacidad de almacenamiento. Se observa cómo se ha ido reduciendo con el paso del tiempo (JICA y CFE, 1993). .....	73
Figura 5- 5. Vista de la cuenca de La Soledad, se muestra la distribución de las 25 represas retenedoras de sedimentos. ....	74
Figura 5- 6. Diagramas que describen el concepto de curvas tiempo-área (Chow, 1988). ....	77
Figura 5- 7. Cuenca correspondiente a la presa La Soledad, sobre el río Apulco, con su respectiva distribución de isócronas. ....	78
Figura 5- 8. Cuenca de La Soledad, con la distribución de las cuencas de las represas seleccionadas para estudio. Se indica la numeración de los segmentos isócronos así como el valor de KLS para cada píxel. ....	82
Figura 5- 9. Cuenca de la Represa 5. Valores de KLS para cada píxel en escala de grises (escala en el gráfico), con sus respectivas isócronas. ....	84
Figura 5- 10. Cuenca de la Presa La Soledad. Valores de KLS para cada píxel en escala de grises (escala en el gráfico), con sus respectivas isócronas. ....	85
Figura 5- 11. Represa 9. Valores de KLS para cada píxel en escala de grises (escala en el gráfico), con sus respectivas isócronas. ....	85
Figura 5- 12. Represa 8 Valores de KLS para cada píxel en escala de grises (escala en el gráfico), con sus respectivas isócronas. ....	86
Figura 5- 13. Represa 14. Valores de KLS para cada píxel en escala de grises (escala en el gráfico), con sus respectivas isócronas. ....	86
Figura 5- 14. Represa 18. Valores de KLS para cada píxel en escala de grises (escala en el gráfico), con sus respectivas isócronas. ....	87
Figura 5- 15. Represa 23. Valores de KLS para cada píxel en escala de grises (escala en el gráfico), con sus respectivas isócronas. ....	87
Figura 5- 16. Represa 24. Valores de KLS para cada píxel en escala de grises (escala en el gráfico), con sus respectivas isócronas. ....	88
Figura 5- 17. Represa 25. Valores de KLS para cada píxel en escala de grises (escala en el gráfico), con sus respectivas isócronas. ....	88
Figura 5- 18. Factor C para zonas forestadas de la serie t1 de Vegetación de INE. ....	89
Figura 5- 19. Factor C para zonas forestadas de la serie II de Vegetación de INEGI. ....	90
Figura 5- 20. Cuenca de la presa La Soledad, donde se muestra la clave de cada municipio y el distrito de desarrollo rural al que corresponde cada uno. ....	91
Figura 5- 21. Tormenta característica de la EMA TL01 utilizada en la metodología. ....	92
Figura 5- 22. Distribución de frecuencia acumulada de tormentas de la EMA TL01 empleada en la metodología. ....	93

---

---

---

## *R e s u m e n*

Se presenta una metodología para estimar la producción de sedimentos en cuencas, que combina el método de Kothyari *et al.* (1996) y el concepto de eficiencia de atrapamiento. El método utiliza la tasa de descarga de sedimentos (*DR*) y la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE). El *DR* se define como una función del área, pendiente y área forestada de los segmentos isócronos. La USLE presenta dificultades para la obtención del factor de erosividad de lluvia (*R*) en México. Por lo que se propone calcular *R* combinando los datos de estaciones climatológicas automáticas (EMAS) con 7 años de registro y estaciones climatológicas con registro de lluvia de 24 h, a través de un procedimiento de Montecarlo.

El método de Kothyari *et al.* (1996) relaciona la producción de sedimentos de una tormenta con curvas tiempo-área. Divide en segmentos la cuenca a lo largo del cauce principal, cada segmento con igual tiempo de concentración (*T<sub>c</sub>*) (isócronas). Supone que una cierta cantidad de material erosionado en el segmento aguas arriba será depositado aguas abajo y una parte de este a su vez será depositado en el siguiente segmento. Este proceso se expresa como una función del *DR* y la pérdida de suelo de cada segmento *j* (*Se<sub>ij</sub>*).

En el presente trabajo se propone estimar el factor de erosividad de lluvia (*R*) mediante un procedimiento de Montecarlo, empleando la tormenta característica de una zona y su respectivo análisis de frecuencias acumulado. Para ello, se supone una tormenta para cada día con registro de lluvia de 24 h, cuya duración es obtenida del análisis de frecuencia y su precipitación es igual a la de 24 h. Al conocer la forma de la tormenta, su duración y su lámina, es posible seguir las ecuaciones de la USLE de Wischmeier (1978).

La metodología fue probada en el Sureste de México, en el estado de Puebla, dentro de la cuenca del Río Apulco y sus subcuencas, contando cada cuenca con un embalse. La producción de sedimentos calculada se comparó con los sedimentos depositados y registrados en cada presa. El error entre los sedimentos calculados y observados varió de -32.03% a 235.11%, con un error medio de 22.42%. Estos errores se consideran como satisfactorios, tomando en cuenta el nivel de aproximación de los datos de entrada.

El documento además incluye una extensa revisión bibliográfica respecto a las metodologías existentes de producción de sedimentos en cuencas.

---

---

## *A b s t r a c t*

A methodology is presented to estimate the sediment produced in watersheds and deposited in reservoirs, by combining the method of Kothyari *et al.* (1996) and the concept of trap efficiency ( $Te$ ). The method assesses the sediment yield through the sediment delivery ratio ( $DR$ ) and the Universal Soil Loss Equation (USLE). The  $DR$  is computed as a function of the area, slope and forested area of isochronal segments. The USLE presents difficulties to evaluate the rainfall factor ( $R$ ) in Mexico, due to the lack of a sufficiently dense pluviometer network. Then an alternative method is proposed to find  $R$  by employing an automatic weather station with a 7- year record and standard rain gauge stations, by using a Monte Carlo procedure.

The method of Kothyari *et al.* (1996) refers the output of sediments of a catchment due a storm as time-area curves and divides the watershed into isochrone segments with the same concentration time ( $Tc$ ). It assumes that a part of the eroded material of the segment upstream would be deposited in the segment downstream and subsequently part of this material plus a percent of the soil loss of this segment would be deposited in the next one. The description of this process is expressed as a function of  $DR$  and the soil loss of each segment  $j$  ( $Se_{ij}$ ).

The factor  $R$  of the USLE is computed through the use of the characteristic storm of the area, its accumulated frequency analysis and a Monte Carlo procedure. Then, a daily storm is assumed for each day with rain data, the duration of the storm is given by the frequency analysis and the amount of precipitation would be the daily rain. When the shape of the storm and its duration are known, is possible to compute  $R$  by using the equations of Wischmeier (1978) for the  $R$  factor.

The methodology was tested in Mexico in the State of Puebla in the Apulco river basin and 8 of its sub-basins, where a dam was built in each catchment. The computed sediment yield was compared with the sediment deposited in each dam. The error between computed and observed sediment goes from -32.03% to 235.11% and with a mean error of 22.42%. We consider these errors as satisfactory in account to the level of approximation of input data.

The document also includes an extensive literature review about the methodologies to estimate sediment yield in catchments.

---

---

# *Capítulo 1*

---

---

## **1. Introducción.**

Recientemente estimar la producción de sedimentos en cuencas ha recibido una gran atención en diversas partes del mundo. Esto se debe al acelerado proceso de sedimentación que varias presas han sufrido en los últimos años (Verstraeten y Poesen, 2000). Lo cual se asocia al cambio de uso del suelo y a los probables efectos del cambio climático sobre el régimen de lluvias. En virtud de lo anterior se desconoce cómo se verá afectado el régimen de escurrimientos y cómo este afectará el funcionamiento de la infraestructura existente.

La producción de sedimentos en cuencas esta íntimamente ligada al proceso de erosión de la misma. En efecto, ésta se incrementa con la deforestación; consecuentemente la concentración de sedimentos suspendidos también crece (Stott y Mount, 2004), los cuales se depositan en el fondo de los cauces, elevando su nivel, aumentando significativamente el riesgo de inundaciones (Kramer *et al.*, 1997). Si bien no todo el sedimento se asienta sobre los ríos, una buena parte de material es transportado aguas abajo hasta llegar a los almacenamientos o al mar, donde el resto de las partículas se azolvan. Esto ocasiona que las presas se llenen de sedimentos, disminuyendo su vida productiva (Manson, 2004).

Para el adecuado manejo de una cuenca se requiere la precisa estimación tanto del escurrimiento como de la producción de sedimentos. Lo que permite proponer medidas para incrementar la infiltración del agua al subsuelo, controlar el exceso de escurrimiento, manejar las corrientes y reducir la erosión, a través de protecciones del terreno (Raghuwanshi *et al.*, 2006).

Para estimar la producción de sedimentos en cuencas existen diferentes métodos: los métodos con base en medición directa y los métodos con base en modelación matemática. Estos últimos a su vez se dividen en métodos: empíricos, estocásticos y de simulación de procesos físicos. Debido a su simplicidad y a la ausencia de registros de sedimentos sobre el cauce, la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por sus siglas en inglés), de naturaleza empírica, es el método más empleado en México. Por su parte, los métodos de simulación de procesos físicos, pueden mejorar la precisión, pero debido a la gran cantidad de datos que se requieren, su uso se ha visto limitado (Simons y Sentürk, 1992).

En México existen al menos 38 presas que presentan azolvamiento, de las cuales Tuxpango en Veracruz y Pilotos en Aguascalientes se encuentran en condiciones críticas, perdiendo más del 85% de su capacidad de almacenamiento. Les siguen La Soledad en



Puebla y Santa Rosa en Jalisco con el 66% y 38% respectivamente, ver tabla 1-1 (Barragán, 2000).

El azolve provoca la pérdida del volumen efectivo de agua para riego, consumo humano, producción de energía y recreación. También influye en la calidad del agua, incrementando la turbiedad y reduciendo el oxígeno disuelto. Esto dificulta la vida acuática, además de incrementar los depósitos cerca de la cortina, poniendo en peligro la estructura al aumentar la carga estática y la dinámica en presencia de sismos. Ello implica la reducción de la eficiencia de la infraestructura hidráulica, así como disminuir los niveles de seguridad.

A continuación se presenta una reseña sobre los esfuerzos para entender la producción de sedimentos en cuencas.

### **1.1 Antecedentes de la producción de sedimentos en cuencas.**

La relación entre el ser humano y los ríos es tan antigua como la civilización misma, puesto que el agua es esencial para la vida. Teniendo a la mano las fuentes superficiales de líquido, el hombre ha hecho fácilmente uso de ellas, en especial de las corrientes que constituyen también vías de comunicación. Las culturas que mayor desarrollo alcanzaron en la antigüedad se asentaron cerca de ríos, por ejemplo: El río Nilo en Egipto, el Amarillo en China, y el Tigris y el Éufrates en Mesopotamia.

Los primeros avances en la hidráulica y en el transporte de sedimentos se remontan a China 4,000 años a. C. Durante el mismo periodo hubo avances importantes en Mesopotamia, donde se construyeron canales que partían del Tigris y del Éufrates con fines de riego, además de obras de control de inundaciones. Luego, en Egipto el Rey Menes (c. 3100 a.C.) construyó la primera presa sobre el Nilo también con fines de riego. Posteriormente, de nuevo en China, el ingeniero hidráulico Yu (Yu el Grande, c. 2100 a.C.) propuso numerosos diques y obras de protección para controlar el río Amarillo y así aprovechar sus aguas, obteniendo por tal mérito el cargo de emperador de China. Desgraciadamente las técnicas empleadas se perdieron por lo que hoy sólo podemos admirar los vestigios de aquellas civilizaciones, algunas de aquellas obras aún siguen en pie.

Por otro lado, la contribución en materia hidráulica de los griegos fue casi nula, a pesar de su brillante desarrollo filosófico, matemático y de las demás ciencias. Sin embargo, su entendimiento del agua les permitió la construcción de grandes acueductos. A ellos les siguieron los romanos quienes perfeccionaron sus técnicas constructivas. En todo el antiguo imperio todavía se aprecian sus trabajos.

Algunos de los trabajos más antiguos en materia de transporte de sedimentos que se tienen reportados los realizó Hipócrates (460-377 a.C.), los cuales fueron retomados en 1932 por W.C. Krumbein, el cual separó las partículas de sedimentos en fracciones de material de acuerdo con una velocidad característica. El libro más antiguo en la materia se ubica en China, escrito por Pan Chi-Hsun en el siglo XVI, titulado “Protección de Ríos”, el cual menciona numerosas obras de protección fluvial y contra sedimentos (Simons y Sentürk, 1992)

El proceso de transferencia de tecnología hacia el occidente tuvo probablemente su detonante al intentar mover los ejércitos otomanos hacia nuevas conquistas, viéndose obstruidos por ríos, por lo que la construcción de puentes fue primordial. Kona Sinan (1489-1588) trabajó en ello en todo el imperio otomano, llegando a estimar el gasto máximo de las corrientes y la erosión en las pilas de los puentes. Desgraciadamente, las técnicas utilizadas no fueron documentadas, por lo que se perdieron con su inventor. La transferencia tecnológica entre oriente y occidente llegó a su cúspide con el Renacimiento, dando lugar al desarrollo científico y tecnológico en Europa, y siglos después en América.

Por su parte, en Mesoamérica también se dieron soluciones hidráulicas. México-Tenochtitlan se encontraba rodeada de agua, situación que era una ventaja militar y agrícola, pero durante la temporada de lluvias llegaba a sufrir estragos. Para esto se construyó una serie de diques y obras de control para evitar la inundación de las poblaciones fundadas en islotes (Tenochtitlan, Tlatelolco y Cuitláhuac) y así mantener el nivel del lago apto para navegación e irrigación de las chinampas (islotes agrícolas contruidos en los lagos y pantanos). Nezahualcóyotl (1402–1472) Rey de Texcoco (1429-1472) construyó un acueducto para llevar agua de Chapultepec a México-Tenochtitlan, condujo el agua por el monte, captó manantiales e introdujo el riego. Desgraciadamente, con la conquista del Imperio Azteca a manos españolas, todo ese conocimiento se perdió, obstaculizando el avance de la ciencia (Rojas, 2002).

Durante el renacimiento, los primeros aportes a esta disciplina los realizó Leonardo da Vinci (1452-1519), quien entre otras cosas, además de ser un excelente artista, fue un brillante ingeniero. Su método consistía en la observación y experimentación, suya es la frase: “En materia de las aguas, remítase a la experiencia antes que a la razón”. Tuvo pocos discípulos y al parecer ninguno en sus actividades de ingeniería, por lo que su influencia en el desarrollo de la hidráulica fue prácticamente nula, pues sus planteamientos no se incluyen en la hidráulica tradicional (Levi, 1986). Definitivamente se adelantó a Castelli, Torricelli y Bernoulli, al afirmar que el gasto es directamente proporcional a la velocidad y determinar que un chorro vertical llega hasta la altura correspondiente del almacenamiento del cual proviene. Da Vinci logró que la corriente de un río rellenara una socavación que él mismo había provocado, al observar

que aguas arriba de una represa se depositaban los sedimentos y que aguas abajo se removían, entonces al ubicarlas a una cierta distancia logró que se rellenara lo erosionado (Levi, 1986).

Podemos decir que del siglo XVII el personaje más destacado en materia hidráulica fue Galileo (1564-1642) quién al analizar la problemática de las aguas dijo: “El secreto del movimiento de las estrellas se descubrirá, pero las leyes que gobiernan el flujo de una corriente tomará mucho más tiempo” (Levi, 1986). Un brillante discípulo de este fue Benedetto Castelli a quien entre otras cosas le debemos la Ecuación de Continuidad. A este le siguió Torricelli, Mariotte, Hooke, Parent, Descartes, Pascal, Newton y muchos otros. Destacando Newton como uno de los más grandes de todos los tiempos (1643-1727). En materia fluvial, Guglielmini sobresale con su obra “De la naturaleza de los ríos”, siendo la primera obra en su tipo (Levi, 1986). Se basó en observaciones de campo, dando un gran avance en materia de sedimentos, siendo uno de los pioneros en este campo.

El siglo XVIII tuvo significativos avances en materia hidráulica, pero en materia de ríos Frizi, Dupuat y Chézy se dieron a notar (Levi, 1986). Frizi publicó en 1770 “El tratado de ríos y torrentes con el método de regularización de cauces y canales”. En su libro habla acerca de mejoras a problemas fluviales y de transporte de sólidos, siendo el primero quizás en experimentar en la materia. Por su parte, Dubuat en 1786 publicó “Principios de la hidráulica” (Levi, 1986), donde registró la relación entre la velocidad del cauce y las partículas de roca movidas. Se dio cuenta de la formación y migración de algunas formas de fondo, de la estabilidad de las secciones transversales, el efecto de acorazamiento, ecuaciones de flujo uniforme, morfología fluvial y muchas otras relaciones. A Dubuat se le conoce como el padre de la escuela hidráulica francesa. Mientras que a Chézy se le debe la ecuación de flujo uniforme usada para estimar la velocidad media de un cauce basándose en el radio hidráulico y la pendiente.

Ya en tiempos contemporáneos es cuando se ha alcanzado un mayor número de logros en las ciencias e hidráulica no es la excepción, ni tampoco la cuestión fluvial y la producción de sedimentos en cuencas. Numerosos y brillantes investigadores como Louis Navier, Adhemar, Jean-Clude Barré de Saint Venant, W. Froude, R. Manning, G. Stokes, H. Bazin, O. Reynolds, J. Boussinesq, Dupuit y DuBoys, entre otros, cambiaron la forma de hacer hidráulica. En materia fluvial y específicamente en el transporte de sedimentos Dupuit y DuBoys destacaron (Levi, 1986).

La teoría de Dupuit (1848) fue una de las más aceptadas hasta hace poco tiempo. Afirma que el transporte de sedimentos se debe al exceso de velocidad sobre la partícula en comparación con la velocidad bajo ella. También observó que la concentración de partículas en el fondo era mayor que en la superficie. Hacia 1861 Humphreys y Abbott

presentan el “Reporte sobre la física y la hidráulica del río Mississippi” (Levi, 1986), determinando la concentración de sedimentos sobre el cauce, así como la naturaleza de las partículas. Lograron establecer relaciones entre la descarga de sedimentos y la velocidad del cauce. Partiot en 1871 fue el primero en señalar la importancia de los remolinos y vórtices en el transporte de sedimentos. De acuerdo con este autor, los remolinos aparecían debido a la rugosidad del fondo, los sólidos depositados, la concavidad de los bancos de arena y a la corriente misma. Patriot relacionó la fuerza de ascenso de los vórtices con la acción de los torbellinos y encontró que la arena del Río Loire (Francia) se movía en suspensión intermitentemente y que la mayor parte de ella se transmitía por carga de fondo, excepto cuando había mucha turbulencia (Simons y Sentürk, 1992).

Hacia 1879 DuBoys publicó su teoría de la “Fuerza Tractiva”, la cual ha sido ampliamente aceptada y usada para estudiar el movimiento de la carga de fondo. Afirmaba que el material transportado por la corriente dependía de la pendiente y del tirante. También que la fuerza tractiva era específica para cada diámetro de material (Simons y Sentürk, 1992).

Los primeros modelos de cauces con fronteras móviles desarrollados en un laboratorio los realizó Fargue (1827-1910). Mientras que Deacon en 1894 describió una relación dinámica entre el gasto y el fondo del cauce, llegando a que el material transportado era proporcional a la quinta potencia de la velocidad del mismo. El ingeniero R. G. Kennedy en 1895 publicó su obra: “La prevención de la sedimentación en canales de riego”, relacionando el transporte de sedimentos con la sección del canal. Propuso una relación entre la velocidad y el tirante del canal para evitar la erosión y la sedimentación. Su trabajo lo continuaron Lindley, Lacey, Inglis y Blench entre otros, dando lugar a la “Teoría de Régimen”. Hacia 1898 H. Engels construyó el primer laboratorio para estudiar problemas fluviales, logrando sobresalientes avances en el transporte de sedimentos (Simons y Sentürk, 1992).

El siglo XX tuvo un continuo incremento de interés en la erosión y la sedimentación. Según Simons y Sentürk (1992), G. K. Gilbert (1843-1918) estudió ampliamente el movimiento de los sedimentos en laboratorio, reportando sus resultados en el libro: “El transporte de fragmentos por agua corriente”. C.K. Wentworth clasificó el material de fondo de acuerdo a los diámetros de las partículas. En 1938 se publicó el “Manual de Petrografía Sedimentaria”, por Krumbein y Pettijohn de la Universidad de Chicago, donde exponen las técnicas de recolección de sedimentos, su análisis y representación.

En cuanto a la estimación de la erosión, la cual es la fuente de la producción de sedimentos, los primeros estudios los realizó Wolly un edafólogo alemán entre 1877 y

1885 (López Cárdenas, 2003; Colotti, 2004). En Estados Unidos las primeras investigaciones comenzaron en 1907. Miller llevó a cabo sus primeros experimentos en Missouri en 1917 (Hudson, 1982). H. Benett y L.A. Jones midieron la erosión de parcelas experimentales entre 1928 y 1933 (Colotti, 2004). Hacia 1936 Cook ya intuía la relación entre la erosión, el suelo, la lluvia, la pendiente y la cobertura vegetal (López Cárdenas, 2003). Siendo Zingg (1940) el primero en proponer la primera ecuación para estimar la pérdida de suelo (Hudson, 1982). Laws en 1940 y Ellison en 1944 identificaron la lluvia como el factor de peso de la erosión (Hudson, 1982). Hacia 1941 Smith añade los factores de cultivo y prácticas de conservación a la ecuación de Zingg. Poco después, en 1947 Browning incorpora el factor de suelo, mientras que Musgrave en el mismo año presenta su ecuación, la cual toma en cuenta la intensidad de la lluvia, el tipo de suelo, el relieve y la cubierta vegetal (Simons y Sentürk, 1992). Para 1959 con base en el trabajo de sus predecesores y experimentación Wischmeir propone la primera versión de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) (ver 3.1.2.1.7), la cual se mejora para 1965 y 1978 en conjunto con Smith (Wischmeir y Smith, 1965 y 1978). Esta ecuación es la más aceptada para la estimación de producción de sedimentos. Debido al gran éxito de la USLE, surgieron versiones de otros autores como Williams y Berndt (1972) con la MUSLE, Kinnell y Risse (1998) con la USLE-M, Renard *et al.* (1997) con la RUSLE y McCool *et al.* (2004) con la RUSLE2, entre otros. Otra línea de investigación que también se ha seguido para estimar la producción de sedimentos en cuencas son los métodos estocásticos y los de simulación de procesos físicos, Simons y Sentürk (1992) proporcionan suficiente información al respecto.

## 1.2 Situación existente.

Los hidrólogos se enfrentan al problema de predecir y estimar las variables hidrológicas, como es el caso del escurrimiento, precipitación, concentración de contaminantes, recarga subterránea y la humedad del suelo. Los procesos hidrológicos tales como el escurrimiento y la producción de sedimentos son de naturaleza compleja dado que dependen de muchos factores, por ejemplo: humedad inicial del suelo, uso del suelo, geomorfología del suelo, evaporación, infiltración, duración y distribución de la lluvia.

Existe una gran diversidad de modelos matemáticos para estimar la producción de sedimentos (ver capítulo 3). Los más conocidos son: métodos de agrupación de variables, modelos estocásticos y los métodos de simulación de procesos físicos. Los más usados son los de agrupación de variables y los de procesos físicos. Los primeros simplifican el proceso utilizando coeficientes que involucran muchas variables, estos parámetros pueden o no representar las características físicas reales. Una desventaja es que algunos modelos no consideran el medio ambiente como dinámico con respecto al tiempo y al

espacio. Los últimos se consideran mejores, dado que toman en cuenta la influencia de las variables físicas, pero requieren de muchos datos (Simons y Sentürk, 1992). Es por eso que existe la necesidad de buscar métodos alternativos de predicción de escurrimiento y producción de sedimentos usando información fácilmente disponible.

Por otro lado, se presenta una variación importante al estimar la producción de sedimentos usando distintos métodos. Se sugiere no quedar satisfechos con los esfuerzos realizados hasta la fecha, ya que existe un vacío en el entendimiento del fenómeno, así como en los ciclos de las variables que intervienen. Del mismo modo, se tiene la urgente necesidad de monitorear la posición del fondo de los cauces, la erosión de estos y su estabilidad. Así como de investigar mejores formas de llevar a cabo dichas labores. Por ello, el potencial para desarrollar modelos de predicción ha venido creciendo, por el contrario el de calibración y validación, los cuales requieren ser abordados.

### 1.3 Planteamiento del Problema.

Durante el siglo XX se propició en el mundo la construcción de presas, y obviamente México no fue la excepción. Esto con el fin de llevar agua a los lugares donde el recurso era escaso, así como para controlar las inundaciones y generar energía eléctrica. Muchas de estas obras se encuentran cerca de terminar su vida útil debido al azolvamiento a lo largo del tiempo. Aproximadamente el 1% del volumen de almacenamiento se pierde en el mundo en 5 años debido al depósito de sedimentos (Marengo, 2001). La Tabla 1- 1 muestra algunos de los embalses con problemas de azolvamiento en México.

El azolvamiento reduce significativamente la capacidad de aprovechamiento y regulación de las presas, cambia la forma de operarlas, altera la calidad del agua que contienen, genera inestabilidad estructural en la cortina y puede dejar fuera de servicio un embalse. Entonces los problemas dejan de ser sólo de ingeniería para ser sociales, comerciales, industriales y ambientales.

El origen de los azolves yace en los sedimentos suspendidos que lleva la corriente. Estos además de representar problemas para los embalses, también pueden depositarse sobre los cauces, ocasionando la elevación del fondo de los ríos, generando inestabilidad y riesgo de inundaciones (Kramer *et al.*, 1997). Por otro lado las alteraciones en la dinámica de los sedimentos afecta directamente el desarrollo de la vida acuática, como es el caso de los peces, cuyo desove se ve obstaculizado y su sobrevivencia se complica. Lo que impacta las economías locales de los pescadores (Stott y Mount, 2004).

Debido a todo lo anterior, se considera necesario hacer una revisión de los métodos para estimar la producción de sedimentos existentes, analizar su viabilidad al medio mexicano, determinar cuál es el más indicado y hacer recomendaciones para poder aplicarlo. Se pretende aplicar lo encontrado a presas con problemas de azolves y así demostrar su validez. De esta manera mejorar lo que se ha venido aplicando y esperar que en el futuro este estudio sea tomado en cuenta para el diseño de nuevos embalses.

**Tabla 1- 1. Embalses con problemas de azolvamiento en México (Barragán, 2000).**

<b>Embalse</b>	<b>Estado</b>	<b>Capacidad Original en millones de m<sup>3</sup></b>	<b>Pérdida del almacenamiento original en %</b>	<b>Tiempo de sedimentación en años</b>
Tuxpango	Veracruz	1.500	91.19	81
Pilotos	Aguascalientes	0.816	85.66	10
La Soledad	Puebla	30.000	66.66	36
Santa Rosa	Jalisco	418.450	38.00	27
San José	San Luis Potosí	7.500	37.33	70
El Cedazo	Aguascalientes	1.200	36.83	23
La Loba	Tamaulipas	3.400	32.35	17
Alto de Norias	Coahuila	2.807	29.75	19
Abelardo Rodríguez	Aguascalientes	28.700	24.18	55
Alvaro Obregón	San Luis Potosí	3.904	23.69	42
Piedritas	Coahuila	22.062	23.50	20
Víboras	Zacatecas	2.000	21.50	39
El Peaje	San Luis Potosí	8.000	17.50	26
Chihuahua	Zacatecas	6.000	17.33	16
Palomas	Zacatecas	8.000	14.64	17
Dolores	Zacatecas	4.912	13.64	15
Tenasco	Zacatecas	10.500	12.89	22
El Cazadero	Zacatecas	58.100	10.31	21
La Codorniz	Aguascalientes	5.340	10.10	17
Sombrereteillo	Nuevo León	5.562	10.09	16
Peña Blanca	Aguascalientes	4.420	8.30	19
Ojo Caliente	San Luis Potosí	10.255	7.89	17
Talamantes	Chihuahua	31.000	7.73	85
La Boca	Nuevo León	17.130	7.55	30
El Saucillo	Aguascalientes	6.800	7.35	44
El Niágara	Aguascalientes	16.500	6.10	22
La Lajilla	Tamaulipas	6.180	5.87	21
Agualeguas	Nuevo León	10.772	5.46	16
Loma Larga	Nuevo León	4.416	5.12	20
El Tecolote	San Luis Potosí	2.035	4.82	15
El Oyul	Tamaulipas	10.319	4.55	12
El Chamal	Tamaulipas	8.154	4.51	17
Achimec II	Zacatecas	9.000	4.02	14
Mexquitic	San Luis Potosí	5.000	3.32	56
Ordeña Vieja	Aguascalientes	4.051	1.90	9
Susticacán	Zacatecas	5.330	1.88	18
Tayahua	Zacatecas	38.190	1.36	14
Santos Bañuelos	Zacatecas	3.000	0.83	7

#### **1.4 Justificación del proyecto.**

Las presas en México han tenido un papel fundamental en la transformación y modernización del país. Su construcción es ejemplo del avance tecnológico nacional y ha respondido permanentemente al objetivo de aprovechar racionalmente un recurso que es estratégico para el desarrollo sostenible del país.

Por lo tanto, estimar la producción de sedimentos más acertadamente resulta necesario. Recordemos que la sobreestimación de sedimentos añade un innecesario costo a las estructuras involucradas, por otro lado subestimarlos llevará a dejar fuera de servicio infraestructura útil y los servicios dependientes de ella antes de tiempo. Queda claro que las obras hidráulicas son onerosas, en la mayoría de las ocasiones son pagadas por el erario público y al quedar fuera de operación se ocasiona una pérdida para todos los ciudadanos, es decir para la nación. Por lo que debemos estar en la búsqueda constante de soluciones óptimas e innovadoras para los tiempos venideros.

Los resultados que se pueden obtener de esta investigación son de interés y beneficio de toda la comunidad.



---

---

## *Capítulo 2*

---

---

## 2. Relación entre la hidrología y la producción de sedimentos en cuencas

La producción de sedimentos en cuencas consiste en la cantidad de partículas de suelo que es arrojada fuera de la cuenca. Existe una relación intrínseca entre la producción de sedimentos en cuencas y la hidrología, ya que el principal agente que expulsa partículas es el escurrimiento, muchas llegan a él por medio del flujo superficial y son generadas a partir del impacto de las gotas de lluvia al suelo o por el escurrimiento mismo, aunque también pueden ser generadas a partir del viento, siendo el proceso mucho más lento. La producción de sedimentos en cuencas está ligada mayormente al ciclo hidrológico, por lo que resulta indispensable estudiar y combinar la hidrología con los sedimentos y de esta forma analizar el fenómeno, a fin de estimar la cantidad de suelo que se expulsará de una cuenca.

### 2.1 Descripción del fenómeno

El continuo cambio de forma que ocurre en la superficie de la tierra implica la generación y subsecuente distribución de los sedimentos. Las partículas de suelo y roca son desprendidas de un lugar y depositadas en otro. Por otro lado, se sabe que el agua, mediante la lluvia y el escurrimiento superficial, es el principal agente responsable del desprendimiento y transporte de las partículas de suelo hacia aguas abajo, resultando imposible planear, diseñar, construir o mantener proyectos fluviales racionalmente sin suponer una distribución de los materiales hacia las zonas bajas (Vanoni, 1977).

El estudio de desprendimiento y movimiento de sedimentos es un tema de mucho interés en la ingeniería hidrológica. Desde luego, el tema de sedimentos trasciende los campos de la geomorfología fluvial, transporte de sedimentos, sedimentación y la ingeniería de ríos. El estudio de los sedimentos se puede dividir dentro del ciclo hidrológico en tres procesos: producción, transporte, y depósito (Rivera Trejo *et al.*, 2006).

Se ha observado el proceso de erosión, transporte y depósito de sedimentos en la naturaleza y se han descrito las causas con algún acierto, aunque la interacción entre las fuerzas que provoca la erosión no resulta tan obvia. Si todas las causas se conocieran y pudieran tomarse en cuenta, las tasas de erosión y depósito podrían predecirse acertadamente. Esto ocurre en forma limitada, ya que no resulta práctico medir todas las variables en cuestión, aislarlas y determinar el modelo a desarrollar (Vanoni, 1977).

A pesar de que la investigación de la erosión del suelo y la redistribución de sedimentos en los ríos posee una larga historia, esta se conduce de manera aislada y por

equipos de especialistas distintos. En años recientes se ha visto una mayor integración en el manejo del suelo y los sistemas de agua, particularmente a la escala de cuenca de un río, donde se ha visto que una mayor integración entre especialistas lleva a tomar mejores decisiones. La relación entre la erosión del suelo, la redistribución, el transporte y el depósito de sedimentos en ríos y lagos resulta obvia para muchos investigadores, sin embargo existe una resistencia cultural entre ambos grupos de científicos, por lo que difícilmente interactúan (Owens y Collins, 2006).

La clave para estimar acertadamente la producción de sedimentos en cuencas dependerá entonces de la precisión con que se conozca la cantidad de suelo erosionado, transportado, sedimentado y finalmente expulsado de la cuenca. La lluvia juega entonces un papel fundamental, ya que aporta la energía necesaria para separar las partículas, por medio del flujo superficial al disgregarlas nuevamente, transportar los agregados a los cauces donde serán acarreados como carga de lavado, cuando la velocidad del cauce sea lo suficientemente baja o nula, la carga de lavado será depositada en ríos o cuerpos de aguas en su camino al mar. A continuación se describen las variables involucradas.

### ***2.1.1 El Proceso de Erosión***

Erosión, proviene del latín *erodere*, significa: desgaste o destrucción producida en la superficie de un cuerpo por la fricción continua. En hidrología, erosión se puede definir como: el desgaste de la superficie terrestre por agentes externos como el agua o el viento. En este trabajo nos referiremos principalmente a la erosión debida al agua, describiremos la erosión hídrica y sus tipos.

El proceso de erosión consiste en el desprendimiento y transporte de partículas de la superficie del suelo debido al agua (hídrica) y al viento (eólica), siendo el agua el principal agente de erosión. Al encontrarse las partículas sobre la superficie pueden ser desprendidas por las gotas de lluvia (figuras 2-1 y 2-3), por los escurrimientos y viento. Entonces, pueden ser transportados por el viento, agua o gravedad. Tanto para el desprendimiento como para transporte de partículas el proceso requiere energía. Esta llega a la superficie por el impulso que produce el momento (*masa x velocidad*), que ocasiona la caída de las gotas de lluvia, el escurrimiento o el viento. Además del desprendimiento se produce el transporte, en algunas ocasiones el suelo que fue arrastrado por la erosión llega a los ríos, en ellos la arena y el limo arrastrado pueden llegar a formar bancos de sedimentos (Brooks *et al.*, 1997; Rivera Trejo *et al.*, 2006).

La figura 2-2 muestra un sistema típico de erosión en una cuenca. Esta se erosiona debido al agua y al viento, produciendo erosión superficial, cuyas partículas son arrastradas por el flujo superficial, el cual se concentra en canalillos o arroyuelos, transportando y erosionando nuevamente, hasta llegar a cauces estables donde la

corriente seguirá degradando el cauce y transportando sedimentos. Durante todo el viaje, el depósito de partículas se lleva al cabo, primero trasladando las partículas, luego acumulándolas en los cambios de pendiente o donde la pendiente sea muy baja, como en valles y planicies, en el fondo de los cauces y formando barras en éstos. Si los cauces encuentran alguna obstrucción también será factible la acumulación de sedimentos.

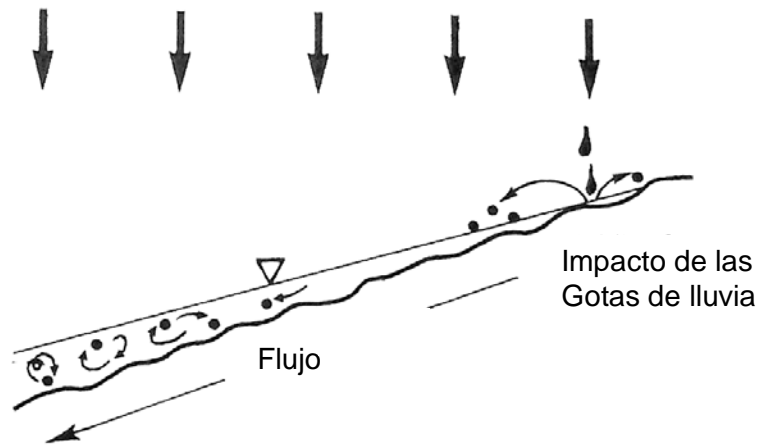


Figura 2- 1 Erosión de superficie como resultado del impacto de las gotas de lluvia y la turbulencia de los escurrimientos (Brooks *et al.*, 1997).

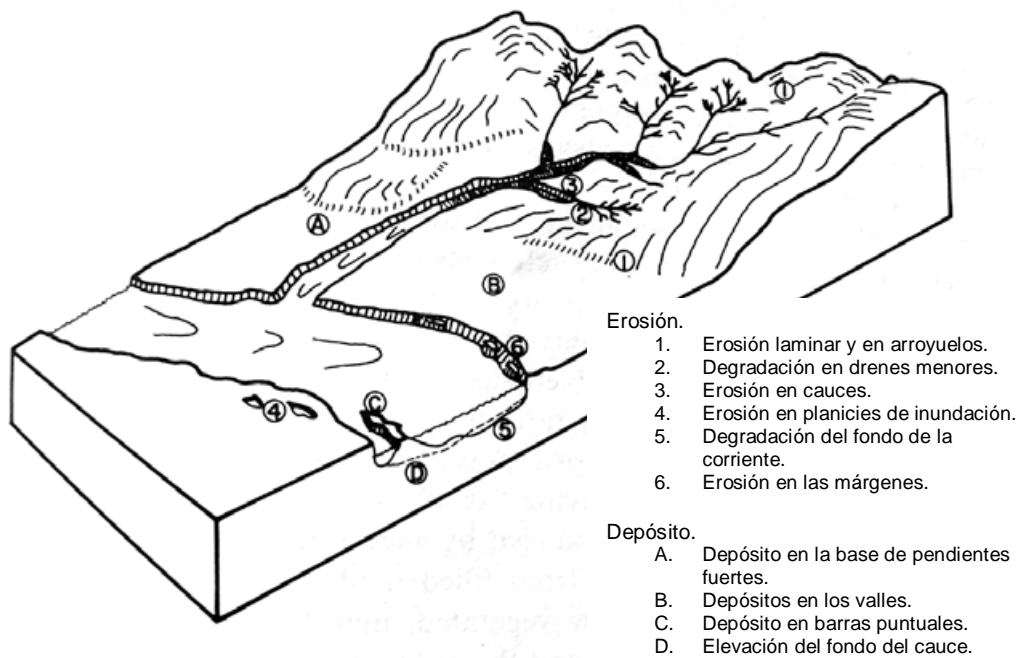


Figura 2- 2. Sistema típico de erosión y depósito de sedimentos en una cuenca (Vanoni, 1977).

### **2.1.1.1 Erosión hídrica**

Trata de la erosión causada por la acción del agua, a través de la lluvia y el escurrimiento. La combinación de estos mecanismos da como resultado la erosión de la superficie.

#### **a) Lluvia**

La lluvia actúa de manera directa e indirecta. La acción directa se refiere al impacto de las gotas de lluvia en la superficie del suelo. La energía cinética liberada por el impacto es suficientemente grande para romper los lazos existentes entre las partículas, pudiendo esparcir más de 200 T/ha en un suelo sin vegetación, salpicando las gotas hasta 50 cm de altura y 1.50 m de longitud (Brooks *et al.*, 1997). Este es el mecanismo más importante, ya que es el que disgrega las partículas que forman la estructura (Figura 2- 1 y Figura 2- 3).

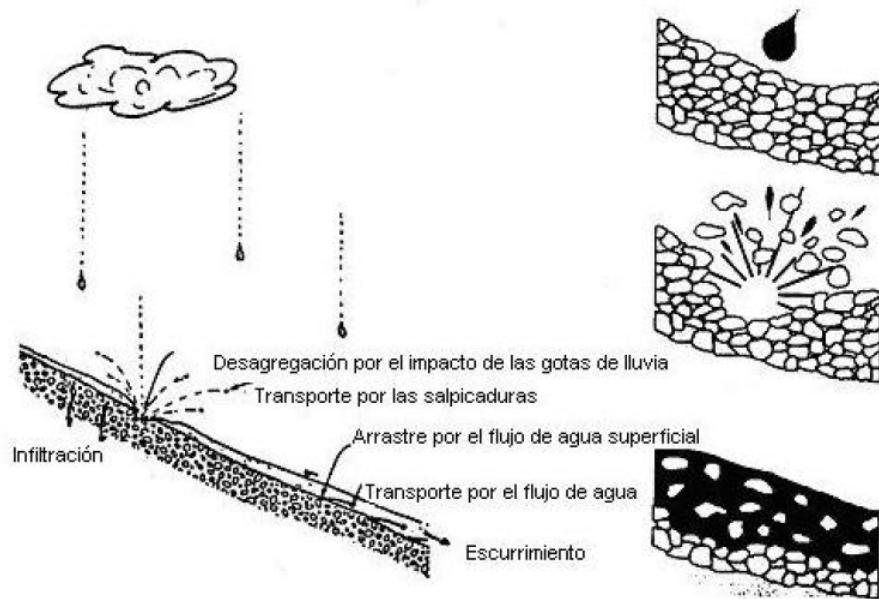
Las características del impacto de las gotas de lluvia dependen del tamaño de la gota y del tirante del escurrimiento; un cráter en forma de corona se forma unos milisegundos después del impacto (Figura 2- 3). El esfuerzo cortante que produce el impacto puede llegar a ser de hasta 100 veces mayor que el esfuerzo cortante del flujo laminar somero, mientras que el esfuerzo cortante en exceso es 4 veces mayor que el esfuerzo cortante resistente de los suelos cohesivos. Pero el efecto del impacto de las gotas de lluvia sobre la superficie se puede llegar a despreciar si el tirante del escurrimiento es mayor a 3 veces el diámetro de la gota de lluvia (Julien, 2002).

En la acción indirecta, el suelo se mezcla con el agua y se lleva a cabo un movimiento lateral de las partículas a otros puntos de la ladera. Este desplazamiento no tiene consecuencias si no existe una fuerza que las haga moverse aguas abajo, esta es la gravedad que actúa por medio de la pendiente del terreno. Aunado a esto se asocia la compactación y la velocidad de infiltración del suelo. Al movilizarse las partículas más finas, van tapando las grietas y poros, que reducen la velocidad de infiltración, entonces el agua que sería absorbida por el suelo se queda en la superficie, formando así el escurrimiento. Ver Figura 2- 2 y 2-3.

#### **b) Escurrimiento**

Esencialmente, el escurrimiento se forma cuando la intensidad de la lluvia es mayor que la velocidad de infiltración. La corriente erosiona por medio de dos acciones: una disgregadora y otra transportadora. La primera se produce cuando las fuerzas tractivas del flujo superan a las fuerzas resistentes de las partículas del suelo. La segunda se lleva a cabo cuando se satura el suelo y el agua empieza a

escurrir, trasladando los sólidos hacia aguas abajo. Estas partículas son muy finas y van a componer la carga de lavado de los cauces.



**Figura 2- 3. Inicio de erosión por gotas de lluvia (Rivera Trejo et al., 2006)**

### 2.1.1.2 Tipos de erosión hídrica

La erosión hídrica puede llevarse a cabo superficialmente o por movimientos de masa. Cuando se lleva a cabo en superficie se puede dividir en laminar, riachuelo, cauces y barrancos (Vanoni, 1977). Mientras que los movimientos de masa se dividen en lentos, rápidos y deslizamientos (López Cárdenas, 2003). Otros autores por ejemplo Brooks *et al.* (1997), consideran sólo tres tipos de procesos de erosión en una cuenca: laminar, cauces y movimientos de masa. A continuación se presentan de manera detallada.

#### 2.1.1.2.1 Erosión de superficie

##### **Erosión laminar**

Esta consiste en una remoción de delgadas capas de suelo extendida más o menos uniformemente en toda la superficie (Vanoni, 1977). Producto del impacto de las gotas de lluvia y por el escurrimiento, mientras que al formarse el flujo, éste transporta el material erosionado. El escurrimiento circula lentamente sin cauce en régimen laminar, y no es permanente (López Cárdenas, 2003).

La erosión laminar causa grandes aportaciones de sedimentos a los cuerpos de agua, además de generar la pérdida de nutrientes en los suelos debido a que se afectan las partículas más finas (López Cárdenas, 2003).

### **Erosión en riachuelos**

Los riachuelos son incisiones longitudinales en el suelo, generalmente intermitentes. Estos se presentan como consecuencia de la concentración local del flujo de agua, canalizada por las características locales del microrrelieve. Son lo suficientemente pequeños para desaparecer por completo con los métodos de cultivo ordinarios (Vanoni, 1977). Las obstrucciones motivan una separación y concentración del flujo de agua. Se forman durante los aguaceros de gran intensidad.

### **Erosión en cárcavas y barrancos**

Son cursos de agua, cauces o ríos con circulación permanente o intermitente. Los procesos de erosión se presentan sobre la superficie que define el propio cauce. Consisten en profundas incisiones en el terreno debido a una gran concentración de escurrimiento, las cuales no desaparecen con los métodos ordinarios de agricultura. Cuando el tirante del arroyuelo excede los 300 mm se le denomina cárcava (Haan *et al.*, 1982).

La erosión en barrancos es la mayor fuente de erosión geológica (Brooks *et al.*, 1997). Sin embargo es la erosión laminar la que aporta la mayor cantidad de partículas a los cauces (López Cárdenas, 2003), por ende el total de sedimentos que fluye de cárcavas es menor que el producido laminarmente (Vanoni, 1977).

#### **2.1.1.2.2 Erosión por movimientos de masa**

La erosión por movimientos de masa se lleva a cabo al saturarse el suelo, cuando este se encuentra en pendiente y carece de vegetación, ocasionando una falla por acción de la gravedad. Otra circunstancia que propicia este tipo de desplazamientos sucede cuando el agua alcanza un horizonte de suelo apoyado sobre una capa impermeable, lubricándolo y, si está en pendiente, puede crear una línea de desequilibrio en toda la zona del suelo situada por encima (López Cárdenas, 2003).

Los factores que intervienen en los movimientos de masa pueden ser pasivos o activos. Entre los factores pasivos se encuentran los litológicos, los estratigráficos, los estructurales, los topográficos, los climatológicos y los biológicos. Los factores activos consisten en la remoción de la base de apoyo por medios naturales o artificiales, y en la sobrecarga por saturación de agua o por cargas artificiales.

Los movimientos de masa se pueden clasificar en: lentos, rápidos y deslizamientos (López Cárdenas, 2003). A continuación se presenta una descripción detallada al respecto.

### **Movimientos Lentos**

**Reptación.** Movimiento lento que se da en capas de suelo arcilloso de 50 cm de espesor. Se observa al comparar el suelo con puntos de referencias, como árboles o postes.

**Solifluji3n.** Movimiento de material saturado y no confinado en cauces definidos. Propio de climas subpolares, donde el suelo se ve afectado por el hielo y deshielo.

### **Movimientos R3pidos**

**Corrientes de barro.** Movimientos en cauces definidos por detritos saturados de agua. Se presentan en regiones 3ridas con precipitaciones poco frecuentes de gran magnitud.

**Corrientes terrosas.** Movimientos de material saturado de agua, no confinadas en un cauce. Se presentan en climas h3medos.

**Derrumbamientos.** Son flujos laminares de detritos rocosos sobre laderas de fuerte pendiente y con formaciones angostas. Son similares a los aludes, pero con mayor contenido de agua.

### **Deslizamientos**

**Desmoronamientos.** Deslizamiento intermitente de detritos rocosos generalmente con una rotaci3n hacia atr3s con respecto a la pendiente sobre la cual tiene lugar el movimiento.

**Deslizamiento de detritos.** Deslizamiento o rodadura, con movimiento r3pido, sin rotaci3n hacia atr3s y con baja cantidad de agua.

**Caída de detritos.** Movimiento libre de detritos desde una cara vertical del terreno. Frecuente a lo largo de las m3rgenes de los r3os.

**Deslizamientos de rocas.** Masas que se deslizan a lo largo de superficies de estratificaci3n, diaclasas o a lo largo de fallas.

**Alud de rocas.** Caída libre de bloques de roca en pendiente con inclinaci3n importante. Son frecuentes durante periodos de congelaci3n y derretimientos sucesivos.

Los procesos erosivos arriba mencionados se pueden presentar de manera independiente o combinados. Adicionalmente las actividades humanas pueden acelerar el proceso, tal es el caso de la construcci3n, deforestaci3n y agricultura.



### **2.1.2 Definiciones**

Dentro del campo de la hidráulica y la producción de sedimentos, es importante definir los siguientes términos:

- Pérdida de suelo. La cantidad de suelo removida por erosión de pequeñas áreas.
- Producción de sedimentos. El total de sedimentos que salen de una cuenca, medidos en una sección transversal de referencia durante un cierto intervalo de tiempo (Ver sección 2.1.3).
- Tasa de entrega de sedimentos. Es la medida de la disminución de sedimentos erosionados, por depósito, conforme se mueven del punto de erosión a cualquier ubicación designada aguas abajo. También es expresado como porcentaje del material erosionado *in situ* que alcanza a llegar a un cierto punto de medición.
- Velocidad de erosión. Consiste en la velocidad a la cual el suelo es erosionado en una cierta área. Ésta es expresada en unidades de volumen o peso, por unidad de área y tiempo. Cuando el área en cuestión es pequeña, la velocidad de erosión, pérdida de suelo y producción de sedimentos se consideran equivalentes, es decir, la tasa de entrega de sedimentos es unitario.

### **2.1.3 La Producción de Sedimentos**

Los sedimentos son el producto de los distintos tipos de erosión. Del material desprendido sólo una pequeña parte atraviesa la cuenca y llega a la salida de ésta. El resto de los sedimentos son depositados en las colinas, planicies de inundación y las áreas entre riachuelos. Según Brooks *et al.* (1997), menos del 25% de los sedimentos generados son descargados al mar. Mientras que la producción de sedimentos consiste en el total de material que sale de la cuenca o sistema de drenaje, medido para un cierto periodo y un punto específico (Vanoni, 1977). Por lo general se estima con base en muestreos y se relaciona con el gasto del cauce o por medio de mediciones de los sedimentos descargados en los embalses.

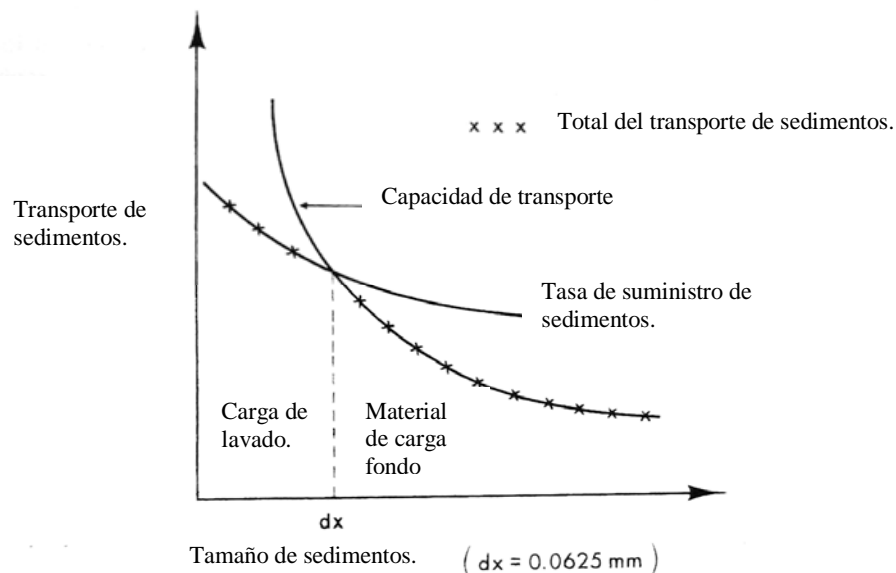
La erosión de una cuenca es directamente proporcional a la producción de sedimentos de la misma. Ésta última se ve afectada por la cubierta vegetal existente; por consiguiente en las zonas áridas se tiene una producción mayor. En ese sentido, puede haber cuencas pequeñas con una producción de sedimentos más importante que cuencas más extensas.

La carga de sedimentos de una corriente es definida como la tasa de transporte de masa a través de una determinada sección del cauce y se puede medir en peso por volumen (mg/l) o por concentración (ppm). Esta se comprende de partículas finas transportadas en suspensión. La parte de la carga suspendida se le denomina carga de

lavado, está constituida principalmente por limos y arcillas. También existe la llamada carga de fondo, la cual está compuesta de arenas, gravas y rocas, que al convertir el movimiento en la energía cinética de los remolinos y turbulencia de la corriente ocasiona que se arrastren las partículas hacia aguas abajo.

La cantidad de sedimentos en una corriente depende del suministro de material, de las características del cauce, del gasto y de las características físicas del sedimento. El suministro de material y el gasto son función de la climatología, la topografía, la geología, la cubierta vegetal y el uso del suelo de la cuenca. Las características del cauce dependen de la morfología, de la pendiente del cauce, de la rugosidad y del material de fondo. Por otro lado las características físicas de las partículas son función del tipo de suelo, de la geología y del estado de intemperismo de la cuenca y el cauce.

Cuando la energía de la corriente excede el suministro de sedimentos, ocurre una degradación en los cauces. Por el contrario si el suministro de sedimentos sobrepasa la energía de la corriente se depositaran sedimentos elevando el fondo del río. En la Figura 2- 4 se muestra la cantidad de material que puede llevar una corriente sin que se altere la sección del mismo.



**Figura 2- 4. Tasa de sedimentación afectada por la capacidad de transporte y suministro de sedimentos para diferentes tamaños de partículas, para una corriente y flujo específica (Brooks *et al.*, 1997).**

Las alteraciones en el uso del suelo de una cuenca producen una variación en la producción de sedimentos, los cuales afectan la morfología de los cauces aguas abajo. Fenómeno que ha sido observado y del cual se puede predecir su comportamiento mediante suposiciones reflejadas en la Tabla 2- 1 (Stott y Mount, 2004).

**Tabla 2- 1. Respuesta del cauce a las alteraciones de la carga de sedimento y gasto líquido. Donde  $Q_w$  es el cambio en el gasto líquido y  $Q_s$  es el cambio en la descarga de sedimentos (Stott y Mount, 2004).**

Cambio	Impacto en la sección del canal.
$Q_s+ Q_w=$	Elevación del fondo: inestabilidad del cauce, ensanchamiento y poca profundidad.
$Q_s- Q_w=$	Incisión: inestabilidad del cauce, angostamiento del canal y crecimiento de la profundidad del cauce.
$Q_w+ Q_s=$	Incisión: inestabilidad del cauce, ensanchamiento del cauce y crecimiento de la profundidad del cauce.
$Q_w- Q_s=$	Elevación del fondo: inestabilidad del cauce, angostamiento y poca profundidad.
$Q_s+ Q_w-$	Elevación del fondo.
$Q_s+ Q_w+$	Toda actividad morfológica se intensifica.
$Q_s- Q_w-$	Decremento de la actividad morfológica.
$Q_s- Q_w+$	Incisión: inestabilidad del cauce, crecimiento de la profundidad del cauce y el ancho cambia sin control.

De la Tabla 2- 1 se infiere que cuando la concentración de sedimentos aumenta provoca elevación del fondo, inestabilidad del cauce, ensanchamiento y poca profundidad. Por el contrario, cuando la concentración de sedimentos baja ocasiona incisión del cauce, inestabilidad del cauce, angostamiento y crecimiento de la profundidad.

#### 2.1.4 Relación entre la producción de sedimentos y la deforestación

Se ha demostrado que la producción de sedimentos se incrementa sustancialmente después de la deforestación. Posteriormente, conforme el bosque se recupera y madura se reduce la tasa de sedimentos. Otra consecuencia de la deforestación es la compactación del suelo, lo que reduce su velocidad de infiltración (Stott y Mount, 2004).

El incremento en la producción de sedimentos ocasiona el arrastre de un mayor número de agregados gruesos y finos, que se ven reflejados como carga de fondo y carga en suspensión. Ambas cargas son transportadas hacia aguas abajo. La carga de fondo a tasas mucho más lentas que la carga en suspensión. Una vez en las zonas bajas y/o planas se almacenan en forma de barras, provocando un desvío del flujo e inestabilidad en el cauce (Stott y Mount, 2004).

## 2.2 Relación entre los sedimentos y la hidrología

Dado que la producción de sedimentos es directamente proporcional al material erosionado de la cuenca, y siendo el proceso lluvia-escurrimiento la principal fuente de

energía para la erosión, además de proveer transporte a las partículas, encontramos que se puede estimar la producción de sedimentos a partir de la hidrología.

Por otra parte, la erosión debida al agua afecta los suelos en general, ya sean naturales o de tierras de cultivo, y los sistemas fluviales. Los sedimentos se van transportando en toda cuenca hacia los cauces, pudiendo llevar contaminantes consigo, cuando llegan a los ríos estos se ven afectados.

Un aumento de erosión en la cuenca implica un incremento de material en suspensión en el cauce, que se puede sedimentar en los cuerpos de agua. Lo que va mermando la capacidad de hidráulica de los cauces y de almacenamiento-regulación de los embalses. Por otro lado, una menor erosión en la cuenca implica una reducción del suministro de sedimentos al sistema de drenaje de la misma, lo que se pudiera reproducir como socavación en los cauces.

La erosión no es buena ni mala, sino que es un proceso que forma parte de un sistema que tiende a estar en equilibrio, cuando es alterado existen consecuencias positivas y/o negativas. Lo interesante es pronosticar la cantidad de suelo que va a erosionarse naturalmente así como el impacto asociado (Simons y Sentürk, 1992).

### **2.3 Alcances de la hidrología en cuanto a la producción de sedimentos**

Para determinar la producción de sedimentos es necesario conocer la lluvia y el escurrimiento de la cuenca. Varios autores han abordado el tema y han hecho una recopilación de las metodologías existentes. Algunas de estas metodologías siguen en uso, mientras otras han quedado en el olvido. A continuación se presentan las obras de algunos de los autores más destacados.

Uno de los autores clásicos en cuanto al transporte de sedimentos es Vanoni (1977). En su libro *Sedimentation Engineering* ofrece una completa descripción de la producción de sedimentos, así como de los distintos tipos de erosión y como evaluarlas. Contiene métodos que requieren muestras de sedimentos en cauces y del volumen azolvado en embalses. Indica la relación entre la concentración de sedimentos suspendidos y el caudal durante una tormenta, así como la relación entre la descarga de sedimentos diarios, el caudal y la concentración de sedimentos, proponiendo una ecuación que relaciona las variables anteriores, con coeficientes específicos para cada cuenca. Además, muestra métodos empíricos y de modelación de procesos físicos para estimar la producción de sedimentos.

Julien (2002) ofrece una amplia descripción matemática del proceso de erosión, la cual resulta similar a la forma de la USLE y propone una ecuación de producción de sedimentos parecida a la MUSLE.

Haan *et al.* (1982) describen la producción de sedimentos como la suma de la erosión laminar, en riachuelos y en cauces. Explican matemáticamente cada uno de estos procesos y señalan la importancia de la hidrología en la producción de sedimentos. Recopilan trece modelos para estimar la erosión y la producción de sedimentos, entre ellos la USLE, MUSLE, Negev, ANSWERS, CREAMS, etc. Los mismos autores estiman la producción de sedimentos mediante la USLE y la tasa de descarga de sedimentos (*DR*). Proporcionan diversas metodologías para estimar el *DR*. Asimismo mencionan el método de estimación de sedimentos por sustracción de batimetrías y diversos métodos para calcular los sedimentogramas.

Simons y Sentürk (1992) dividen los métodos de producción de sedimentos en: métodos determinísticos y de agrupación de variables, métodos estocásticos y métodos de procesos físicos. Entre los métodos determinísticos destacan la USLE, MUSLE, RUSLE y PSIAC; mientras que los de procesos físicos toman más atención, haciendo hincapié en el WEPP.

Otro autor clásico de hidrología es Chow *et al.* (1988), quien en su obra describe el proceso, análisis y diseño hidrológico. Sin embargo no ataca la producción de sedimentos en cuencas, ni el transporte de sedimentos.

Brooks *et al.* (1997) presentan una descripción amplia de la erosión hídrica y eólica. Proponen técnicas para prevenir y controlar la erosión. Estiman la erosión mediante la USLE, MUSLE y WEPP. Relacionan el gasto de la corriente con la concentración de sedimentos a través de un gráfico log-log. Relacionan la producción de sedimentos con la erosión de la cuenca por medio de la tasa de descarga de sedimentos (*DR*).

Mays (2001) recopila varias metodologías para la estimación de la producción de sedimentos en su mayoría ecuaciones empíricas. Tal como es el caso: USLE, MSLE, MUSLE, RUSLE, Dendy y Bolton, Zeller y Fullerton, y Flaxman. En cuanto a métodos de procesos físicos solo menciona el WEPP.

Siguiendo una línea de investigación distinta a los anteriores tenemos a Zapata (2002). Quien sin ser hidrólogo, pero envuelto en la problemática de la erosión, colecta las metodologías para estimar la erosión y la sedimentación por medio de radionuclidos ambientales.

Owens y Collins (2006) abordan la producción de sedimentos mediante la estimación de la erosión y la redistribución de los sedimentos en la cuenca. Analizan los modelos matemáticos y las técnicas que emplean radionuclidos ambientales, de donde recomiendan la combinación de ambos a fin de obtener resultados más certeros.

En México, destacan en la hidrología los trabajos de Aparicio (2004) y Campos Aranda (1998). Sin embargo, no incluyen apartado alguno respecto a la producción de sedimentos. Aunque, abordaron el tema en otros trabajos (Aparicio, 1979; Campos Aranda, 1980). Sánchez y Gracia (1992), presentan un modelo matemático para determinar el comportamiento del material en suspensión, dentro de un vaso de almacenamiento con dos afluentes de diferentes magnitudes y diferentes cargas de sedimento. Su procedimiento permite determinar el depósito del sedimento en el vaso y la evolución de las concentraciones en el efluente, pero no estiman la cantidad de sedimento que entra al embalse.

Maza y García (1996) recomiendan tomar en cuenta tanto la carga de fondo como la carga en suspensión para estimar la producción de sedimentos. Llevaron a cabo una extensa revisión bibliográfica, describiendo métodos y ecuaciones para determinar la carga de fondo y la carga suspendida. Para estimar la carga de fondo mencionan métodos empíricos, entre ellos: Duboys, Straub, Schoklitch, Shields, Meyer-Peter y Muller, Kalinske, Levi, Einstein y Einstein-Brown, Kikkawa y Ashida, Rottner, Garde y Albertson, Frijlink, Yalin, Pernecker y Vollmers, Inglis y Lacey, Bogardi, Garg, Agrawal y Singh. Mientras que para estimar la carga en suspensión describe métodos que requieren la concentración de sedimentos sobre el cauce y las propiedades de estos sedimentos suspendidos.

Gracia (1997) presenta los conceptos básicos para comprender el fenómeno de la erosión de suelos en cuencas. Se incluyen los principales criterios para calcular la pérdida de suelo, y en especial se presenta la aplicación de la USLE a cuencas. Describe métodos para el control de la erosión de suelos. El mismo autor en el mismo año (Gracia, 1997a) presenta los conceptos básicos para comprender el fenómeno de sedimentación en embalses. Incluye los principales criterios para calcular la distribución de sedimento en un embalse, la eficiencia de atrapamiento y la consolidación del sedimento. Describe el fenómeno de las corrientes de densidad y su cálculo. Se indican los principales métodos para el control del sedimento.

Del análisis de los autores anteriores, podemos dividir los métodos matemáticos de producción de sedimentos en determinísticos o empíricos de agrupación de variables, estocásticos y de simulación de procesos físicos. También existen las técnicas que estiman la producción de sedimentos con base en mediciones directas, ya sean concentraciones de sedimentos y volúmenes de material azolvado en los embalses. Como

métodos de última generación encontramos a los métodos que emplean a los radionuclidos ambientales como trazadores, cuya tecnología aun se encuentra en proceso de desarrollo. En el capítulo 3 se describen algunos de los métodos citados anteriormente y en el capítulo 4 se analizan sus ventajas y desventajas.

---

---

## *Capítulo 3*

---

---



### 3. Metodologías para estimar la producción de sedimentos en cuencas

En el presente capítulo se muestran las distintas metodologías para estimar la producción de sedimentos, las cuales se agrupan en: los métodos con base en medición directa y los métodos con base de modelación matemática. Estos últimos a su vez se dividen en métodos: empíricos, estocásticos y de simulación de procesos físicos. Además se presentan los métodos de última generación y los métodos empleados en México, que en su mayoría consisten en métodos empíricos.

#### 3.1 Métodos para la estimación de producción de sedimentos en cuencas

##### 3.1.1 Métodos con base en medición directa

Este tipo de métodos para estimar la producción de sedimentos se fundamentan en mediciones directas hidrológicas, hidráulicas y de sedimentos en la sección de estudio. Se pueden dividir en tres categorías: muestreo sobre el cauce, sedimentación en embalses y análisis regionales (USACE, 1995). A continuación se describen los métodos: registro de descarga diaria de sedimentos, periodo de acumulación de carga de sedimentos por periodos, curva de descarga de sedimentos y duración de flujo, y curvas de producción de sedimentos y volumen de agua anual.

##### 3.1.1.1 Registro de descarga diaria de sedimentos

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

$$Q_s = 0.0864 Q C k$$

Ecuación 3- 1

$Q_s$ : descarga de sedimentos (Ton/día)  
 0.0864: convierte  $m^3/s$  a Ton/día  
 $Q$ : gasto líquido diario de descarga ( $m^3/s$ )  
 $C$ : concentración de sedimentos por día (ppm)  
 $k$ : convierte ppm a mg/l

Si:  $C < 16,000 \text{ ppm}$  entonces  $k=1$

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

$C$ : concentración de sedimentos por día (ppm)  
 $S_s$ : peso específico de las partículas de sedimento.  
 $S_w$ : peso específico del agua.

Normalmente, solo la carga de sedimentos medida es registrada. Sin embargo, los muestreadores no miden los últimos 10-15 cm de columna de agua. La concentración de sedimentos en esas zonas se estima entre el 5-15% de la concentración. Este valor es añadido a la carga suspendida para obtener el total. Antes de comparar la producción de sedimentos de un año con el otro, los datos del periodo de registro deben ser examinados homogéneamente. Algunos ajustes aguas arriba de los embalses deben ser realizados antes de establecer la correlación de la producción de sedimentos y el escurrimiento (USACE, 1995).

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

Método empleado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés). Calcula la producción de sedimentos una vez que se han medido los valores de concentración de sedimentos diario o por hora. Consiste en sumar el promedio de la producción de sedimentos descargada, estimando así periodos que van de horas a años (USACE, 1995).

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

El método consiste en una simple integración de la curva de duración de flujo con la curva de descarga de sedimentos en un punto a la salida de la cuenca. Es el método más usado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (USACE, 1995).

La curva de duración de flujo relaciona el gasto medio de descarga de líquido con la duración adimensional en un punto de control, mientras que la curva de descarga de sedimentos relaciona el gasto líquido con la producción de sedimentos diaria. Si se tienen estos registros en un mismo punto de aforo, se puede estimar la cantidad de material sólido que pasará durante un año al obtener la cantidad de sedimentos promedio diaria (USACE, 1995).

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

En algunos lugares se llevan a cabo batimetrías periódicamente. La cantidad de sedimento depositado se puede calcular por sustracción entre batimetrías. En E.U.A. los resultados de todas las presas y represas son publicados y actualizados cada 5 años. Por otro lado, si se conoce el volumen de agua que llega al embalse para un cierto periodo es posible comparar gráficamente los sedimentos depositados con el volumen de agua generado para un periodo común y observar como ha ido evolucionando (USACE, 1995).

Los sedimentos depositados en el embalse están relacionados con la producción de sedimentos en una cuenca por medio del concepto de eficiencia de atrapamiento de sedimentos. Este expresa el porcentaje de sedimentos que son retenidos por la presa. Se obtiene de la diferencia entre la cantidad de sedimentos que entra y la que sale del embalse, dividido entre la cantidad de sedimentos que entra al vaso (Ecuación 3- 2). Una de las metodologías más aceptadas para calcular la eficiencia de atrapamiento de

sedimentos es la de Brune (1953). Entonces la producción de sedimentos que entra al vaso ( $S_a$ ) será el volumen de material azolvado ( $S_R$ ) entre la eficiencia de atrapamiento de sedimentos ( $T_e$ ) (Ecuación 3- 3) (USACE, 1995):

$$T_e = \frac{q_{s_{in}} - q_{s_{out}}}{q_{s_{in}}} \quad \text{Ecuación 3- 2}$$

$T_e$ : Eficiencia de atrapamiento

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

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

$$S_a = \frac{S_R}{T_e} \quad \text{Ecuación 3- 3}$$

$S_R$ : Material depositado en el vaso.

$S_a$ : Producción de sedimentos que entra al vaso.

Para efectos de diseño se recurre a la presa más cercana con características climatológicas, topográficas, de uso del suelo y de superficie de la cuenca similares. Entonces se tiene un aproximado de los sedimentos que se pueden producir. Para algunas agencias es de los mejores métodos de estimación de producción de sedimentos (USACE, 1995).

Comparar la concentración de sedimentos de dos o más puntos sobre una misma corriente puede ser engañoso, debido a que la velocidad del flujo será diferente alterando la concentración. Para este caso se recomienda comparar la producción de sedimentos acumulada para un mismo periodo, por ejemplo un año (USACE, 1995).

El Servicio de Conservación de Suelos de E.U.A (*Soil Conservation Service of the U.S.A.*, SCS) propone algunas recomendaciones para transferir datos de una cuenca a otra (Ecuación 3- 4). Asimismo, recomienda que el área de una cuenca en estudio esté entre 0.50 y 2 veces la superficie de la cuenca de donde se tomarán los datos. De ninguna manera se transferirán datos si la cuenca es menor que 0.1 veces la original o mayor de 10 veces (USACE, 1995).

$$Y_e = Y_m \left( \frac{A_e}{A_m} \right)^{0.80} \quad \text{Ecuación 3- 4}$$

$Y_e$ : producción de sedimentos anual estimada para la cuenca de estudio.

$Y_m$ : producción de sedimentos anual medida de la cuenca a transferir.

$A_e$ : área de la cuenca en estudio.

$A_m$ : área de la cuenca medida a transferir.

Estas recomendaciones no aplican para zonas montañosas ni para cuencas cuyas corrientes aporten un porcentaje considerable de producción de sedimentos (USACE, 1995).

### 3.1.2 Métodos de modelación matemática

Los métodos con base en modelación matemáticas se dividen en: métodos empíricos o de agrupación de variables, métodos estocásticos y métodos de simulación de procesos físicos. De los cuales, por su simplicidad los más empleados son los métodos empíricos, pero los que arrojan resultados más acertados son los métodos de procesos físicos.

#### 3.1.2.1 Métodos empíricos o de agrupación de variables

A continuación se describen algunos de los métodos empíricos más populares: método de Dendy y Bolton, método del Comité Interinstitucional del Pacífico Suroeste (PSIAC, por sus siglas en inglés), método Tatum para el sur de California, ecuación de Anderson, ecuación de Branson, ecuación de Flaxman, ecuación universal de pérdida de suelo (USLE, por sus siglas en inglés), ecuación universal de pérdida de suelo modificada (MUSLE, por sus siglas en inglés), USLE-M, ecuación universal de pérdida de suelo revisada (RUSLE, por sus siglas en inglés), 2º versión de la ecuación universal de pérdida de suelo revisada (RUSLE2), tasa de descarga de sedimentos y la eficiencia de atrapamiento de sedimentos.

##### 3.1.2.1.1 Método de Dendy y Bolton

Dendy y Bolton desarrollaron una ecuación con datos de alrededor de 800 embalses en los E.U.A. para estimar la producción de sedimentos en cuencas (Ecuación 3- 5 y Ecuación 3- 6). Las cuencas que emplearon van de 2.5 a 75,000 km<sup>2</sup> de superficie, con precipitaciones menores a 2 pulg. (Walling *et al.*, 1985). La ecuación depende de la superficie y el escurrimiento medio anual:

$$\text{Si } Q < 2 \text{ pulg. : } \quad S = 1280 Q^{0.46} (1.43 - 0.26 \log A) \quad \text{Ecuación 3- 5}$$

$$\text{Si } Q \geq 2 \text{ pulg. : } \quad S = 1958 e^{0.055Q} (1.43 - 0.26 \log A) \quad \text{Ecuación 3- 6}$$

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

Q: escurrimiento medio anual (inch)

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

La ecuación presenta buenos resultados en cuencas grandes y no montañosas (USACE, 1995).

##### 3.1.2.1.2 Método del Comité Interinstitucional del Pacífico Suroeste (PSIAC)

Hacia 1968 el PSIAC diseñó un método con la finalidad de ayudar a la planeación de estructuras hidráulicas, dependiendo de 9 parámetros, los cuales afectan la producción de sedimentos en cuencas: uso del suelo, escurrimientos, erosión-transporte-depósito, geología, topografía, erosión de las zonas altas, suelo, superficie del suelo y el clima (Simons y Sentürk, 1992). El método fue diseñado para cuencas del Oeste de los E.U.A. con superficies mayores a 10 mi<sup>2</sup>.

Los valores numéricos de cada factor van de 25 a -10, los cuales se suman. La producción de sedimentos se obtiene al comparar el total de la suma de los valores de Tabla 3- 1, los cuales varían entre 1.2 y 18.3 Ton/ha/año. El método ha sido comparado con mediciones de campo, obteniendo resultados satisfactorios. El método es capaz de evaluar cambios en la producción de sedimentos debido al uso del suelo (USACE, 1995).

Johnson y Gebhard propusieron una serie de relaciones para estimar cada factor de forma objetiva (Walling *et al.*, 1985).

**Tabla 3- 1. Valores numéricos del PSIAC respecto a la producción de sedimentos.**

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

### 3.1.2.1.3 Método Tatum para el Sur de California

El método Tatum es usado para estimar la producción de sedimentos dentro de regiones áridas y montañosas de California. Los cálculos se llevan a cabo a partir de nomogramas empleando una ecuación con factores de ajuste para tamaño, forma y pendiente de la superficie de drenado, precipitación en 3 horas, el porcentaje de superficie incendiada y los años transcurridos entre el incendio y el flujo (USACE, 1995).

### 3.1.2.1.4 Ecuación de Anderson

El método se desarrolló mediante el estudio de la respuesta de la carga suspendida de sedimentos descargada de cuencas de superficie variada. Estas respuestas fueron empleadas para estimar la contribución de descarga de sedimentos de cada zona de la cuenca con diferentes valores. La zona de estudio consistió en las montañas y valles del oeste de Oregon. Se contó con los registros de carga suspendida de sedimentos con una anterioridad de 1-3 años para 29 cauces (PSIAC, 1974).

El estudio incluyó el cálculo del promedio anual de la descarga de sedimentos suspendidos, relacionando esta variable con las características de la cuenca por medio de un análisis de multi-regresión. Incluye también la predicción de la diferencia entre la erosión actual con la erosión potencial considerando variaciones en el uso del suelo (Ecuación 3- 7 y Ecuación 3- 8) (PSIAC, 1974).

$$\begin{aligned} \text{Log } ss = & -3.721 + 0.116 \text{Log } A + 1.673 \text{Log } FQp + 1.244 \text{Log } MAq \\ & + 0.401 \text{Log } S + 0.0486 SC + 0.482 S/A + 0.0280 BC \\ & - 0.0036 OC + 0.942 R + 0.0086 RC \end{aligned}$$

**Ecuación 3- 7**

$$SS - SS_f = -1.639 + 0.240C + 0.00514EB$$

Ecuación 3- 8

Donde:

- ss: promedio anual de la carga de sedimentos suspendidos (decenas de Ton/mi<sup>2</sup>/año)  
SS: promedio anual de la carga de sedimentos suspendidos (miles de Ton/año)  
SS<sub>f</sub>: promedio anual de la carga de sedimentos suspendidos de zonas forestadas (miles de Ton/año)  
A: área de la cuenca (mi<sup>2</sup>)  
FQ<sub>p</sub>: descarga pico promedio del mes con mayor descarga, dividido entre la descarga promedio anual.  
MA<sub>q</sub>: escurrimiento medio anual (ft<sup>3</sup>/mi<sup>2</sup>)  
S: pendiente de las corrientes.  
SC: porcentaje de limo y arcilla. Porcentaje de partículas de diámetro menor que 0.05mm  
S/A: tasa de acumulación de la superficie (cm<sup>2</sup>/gm pct)  
BC: porcentaje de la cuenca cultivada de granos.  
OC: porcentaje de la cuenca cultivada de no granos.  
R: porcentaje de la cuenca que cubren las carreteras.  
RC: porcentaje de la cuenca talada en los últimos 10 años.  
C: área de la cuenca sin vegetación y cultivada (mi<sup>2</sup>).  
Eb: longitud del cause principal (ft).

Se encontraron resultados satisfactorios entre los sedimentos calculados y observados para la producción de altas y bajas cantidades de sedimentos.

#### 3.1.2.1.5 Ecuación de Branson

Branson investigó la relación entre las variables geomorfológicas, cobertura de la cuenca y mediciones hidrológicas para 17 cuencas cercanas a Grand Junction, Colorado. Para su análisis se utilizaron 6 años de mediciones de cobertura vegetal y 15 años de registros hidrológicos. Se desarrollo una ecuación de producción de sedimentos utilizando un análisis de regresión estadística (Ecuación 3- 9) (PSIAC, 1974):

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

Ecuación 3- 9

- $\hat{Y}$ : producción de sedimentos promedio anual estimada (acre ft/mi<sup>2</sup>).  
 $X_1$ : tasa del relieve.  
 $X_2$ : porcentaje de suelo sin vegetación en la cuenca.

El coeficiente de correlación múltiple es 0.86 significativa al 1% de nivel de probabilidad. Las variables geomorfológicas que se consideraron en el análisis incluyeron la tasa del relieve, ángulo de la intersección del cauce, la pendiente principal, la densidad de drenaje y la forma de la cuenca (PSIAC, 1974).

#### 3.1.2.1.6 Ecuación de Flaxman

Presenta una ecuación (Ecuación 3- 10) la cual fue obtenida a través de un análisis de regresión múltiple para estimar la producción de sedimentos media anual proveniente de la erosión laminar.

Es importante destacar que las variaciones en la generación de sedimentos se explican con datos obtenidos de mediciones de cuatro características de la cuenca. Los parámetros empleados son el factor climático como expresión indirecta de la cobertura

vegetal, la pendiente media de la cuenca y dos factores del suelo. Con la ecuación se obtiene una buena correlación entre la producción de sedimentos calculada y la observada excepto cuando las tasas de sedimentos son bajas. Una mejor correlación se puede obtener al ajustar el factor de cobertura vegetal por medio de la experiencia, incrementando las muestras de suelo y al calcular la producción de sedimentos para largo plazo (PSIAC, 1974):

$$\begin{aligned} \text{Log}(Y + 100) = & 524.372 - 270.565 \text{Log}(X_1 + 100) + \\ & + 6.417 \text{Log}(X_2 + 100) - 1.702 \text{Log}(X_3 + 100) + \\ & + 4.033 \text{Log}(X_4 + 100) + 0.992 \text{Log}(X_5 + 100) \end{aligned} \quad \text{Ecuación 3- 10}$$

Donde:

- Y: producción de sedimentos media anual (Ton/mi<sup>2</sup>)
- X1: tasa de la precipitación media anual y la temperatura promedio anual (inch/°F).
- X2: pendiente de la cuenca.
- X3: porcentaje del diámetro de las partículas del suelo mayores que 1.00 mm.
- X4: porcentaje de acumulación del suelo, porcentaje del diámetro de las partículas menores que 0.002 mm.
- X5: 50% de probabilidad de la descarga pico (ft/s/mi<sup>2</sup>)

### 3.1.2.1.7 Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) es el modelo matemático mas usado en la estimación de la pérdida de suelo debido a erosión laminar y en canalillos. La ecuación ha sido empleada especialmente en los E.U.A. desde 1959. Debido a que la USLE fue desarrollada para una zona específica mediante el análisis estadístico de las pérdidas de suelo por erosión en lotes experimentales, las correlaciones matemáticas presentan niveles aceptables de pronóstico para dicha zona, para emplear este modelo en otra área se debe de emplear con cautela (Figuroa *et al.*, 1991). Sin embargo en una zona diferente puede conducir a errores importantes.

#### *Antecedentes*

Los primeros registros de estudios científicos en materia de erosión los realizó Wollny un edafólogo alemán entre 1877 y 1895 según López Cárdenas (2003) y Colotti (2004). Condujo extensas investigaciones en pequeñas parcelas observando los efectos de la lluvia y el deterioro de la estructura del suelo, y la relación entre la pendiente y la erosión. En 1907 el Departamento de Agricultura de E.U.A. comenzó sus primeras investigaciones gracias a una política oficial de conservación del suelo. Hacia 1915 el Servicio Forestal de los E.U.A. llevó acabo sus primeros experimentos en Utah, mientras que Miller realizó los suyos en Missouri en 1917 (Hudson, 1982).

En 1928 el Congreso de E.U.A impulsó la investigación en la materia, por lo que H. Benett y L.A. Jones establecen una red de 10 parcelas experimentales entre 1928 y 1933. La extensión de cada parcela fue de 22 m de largo y 1.83m de ancho, medidas que

se conocen como estándar en la actualidad (Colotti, 2004). Hacia 1935 se creó el Servicio de Conservación de Suelos de los E.U.A (SCS, por sus siglas en inglés), quienes desarrollaron conocimiento de los procesos erosivos. En 1936 Cook describió la erosión del suelo, relacionándola con la erosionabilidad del suelo, potencial erosivo de la lluvia asociado a la pendiente y a la cobertura vegetal (López Cárdenas, 2003). Zingg en 1940 propone la primera ecuación (Ecuación 3- 11) para evaluar la erosión ( $A$ ), la cual es directamente proporcional a la topografía del terreno (Hudson, 1982):

$$A = C S^{1.4} L^{0.6} \quad \text{Ecuación 3- 11}$$

Donde:

- A: pérdida de suelo por unidad de área
- C: constante
- S: pendiente del terreno (%)
- L: longitud de la pendiente (ft)

A pesar de que Wollny y otros habían inferido la importancia del efecto de la erosión debido a las gotas de lluvia, no fue hasta 1940 cuando Laws realizó el primer estudio detallado al respecto. Para 1944 Ellison llevó a cabo el primer análisis mecánico de las gotas de lluvia sobre el suelo, siendo este elemento el factor de peso en la erosión hídrica (Hudson, 1982).

Hacia 1941 Smith (Ecuación 3- 12) añade un factor referente al cultivo y a las prácticas de conservación a la ecuación de Zingg (Ecuación 3- 11), además del concepto de límite de pérdida de suelo (Wischmeier y Smith, 1965). Esto por medio de la tasa de pérdida de suelo entre un suelo con prácticas de conservación y otro sin prácticas de conservación ( $P$ ) (Ecuación 3- 12):

$$A = C S^{1.4} L^{0.6} P \quad \text{Ecuación 3- 12}$$

Para 1947 Browning incorpora un factor de erosionabilidad del suelo. Smith y Whitt presentan un método racional para estimar la erosión similar a la posterior *USLE*, sin incluir el factor de erosividad de la lluvia (López Cárdenas, 2003). Este factor lo incluye Musgrave por primera vez en su ecuación en 1947 (Ecuación 3- 13), también conocida como la “Ecuación de Prácticas-Pendiente”, ya que la pendiente y las prácticas de cultivo eran las variables principales de la expresión (Hudson, 1982):

$$A_s = I^{1.75} K L^{0.35} S^{1.35} C_g \quad \text{Ecuación 3- 13}$$

Donde:

- $A_s$ : pérdida anual de suelo por unidad de área.
- $I$ : intensidad máxima de una tormenta de duración de 30 min. para un periodo de retorno de 2 años.
- $K$ : valor numérico proporcional a la erosión del suelo.
- $L$ : longitud de de la pendiente.
- $S$ : pendiente.
- $C_g$ : cubierta vegetal.



Musgrave aplicó uno de los primeros métodos de regresión, el cual consiste en buscar una relación entre las características de la cuenca y su respuesta a la producción de sedimentos (Simons y Sentürk, 1992).

En 1954 se creó el Centro de Recolección de Datos de Escurrimiento y Pérdida de Suelos (*National Runoff and Soil Loss Data Center, NRSL*) del Servicio de Investigación de Agricultura de los E.U.A. (*Agricultural Research Service, ARS*), estableciéndose en la Universidad de Purdue. Esto con la idea de mejorar la ecuación de Musgrave, es decir generalizarla. Se analizaron datos que se habían obtenido desde 1930, contando con 10,000 parcelas-año, en los estados del Cinturón de Maíz (Iowa, Indiana, Illinois, Ohio, Dakota del Sur, Nebraska, Kansas, Minnesota, Wisconsin, Michigan, Missouri y Kentucky). Lo que contribuyó enormemente al desarrollo de las ecuaciones de pérdida de suelo (Wischmeier y Smith, 1965).

Para 1958 Wischmeier propone una manera de estimar el factor de erosividad debido a la lluvia a partir de la energía cinética y la intensidad de la lluvia (Colotti, 2004). Mientras que en 1959 el mismo autor Wischmeier en conjunto con Smith luego de combinar la erosividad de la precipitación ( $R$ ), la erosionabilidad del suelo ( $K$ ), la topografía ( $LS$ ), la cobertura vegetal del terreno ( $C$ ) y las prácticas de conservación de suelo ( $P$ ) de los datos del NRSL llegaron al desarrollo de la Ecuación Universal del Pérdida de Suelo (*USLE*) (Ecuación 3- 14). La cual expresa la cantidad de pérdida de suelo por peso por unidad de área ( $A$ ) (Wischmeier y Smith, 1965).

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

**Ecuación 3- 14**

La ecuación se le denominó erróneamente universal puesto que integraba los factores para toda la región del Cinturón de Maíz de los E.U.A, generalizada para el Este de las Montañas Rocallosas. Debido al éxito de la ecuación se mejoraron los factores para 1965 (Wischmeier y Smith, 1965).

La ecuación fue revisada en 1978 por parte de los mismos autores, donde realizaron ajustes en la forma de obtener los parámetros. Trece años pasaron desde 1965, por lo que contaron con un mayor número de registros y mejores herramientas de cálculo.

### ***Descripción***

La USLE se desarrolló como un método para predecir la pérdida de suelo anual promedio para erosión laminar y canalillos. Con los parámetros disponibles, se pueden diseñar alternativas de manejo y de cultivos para una región dada para (Figuroa *et al.*, 1991):

1. Predecir pérdida anual de suelo promedio de un terreno.
2. Seleccionar sistemas de manejo de cultivos y prácticas de conservación.
3. Predecir los cambios en pérdida de suelo que ocurrirán al darse un cambio en prácticas de cultivo.
4. Estimar la producción de sedimentos de una cuenca.

La expresión general de la USLE es la Ecuación 3- 14, depende de seis factores. Cada factor describe un elemento que interviene en la pérdida de suelo y para cada uno existe una metodología para su cálculo, descritos a continuación.

**Factor de erosividad debido a lluvia (R)**

Una de las mayores diferencias entre la USLE y sus antecesoras es la incorporación del factor *R* (Ecuación 3- 15) de una manera precisa que varía dependiendo de la lámina de lluvia que se tenga por tormenta y su intensidad. Las investigaciones de Wischmeir mostraron que cuando varía la lluvia y el resto de los factores (*K*, *L*, *S*, *C* y *P*) permanecen constantes, la pérdida de suelo es directamente proporcional a la energía cinética de la tormenta (*E*) (Ecuación 3- 16) multiplicada por su intensidad máxima en 30 min (*I30*) (Wischmeier y Smith, 1978).

$$R = \sum_{i=1}^m EI_{30} \tag{Ecuación 3- 15}$$

$$E = \sum_{j=1}^n e_j p_j \tag{Ecuación 3- 16}$$

$$e_j = 0.119 + 0.0873 \log_{10} I_j \quad I_j < 76 \text{ mm/hr} \tag{Ecuación 3- 17}$$

$$e_j = 0.283 \quad I_j \geq 76 \text{ mm/hr} \tag{Ecuación 3- 18}$$

Donde:

- R*: factor de erosividad de la lluvia (MJ mm / ha hr año).
- p<sub>j</sub>*: lámina de lluvia en el intervalo de tiempo *j* (mm).
- I<sub>j</sub>*: intensidad de la lluvia en el intervalo *j* (mm/hr).
- e<sub>j</sub>*: energía cinética para el intervalo de tiempo *j* (MJ/ha mm).
- n*: número de intervalos de tiempo *j*.
- m*: número de tormentas en el año.

**Factor de erosionabilidad de suelo (K)**

El factor de erosionabilidad de suelo (*K*) es determinado experimentalmente. Representa la susceptibilidad del suelo a ser erosionado y se define como la tasa de pérdida de suelo por unidad adicional de *EI30*, cuando *L*, *S*, *C* y *P* permanecen constantes y son iguales a 1. *K* se expresa en T ha hr / ha MJ mm. Experimentalmente se puede evaluar si se conocen el resto de los factores y se resuelve la Ecuación 3- 19:

$$K = \frac{A}{RLSCP} \tag{Ecuación 3- 19}$$

Originalmente Wischmeir y Smith (1965) proponen valores de *K* para tipos de suelos específicos, mismos que habían experimentado y correlacionado. Posteriormente

en 1971 Wischmeir propone un nomograma (Figura 3- 1) (Wischmeir y Smith, 1978) que permite evaluar el factor usando cinco parámetros:

1. Porcentaje de limos y arenas muy finas, diámetro de 0.002mm-0.10mm.
2. Porcentaje de arena, partículas de diámetro 0.10-2.0mm.
3. Porcentaje de materia orgánica.
4. Estructura del suelo.
5. Permeabilidad.

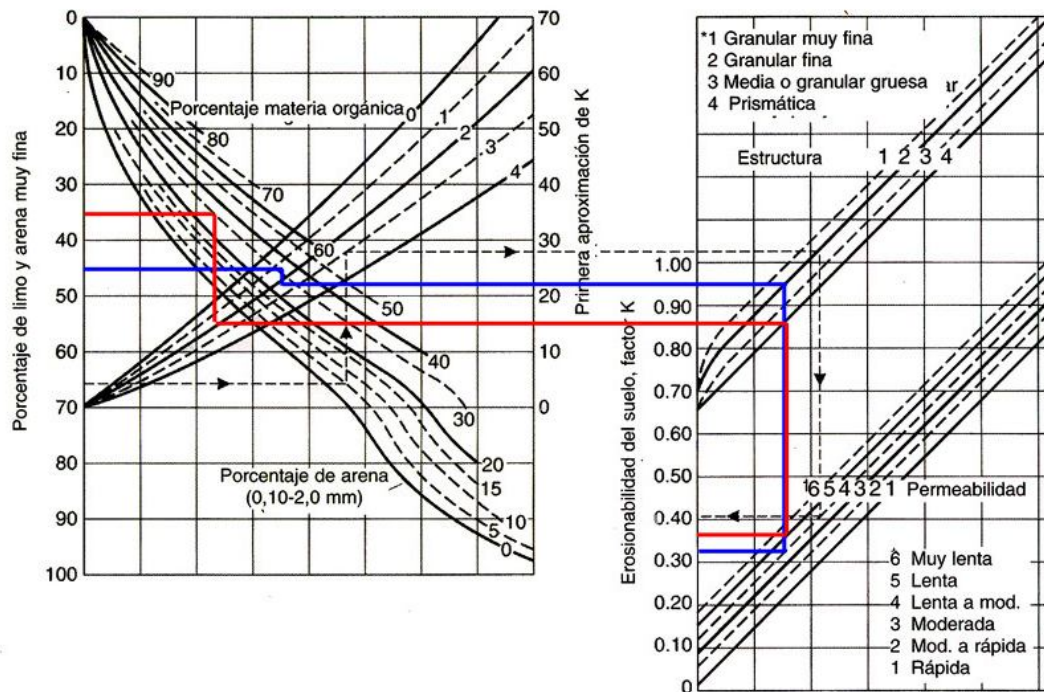


Figura 3- 1. Nomograma del factor K (Figuroa *et al.*, 1991)

En 1980 la FAO propone calcular el  $K$  a partir de la clasificación FAO/UNESCO de suelos, dividiendo los suelos por textura superficial y unidades de suelo (Tabla 3- 2. FAO, 1980; Figuroa *et al.*, 1991). Cuando no se cuenta con todas las propiedades del suelo y se cuenta con la edafología de una zona conviene emplear el método de la FAO.

### **Factor topográfico (LS)**

Tanto la longitud como la inclinación de la pendiente de un terreno afectan la tasa de erosión hídrica. Las dos variables han sido evaluadas de forma separada. Se representan en la USLE con  $L$  para la longitud del terreno con la misma pendiente y  $S$  para la pendiente de forma adimensional. Debido a que sus ecuaciones se encuentran interrelacionadas se trata como el factor  $LS$  (Wischmeier y Smith, 1978).

ORDEN	TEXTURA			ORDEN	TEXTURA		
	G	M	F		G	M	F
A	0.026	0.040	0.013	Lo	0.026	0.040	0.013
Af	0.013	0.020	0.007	Lp	0.053	0.079	0.026
Ag	0.026	0.040	0.013	Lv	0.053	0.079	0.026
Ah	0.013	0.020	0.007	M(a,g)	0.026	0.040	0.013
Ao	0.026	0.040	0.013	N(d,e,h)	0.013	0.020	0.007
Ap	0.053	0.079	0.026	O(d,e,x)	0.013	0.020	0.007
B	0.026	0.040	0.013	P	0.053	0.079	0.026
Bc	0.026	0.040	0.013	Pf	0.053	0.079	0.026
Bd	0.026	0.040	0.013	Pg	0.053	0.079	0.026
Be	0.026	0.040	0.013	Pb	0.026	0.040	0.013
Bf	0.013	0.020	0.007	Pl	0.026	0.040	0.013
Bg	0.026	0.040	0.013	Po	0.053	0.079	0.026
Bh	0.013	0.020	0.007	Pp	0.053	0.079	0.026
BK	0.026	0.040	0.013	Q(a,c,f,l)	0.013	0.020	0.007
Bv	0.053	0.079	0.026	R	0.026	0.040	0.013
Bx	0.053	0.079	0.026	Re	0.026	0.040	0.013
C(g,h,k,l)	0.013	0.020	0.007	Rc	0.013	0.020	0.007
D(d,e,g)	0.053	0.079	0.026	Rd	0.026	0.040	0.013
E	0.013	0.020	0.007	Rx	0.053	0.079	0.026
F(a,h,o,p,r,x)	0.013	0.020	0.007	S	0.053	0.079	0.026
G	0.026	0.040	0.013	Sg	0.053	0.079	0.026
Gc	0.013	0.020	0.007	Sm	0.026	0.040	0.013
Gd	0.026	0.040	0.013	So	0.053	0.079	0.026
Ge	0.026	0.040	0.013	T	0.026	0.040	0.013
Gh	0.013	0.020	0.007	Th	0.013	0.020	0.007
Gm	0.013	0.020	0.007	Tm	0.013	0.020	0.007
Gp	0.053	0.079	0.026	To	0.026	0.040	0.013
Gx	0.053	0.079	0.026	Tv	0.026	0.040	0.013
Gv	0.053	0.079	0.026	U	0.013	0.020	0.007
H(c,g,h,l)	0.013	0.020	0.007	V(c,p)	0.053	0.079	0.026
I	0.013	0.020	0.007	W	0.053	0.079	0.026
J	0.026	0.040	0.013	Wd	0.053	0.079	0.026
Jc	0.013	0.020	0.007	We	0.053	0.079	0.026
Jd	0.026	0.040	0.013	Wh	0.026	0.040	0.013
Je	0.026	0.040	0.013	Wm	0.026	0.040	0.013
Ji	0.053	0.079	0.026	Ws	0.053	0.079	0.026
Jp	0.053	0.079	0.026	Wx	0.053	0.079	0.026
K(h,k,l)	0.026	0.040	0.013	X(h,k,l,y)	0.053	0.079	0.026
L	0.026	0.040	0.013	Y(h,k,l,y,t)	0.053	0.079	0.026
La	0.053	0.079	0.026	Z	0.026	0.040	0.013
Lc	0.026	0.040	0.013	Zg	0.026	0.040	0.013
Lf	0.013	0.020	0.007	Zm	0.013	0.020	0.007
Lg	0.026	0.040	0.013	Zo	0.026	0.040	0.013
Lk	0.026	0.040	0.013	Zt	0.053	0.079	0.026

Donde: La textura se clasifica en G = Gruesa; M = Media; F = Fina

Tabla 3- 2. Valor del factor *K* estimado en función de la unidad de suelo y su textura (Figuroa *et al.*, 1991)

La longitud de la pendiente (*L*) se define como la distancia desde donde se origina el flujo superficial hasta el punto donde la pendiente decrece, propiciando el depósito de partículas, o cuando el escurrimiento llega a un cauce definido que forma parte de una red de flujo. La pérdida de suelo generalmente aumenta por unidad de área cuando se incrementa *L*, ya que el flujo superficial es directamente proporcional a esta y por ende desprende un mayor número de partículas. El factor *L* se expresa como (Ecuación 3- 20) (Wischmeier y Smith, 1978):

$$L = \left( \frac{\lambda}{22.1} \right)^m \quad \text{Ecuación 3- 20}$$

La Ecuación 3- 20 expresa que la pérdida de suelo es proporcional a la relación entre la longitud de la pendiente ( $\lambda$ ) y la longitud de una parcela experimental (22.1 m) elevado a una potencia ( $m$ ). Foster *et al.* (2003) proponen una forma para estimar  $m$  (Ecuación 3- 21), relacionando la erosión entre canalillos (debida al impacto de las gotas de lluvia) y en canalillos (causado por el flujo superficial) (Figuroa *et al.*, 1991):

$$m = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad \text{Ecuación 3- 21}$$

Para evaluar  $\beta$ , McCool *et al.* proponen la Ecuación 3- 22, donde relacionan la erosión entre y en canalillos con el ángulo de la pendiente ( $\theta$ ):

$$\beta = \frac{\text{sen } \theta / 0.0896}{3(\text{sen } \theta)^{0.8} + 0.56} \quad \text{Ecuación 3- 22}$$

Generalmente el escurrimiento sobre un terreno cultivado es directamente proporcional a la pendiente del terreno, aunque también pueden afectar otros parámetros, mientras que la pérdida de suelo crece mucho más rápido que el escurrimiento conforme se incrementa la pendiente. El factor de erosibilidad debido a la pendiente ( $S$ ) se encuentra en función del ángulo de la pendiente ( $\theta$ ) (Ecuación 3- 23) (Wischmeir y Smith, 1978):

$$S = 65.41 \text{sen}^2 \theta + 4.56 \text{sen } \theta + 0.065 \quad \text{Ecuación 3- 23}$$

Para 1987 buscando mejorar el factor  $S$ , McCool *et al.* propusieron calcular el factor diferenciando entre  $\theta < 5.14^\circ$  y  $\theta \geq 5.14^\circ$  con las Ecuación 3- 24 y Ecuación 3- 25 (Figuroa *et al.*, 1991). Esto permitió aplicar la ecuación en pendientes con mayor inclinación:

$$S = 10.8 \text{sen } \theta + 0.03 \quad \theta < 5.14^\circ \quad \text{Ecuación 3- 24}$$

$$S = 16.8 \text{sen } \theta - 0.50 \quad \theta \geq 5.14^\circ \quad \text{Ecuación 3- 25}$$

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

El factor de erosibilidad debido a la cobertura vegetal ( $C$ ) representa la relación entre la pérdida de suelo de un terreno cultivado y la pérdida de suelo de un terreno sin ningún cultivo. La pérdida de suelo que ocurre cuando no hay ningún cultivo y el suelo

se encuentra desnudo se obtiene del producto de  $RKLS$ , es decir  $C=I$ . La erosión de un terreno cultivado es generalmente menor, qué tan reducida será la erosión depende de la combinación de la cobertura vegetal. También influye la etapa de crecimiento en que se encuentre el cultivo, entonces  $C$  varía con el tiempo. Además al estar ligado el desarrollo de los cultivos con la precipitación, entonces  $C$  varía según su ubicación (Wischmeier y Smith, 1978).

A fin de obtener el valor de  $C$  para una zona en particular es necesario conocer cómo se distribuye la lluvia a través del año. Además se debe saber cuánta protección a la erosión ofrecen los cultivos, los residuos de cultivo y las prácticas de cultivo cuando se presenten tormentas (Figueroa *et al.*, 1991).

Para conocer el valor de  $C$  anual se cuenta con porcentajes de cobertura vegetal para cada tipo de cultivo bajo condiciones específicas de su manejo. Para cada etapa de cultivo se asigna un porcentaje de cobertura que se afecta por el porcentaje acumulado del índice de erosividad  $R$ . El acumulado de este producto arroja el valor de  $C$  promedio anual. Una descripción más detallada se puede encontrar en: Wischemeier y Smith, 1978; Figueroa *et al.*, 1991; y López Cárdenas, 2003.

#### ***Factor de prácticas de conservación (P)***

Por definición el factor  $P$  de la USLE representa la relación de la pérdida de suelo bajo una práctica de conservación específica respecto a la pérdida de suelo de la misma zona sin ningún tipo de práctica (Wischmeier y Smith, 1978). Existen tres tipos principales de prácticas de conservación (Figueroa *et al.* 1991):

- a) **Surcado al contorno.** Consiste en orientar el trazo de los cultivos paralelos a las curvas de nivel del terreno.
- b) **Fajas al contorno.** Es una práctica en la que se alternan fajas de praderas con fajas de cultivos en hilera o de granos pequeños. Esta práctica es más efectiva que el surcado al contorno. Tiene la ventaja de que al incluirse cultivos tupidos permanentes en rotación se tiene un valor más bajo de  $C$ . Entonces, el suelo erosionado de las fajas bajo cultivo es retenido al entrar a la faja con vegetación permanente.
- c) **Terrazas.** Estas reducen la erosión laminar y de canalillos en el intervalo de la terraza al dividir la pendiente en longitudes menores. Por otro lado el depósito de sedimentos a lo largo de la terraza remueve mucho el sedimento erosionado en el intervalo, en particular si la terraza esta a nivel con los extremos cerrados.

Para estimar el valor de  $P$  se puede recurrir a las siguientes referencias bibliográficas: Wischmeier y Smith, 1978; Figueroa *et al.*, 1991; López Cárdenas, 2003; entre otros.

### ***Desventajas***

La USLE tiene algunas limitantes, por lo que no es tan universal como su nombre lo indica. Fue desarrollada con mediciones en el centro-este de los E.U.A. correspondientes a un tipo específico de precipitación, vegetación y topografía, por lo que su aplicación en otros lugares resulta poco conveniente. Además para su formulación se utilizaron cientos de datos de medición, los que son difíciles de encontrar en otra parte, especialmente si no se cuenta con la infraestructura. Por otro lado, no fue diseñada para calcular la erosión debido a deslizamientos de terreno y accidentes topográficos (barrancas), tampoco incluye las pérdidas o ganancias de suelo en las corrientes o almacenamientos de agua. Estos últimos se evalúan por separado. La ecuación es válida para cuando las partículas de suelo son menores a 1 mm, lo que la invalida para cuando se trata de cuencas grandes, complejas, heterogéneas y con cauces (Simons y Sentürk, 1992).

#### ***3.1.2.1.8 Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE)***

Siendo válido el planteamiento de la USLE y buscando corregir las limitaciones que tiene, en 1972 Williams y Berndt propusieron la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE, por sus siglas en inglés). Esta determina la producción de sedimentos basada en tormentas individuales, en lugar de emplear un factor para la energía de precipitación ( $R$ ) introduce un factor para los escurrimientos, por lo que es más aplicable a zonas áridas y semiáridas (Ecuación 3- 26):

$$Y_s = a(Q_v q_p)^\beta K L S C P \quad \text{Ecuación 3- 26}$$

Donde:

$Y_s$ : producción de sedimentos en (Ton/tormenta).

$Q_v$ : volumen de escurrimiento (acres-ft).

$q_p$ : gasto pico en (ft<sup>3</sup>/s).

$a$  y  $\beta$ : coeficientes.

También es posible determinar la cantidad de sedimentos producidos por año, con solo variar el periodo de retorno. Los resultados se expresan en términos de concentración (ppm).

### ***Desventajas***

Las ecuaciones anteriores no consideran el depósito de sedimentos en el trayecto ni la erosión en el cauce. Por lo que se recurre al concepto de tasa de descarga ( $DR$ ). Los métodos de la USLE, MUSLE y PSIAC predicen la carga de lavado, pero olvidan la

carga de fondo para lo que se emplea la teoría de transporte de sedimentos. Entonces para determinar la carga total se debe considerar tanto la carga de fondo como la de lavado. Para la de fondo se emplean las ecuaciones de Meyer-Peter y Müller para carga de fondo por el fondo y la integración de la ecuación de Einstein para la carga suspendida, donde se consideran las fracciones de tamaño del material.

Existen otros modelos de regresión similares a los anteriores, su planteamiento es más o menos parecido así como sus limitaciones, ya que dependen de la disponibilidad de datos.

Por otro lado Meyer y Monke estudiaron las relaciones entre la erosión del escurrimiento y algunos factores como la pendiente, la longitud del cauce y el diámetro de las partículas. Mientras que Kilinc y Richardson estudiaron los mecanismos de erosión del suelo por medio de simulación de lluvia, emplearon parámetros como el número de Reynolds, la pendiente, el poder de la corriente y descarga (Simons y Sentürk, 1992).

### 3.1.2.1.9 USLE-M: Una versión modificada de la USLE

Kinnell y Risse (1998) propusieron una modificación a la USLE de Wischmeir (1965 y 1978). Una de las modificaciones principales que sufre la ecuación radica en el factor de erosividad de lluvia ( $R$ ), al que se le añade una tasa de escurrimiento ( $Q_R$ ). Debido a que la USLE es un modelo empírico, modificar  $R$  tiene consecuencias en el factor de erosionabilidad del suelo ( $K$ ) y de cobertura vegetal ( $C$ ), ya que las unidades de  $K$  están referidas a las de  $R$  y  $C$  depende de  $R$ . Por ende la USLE-M se escribe como (Ecuación 3- 27):

$$A = R_{UM} K_{UM} L S C_{UM} P_{UM} \quad \text{Ecuación 3- 27}$$

$$R_{UM} = Q_R EI_{30} \quad \text{Ecuación 3- 28}$$

$$Q_R = \frac{Q_e}{d} \quad \text{Ecuación 3- 29}$$

Donde:

$UM$ : indica factores que difieren en valores los valores originales de la USLE.

$Q_e$ : volumen de escurrimiento por evento de lluvia.

La energía por cantidad de lluvia se expresa como  $E$  dividida por la lámina de lluvia ( $d$ ), entonces:

$$R_{eUM} = Q_e \left( \frac{E}{d} \right) I_{30} \quad \text{Ecuación 3- 30}$$



$$A = [Q_R EI_{30}] K_{UM} L S C_{UM} P_{UM}$$

Ecuación 3- 31

Kinnell y Risse (1998) proponen valores para  $K_{UM}$ , la cual varía de 1.40 a 3.90 la  $K$  de la USLE. Mientras que  $C_{UM}$  varía de 1.10 a 32.3 veces la  $C$  de la USLE. Los mismos autores presentan procedimientos para obtener  $K_{UM}$  y  $C_{UM}$ . Además aseguran que debido a la consideración del escurrimiento que hace la USLE-M se estima la pérdida de suelo mejor que la USLE. La USLE y la USLE-M son igualmente efectivas en la estimación de la erosión cuando  $Q_R=1$  (Kinnell y Risse, 1998).

### 3.1.2.1.10 Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE)

En 1987 se inicio una revisión de la última versión de la USLE, tanto de criterios como de datos, lo que dio origen a la RUSLE de Renard *et al.* (1997). La RUSLE conserva los 6 factores de la versión de Wischmeir y Smith (1965 y 1978) para calcular la pérdida de suelo de un terreno. Sólo que se mejoró la metodología para evaluar los factores y se añadieron datos de campo. Entonces, se puede obtener la erosión para condiciones que no se incluyen en las versiones de anteriores (Renard *et al.*, 1997). El modelo se concentró en un programa de cómputo, el cual se puede obtener gratuitamente ([www.sedlab.olemiss.edu/rusle](http://www.sedlab.olemiss.edu/rusle)).

El cambio más significativo en esta versión es la informatización de la tecnología, de tal manera que cada factor se puede determinar recurriendo a las bases de datos integradas en el programa informático en el que se apoya (López Cárdenas, 2003). Las bases de datos son (Renard *et al.*, 1997):

- CITY. Contiene los datos de precipitación mensual y temperatura, el factor de erosividad de lluvia ( $R$ ).
- CROP. Incluye las características de la cobertura vegetal. Describe la biomasa en los primeros centímetros de suelo, la cubierta aérea, la altura de la vegetación y la información de los cultivos. Estos datos se encuentran disponibles a intervalos de 15 días.
- OPERATION. Esta base de datos refleja las alteraciones sufridas al suelo y su cobertura debido a las operaciones agropecuarias.

#### Ventajas

- Se dispone de datos para sitios que antes no se tenía, para un mayor número de tipos de cultivos y distintas técnicas de cultivo (Mays, 2001).
- Se mejoraron los factores para bosques y pastizales (Mays, 2001).
- Se incrementó la flexibilidad para aplicar la RUSLE a distintos tipos de ecosistemas y prácticas de conservación (Mays 2001).
- RUSLE ha sido implementado en sistemas de información geográfica (GIS), ofreciendo un mejor manejo y análisis de las base de datos (Mays 2001).

### ***Desventajas***

- RUSLE al igual que sus predecesores fueron diseñadas para estimar la erosión hídrica, producto del promedio de muchas tormentas registradas a través de los años (Mays, 2001).
- La pérdida de suelo representa el promedio sobre una zona y no en un solo punto (Mays, 2001).
- Las bases de datos aplican únicamente para los E.U.A

#### ***3.1.2.1.11 Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada, 2º VERSION (RUSLE2)***

La segunda versión de la RUSLE estima la pérdida de suelo, la producción de sedimentos y las características de los sedimentos provenientes de erosión en canalillos y entre canalillos producida por la lluvia y asociada con el flujo superficial. La RUSLE2 emplea factores que representan efectos erosivos del clima, topografía, manejo de la cobertura y proporciona un programa computacional para calcular la erosión (McCool *et al.*, 2004).

También puede ser usada como guía en la conservación, planeación, estimación de la erosión en superficies extensas y para estimar la producción de sedimentos de una cuenca. Se puede emplear en cultivos, pastizales, zonas de pastoreo, bosques alterados, sitios de construcción, minas, áreas militares y prácticamente cualquier zona donde el suelo este expuesto a las gotas de lluvia y donde se genere un flujo superficial. El flujo superficial se genera cuando la intensidad de la lluvia excede la capacidad de infiltración del suelo. Puede operar en unidades inglesas o con el sistema internacional (McCool *et al.*, 2004).

La RUSLE2 considera el desprendimiento, transporte y depósito del suelo a lo largo del flujo superficial.

#### ***Desprendimiento de partículas de suelo***

La RUSLE2 supone que el desprendimiento se produce debido al impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo y por el escurrimiento superficial que se produce cuando se satura el suelo. Su base de datos permite calcular la pérdida de suelo por día, empleando la Ecuación 3- 32 de la misma naturaleza que a la USLE (McCool *et al.*, 2004):

$$a_i = r_i k_i l_i S c_i p_i$$

**Ecuación 3- 32**

Donde:

- a<sub>i</sub>*: pérdida de suelo promedio para el día *i* del año.
- r<sub>i</sub>*: factor de erosividad de lluvia para el día *i* del año.
- k<sub>i</sub>*: factor de erosionabilidad del suelo para el día *i* del año.
- l<sub>i</sub>*: factor de longitud de la pendiente para el día *i* del año.
- S*: factor de la pendiente, es la misma para todo el año.
- c<sub>i</sub>*: factor de cobertura para el día *i* del año.
- p<sub>i</sub>*: factor de prácticas de cultivo para el día *i* del año.

La Ecuación 3- 32 supone que el desprendimiento producido por un evento de lluvia es directamente proporcional al producto de la energía cinética de la tormenta ( $E$ ) y la intensidad máxima en 30 min. ( $I_{30}$ ). Entonces, se puede obtener el  $EI_{30}$  para cada día, semana o mes del año que se requiera (McCool *et al.*, 2004).

### ***Escurrimiento, transporte y depósito***

La RUSLE2 calcula los sedimentos transportados y depositados por medio de la técnica del escurrimiento y número de curva de la NRCS. Para el escurrimiento se considera un periodo de retorno de 10 años y 24 h de intervalo. El modelo considera que existe un depósito cuando la carga de sedimentos excede la capacidad de transporte en el segmento del flujo superficial, lo que suele presentarse cuando la pendiente decrece (McCool *et al.*, 2004).

### ***Programa computacional***

El programa computacional del modelo RUSLE2 consiste en un arreglo de ruta que sigue un flujo superficial sobre una pendiente. Se define como ruta del flujo superficial desde el punto donde se origina el flujo superficial hasta que se alcanza un escurrimiento bien definido o cauce (McCool *et al.*, 2004).

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

La tasa de descarga de sedimentos ( $DR$ ) consiste en la relación que existe entre la producción de sedimentos en un punto ( $Y_s$ ) y la erosión superficial de la cuenca en el mismo punto ( $A$ ) (Brooks *et al.*, 1997). Ver Ecuación 3- 33:

$$DR = \frac{Y_s}{A} \qquad \text{Ecuación 3- 33}$$

El  $DR$  es afectado por la textura del material erosionado, el uso del suelo, clima, corrientes locales y el relieve. Generalmente a mayor área de la cuenca,  $DR$  decrece (USACE, 1995). Tal relación solo arroja valores de muy baja aproximación, ya que la erosión y las concentraciones de sedimentos pueden variar enormemente para cada cuenca (Brooks *et al.*, 1997).

Varios investigadores emplean relaciones para calcular el  $DR$  y así al conocer la erosión en la cuenca determinar la producción de sedimentos. Algunos de ellos son:

$$\text{Vanoni, 1977.} \qquad DR = 0.001(Fm)^{-0.125} \qquad \text{Ecuación 3- 34}$$

Williams y Berndt, 1972.  $DR = 0.627 SLP^{0.403}$  **Ecuación 3- 35**

Kothyari *et al.*, 1996.  $DR_i = C_1 \frac{F_i}{F_{i-1}} + C_2 \frac{SLP_i}{SLP_{i-1}} + C_3 \frac{FA_i}{FA_{i-1}}$  **Ecuación 3- 36**

Rivera y Arellano, 2006.  $DR = 0.30$  **Ecuación 3- 37**

Donde:

- Fm*: área expresada en  $mi^2$   
*SLP*: pendiente media del curso principal expresada en (%)  
*FA*: Área Forestada.  
*C<sub>1</sub>*, *C<sub>2</sub>* y *C<sub>3</sub>*: Constantes de cada cuenca.  
*F*: área

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

La eficiencia de atrapamiento de sedimentos (*Te*) consiste en la parte de material que entra a un embalse y es depositado o atrapado respecto al material entrante. La siguiente expresión describe lo anterior (Ecuación 3- 38):

$$Te = \frac{qs_{in} - qs_{out}}{qs_{in}} \quad \text{Ecuación 3- 38}$$

Donde:

- Te*: eficiencia de atrapamiento  
*qs<sub>in</sub>*: carga de sedimentos entrante al embalse.  
*qs<sub>out</sub>*: carga de sedimentos saliente.

*Te* depende de la velocidad de caída de las partículas y del tiempo de retención del escurrimiento y de los sedimentos. La velocidad de caída está gobernada por los diámetros de las partículas, es decir por su distribución granulométrica y ésta a su vez por la floculación. Por otro lado el tiempo de retención del escurrimiento y de los sedimentos depende del volumen de la avenida, el gasto pico, el gasto base y las características del embalse (Gert y Poesen, 2000).

Existen distintos métodos para determinar el *Te*, el cual es particular para cada embalse. Los más conocidos son según Gert y Poesen (2000):

#### a) Métodos Empíricos:

- Curva de *Te*% y la tasa de capacidad de la cuenca de Brown.
- Curva de *Te* % y la tasa de capacidad de de volumen de entrada de Brune.
- Curva de 100%-*Te*% y el índice de sedimentación de Churchill.
- Curva de 100%-*Te*% y el índice de sedimentación de Borland.
- Curva de *Te*% y el índice de sedimentación de Trimble y Bube.

## b) Métodos Teóricos:

- Descarga constante.
- Descarga variable.
- Modelos teóricos mediano plazo.

Cabe notar que los métodos empíricos se fundamentan en un número limitado de almacenamientos. En su mayoría fueron desarrollados para cuencas grandes, lo que dificulta su aplicación en pequeñas cuencas. Entonces, el empleo de estos métodos para estimar  $Te$  en otras regiones con características diferentes puede no ser apropiado. Muchos de los datos empleados en el desarrollo de estos métodos tienen periodos desde meses hasta algunos años, por lo que puede que no haya sido registrado ningún evento extremo, que al presentarse no corresponderá con el  $Te$  estimado (Gert y Poesen, 2000).

**3.1.2.2 Métodos Estocásticos**

La producción de sedimentos se puede modelar de manera estocástica dado que está gobernada por la precipitación, que es de dicha naturaleza. Sin embargo estos métodos no muestran lo que sucede en la cuenca cuando se tienen varios usos del suelo.

En 2002 Gangyan *et al.* modelaron de manera estocástica la producción de sedimentos sobre el río Yangtze. Contaron con registros de mediciones de sedimentos desde 1950 y aplicaron la correlación de Kendall y Anderson. Estos autores analizaron la periodicidad de la carga de sedimentos mediante un análisis armónico y su componente estocástico fue modelado por un modelo de auto-regresión, obteniendo periodicidad en las desviaciones media y estándar de la carga de sedimentos mensual y anual, mientras que la estructura de la correlación mes a mes fue no estacionaria (Gangyan *et al.*, 2002).

**3.1.2.3 Métodos de Simulación de Procesos Físicos**

En la simulación de procesos físicos, los procesos gobernantes que controlan la producción de sedimentos son la precipitación y la erosionabilidad del suelo. Se analizan por separado para proveer de sensibilidad al modelo. Se usan para estimar o predecir la producción de sedimentos en terrenos naturales o alterados, tomando en cuenta el salpicado de gotas de lluvia, la erosión en la cuenca y en los cauces, y el movimiento de las fracciones de material de sedimento (Simons y Sentürk, 1992).

Un factor importante en la modelación de sedimentos es la medición. Si ha habido algún error en ellas pueden producir resultados incorrectos y poco representativos. Por otro lado el entendimiento del modelo, el mantener el proceso físico y contar con las mediciones necesarias, produce resultados reales (Simons y Sentürk, 1992).

En este apartado se presentan algunos de los métodos de simulación de procesos físicos más populares: proyecto de predicción de erosión hídrica (WEPP, por sus siglas en inglés), SHETRAN, ANSWERS, EUROSEM y el método de Negev.

#### **3.1.2.3.1 Proyecto de Predicción de Erosión Hídrica (Water Erosion Prediction Project, WEPP)**

El modelo de erosión WEPP es un simulador continuo computarizado que estima la pérdida de suelo y el depósito de sedimentos sobre el flujo superficial, cauces pequeños y en embalses. Cuenta con componentes para estimar la erosión, el clima y lluvia a través de un generador estocástico. Emplea la ecuación de infiltración de Green-Ampt y la ecuación de onda cinemática. Realiza balances de agua diarios, modela el crecimiento de las plantas y la descomposición de sus residuos (Flanagan y Nearing, 1995).

El WEPP calcula espacial y temporalmente la pérdida de suelo y el depósito de sedimentos. Entonces predice donde será erosionada una cuenca o parcela y en qué tiempo, por lo que se pueden tomar medidas de conservación de suelo (Flanagan y Nearing, 1995).

#### **3.1.2.3.2 SHETRAN**

Este modelo fue desarrollado por el Laboratorio de Investigación de Sistemas Hídricos (*Water Resource Systems Research Laboratory, WRSRL*), el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Newcastle en Tyne. Partieron del Sistema Hidrológico Europeo (SHE) de la década de los setenta, que era capaz de modelar una cuenca hidrológicamente. La versión SHETRAN incluye transporte de sedimentos y migración de contaminantes (Summer y Walling, 2002).

SHETRAN es en general un modelo de distribución espacial con fundamento físico, es decir que puede ser usado para construir y correr modelos para todo o cualquier parte del ciclo hidrológico, para cualquier zona geográfica. Su fundamento físico consiste en que varios caudales y procesos de transporte pueden ser modelados por medio de representaciones de diferencias finitas de las ecuaciones diferenciales parciales de masa, momento y conservación de energía, o por ecuaciones empíricas producto de la experimentación. Los parámetros del modelo tienen significado físico y pueden ser medidos. La distribución espacial de las propiedades de la cuenca, entradas y salidas, se representan en una malla de diferencias finitas en 3D. El cauce del sistema se representa a lo largo de las condiciones de frontera por medio de una malla cuadrículada (Summer y Walling, 2002).

#### **3.1.2.3.3 ANSWERS**

Fue desarrollado como un modelo de planeación y evaluación del efecto del manejo de uso del suelo y de calidad del agua. Además, para evaluar los problemas de contaminación de fuentes no puntuales y para definir el costo efectivo de soluciones para cuencas agrícolas primarias (Beasley *et al.*, 1980).

La estructura del programa ANSWERS comprende un modelo hidrológico, un modelo de desprendimiento-transporte-depósito de sedimentos y rutinas para describir el movimiento del agua superficial, subsuperficie y el flujo en cauces. El concepto de

parámetros distribuidos es usado para modelar los procesos de variación espacial de escurrimiento, infiltración, drenaje subterráneo y erosión. La aplicación del programa a cuencas no aforadas arroja resultados comparables para determinar estrategias de manejo de cuencas. Se han modelado eventos hidrológicos en cuencas agrícolas con resultados satisfactorios (Beasley *et al.*, 1980).

#### **3.1.2.3.4 EUROSEM**

El Modelo Europeo de Erosión de Suelo (*European Soil Erosion Model*, EUROSEM) consiste de un modelo dinámico, capaz de simular el transporte de sedimentos, erosión y depósito en canalillos y entre canalillos durante una tormenta, tanto para cuencas como para parcelas. El modelo arroja el escurrimiento total, la pérdida de suelo total, el hidrograma de la tormenta y su sedimentograma. Comparado con otros modelos de erosión, el EUROSEM tiene excelente simulación del flujo en canalillos y entre canalillos; efectos de cobertura en intercepción y energía de lluvia; efecto de los fragmentos de roca en la infiltración, velocidad del flujo y erosión por salpicadura; además de cambios en la forma y tamaño de los canalillos como resultado de la erosión y depósito (Morgan *et al.*, 1998).

La capacidad de transporte de escurrimiento es modelado empleando una relación que se basa en más de 500 observaciones experimentales de flujo superficial. EUROSEM puede ser aplicado en pendientes suaves con y sin canalillos (Morgan *et al.*, 1998).

#### **3.1.2.3.5 Método de Negev**

Negev propone simular la carga suspendida de sedimentos a partir de datos de lluvia y gasto total, y la simulación de flujo superficial por medio del Modelo de la Cuenca de Stanford. La simulación de la carga suspendida de sedimentos se obtiene mediante la modelación de la producción de sedimentos y el proceso de transporte en una computadora. El modelo hace la diferencia entre dos principales fuentes de sedimentos: la superficie de la cuenca, que aporta la mayor cantidad de producción de sedimentos; y los escurrimientos donde el flujo total es el parámetro más significativo (PSIAC, 1974).

La producción de sedimentos y las mediciones de escurrimiento empleadas para el desarrollo del modelo fueron tomadas de los ríos Napa y San Antonio en los condados de Napa y Monterey, California. Los datos de entrada del modelo son los datos de lluvia acumulada de manera horaria. Las condiciones mínimas para el cumplimiento de este requisito se establecen en la continuidad de los datos de lluvia horaria para una estación y continuidad de los datos de lluvia diaria para la segunda estación (PSIAC, 1974).

Las siguientes mediciones de la cuenca fueron seleccionadas con base teórica y soporte experimental. Las funciones usadas fueron obtenidas mediante prueba y error.

- Características del suelo.
  - Cantidad horaria de suelo salpicado (Ton).
  - Cantidad diaria acumulada de suelo salpicado (Ton).
  - Cantidad horaria de suelo salpicado removido (Ton).

- Cantidad horaria de suelo por riachuelos y escurrimientos (Ton).
- Fracción del área de la cuenca que es impermeable.
- Escurrimiento.
  - Flujo superficial medio horario (mm).
  - Flujo total medio diario (m<sup>3</sup>)
- Sedimento.
  - Carga de lavado.
  - Intercarga.
  - Carga de fondo.
  - Tamaño del grano.

Se obtuvo una acertada reproducción del registro de la carga suspendida de sedimentos en dos cuencas mediante el modelo, empleando las mismas funciones para ambas, solo variando los coeficientes (PSIAC, 1974)

### 3.2 Métodos empleados en México

Según Rivera Trejo *et al.* (2006), en México los estudios realizados sobre la erosión hídrica son pocos y en algunos casos se estima la erosión en cuencas utilizando las mediciones de carga de sedimentos. Aunque varios autores entre ellos Gracia (1997) señalan que el método más utilizado en México para estimar la producción de sedimentos es la USLE, en combinación con la tasa de descarga (*DR*) y eficiencia de atrapamiento (*Te*).

Debido a que la USLE ha sido desarrollada en los E.U.A. mediante análisis estadístico de las pérdidas de suelo por lotes experimentales, las correlaciones son muy buenas para los E.U.A. (Figuroa *et al.*, 1991). Sin embargo, es necesario utilizar la ecuación con cautela cuando se quiere aplicarla fuera de los E.U.A. porque algunas de las relaciones utilizadas en la USLE no siempre se pueden extrapolar a ambientes diferentes (Figuroa *et al.*, 1991). Por esta razón, en el Centro Regional para Estudios de Zonas Áridas y Semiáridas (CREZAS) se adecuó la ecuación a las condiciones de México, especialmente los factores *R* (erosividad de la lluvia) y *C* (manejo del cultivo) (Figuroa *et al.*, 1991).

Para la aplicación de la USLE en México existe la limitante del factor *R* de la ecuación, la cual requiere información de tiempo-lámina de lluvia de pluviómetros. Lamentablemente la red pluviométrica en nuestro país es limitada y a menudo se carece de este tipo de aparatos. Por lo que Cortes (1991) regionalizó las estaciones a fin de caracterizar áreas sujetas a condiciones similares de lluvia. De esta manera formó 14 regiones diferentes en la República Mexicana, con referencia a la erosividad de la lluvia. Además generó mediante un análisis de regresión ecuaciones que permiten la estimación del factor *R* de la USLE en función de la lluvia anual para cada una de las regiones. Las ecuaciones se presentan en la Tabla 3- 3 (Cortés, 1991):



Tabla 3- 3. Ecuaciones regionales para México que estiman el valor de  $R$  por medio de la precipitación anual ( $P$ ) (Cortés, 1991).

Región	Ecuación
I	$R = 1.2078P + 0.002276P^2$
II	$R = 3.4555P + 0.006470P^2$
III	$R = 3.6752P + 0.001720P^2$
IV	$R = 2.8959P + 0.002983P^2$
V	$R = 3.4880P + 0.000188P^2$
VI	$R = 6.6847P + 0.001680P^2$
VII	$R = -0.0334P + 0.006661P^2$
VIII	$R = 1.9967P + 0.003270P^2$
IX	$R = 7.0458P - 0.002096P^2$
X	$R = 6.8938P - 0.000442P^2$
XI	$R = 3.7745P + 0.004540P^2$
XII	$R = 2.4619P + 0.006067P^2$
XIII	$R = 10.7427P + 0.001008P^2$
XIV	$R = 1.5005P + 0.002640P^2$

$R$ : EI30 anual (MJ mm / ha hr)

$P$ : lluvia anual (mm)

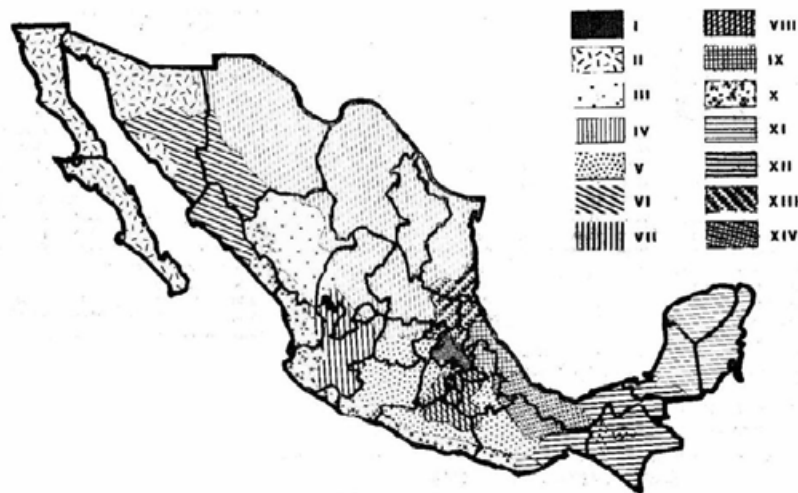


Figura 3- 2. Mapa de regiones de erosividad de la lluvia en México (Cortés, 1991).

Como hemos visto la USLE determina la erosión en una zona, y esta a su vez esta relacionada con la producción de sedimentos de una cuenca. Por lo que es común relacionar estos conceptos mediante la tasa de descarga de sedimentos ( $DR$ ). Existen varias formas de estimar  $DR$ , en México los siguientes autores han empleado éstas ecuaciones:

Rivera Trejo *et al.*, 2006

$$DR = 0.417662 Fm^{-0.134958} - 0.127097$$

Ecuación 3- 39

Rivera y Arellano, 2006  $DR = 0.30$  **Ecuación 3- 40**

Martínez *et al.*, 2001  $DR = 2.9759A^{-0.5479}$  **Ecuación 3- 41**

$F_m$ : área ( $m^2$ )

$A$ : área (miles de ha).

### 3.3 Métodos de actualidad

#### 3.3.1 Variación Temporal de la Producción de Sedimentos

Kothyari *et al.* (1996) proponen el Método de la Variación Temporal de Producción de Sedimentos. Parte de la suposición de que la curva de tiempo-área de una tormenta puede ser usada para obtener la respuesta de salida de sedimentos. Divide en segmentos la cuenca a lo largo del cauce principal, cada segmento con igual tiempo de concentración (isócronas). Supone que una cierta cantidad de material erosionado en el segmento aguas arriba será depositado aguas abajo y una parte de este a su vez será depositado en el siguiente segmento, esto lo estima por medio de tasas de descarga ( $DR$ ).

El tiempo de concentración ( $T_c$ ) se puede estimar por la ecuación de Kirpich (e.g. Aparicio, 2004). La subdivisión de la cuenca en segmentos isócronos se pueden delimitar por el método de Laurenson (e.g. Chow *et al.*, 1988). Para la estimación del material erosionado ( $S$ ) se puede utilizar cualquier ecuación de agrupación de variables p.e. USLE, MUSLE, RUSLE, etc. El método simplifica el proceso de erosión-transporte-depósito, incluye la erosión laminar, en canalillos, entre canalillos y en el cauce.

$DR$  se calculan mediante la Ecuación 3- 42 como una función del área del segmento ( $A$ ), la pendiente promedio ( $L_s$ ) y su área forestada ( $FA$ ), existiendo un  $DR$  para cada par consecutivo de segmentos.

$$DR_i = C_1 \frac{A_i}{A_{i-1}} + C_2 \frac{L_{s_i}}{L_{s_{i-1}}} + C_3 \frac{F_{A_i}}{F_{A_{i-1}}} \quad \text{Ecuación 3- 42}$$

Donde:

$i$ : número del segmento tiempo-área, el cual crece hacia aguas arriba desde la salida de la cuenca.

$C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$ : coeficiente que se suponen constantes en una cuenca durante las distintas tormentas.

En la Ecuación 3- 42 la relación de la pendiente ( $L_{s_i}/L_{s_{i-1}}$ ) es tomada como uno cuando la pendiente del segmento isócrono aguas abajo sea menor que la pendiente del segmento aguas arriba. Aplicando lo anterior también para el segmento más alejado de la cuenca.

La producción de sedimentos total para una tormenta ( $Se$ ) se expresa con la Ecuación 3- 43 (Kothyari *et al.*, 1996):

$$Se = DR_1 S_1 + DR_1 DR_2 S_2 + DR_1 DR_2 DR_3 S_3 + \dots + DR_1 DR_2 \dots DR_n S_n \quad \text{Ecuación 3- 43}$$

Donde:

$S_i$ : pérdida de suelo para el segmento  $i$ .

$DR_i$ : tasa de descarga de sedimentos para el segmento  $i$ .

Los  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$  se suponen constantes para cada cuenca, se obtienen mediante calibración de producción de sedimentos calculados contra observados. En general se ha encontrado que  $C_1 > C_2 > C_3$ , que  $C_3$  es la mitad que  $C_1$  y que  $C_2$  es el punto medio entre  $C_1$  y  $C_3$  (Kothyari *et al.*, 1996).

Kothyari *et al.* (1996) obtuvieron en general errores menores del 40%. Esta precisión es considerada satisfactoria, particularmente debido a los errores de medición y cartográficos, los cuales son muy comunes en tales escalas.

### Ventajas

- El método es más simple en su aplicación que los modelos de procesos físicos de erosión y sedimentación.
- La precisión del presente método es razonable, si consideramos el nivel de incertidumbre de los datos de entrada y de la cartografía.
- Puede ser usado en sistemas de información geográfica y en modelos digitales del terreno.

### 3.3.2 Modelación de la Producción de Sedimentos por Redes Neuronales Artificiales

Los modelos de redes neuronales artificiales (ANN) han sido empleados en hidrología para representar distintos procesos (Dölling y Varas, 2006; Molina-Aguilar y Aparicio, 2006; Pelczer y Cisneros-Iturbe, 2007). Raghuwanshi *et al.* (2006) propone también utilizarlas para estimar la producción de sedimentos y el escurrimiento diario y semanal para cuencas agrícolas pequeñas.

Como datos de entrada se requieren de años de registro de lluvia diaria, temperatura del aire, escurrimiento y producción de sedimentos de la cuenca. Las ANN semejan el funcionamiento del cerebro humano al ir adquiriendo conocimiento a través de un proceso de aprendizaje que implica encontrar el arreglo óptimo de pesos para las conexiones y valores límite para los nodos (Raghuwanshi *et al.*, 2006).

Una ANN consiste en varios arreglos de datos (capas). Pueden ser vistas como un modelo de caja negra en donde cada nodo tiene un valor específico en la capa de entrada. La información pasa de ser dato de entrada a dato de salida. Los nodos en una capa están conectados a aquellos en la capa siguiente, pero no a aquellos en la misma capa. Por lo que los datos de salida de un nodo en una capa dependen únicamente de los datos de

entrada de la capa anterior y los pesos que recibe de ésta. Las conexiones entre la capa de los datos de entrada y las capas medias u ocultas contienen pesos, que son generalmente determinados a través del entrenamiento del sistema. Las capas medias de neuronas toman el peso de los datos de entrada y los suman. Para hacer un solo valor de salida para cada neurona la suma es usada en la ecuación llamada función de transferencia que crea el valor de salida. Para el entrenamiento de las ANN se puede emplear el algoritmo de Levenberg-Marquardt, que es una técnica de mínimos cuadrados no lineal de segundo orden estándar (Raghuwanshi *et al.*, 2006).

Las ANN pueden predecir precisamente el escurrimiento y la producción de sedimentos diario y semanal de una cuenca empleando información de lluvia y temperatura. Estos modelos pueden ser empleados efectivamente para interpolar datos faltantes e incluso para probar la veracidad de otros modelos (Raghuwanshi *et al.*, 2006).

### **3.3.3 Métodos geológicos con base en radionúclidos ambientales**

Los métodos geológicos evalúan la erosión y depósito de sedimentos en cuencas y en embalses. Tienen fundamento físico, ya que recurren a trazadores de radionúclidos ambientales para estimar las tasas de pérdida de suelo y el azolve en los embalses a través del tiempo.

En cuanto a los azolves, éstos son depositados en orden cronológico, el cual conservan a través del tiempo. Se ha demostrado que identificando las fechas de depósito de los sedimentos es posible reconstruir cómo ha sido el depósito en el embalse. Entre las aplicaciones que tienen estos métodos encontramos (Zapata, 2002):

- Determinación cronológica de los mayores episodios de pérdida de suelo en la cuenca.
- Cuantificación de la tasa neta de pérdida de suelo en cuenca.
- Identificar las fuentes más importantes de sedimentos.
- Evaluación del impacto de la erosión en un embalse, incluyendo calidad del agua y su capacidad de almacenamiento de agua.

Los trazadores de radionúclidos ambientales más utilizados son el cesio-137 de lluvia radioactiva (Cs-137), plomo-210 de origen natural (Pb-210) y el berilio-7 cosmogénico (Be-7) (Zapata, 2002). Estos se encuentran distribuidos de manera equitativa sobre la superficie terrestre, entonces relacionando el decaimiento de los radionúclidos con el tiempo y el espacio es posible determinar la tasa de erosión o depósito de sedimentos en la cuenca. El Cs-137 puede proporcionar información para 40-50 años, el Be-7 para 7 días, mientras que el Pb-210 para 100 años aproximadamente. Por lo que el más recomendado para fines hidrológicos en cuencas es el Cs-137 (Zapata, 2002).

El concepto de la estimación mediante radionúclidos parte de que cada estrato de material fue depositado en un tiempo distinto, entonces si pudiéramos determinar cuándo

fueron depositados tendríamos una tasa de depósito de sedimentos (Zapata, 2002). Esto se puede determinar mediante el análisis de radionúclidos sobre la superficie del suelo.

Para el análisis se utiliza un espectrómetro de rayos gamma que mide la actividad radioactiva expresada en bequerels (Bq), la cual al relacionarla con la superficie ( $m^2$ ) de la muestra se expresa en  $Bq/m^2$ . Dependiendo de la ubicación geográfica, la actividad radioactiva por superficie varía, misma que se tiene calibrada por la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA), para cuando no existe erosión ni depósito en distintos puntos en el globo terráqueo (Zapata, 2002). Entonces, cuando se compara el resultado de una muestra con lo observado se obtendrán los  $Bq/m^2$  ganados o perdidos, es decir el material erosionado o depositado. Lo anterior aunado con el decaimiento del radionúclido determina la tasa de erosión o depósito respecto al origen del radionúclido (Zapata, 2002).

El Cs-137 se esparció por el globo desde la década de 1950 cuando comenzaron a probarse las armas nucleares. Este radionúclido se encuentra distribuido en los primeros 40 cm de suelo. Por lo que las muestras de suelo se toman de manera vertical y se analiza la distribución de actividad radioactiva en estratos de 2-5 cm (Zapata, 2002). Para el análisis se utiliza un espectrómetro de rayos gamma que determina la cantidad de actividad radioactiva.

Por otro lado también es posible calcular la erosión o depósito de sedimentos para periodos específicos. Esto mediante la toma de muestras del mismo sitio con un periodo de tiempo de separación (5-10 años). Entonces se establece la reducción o incremento de actividad radioactiva del radionúclido, que al relacionarlo con su vida media nos lleva a conocer la tasa de erosión o depósito de sedimentos (Zapata, 2002).

Una vez que se conoce la erosión de la cuenca es posible relacionarla con una tasa de descarga de sedimentos (*DR*), y así conocer la producción de sedimentos. El *DR* también puede ser estimado si se analiza una muestra de azolve del embalse y se relaciona con la erosión de la cuenca y la eficiencia de atrapamiento del embalse (*Te*). Al conocer la pérdida de suelo y/o producción de sedimentos de una cuenca es posible estimar y predecir el comportamiento de esta, lo que beneficiará el diseño y las prácticas de conservación de la misma (Zapata, 2002).

En México la técnica ha sido empleada por García Oliva *et al.* (1995), obteniendo resultados aceptables en una cuenca experimental en la región de Chamela, Jalisco. Para mayor información al respecto se recomienda consultar los siguientes autores: Zapata, 2002; Queralt *et al.*, 2000; Owens y Collins, 2006; y Philips, 2003.

### ***Ventajas***

- Las estimaciones se basan en muestras que proveen una retrospectiva para evaluar tasas de erosión en un mediano plazo (alrededor de 40 años).
- Las muestras pueden obtenerse con una sola visita a campo.

- Las estimaciones resultantes de tasas de erosión son menos propensas a errores debido a eventos extremos.
- Las estimaciones son puntuales en el terreno y los resultados pueden armar un modelo de toda la cuenca.
- El muestreo no afecta el área de estudio.
- Los resultados son compatibles con aplicaciones SIG y geoestadísticas.
- Las tasas de erosión representan todos los procesos ocurridos en un punto después de un lapso de tiempo (erosión-transporte-depósito).
- Se proveen resultados tanto para la erosión como para el depósito de sedimentos para una misma cuenca, así como de producción de sedimentos.
- No hay restricciones de escala además del número de muestras a analizar.
- El método permite cuantificar los procesos de pérdida de suelo y depósito asociados a la erosión laminar de la interpretación de los datos.

### ***Desventajas***

- Se requiere un equipo multidisciplinario para la aplicación del método, lo que es una limitante en países en vías de desarrollo.
- Se requiere de laboratorios especializados que cuenten con un espectrómetro de rayos gamma, lo que es oneroso.
- El espectrómetro de rayos gamma debe ser capaz de detectar bajos niveles de radioactividad.
- El método se ha desarrollado para estimar la erosión laminar mas no en escurrimientos.
- No es posible determinar la pérdida de suelo para periodos cortos donde se hayan sufrido cambios en el uso del suelo y prácticas de cultivo.
- Se requiere aún de investigación en la materia para estandarizar la metodología y abaratarla.

---

---

## *Capítulo 4*

---

---

## **4. Información disponible en México**

En este capítulo se tocan tres puntos: la información disponible en México para estimar la producción de sedimentos, las ventajas y desventajas de los métodos descritos en el capítulo 3 y finalmente la selección de los métodos que recomendamos para nuestro país. La información disponible en México consiste básicamente en estaciones hidrométricas, estaciones climatológicas, estaciones meteorológicas automáticas (EMA) y la información geográfica que ofrece INEGI. Posteriormente se analiza la factibilidad de aplicar los métodos con la información disponible, describiendo sus pros y sus contras. Una vez que se examinaron los diferentes métodos, se identifican los que pudieran funcionar en nuestro país.

### **4.1 Datos que existentes en el medio mexicano para la estimación de sedimentos en cuencas**

La infraestructura hidráulica con la que cuenta México para la estimación de la producción de sedimentos en cuencas se reduce a estaciones hidrométricas, climatológicas, estaciones meteorológicas automáticas (EMAS) y la información geográfica que ofrece INEGI. Existen 2,316 estaciones hidrométricas distribuidas en las principales corrientes del país (Solís, 2007), las cuales determinan el gasto líquido que pasa por un punto de control y en pocos casos también el gasto sólido, es decir los sedimentos. Por otro lado se cuenta con 6,063 estaciones climatológicas (IMTA, 2006), las cuales miden la temperatura mínima, máxima y observada, la precipitación y evaporación diaria, la ocurrencia de tormentas, granizo y niebla, además la cobertura del cielo. Mientras que las EMAS suman 146, 133 a cargo del Servicio Meteorológico Nacional y 13 a cargo del Gobierno del Estado de Chiapas (<http://smn.cna.gob.mx/productos/emas>).

El registro de las estaciones hidrométricas se encuentra almacenado de forma digital en el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) elaborado por el IMTA (2007). Mientras que los datos referentes a las estaciones climatológicas están concentrados en el Extractor Rápido de Información Climatológica III (ERIC III), igualmente elaborado por el IMTA (2006). El registro de las EMAS lo guarda el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), al cual se puede acceder por internet (<http://smn.cna.gob.mx/productos/emas>).

A continuación se presenta una breve descripción de las bases de datos BANDAS y ERIC III, así como la información que ofrecen las EMAS y el INEGI.



#### **4.1.1 Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS)**

El BANDAS en su edición 2007, contiene información alfanumérica actualizada hasta 2005. Los catálogos actualizados contienen 2,316 estaciones y 117 vasos (Solís, 2007). Los datos que se obtienen de las estaciones hidrométricas son el caudal y en algunos casos los sedimentos. A partir de mediciones instantáneas de gasto de una corriente hechas en intervalos irregulares es posible determinar la variación continua del caudal, el volumen de agua y sedimentos acumulados por día, mes o año. Del mismo modo para los almacenamientos, de las aportaciones y extracciones de agua registradas en las estaciones hidrométricas y climatológicas se obtiene el balance diario de volumen en los vasos, además de la variación de volumen que representa la diferencia en elevación del nivel de agua en el embalse en función de las curvas de elevación-área-capacidad de cada uno.

Anteriormente a la existencia del BANDAS, el acceso a la información hidrométrica, de sedimentos y de régimen de vasos representaba una dificultad. Esto debido a que la información se encontraba originalmente en papel y luego en cintas magnéticas, las cuales procedían de los boletines hidrológicos publicados por la SARH y CFE. Los boletines se editaban para cada región hidrológica con una periodicidad de 1-5 años.

Hacia 1990 el IMTA elaboró un disco compacto denominado CD-HIDRO, el cual agrupó registros hasta 1985 de 560 estaciones hidrométricas. Para 1994 existía el Banco Nacional de Datos (BND) con información digital almacenada en cintas cartucho de 1,402 estaciones actualizadas hasta 1985. A partir del BND se desarrolló el BANDAS en 2002 actualizado hasta 1999, para 1,774 estaciones hidrométricas y 152 vasos. Se realizaron actualizaciones en 2003, 2005 y 2007 (Solís, 2007).

#### **4.1.2 Extractor Rápido de Información Climatológica III (ERIC III)**

El ERIC en su tercera versión (2006) cuenta con un catálogo de 6,063 estaciones, aunque sólo 5,450 poseen registros diarios (IMTA, 2006). Los registros mensuales suman 1'500,000, teniendo los registros de las principales variables climatológicas. Las estaciones más antiguas datan de 1900, aunque en promedio se cuenta con 25 años de información por estación. Las variables que ofrece la base de datos por estación son (IMTA, 2006):

- Temperatura mínima diaria
- Temperatura máxima diaria
- Temperatura observada a las 8 h.

- Precipitación acumulada diaria a las 8 h.
- Evaporación acumulada diaria a las 8 h.
- Ocurrencia o no de: tormenta, granizo y nieve
- Cobertura del cielo: despejado, medio nublado o nublado.

La primera versión del ERIC apareció en 1994 y partió del CLICOM una base de datos desarrollada a principios de los ochenta, para procesar la información climatológica en microcomputadoras en países pequeños (Quintas, 2000). Como las capacidades de las máquinas eran muy limitadas, no se trató de tener una herramienta eficiente, sino de aprovechar las estructuras de las grandes bases de datos con las salidas interactivas de la PC (Quintas, 2000).

En año 2000 apareció la segunda versión denominada ERIC II, la cual se desarrolló en ambiente Windows. Contiene información del CLICOM y del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) hasta 1999. Las estaciones climatológicas son administradas por las gerencias estatales y regionales de la Comisión Nacional del Agua, por lo que en muchas ocasiones la recopilación y digitalización de la información no se realiza con el mismo criterio (Quintas, 2000).

#### ***4.1.3 Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS) en México***

En total en el país existen instaladas 146 EMAS, de las cuales 133 las administra el Servicio Meteorológico Nacional y las 13 restantes la Secretaría de Seguridad Pública del Estado de Chiapas. Estas consisten en dispositivos electrónicos y mecánicos que realizan mediciones de las variables meteorológicas de forma automática. Generan información cada 10 min. de todas las variables, la cual es enviada vía satélite en intervalos de 1-3 horas por estación. Las variables meteorológicas que miden las EMAS son: velocidad del viento, dirección del viento, presión atmosférica, temperatura y humedad relativa, radiación solar y precipitación (<http://smn.cna.gob.mx/productos/emas>).

#### ***4.1.4 Información que ofrece el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI)***

INEGI agrupa la información digital que ofrece en tres tipos: conjuntos de datos vectoriales, conjuntos de datos raster y conjuntos de datos alfanuméricos. Los cuales describimos a continuación:

(<http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/normatividad/mde/menu.cfm?c=198>)

**Conjuntos de Datos Vectoriales.** Consignan los rasgos u objetos geográficos mediante una representación de puntos, líneas y líneas que conforman áreas, esos

datos se encuentran separados por temas en diferentes capas de información tales como vías de comunicación, localidades, hidrografía y topografía.

**Conjuntos de Datos Raster.** Consisten en archivos con un arreglo matricial de valores de un atributo particular. Por ejemplo, para el caso de las imágenes los valores son de la reflectancia del terreno para cada elemento de imagen o de valores de altura del terreno cuando se trata de los modelos de elevación del terreno.

**Conjuntos de Datos Alfanuméricos.** Corresponden a archivos de tipo texto relativos a los diferentes conjuntos de datos vectoriales. Se incluyen, por ejemplo, los nombres geográficos (topónimos y localidades), mapas de recursos naturales, uso del suelo y vegetación, edafología, etc.

De la información que ofrece INEGI la que se puede emplear para la estimación de la producción de sedimentos es el modelo digital de elevación, las cartas topográficas, las de edafología, de uso del suelo y vegetación. A continuación se describen brevemente.

#### ***4.1.4.1 Modelo digital de elevación***

El nombre de Modelo Digital de Elevación (MDE) implica una representación de las elevaciones del terreno mediante valores numéricos. Generalmente esta representación es una forma simplificada de la geometría de la superficie del terreno y consiste en una serie de puntos con coordenadas conocidas referenciadas a un sistema de coordenadas bidimensionales a las que se les asocia un valor de elevación.

En otras palabras, un MDE es un grupo de valores que representa puntos sobre la superficie del terreno cuya ubicación geográfica está definida por coordenadas "X" y "Y" a las que se les agrega un valor de "Z" que corresponde a la elevación. La escala de estos es de 1:50,000 y se generan a partir de curvas de nivel de mapas topográficos de la misma escala o bien por el método fotogramétrico de correlación de imágenes. La resolución en "X, Y" de la red regular de puntos de altura es de 50 m en su mayoría, aunque también se pueden encontrar de 30 m, ajustada a valores cerrados en metros, en coordenadas UTM (<http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/normatividad/mde/menu.cfm?c=198>).

#### ***4.1.4.2 Carta Topográfica***

Los Conjuntos de Datos Vectoriales de la Carta Topográfica escala 1:50,000, representa la concreción gráfica del inventario de la infraestructura, orografía, hidrografía y de la población del país, así como de su distribución geográfica; en ellas se registra fielmente todos estos factores y las relaciones que guardan entre sí. Es asimismo, la base en la cual se sustentan los estudios que se ocupan del inventario de los recursos naturales como los de geología, edafología, uso del suelo y vegetación e hidrología, entre otros.

Estos rasgos son representados digitalmente por un componente geométrico (puntos, líneas o áreas), y un componente descriptivo (los atributos del rasgo) (INEGI, 2005).

#### ***4.1.4.3 Carta Edafológica***

La carta edafológica incluye las características morfológicas, físicas, químicas y biológicas de los suelos en escalas 1:1'000,000, 1:250,000 y 1:50,000. La palabra edafología proviene de las raíces *edafos*-suelo y *logos*-estudio, por lo tanto, es el estudio de los suelos. El suelo es el resultado de la interacción de varios factores del ambiente y fundamentalmente de los siguientes: clima, tipo de roca a partir de la cual se originan los suelos, vegetación, uso del suelo, relieve y tiempo (INEGI, 2004).

Al variar los factores formadores del suelo se obtienen suelos con distribución y características muy diversas, por lo que es necesario clasificarlos tomando en cuenta todas sus variables. La carta edafológica emplea la clasificación FAO/UNESCO 1968, modificado por DETENAL (Dirección de Estudios del Territorio Nacional) en 1970 (INEGI, 2004).

#### ***4.1.4.4 Uso del Suelo y Vegetación***

Las series de INEGI de Uso del Suelo y Vegetación describen los tipos de comunidades vegetales que hay en el país, la condición en que se encuentran y los tipos de actividades agropecuarias y forestales que se practican. Cabe mencionar que las cartas cubren la totalidad del territorio nacional para las denominadas Serie I (década de 1980) y Serie II (década de 1990). Actualmente se está produciendo la Serie III (primera década del siglo XXI). La escala de la serie I es de 1:1'000,000, la de la serie II de 1:250,000 y la de la serie III 1:50,000, formando parte de un Sistema de Información Geográfica (SIG), por lo que están estructuradas en conjuntos de datos que se integran en capas (INEGI b, 2005).

## **4.2 Análisis de los métodos para estimar la de producción de sedimentos para el medio mexicano**

En esta sección se analizan los métodos descritos en el capítulo 3, a fin de identificar cuáles podrían tener aplicación en nuestro país. Para cada método se analizan sus ventajas y desventajas, tomando en cuenta la información que hay en México descrita en la sección anterior.

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

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

Ver 3.1.1.1/USACE, 1995.

**Ventajas.** Se obtiene la producción de sedimento sobre el cauce con fundamento en mediciones de caudal y sedimentos.

**Desventajas.** Existen errores sistemáticos además de la precisión de los aparatos. Algunos de ellos se deben a que las mediciones no alcanzan a cuantificar los últimos 15 cm. de columna de agua, donde la concentración de sedimentos es mayor. Otro es que la velocidad del cauce no es la misma en toda la sección transversal y sólo se obtienen aproximaciones. La desventaja más grande en el medio mexicano para estimar la producción de sedimentos de esta forma es que la medición de concentración de sedimentos es escasa y el periodo de registro es limitado.

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

Ver 3.1.1.2/USACE, 1995.

**Ventajas.** Se obtiene la producción de sedimento sobre el cauce con fundamento en mediciones de caudal y sedimentos. El valor que se obtiene puede ser anual o mensual.

**Desventajas.** Igual que el anterior.

**4.2.1.3** *Método de la curva de descarga de sedimentos y duración de flujo*

Ver 3.1.13/ USACE, 1995.

**Ventajas.** Se obtiene la producción de sedimento sobre el cauce con fundamento en mediciones de caudal y sedimentos. Toma en cuenta la variación de flujo, duración y descarga de sedimentos. Se puede estimar la producción de sedimentos anual.

**Desventajas.** Igual que el anterior.

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

Ver 3.1.1.4/ USACE, 1995.

**Ventajas.** El método se fundamenta en las batimetrías de los embalses, por lo que la información es bastante confiable en cuanto a la cantidad de sedimento que se deposita en el embalse. Para estimar la producción de sedimentos que llega al embalse se recurre al concepto de eficiencia de atrapamiento de sedimentos (*Te*). Comparar dos o más concentraciones de sedimentos sobre un mismo cauce puede ser engañoso debido a la velocidad del flujo, entonces al analizar directamente el sedimento que llega al embalse se tiene un dato más objetivo.

**Desventajas.** La forma de evaluar la eficiencia de atrapamiento de sedimentos inevitablemente incurre en errores. Por otro lado, la densidad de los sedimentos azolvados varía con el tiempo. Para tener un valor

acertado es necesario contar con muestras de azolves. Las batimetrías en México no se llevan a cabo regularmente, sino son aisladas y sólo en algunos embalses.

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

##### 4.2.2.1 *Método de Dendy y Bolton*

Ver 3.1.2.1.1/ Walling *et al.*, 1985.

**Ventajas.** Presenta buenos resultados en cuencas grandes y no montañosas. La ecuación ofrece resultados de producción de sedimentos en ton/mi<sup>2</sup>.

**Desventajas.** Resultados válidos para cuencas entre 2.5 y 75,000 km<sup>2</sup>, con precipitaciones menores a 50 mm. Desarrollada en E.U.A. por lo que se estaría extrapolando si se empleara en otros países, lo que implicaría que la producción de sedimentos es de la misma forma en todos lados. Depende únicamente del escurrimiento anual y la superficie de la cuenca, lo que excluye otras variables, como el relieve, vegetación y tipo de suelo.

##### 4.2.2.2 *Método del Comité Interinstitucional del Pacífico Suroeste (PSIAC)*

Ver 3.1.2.1.2/ Simons y Sentürk, 1992; USACE, 1995; Walling *et al.*, 1985.

**Ventajas.** Estima la producción de sedimentos tomando en cuenta el uso del suelo, escurrimientos, erosión-transporte-depósito, geología, topografía, superficie del suelo y el clima.

**Desventajas.** Desarrollado para el Oeste de los E.U.A. para cuencas con superficies mayores a 25 km<sup>2</sup>.

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

Ver 3.1.2.1.3/USACE, 1995; PSIAC, 1974.

**Ventajas.** Estima la producción de sedimentos para regiones áridas y montañosas. Toma en cuenta factores de tamaño, forma, pendiente de la superficie de drenado, precipitación en 3 h, porcentaje de superficie incendiada, los años transcurridos entre el incendio y el flujo.

**Desventajas.** Válido para el Sur de California, cuando se quiere conocer la producción de sedimentos después de un incendio. Requiere de mediciones de producción de sedimentos.

#### 4.2.2.4

##### ***Ecuación de Anderson***

Ver 3.1.2.1.4/ PSIAC, 1974.

**Ventajas.** Estima la descarga de sedimentos suspendidos en promedio por año. Diferencia la erosión potencial de la erosión actual con variaciones en el uso del suelo.

**Desventajas.** Desarrollada para las montañas y valles del oeste de Oregon con registros de 1-3 años en 29 cauces, por lo que su aplicación se limita a esa zona. La ecuación requiere de mediciones de sedimentos sobre los cauces diferenciando la producción de sedimentos de zonas forestadas.

#### 4.2.2.5

##### ***Ecuación de Branson***

Ver 3.1.2.1.5/ PSIAC, 1974.

**Ventajas.** La ecuación estima la producción de sedimentos tomando en cuenta variables geomorfológicas e hidrográficas de la cuenca.

**Desventajas.** La ecuación fue desarrollada para 17 cuencas en Colorado con 6 años de registro de sedimentos y 15 de registros hidrológicos, lo que limita mucho la ecuación para otra zona.

#### 4.2.2.6

##### ***Ecuación de Flaxman***

Ver 3.1.2.1.6/ PSIAC, 1974.

**Ventajas.** Estima la producción de sedimentos media anual. Toma en cuenta el factor climático, la pendiente de la cuenca y el suelo.

**Desventajas.** Es una ecuación producto de un análisis de regresión, por lo cual presenta buenos resultados para el área en que fue desarrollada, lo que limita su aplicación en otras áreas.

#### 4.2.2.7

##### ***Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)***

Ver 3.1.2.1.7/ Wishmeier y Smith, 1965.

**Ventajas.** La USLE toma en cuenta muchas de las variables involucradas en la erosión, estas son: el relieve del terreno, la forma de la lluvia, el tipo de suelo, la vegetación y las prácticas de conservación.

**Desventajas.** La USLE fue desarrollada para calcular la pérdida de suelo en parcelas agrícolas en los E.U.A., por lo que para su aplicación a producción de sedimentos requiere combinarse con el concepto de tasa de descarga de sedimentos (*DR*). El empleo de la ecuación en otras zonas requiere cautela, ya que se estaría extrapolarlo. Requiere de mediciones

de pluviómetros (lluvia-tiempo), las cuales escasean en México y se suplen por ecuaciones que se basan en la precipitación anual.

**4.2.2.8** *Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE)*

Ver 3.1.2.1.8/ Williams y Berndt, 1972.

**Ventajas.** Estima la producción de sedimentos por tormenta. Toma en cuenta factores del relieve del terreno, de la vegetación, suelo, prácticas de conservación y a diferencia que la USLE el volumen de agua escurrido y su gasto pico.

**Desventajas.** Se requiere conocer el volumen escurrido de agua y su gasto pico por tormenta, lo cual no siempre esta disponible, o puede estimarse de alguna forma. No toma en cuenta el depósito de sedimentos durante el trayecto.

**4.2.2.9** *USLE-M: una versión modificada de la USLE*

Ver 3.1.2.1.9/Kinnell y Risse, 1998.

**Ventajas.** Mejora el factor de lluvia ( $R$ ) de la USLE al añadir la tasa de escurrimiento ( $Q_R$ , ver ecuación 3-29). Se supone que la USLE-M mejora los resultados de la USLE, pero cuando  $Q_R=I$  son igualmente efectivas.

**Desventajas.** Al modificar el factor  $R$  también se modifican los factores  $K$ ,  $C$  y  $P$  de la USLE, por lo que hay que calcularlos a través de una nueva metodología que se propone. Al igual que para la USLE determinar  $R$  implica contar con datos de pluviómetros, información que, como ya se mencionó, escasea en México.

**4.2.2.10** *Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE)*

Ver 3.1.2.1.10/ Renard *et al.*, 1997.

**Ventajas.** La RUSLE conserva los 6 factores de la USLE para calcular la pérdida de suelo de un terreno. Se añadieron datos de campo para condiciones que no incluye la USLE, como es el caso de bosques, pastizales, distintos tipos de ecosistemas y prácticas de conservación. Cada factor se encuentra concentrado en bases de datos. Trabaja en GIS.

**Desventajas.** La RUSLE aplica para estimar la pérdida de suelo. Si se quiere conocer la producción de sedimentos es necesario combinarla con el concepto de tasa de descarga de sedimentos. Al igual que la USLE fue desarrollada para los E.U.A., entonces las bases de datos existen únicamente para dicho país.



**4.2.2.11 Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada, 2° VERSION (RUSLE2)**

Ver 3.1.2.1.11/ McCool *et al.*, 2004.

**Ventajas.** La RUSLE2 puede estimar la pérdida de suelo, la producción de sedimentos y las características de los sedimentos provenientes de erosión en canalillos y entre canalillos, producidos por la lluvia y el flujo superficial. Toma en cuenta el desprendimiento, transporte y depósito de sedimentos a lo largo del flujo superficial. Los cálculos los lleva a cabo un programa computacional.

**Desventajas.** Al igual que la RUSLE los valores de los factores se encuentran almacenados en bases de datos. Dichos valores existen únicamente para E.U.A.

**4.2.3 Métodos Estocásticos**

Ver 3.1.2.2.

**Ventajas.** Estiman la producción de sedimentos de manera estocástica, dado que el proceso está gobernado por la lluvia que es de dicha naturaleza.

**Desventajas.** No diferencia los distintos usos del suelo de la cuenca y requiere un extenso registro de mediciones de sedimentos sobre el cauce para ser válidos.

**4.2.4 Métodos de Simulación de Procesos Físicos**

**4.2.4.1 Proyecto de Predicción de Erosión Hídrica (Water Erosion Prediction Project, WEPP)**

Ver 3.1.2.3.1/Flanagan y Nearing, 1995.

**Ventajas.** Estima la pérdida de suelo y la producción de sedimentos espacial y temporalmente sobre el flujo superficial, en cauces pequeños y en embalses. Modela la lluvia estocásticamente, emplea las ecuaciones de Greeng y Ampt para calcular la infiltración y la de onda cinemática. Lleva a cabo balances de agua diarios y toma en cuenta el crecimiento y descomposición de las plantas.

**Desventajas.** Requiere un extenso registro de precipitaciones para modelar estocásticamente, así como de sedimentos sobre el cauce.

**4.2.4.2**    ***SHETRAN***

Ver 3.1.2.3.2/Summer y Walling, 2002.

**Ventajas.** Estima la producción de sedimentos espacialmente, incluye el transporte de sedimentos y la migración de contaminantes. Emplea las ecuaciones diferenciales parciales de masa, momento y conservación de energía.

**Desventajas.** Requiere un registro de mediciones de sedimentos.

**4.2.4.3**    ***ANSWERS***

Ver 3.1.2.3.3/ Beasley *et al.*, 1980.

**Ventajas.** Desarrollado para evaluar el manejo del uso del suelo y la calidad del agua. Estima la producción de sedimentos a través de un modelo hidrológico que comprende el desprendimiento-transporte-depósito de sedimentos. Su empleo en cuencas no aforadas al menos arroja resultados comparables para determinar estrategias de manejo de cuencas.

**Desventajas.** Requiere que la cuenca donde se va a aplicar tenga aforo de gasto líquido y sólido, mediciones que escasean en México.

**4.2.4.4**    ***EUROSEM***

Ver 3.1.2.3.4/Morgan *et al.*, 1980.

**Ventajas.** Modelo dinámico capaz de simular el transporte de sedimentos, erosión y depósito en canalillos y entre canalillos durante una tormenta, para cuencas y parcelas. Arroja el escurrimiento total, la pérdida de suelo total, el hidrograma de la tormenta y su sedimentograma.

**Desventajas.** Sólo se puede aplicar en cuencas bien aforadas, donde se cuente con volúmenes de entrada y salida de agua, y de sedimentos.

**4.2.4.5**    ***Método de Negev***

Ver 3.1.2.3.5/PSIAC, 1974; Aparicio, 1979.

**Ventajas.** Simula la carga suspendida de sedimentos a partir de datos de lluvia y gasto total, y la modelación del flujo superficial por medio del Modelo de la Cuenca de Stanford. Diferencia entre las dos fuentes de sedimentos principales: la superficie de la cuenca y los escurrimientos.

**Desventajas.** Los datos de entrada del modelo son los datos de lluvia acumulada de forma horaria, es decir de pluviómetros, los cuales escasean en México.

## 4.2.5 Métodos de actualidad para la producción de sedimentos

### 4.2.5.1 Variación Temporal de la Producción de Sedimentos

Ver 3.3.1/Kothyari *et al.*, 1996.

**Ventajas.** Estima la producción de sedimentos anual. Supone que una cierta cantidad de material erosionado aguas arriba será depositado aguas abajo, empleando las tasas de descarga que dependen del área, área forestada y la pendiente de la cuenca. La pérdida de suelo puede ser estimada por medio de cualquier ecuación de agrupación de variables (USLE, USLE-M, RUSLE, RUSLE2, etc.). Simplifica el proceso de erosión-transporte-depósito, agrupando la erosión laminar, en canalillos, entre canalillos y en el cauce.

**Desventajas.** Su grado de aproximación no es alto, sus resultados pueden tener errores de hasta un 40%. Requiere de algunas mediciones de sedimentos para calibrar el modelo. No toma en cuenta la erosión en el cauce, por lo que solo toma en cuenta la carga de lavado.

### 4.2.5.2 Modelación de la Producción de Sedimentos por Redes Neuronales Artificiales

Ver 3.3.2/Raghuwanshi *et al.*, 2006.

**Ventajas.** Pueden predecir precisamente el escurrimiento y la producción de sedimentos diario y semanal de una cuenca.

**Desventajas.** Requieren de un registro de lluvia y sedimentos para entrenar al modelo.

### 4.2.5.3 Métodos geológicos por medio de radionúclidos ambientales

Ver 3.3.3/ Zapata, 2002.

**Ventajas.** Estima tanto erosión como producción de sedimentos. Las estimaciones se basan en muestras que proveen una retrospectiva para evaluar tasas de erosión en un mediano plazo. Las muestras pueden obtenerse con una sola visita de campo. Los resultados son menos propensos a errores debido a eventos extremos. El muestreo no afecta el área de estudio. Incluye todos los procesos (erosión-transporte-depósito). No hay restricciones de escala.

**Desventajas.** Se requiere un equipo multidisciplinario para su aplicación. Se requieren laboratorios especializados que cuenten con un espectrómetro de rayos gamma, que puede detectar bajos niveles de radioactividad. Los aparatos son onerosos y el análisis de cada muestra es lento (1-2 días). No

se puede emplear el método para periodos de tiempo cortos. La metodología aún requiere ser estandarizada.

#### **4.3 Selección de los métodos que pueden ser viables en nuestro medio**

La aplicación en México de los métodos antes estudiados tiene diversas limitantes, ya que sólo se pueden aplicar algunos de ellos. Los métodos con base en medición directa (ver 3.1.1) arrojan muy buenos resultados, son empleados por varias agencias, pero su aplicación no se ha generalizado en nuestro país debido a que las mediciones de sedimentos sobre los cauces son escasas. En cuanto a los métodos empíricos o de agrupación de variables algunas de estas ecuaciones (Dendy y Bolton, Tatum, Anderson, Branson, Flaxman, ver 3.1.2.1.1-6) fueron desarrollados localmente, por lo que su aplicación o extrapolación a nuestro país podría arrojar resultados fuera de rango.

Para las metodologías tipo USLE (USLE-M, RUSLE y RUSLE 2, ver 3.1.2.1.7-11), su limitante principal yace en que se requieren datos de lluvia de pluviómetros, donde se expresa la forma de la tormenta en el tiempo, cuando la red de pluviómetros en nuestro medio es limitada. Por otro lado, estas series de ecuaciones fueron desarrolladas para estimar la pérdida de suelo para parcelas agrícolas, por lo que sobreestiman al emplearlas directamente sobre cuencas. Entonces, se pueden combinar mediante la tasa de descarga (*DR*) y la eficiencia de atrapamiento de sedimentos.

La MUSLE (ver 3.1.2.1.9) reemplaza el factor de lluvia (*R*), por lo que no se requiere del pluviómetro, en cambio requiere el volumen de agua escurrido y su gasto pico. Estos últimos no siempre están disponibles, por lo que hay que estimarlos.

La gran limitante de los métodos estocásticos (ver 3.1.2.2) es que requieren series extensas de datos de sedimentos para poder estimar con una cierta precisión. Esta misma limitante es la que no permite aplicar el método de redes neuronales artificiales (ver 3.3.2). Los métodos de simulación de procesos físicos (WEPP, SHETRAN, ANSWERS, EUROSEM, ver 3.1.2.3.1) arrojan muy buenos resultados, pero requieren cuencas aforadas (caudal y sedimentos) y con bastantes años de registro, lo que limita su uso en nuestro país.

Unos de los métodos de última generación son los que emplean radionúclidos ambientales (ver 3.3.3), pero para su aplicación se requiere de una importante infraestructura en cuanto a laboratorios, equipo y recursos humanos, lo que dificulta su aplicación en México. Por otra parte el análisis de cada muestra es oneroso (\$700 dls) y tardado (1-2 días), por ejemplo si se requieren 50 muestras para una cuenca de área

modesta (100 km<sup>2</sup>) estaríamos hablando de \$35,000 dls y 75 días sólo para el análisis. La tecnología arroja resultados aceptables, pero hace falta abaratarla y acelerarla.

Debido a la carencia de infraestructura en cuanto a mediciones de sedimentos en nuestro país y a que las tecnologías de última generación (radionúclidos ambientales) aún no son prácticas, se sugieren métodos de estimación de sedimentos que no requieran mediciones de estos o que requieran pocas. Tal es el caso de los métodos que emplean ecuaciones tipo USLE.

El método que se sugiere es el de la variación temporal de producción de sedimentos de Kothyari *et al.* (1996) (ver 3.3.1), ya que requiere escasas mediciones de sedimentos sobre el cauce o volúmenes de azolve en los vasos. Este método describe de forma simple el proceso de erosión-transporte-depósito, relacionado la pérdida de suelo con la producción de sedimentos a través de tasas de descarga (*DR*). La pérdida de suelo puede estimarse por medio de cualquier ecuación del tipo USLE.

---

---

## *Capítulo 5*

---

---

## 5. Aplicación del Método de la Variación Temporal de Producción de Sedimentos a la Cuenca del Río Apulco

El objetivo de este capítulo es determinar la viabilidad del método de la “Variación Temporal de Producción de Sedimentos” de Kothiyari *et al.* (1996) en combinación con el concepto de eficiencia de atrapamiento, para la estimación de azolves en embalses en México, probándolo en la cuenca del río Apulco, sobre la presa La Soledad, Puebla. Complementariamente se evaluó una serie de represas contenidas dentro de la misma cuenca (Figura 5- 1). El método emplea la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE), la cual presenta dificultades para la obtención del factor de lluvia ( $R$ ) en el país, debido a la carencia de una red pluviométrica adecuada, por lo que se propone calcular  $R$  combinando los datos de pluviómetros con estaciones de registro de lluvia de 24 h, a través de un procedimiento de Montecarlo. De esta manera se espera mejorar la práctica actual.

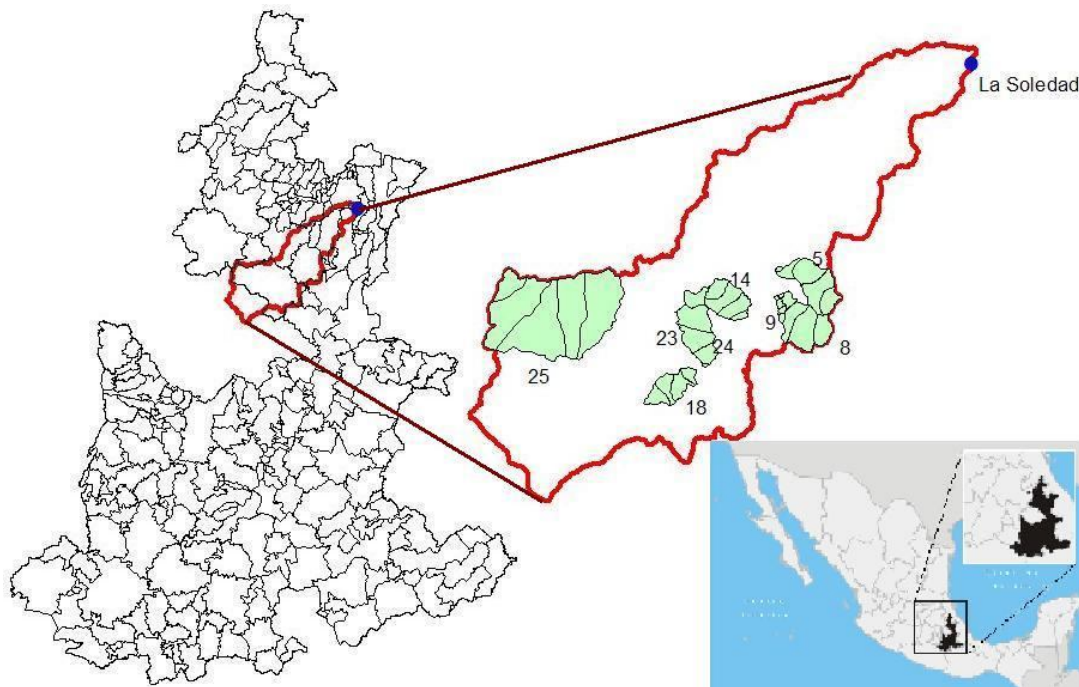


Figura 5- 1 . Ubicación de la cuenca del río Apulco, la presa La Soledad y las represas 5, 8, 9, 14, 18, 23, 24 y 25.

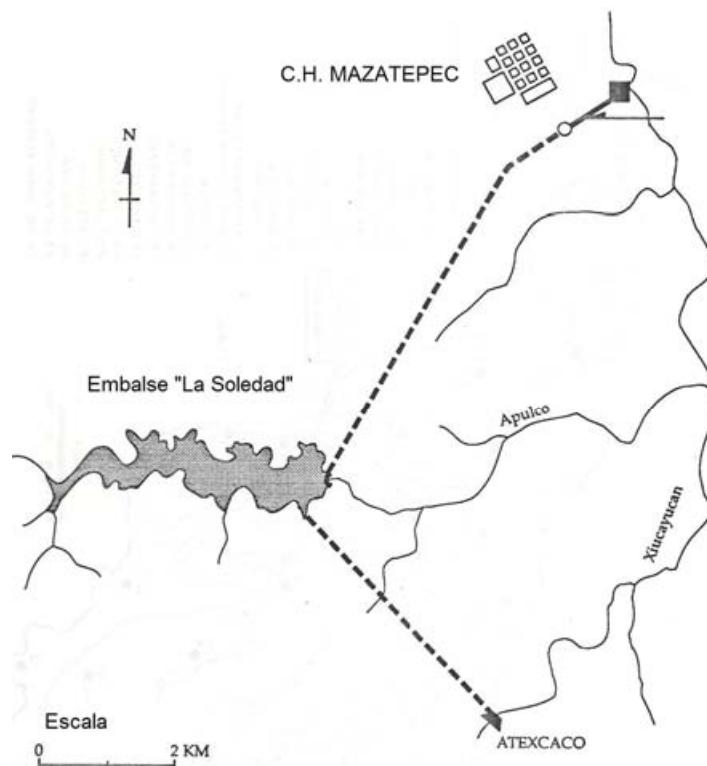
### 5.1 Antecedentes de la cuenca alta del río Apulco

El río Apulco se origina al este de la Sierra Madre, a 170 km al Noreste de la Cd. de México y a 130 km al norte de la Cd. de Puebla, a 3000 msnm y fluye hacia el Golfo de México. Ofrece un sitio favorable para la generación de energía eléctrica por medio de centrales hidroeléctricas, debido a una abundante precipitación, una topografía empinada y características geológicas favorables, por lo que en 1962 se construyó la Central Hidroeléctrica (C. H.) Mazatepec. El complejo incluye además de la central

hidroeléctrica, la cortina y el vaso denominado “La Soledad”, y es operado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE). La construcción la llevó a cabo la CFE con supervisión técnica de la empresa italiana ELC (JICA y CFE, 1993).

El complejo consta de una cortina de arco de 92 m de alto y 210 m de longitud, cortinas de gravedad en ambos extremos sumando 1010 m, obra de excedencias, obra de toma, desarenador, casa de máquinas, patio de maniobras y líneas de transmisión de energía eléctrica (Figura 5- 3). La cota de la cresta de la cortina es la 806.5 msnm y los niveles del diseño original son: NAMO 804.5 msnm y el NAMINO 775.0 msnm. La capacidad de almacenamiento original de La Soledad es de 59.726 hm<sup>3</sup>. La casa de máquinas alberga 4 unidades de turbinas generadoras, cada una con una capacidad de 54.84 MW y un total de 220 MW. El vaso “La Soledad” tiene una longitud aproximada de 5 km y 186.4 ha, recibiendo agua de la cuenca del río Apulco y de la del río Xiucayucan a través de un transvase por medio del túnel 1. El área correspondiente del río Apulco es de 1460 km<sup>2</sup> y 370 km<sup>2</sup> para el Xiucayucan (Figura 5- 2). La obra de toma tiene la cota 768.76 m (JICA y CFE, 1993).

La C.H. de Mazatepec pertenece a la Zona Oriente del Sistema de Interconexión Nacional de Energía Eléctrica. La demanda de energía para dicha zona fue de 3000 MW y 16500 MW para 1991, representando el 7% de producción de la zona y el 1.3% nacional (JICA y CFE, 1993).



**Figura 5- 2. Esquema que muestra cómo están conectados el embalse de Atexcaco, La Soledad y la C.H. Mazatepec (JICA y CFE, 1993).**



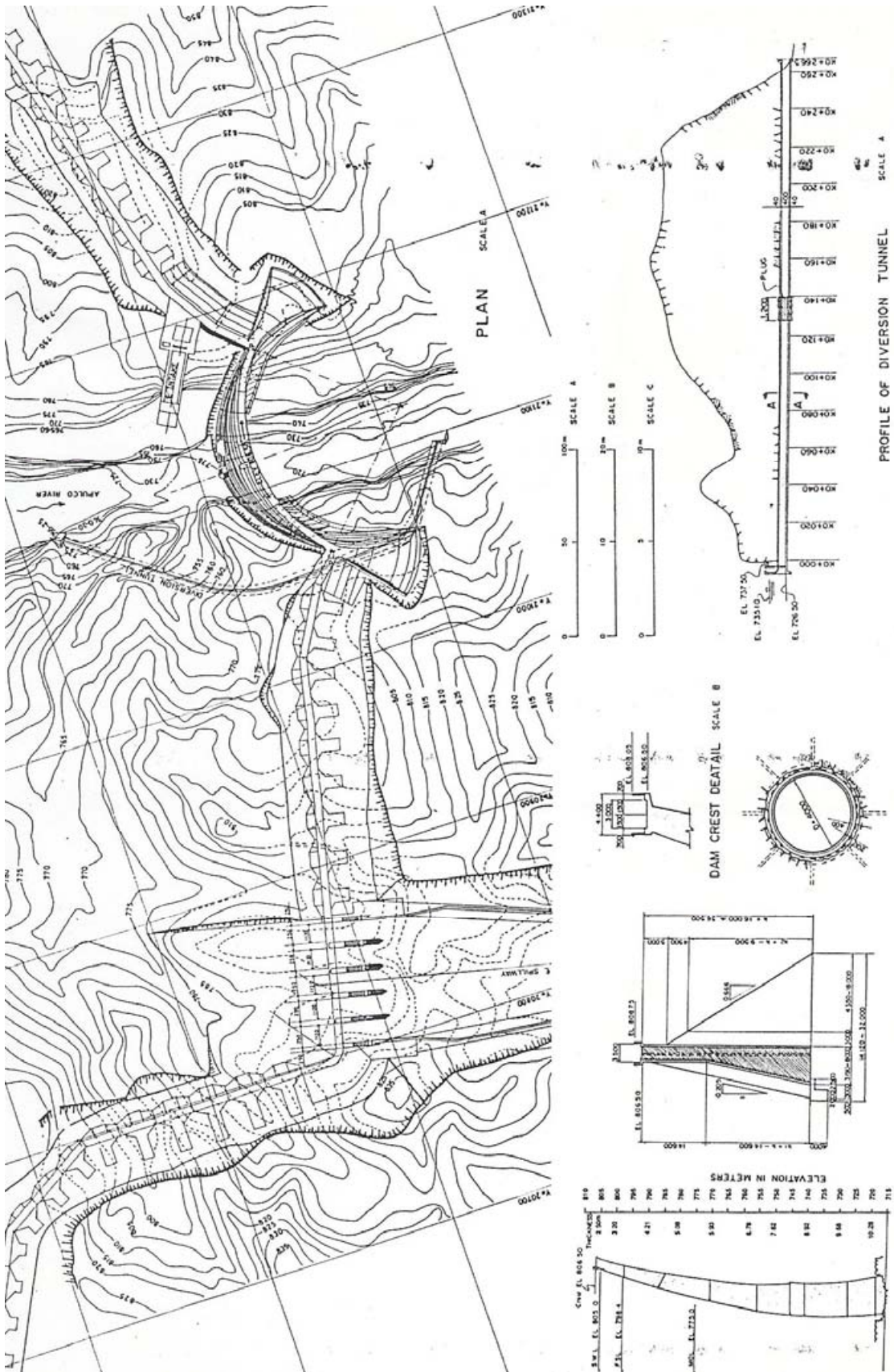


Figura 5- 3. Vista en planta de la cortina de La Soledad, se observa la sección de arco y la de gravedad, así como su topografía original (JICA y CFE, 1993).

## 5.2 Problemática de la presa La Soledad

Varios años después de entrar en operación la C.H. Mazatepec, se notó que la cantidad de sedimentos depositados en el vaso era mucho mayor que lo que se había estimado originalmente. Por ello empezaron a medir los volúmenes de azolves en el vaso regularmente desde 1972, realizando batimetrías completas en 1977, 1988, 1990 y 1992 (Tabla 5- 1). La capacidad de almacenamiento cayó rápidamente, perdiendo 30.041 hm<sup>3</sup> para 1977 (Tabla 5- 2), viéndose alterada la estabilidad de la estructura y la calidad del agua que entraba a la C. H. Por consecuencia la vida útil de las estructuras hidráulicas y equipos para generación se reducía dramáticamente, debido a los efectos de abrasión de los sedimentos sobre las turbinas. Las Tabla 5- 1, Tabla 5- 2 y la Figura 5- 4 muestran como ha ido variando la capacidad de almacenamiento del embalse (JICA y CFE, 1993).

En 1977 los azolves habían llegado a la cota 770 m, muy cerca del NAMINO (775 m) por lo que se modificaron el NAMO y el NAMINO de 798.40 m y 775 m a 804.5 m y 797.50 m respectivamente. Con esto se trató de proteger la casa de máquinas, al evitar la entrada de sedimentos (JICA y CFE, 1993).

**Tabla 5- 1. Resultados de las batimetrías. Se compara la elevación, área y la capacidad de almacenamiento para cada año (JICA y CFE, 1993).**

Elev. (m)	1962		1977		1988		1990		1992	
	Area (ha)	Vol. (hm <sup>3</sup> )	Area (ha)	Vol. (hm <sup>3</sup> )	Area (ha)	Vol. (hm <sup>3</sup> )	Area (ha)	Vol. (hm <sup>3</sup> )	Area (ha)	Vol. (hm <sup>3</sup> )
710.0	0.0	0.000								
720.0	2.1	0.274								
730.0	5.8	0.822								
740.0	12.7	2.055								
750.0	22.6	3.973								
760.0	39.5	6.986								
765.0	47.7	9.315								
770.0	67.8	12.740	2.4	0.000						
775.0	82.6	17.123	26.6	0.724	3.6	0.000	3.6	0.000		0.000
780.0	99.0	21.233	38.0	2.339	12.2	0.317	10.1	0.342	7.1	0.179
785.0			55.1	4.667	29.2	1.354	31.2	1.377	16.6	0.771
790.0	134.6	31.096	72.0	7.843	66.9	3.759	58.5	3.619	46.5	2.347
795.0		40.000	147.5	13.328	91.7	7.726	78.5	7.044	75.3	5.392
797.5		45.413								8.157
798.4	168.1	47.361								9.152
800.0	173.4	50.000	164.0	21.114	170.4	14.279	167.8	13.212	145.9	10.922
804.5		58.753		28.828	22.3	22.305		21.171		18.398
805.0	196.7	59.726	178.8	29.685	23.2	23.197	186.3	22.055	186.4	19.229

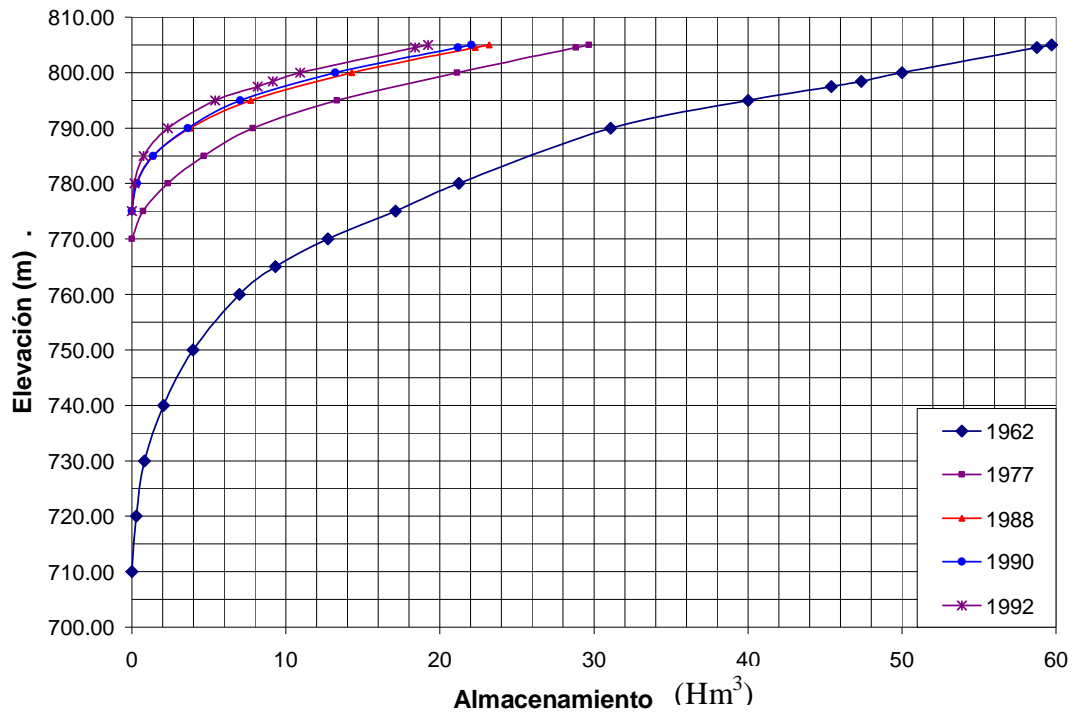
hm<sup>3</sup>: Millones de metros cúbicos.

**Tabla 5- 2. Pérdida de la capacidad de almacenamiento en cada elevación y en cada periodo (JICA y CFE, 1993).**

Elev. (m)	Pérdida 77-62 (hm <sup>3</sup> )	Pérdida 88-62 (hm <sup>3</sup> )	Pérdida 90-62 (hm <sup>3</sup> )	Pérdida 92-62 (hm <sup>3</sup> )
770.0	12.740			
775.0	16.399	17.123	17.123	17.123
780.0	18.894	20.916	20.891	21.054
790.0	23.253	27.337	27.477	28.749
795.0	26.672	32.274	32.956	34.608
800.0	28.886	35.721	36.788	39.078
804.5	29.925	36.448	37.582	40.355
805.0	30.041	36.529	37.671	40.497

hm<sup>3</sup>: Millones de metros cúbicos.

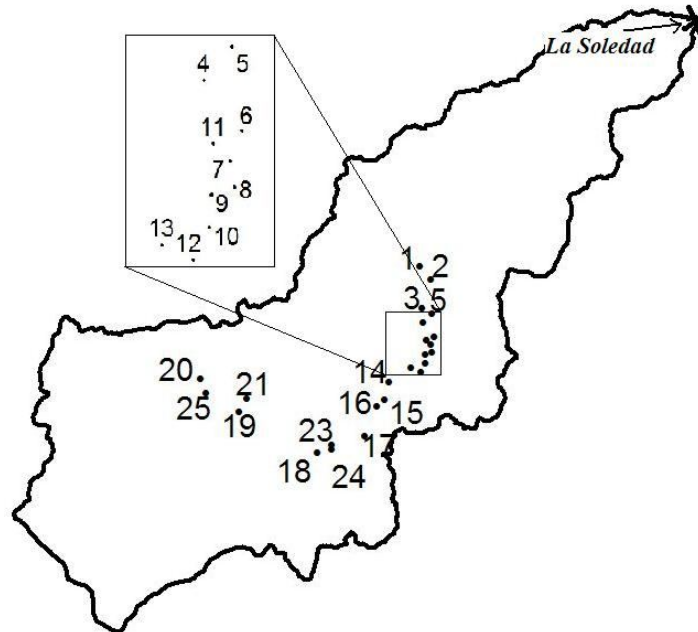
**Elevación vs. Almacenamiento**



**Figura 5- 4. Variación de la capacidad de almacenamiento. Para cada año se muestra la capacidad de almacenamiento. Se observa cómo se ha ido reduciendo con el paso del tiempo (JICA y CFE, 1993).**

La CFE consideró seriamente el problema y dispuso medidas para que los sedimentos no llegaran al embalse. Por ello se implementó un plan de conservación de cuencas, el cual consistía de represas retenedoras de sedimentos, terrazas forestales, muros secos, reforestación, zanjas y bordos (JICA y CFE, 1993).

En 1976 se comenzó la construcción de las represas retenedoras y para 1987 se habían construido 25, cubriendo 450.6 km<sup>2</sup>. El programa se suspendió en 1988 debido a problemas económicos (Figura 5- 5). Entre 1981 y 1987 se construyeron 43 km de terrazas forestales, protegiendo 100 ha de la cuenca. Se construyeron 5,019 muros perpendiculares a 156 barrancas y cárcavas, durante 1980 y 1987 con la intención de retardar el flujo y retener los sedimentos. 255 km de zanjas y bordos fueron excavados entre 1980 y 1987, con una sección transversal de 60x60cm, cubriendo 640 ha. Además de las obras anteriores, se plantaron 450,000 árboles en 625 ha (JICA y CFE, 1993).



**Figura 5- 5. Vista de la cuenca de La Soledad, se muestra la distribución de las 25 represas retenedoras de sedimentos.**

Se han hecho varios intentos por eliminar los azolves del vaso (JICA y CFE, 1993). Éstos son:

- Por medio de una válvula que existe en el fondo de la cortina de 1.88 m de diámetro en la cota 750m. Esta práctica dejó de llevarse a cabo debido a que se encontró que su capacidad de gasto de sedimentos era mucho menor que los sedimentos que se depositaban.
- Arrojar los sedimentos por el vertedor. El empleo del vertedor para arrojar sedimentos ha funcionado satisfactoriamente, con el defecto de que solo se pueden desalojar los azolves cercanos al mismo.
- Dragando el fondo del vaso. Esto se llevó a cabo por medio de una bomba de arena con una capacidad de 15.1 m<sup>3</sup>/min. El dragado se suspendió debido a que trozos de madera, y desperdicios urbanos y rurales obstruían la bomba.

### 5.3 Datos disponibles del proyecto

Se contó con batimetrías para las 25 represas y la presa La Soledad contenidas en la cuenca alta del río Apulco, las cuales se obtuvieron de JICA y CFE (1993). La información de los embalses se expresa en las Tabla 5- 3, Tabla 5- 4 y Tabla 5- 5, donde se muestra el volumen azolvado para cada año correspondiente, año de construcción, área de la cuenca y eficiencia de atrapamiento, además de 26 muestras de material azolvado en el vaso La Soledad, con su respectiva granulometría (JICA y CFE, 1993).

**Tabla 5- 3. Resultado de las batimetrías para todos los embalses en la cuenca alta del río Apulco (JICA y CFE, 1993).**

Embalse	Batimetrías							
	Año	Azolve (m <sup>3</sup> )	Año	Azolve (m <sup>3</sup> )	Año	Azolve (m <sup>3</sup> )	Año	Azolve (m <sup>3</sup> )
Represa 1	1982	4,043	1987	23,147				
Represa 2	1982	2,831	1984	5,449	1987	6,512		
Represa 3	1982	1,202	1984	23,086	1987	25,093		
Represa 4	1984	901	1985	2,441	1986	6,450	1987	15,805
Represa 5	1982	44,246						
Represa 6	1984	1,146	1985	1,296	1987	6,602		
Represa 7	1982	9,976	1985	17,494				
Represa 8	1982	162,181	1986	220,925	1987	254,474		
Represa 9	1982	1,435	1984	2,821	1985	6,760		
Represa 10	1986	281						
Represa 11	1984	580	1987	965				
Represa 12	1982	139	1984	316				
Represa 13	1982	20	1984	453	1985	936		
Represa 14	1981	10,631						
Represa 15	1982	3,152	1984	3,332	1985	3,500		
Represa 16	1982	969	1985	1,385				
Represa 17	1982	421	1984	510	1985	1,157		
Represa 18	1982	3,600	1984	18,942	1985	19,542		
Represa 19	1981	18,277						
Represa 20	1980	35,466						
Represa 21	1982	2,799	1984	9,850	1985	13,665		
Represa 23	1984	11,547	1985	20,824				
Represa 24	1986	22,922	1987	32,342				
Represa 25	1987	30,000						
Presa La Soledad	1977	30,041,000	1988	36,529,000	1990	37,671,000	1992	40,497,000

**Tabla 5- 4. Área de la cuenca de La Soledad con su respectivo año de construcción y eficiencia de atrapamiento de sedimentos (JICA y CFE, 1993).**

Embalse	Area (ha)	Año de Construcción	Eficiencia de atrapamiento por año			
			1977	1988	1990	1992
Presa La Soledad	144,539	1962	0.695	0.645	0.625	0.615

**Tabla 5- 5. Área de la cuenca de cada embalse con su respectivo año de construcción y eficiencia de atrapamiento de sedimentos (JICA y CFE, 1993).**

Embalse	Area (ha)	Año de Construcción	Eficiencia de atrapamiento
Represa 1	3,325	1979	0.47
Represa 2	556	1979	0.62
Represa 3	1,169	1977-78	0.6
Represa 4	694	1977-78	0.67
Represa 5	2,925	1976	0.67
Represa 6	112	1981	0.66
Represa 7	42	1980	0.82
Represa 8	3,475	1976-77	0.72
Represa 9	238	1978	0.65
Represa 10	11	1982	0.67
Represa 11	144	1983	0.57
Represa 12	9	1981	0.77
Represa 13	28	1982	0.67
Represa 14	2,181	1979-80	0.35
Represa 15	192	1980	0.53
Represa 16	355	1980	0.57
Represa 17	23	1981	0.65
Represa 18	1,917	1980	0.44
Represa 19	1,569	1979	0.43
Represa 20	2,469	1980	0.44
Represa 21	119	1981	0.68
Represa 23	3,125	1984	0.38
Represa 24	3,135	1986	0.54
Represa 25	16,883	1987	0.52

La estación meteorológica automática (EMA) más cercana a la cuenca es la TL01, con 7 años de registro de 2000-2006 (Servicio Meteorológico Nacional, SEMARNAT), con una acumulación de 198 tormentas agrupadas según la definición de tormenta de Wischmeier y Smith (1965 y 1978). Las estaciones climatológicas que se utilizaron fueron (ERIC III, 2006):

21011	21066	21140	29027
21021	21098	21184	29032
21029	21099	21207	29052
21032	21103	29002	29053
21043	21106	29003	
21047	21107	29004	
21055	21108	29005	
21057	21119	29011	
21059	21122	29020	
21064	21129	29022	

Por otro lado, se contó con las cartas de información geográficas de Series I y II de INEGI y t1 de INE de uso del suelo, vegetación, edafología y el modelo digital de elevación con una resolución de 30x30m.

## 5.4 Aplicación

Los métodos de agrupación de variables no consideran los procesos de transporte y depósito de sedimentos, por ello Kothyari *et al.* (1996) propone en su método que el material que es erosionado se transporta hasta la salida de la cuenca, combinando los conceptos de tasa de descarga ( $DR$ ) y de las curvas tiempo-área (Figura 5- 6). La ventaja de este método radica en que se puede trabajar junto con cualquiera de las versiones de la USLE. Aunque en México se tiene la dificultad de que dicha ecuación requiere un registro pluviográfico de la zona de aplicación, así como un inventario del uso del suelo, con su respectivo cultivo, rotación, productividad, así como fechas de siembra y de cosecha, información que escasea en nuestro país. Para remediar la falta de registro pluviométrico se han desarrollado diversas aproximaciones (*e.g.* Roose, 1977; Arnouldus, 1980; Cortés, 1991; Renard y Freimund, 1994) que emplean la precipitación anual. De este modo, el método de Kothyari *et al.* (1996) es viable para el medio mexicano.

### 5.4.1 Método

Para estimar el azolvamiento que ocurrirá en un embalse, en este trabajo se combina el método de la “Variación Temporal de Producción de Sedimentos” de Kothyari *et al.* (1996), con el concepto de eficiencia de atrapamiento de sedimentos en embalses. El primero sirve para estimar la cantidad de carga suspendida que arrojará una cuenca y el segundo para determinar la cantidad de sedimento que se quedará en el embalse, el cual será depositado.

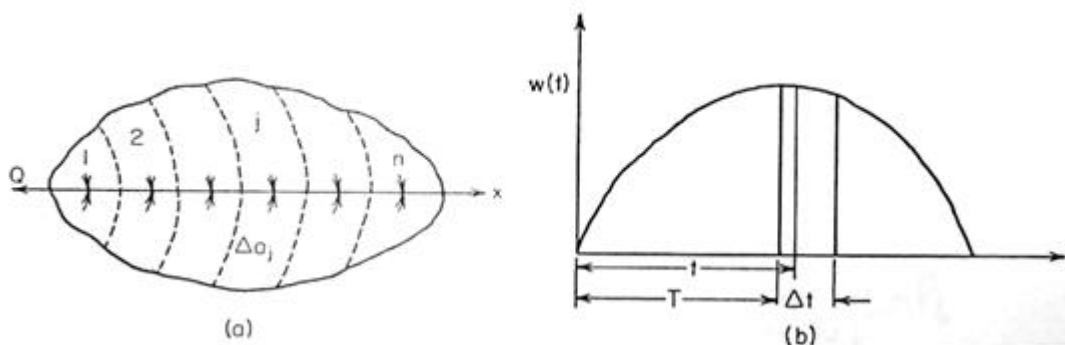


Figura 5- 6. Diagramas que describen el concepto de curvas tiempo-área (Chow, 1988).

El método de la “Variación Temporal de Producción de Sedimentos” se fundamenta en la suposición de que la curva de tiempo-área (Figura 5- 6) de una cuenca puede ser usada para obtener la “variación de carga de sedimentos suspendidos” que llevará la corriente durante una tormenta y simplifica el proceso de erosión, al no estudiar

la erosión, transporte y depósito por separado. El método divide la cuenca en segmentos tiempo área y supone que la pérdida de suelo del segmento aguas arriba descargará un cierto porcentaje de suelo en el segmento aguas abajo. La tasa de descarga ( $DR$ ) se determina como una función del área, pendiente y área forestada, el cual es calibrado con datos de campo de la salida de la cuenca.

Entonces, se requiere dividir la cuenca en  $n$  segmentos de igual tiempo de concentración (isócronas) a lo largo del cauce principal, numerando de la salida de la cuenca hacia aguas arriba (Figura 5- 6 y Figura 5- 7). La pérdida de suelo en cada segmento se puede estimar usando cualquier versión de la USLE (Ec. 5- 12). Para estimar el material desprendido de cada isócrona que será descargado en la siguiente se recurre al  $DR$  (Ec. 5- 1) definido por Kothyari *et al.* (1996) como:

$$DR_j = C_1 \frac{A_j}{A_{j-1}} + C_2 \frac{Ls_j}{Ls_{j-1}} + C_3 \frac{FA_j}{FA_{j-1}} \quad \text{Ec. 5- 1}$$

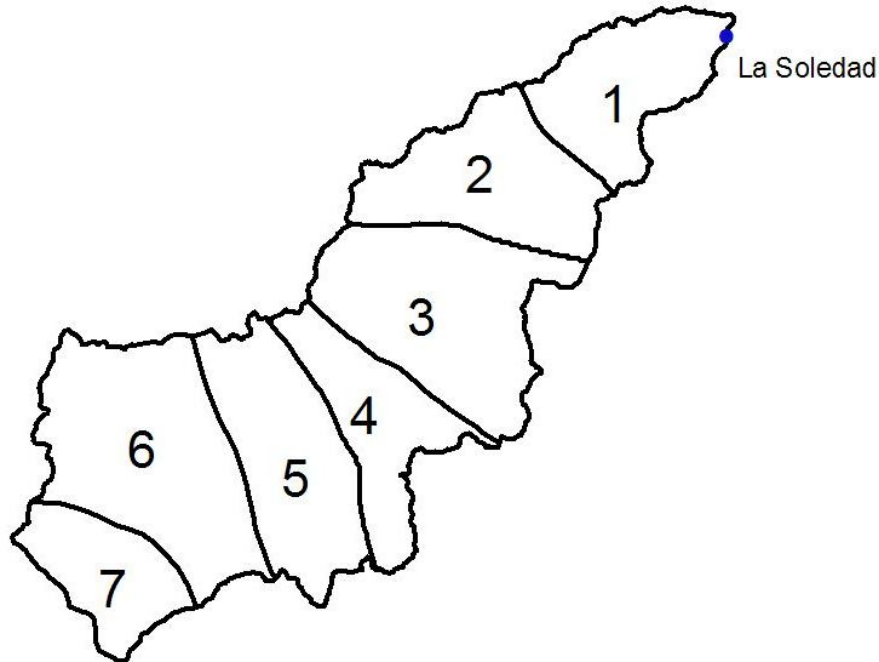


Figura 5- 7. Cuenca correspondiente a la presa La Soledad, sobre el río Apulco, con su respectiva distribución de isócronas.

Donde  $j$  es el número de segmento tiempo-área;  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$  son coeficientes que se suponen constantes para cada cuenca durante las distintas tormentas;  $A$  es el área del segmento;  $Ls$  es la pendiente del terreno, y  $FA$  el área forestada del segmento. El valor de la relación  $Ls$  es tomado como uno cuando la pendiente de la corriente aguas abajo del siguiente segmento es menor que la del segmento aguas arriba. Para el segmento más alejado de la salida, la relación de áreas es tomada también como uno.



Entonces la cantidad total de producción de sedimentos ( $Se$ ) para una tormenta aislada  $i$ , se expresa con la siguiente ecuación (Ec. 5- 2), donde  $Se_{ij}$ , es la pérdida de suelo correspondiente al segmento  $j$  (Kothyari *et al.*, 1996):

$$Se_i = DR_1 Se_{i1} + DR_1 DR_2 Se_{i2} + DR_1 DR_2 DR_3 Se_{i3} + \dots + DR_1 DR_2 \dots DR_n Se_{in} \quad \text{Ec. 5- 2}$$

Debido a que el área es el factor más importante de  $DR$  (Ec. 5- 1), seguida de la pendiente y al final el área forestada,  $C_1$  tendrá un peso mayor, luego  $C_2$  y  $C_3$  en ese orden, siendo estos tres factores menores que la unidad. Según Kothyari *et al.* (1996)  $C_2$  y  $C_3$  se pueden expresar en función de  $C_1$  (Ec. 5- 3 y Ec. 5- 4):

$$C_3 = \frac{C_1}{2} \quad \text{Ec. 5- 3}$$

$$C_2 = \frac{C_3 + C_1}{2} \quad \text{Ec. 5- 4}$$

Para la obtención del coeficiente  $C_1$  se requiere calibrar el modelo, por lo que es necesario relacionar una tormenta en la cuenca con la carga de sedimentos que salen de ésta. Dado que no se cuenta con datos de carga de sedimentos de las cuencas en cuestión y al contar con batimetrías en cada una de ellas, se obtuvieron los coeficientes con base en el material depositado en el embalse.

Puesto que la acumulación de  $Se$  de las  $m$  distintas tormentas en el año constituye la producción de sedimentos total en el año ( $Sa$ ) para cada cuenca y que los  $DR$  son invariables para cada segmento de cuenca, se trabajó con la suma de pérdida de suelo anual por segmento  $j$  ( $Se_{kj}$ ) a fin de agilizar el procedimiento (Ec. 5- 5, Ec. 5- 6 y Ec. 5- 8).

$$Sa = \sum_{i=1}^m Se_i \quad \text{Ec. 5- 5}$$

$$Se_1 + Se_2 + \dots + Se_m = (DR_1 Se_{11} + DR_1 DR_2 Se_{12} + \dots + DR_1 DR_2 \dots DR_n Se_{1n}) + \\ + (DR_1 Se_{21} + DR_1 DR_2 Se_{22} + \dots + DR_1 DR_2 \dots DR_n Se_{2n}) + \dots \\ \dots + (DR_1 Se_{m1} + DR_1 DR_2 Se_{m2} + \dots + DR_1 DR_2 \dots DR_n Se_{mn}) \quad \text{Ec. 5- 6}$$

$$Sek_j = \sum_{i=1}^m Se_{ij} \quad \text{Ec. 5- 7}$$

$$Sa = DR_1 Sek_1 + DR_1 DR_2 Sek_2 + DR_1 DR_2 DR_3 Sek_3 + \dots + DR_1 DR_2 \dots DR_n Sek_n \quad \text{Ec. 5- 8}$$

La eficiencia de atrapamiento ( $Te$ ) es el porcentaje de la diferencia entre la carga de sedimentos entrante al embalse ( $qs_{in}$ ) y la carga de sedimentos saliente ( $qs_{out}$ ), (Ec. 5-9):

$$Te = \frac{qs_{in} - qs_{out}}{qs_{in}} \quad \text{Ec. 5-9}$$

$$S_R = Te Sa \quad \text{Ec. 5-10}$$

$$d_m = d_1 + B \log \theta \quad \text{Ec. 5-11}$$

Entonces, una vez que se tiene  $Sa$  de la Ec. 5-8, se multiplica por  $Te$  y se obtiene la cantidad de sedimento que es retenido en cada presa  $S_R$  (Ec. 5-10) en unidades de masa y el proceso se repite las veces que sea necesario.

El resultado de las batimetrías son unidades de volumen de material azolvado, por lo que para poder compararlo con lo estimado en la Ec. 5-10 se recurrirá al método de Lane y Koelzer (1953). Estos autores presentaron la ecuación  $d_m = d_1 + B \log \theta$ , para evaluar la variación de la densidad de los sedimentos ( $d_m$ ) con respecto al tiempo, donde  $d_1$  y  $B$  son constantes definidas y  $\theta$  el número de años que lleva el sedimento en el fondo. La Tabla 5-6 muestra los valores de las constantes  $d_1$  y  $B$  dependiendo de si se trata de arcilla, limo o arena. La ecuación no hace distinción alguna entre los estratos, por lo que se considera toda la masa con la misma densidad.

**Tabla 5-6. Valores de  $d_1$  y  $B$  de la ecuación de Lane y Koelzer (1953)**

Estado de operación del almacenamiento	Unidades	Arcilla		Limo		Arena	
		$d_1$	$B$	$d_1$	$B$	$d_1$	$B$
Sedimento siempre o casi siempre sumergido	(Ton/m <sup>3</sup> )	0.48	0.26	1.04	0.09	1.49	0
Abatimiento normal en el almacenamiento	(Ton/m <sup>3</sup> )	0.74	0.17	1.19	0.04	1.49	0
Abatimiento considerable en el almacenamiento	(Ton/m <sup>3</sup> )	0.64	0.10	1.27	0.02	1.49	0
Almacenamiento vacío	(Ton/m <sup>3</sup> )	1.25	0	1.31	0	1.49	0

El modelo de pérdida de suelo USLE (Ec. 5-12) de Wischmeier y Smith (1965 y 1978) sigue siendo ampliamente utilizado en nuestros días. Las revisiones que ha sufrido, por ejemplo en la RUSLE (Renard *et al.*, 1997) y la RUSLE2 (Foster *et al.*, 2003), siguen analizando el problema de manera similar, sólo que han afinado los factores y organizado en bases de datos para Estados Unidos. Mientras que en el medio mexicano se sigue utilizando la USLE, al carecer de una base de datos nacional. La USLE se describe como (Ec. 5-12):

$$A = RKLSCP$$

Ec. 5- 12

La pérdida de suelo ( $A$ ), es directamente proporcional a los factores de erosividad por lluvia ( $R$ ), erosionabilidad del suelo ( $K$ ), erosibilidad de longitud y pendiente del terreno ( $LS$ ), cobertura del terreno ( $C$ ) y prácticas de conservación de cultivo ( $P$ ).  $K$  se puede obtener por medio de las cartas de edafología de INEGI y el método de la FAO (Figueroa *et al.*, 1991), sus unidades son (T ha h / ha MJ mm). En este trabajo,  $LS$  se calculó para cada píxel a partir de un archivo raster de la zona, en el cual se determinó la longitud y pendiente para cada punto a través de un algoritmo y las ecuaciones de Wischmeier y Smith (1978) (ver apéndice D). Estos dos factores son adimensionales. Para  $C$  se estimó un valor para las zonas forestadas con base en tablas y experiencia (Cortés, 2008), mientras que para las zonas agrícolas se calculó para maíz, este factor también carece de unidades. Los factores  $K$ ,  $C$  y  $P$  toman valores entre 0 y 1, que al multiplicarse por  $RLS$  se obtiene un producto  $KLSCP$  menor que  $RLS$ . El factor  $P$  se tomó como la unidad, ya que no se contó con información precisa acerca de qué tipo de prácticas de conservación se llevaban a cabo en la cuenca.

Para estimar  $R$ , se requieren datos de pluviógrafo, pero debido a la falta de éstos y al contar con una amplia red de estaciones meteorológicas con registro de lluvia de 24 h, se optó por combinar los datos de estas con las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA). Lo anterior se llevó a cabo determinando la tormenta característica (Figura 5-21), al analizar los datos de la EMA, mediante una duración y precipitación adimensional. Con la misma información, se realizó un análisis de frecuencias (Figura 5-22) para la duración de las tormentas. Entonces, por medio de un procedimiento de Montecarlo para cada día de lluvia se determinó con base en el análisis de frecuencias la duración de la tormenta y se supuso para cada día una tormenta con la lámina de 24 h. Al tener la curva característica de las tormentas en la zona, con su respectiva duración y precipitación, es posible determinar el incremento de lámina de lluvia para cada instante y entonces obtener  $R$  por la metodología de Wischmeier y Smith (1978). El área de aplicación de cada estación climatológica se determinó por polígonos de Thiessen (Aparicio, 2004). Dada la naturaleza aleatoria de la función de Montecarlo, es preciso repetir el proceso para cada día de lluvia un número suficientes de veces, a fin de poder identificar una tendencia, por lo que se repitió 1000 veces para cada día de lluvia.

#### 5.4.2 Cálculos y Resultados

Se procedió a analizar sólo las represas 5, 8, 9, 14, 18, 23, 24, 25 y la presa La Soledad (Figura 5- 8), debido a que sus cuencas pudieron ser delimitadas satisfactoriamente, coincidiendo con el área delimitada por JICA y CFE (1993). Las cuencas se delimitaron con la ayuda del modelo digital de elevación del terreno (tamaño

del píxel 30x30m), se determinó la pendiente del cauce principal y se obtuvo el tiempo de concentración ( $T_c$ ) (Tabla 5- 7) por el método de Kirpich (Aparicio, 2004), dividiéndose en segmentos de isócronas (figura 5-6).

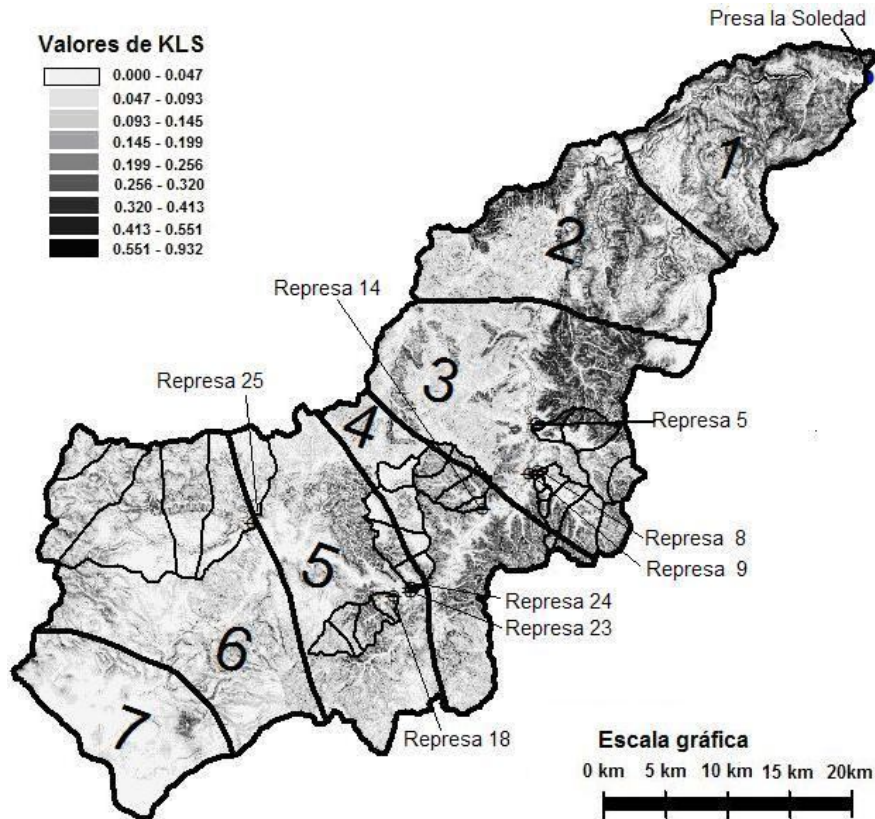


Figura 5- 8. Cuenca de La Soledad, con la distribución de las cuencas de las represas seleccionadas para estudio. Se indica la numeración de los segmentos isócronos así como el valor de  $KLS$  para cada píxel.

Tabla 5- 7. Cuenca de cada embalse con su respectivo tiempo de concentración y número de segmentos isócronos.

Embalse	$T_c$ (h)	No. Isócronos
Represa 5	1.47	5
Represa 8	1.14	5
Represa 9	0.56	4
Represa 14	0.69	4
Represa 18	0.94	4
Represa 23	1.42	4
Represa 24	1.46	4
Represa 25	2.55	5
Presa La Soledad	13.35	7

Del modelo digital de elevación se obtuvo un archivo raster y de éste la elevación de cada píxel. Por medio de un algoritmo se determinó la dirección y el desnivel para donde escurría cada uno, pudiendo tener una longitud de la pendiente de 30 o 42.43m

(ver apéndice D). Entonces, al conocer el desnivel y la longitud de la pendiente se obtiene la pendiente, por lo que se aplicó la metodología de la USLE, (Ec. 5- 13 a Ec. 5- 17) (Wischmeier y Smith, 1978; Figueroa *et al.*, 1991):

$$L = \left( \frac{\lambda}{22.1} \right)^m \quad \text{Ec. 5- 13}$$

$$m = \frac{\beta}{1 + \beta} \quad \text{Ec. 5- 14}$$

$$\beta = \frac{\text{sen}\theta / 0.0896}{3(\text{sen}\theta)^{0.8} + 0.56} \quad \text{Ec. 5- 15}$$

$$S = 10.8 \text{sen}\theta + 0.03 \quad \theta < 5.14^\circ \quad \text{Ec. 5- 16}$$

$$S = 16.8 \text{sen}\theta - 0.50 \quad \theta \geq 5.14^\circ \quad \text{Ec. 5- 17}$$

donde  $L$  es el factor de erosibilidad de longitud de la pendiente;  $\lambda$ , la longitud de la pendiente;  $S$ , el factor de erosibilidad de pendiente; y  $\theta$ , el ángulo de inclinación respecto a la horizontal.

Para determinar  $K$  se empleó el método de la FAO (Figueroa *et al.*, 1991), que proporciona valores de erosionabilidad de suelo ( $K$ ) con base en la unidad geológica del suelo y su textura (gruesa, media o fina). La unidad de suelo y textura para cada zona de la cuenca se obtuvo de las cartas de edafología del INEGI. En las Figura 5- 9 a Figura 5- 17 se muestran las cuencas estudiadas con sus valores de  $KLS$  para cada pixel de 30x30, además de la distribución de los segmentos de área isócronas. Nótese que el segmento  $I$  indica la salida de la cuenca.

**Tabla 5- 8. JICA y CFE (1993).**

Embalse	Área (ha)	Año de Construcción	Eficiencia de atrapamiento
Represa 5	2,964	1976	0.67
Represa 8	3,074	1976-77	0.72
Represa 9	273	1978	0.65
Represa 14	2,139	1979-80	0.35
Represa 18	1,831	1980	0.44
Represa 23	3,086	1984	0.38
Represa 24	3,113	1986	0.54
Represa 25	15,285	1987	0.52

Tabla 5- 9. JICA y CFE (1993).

Embalse	Área (ha)	Año de Construcción	Eficiencia de atrapamiento anual			
			1977	1988	1990	1992
Presa La Soledad	144,539	1962	0.695	0.645	0.625	0.615

Tabla 5- 10. JICA y CFE (1993).

Embalse	Batimetrías							
	Año	Azolve (m³)	Año	Azolve (m³)	Año	Azolve (m³)	Año	Azolve (m³)
Represa 5	1982	44,246						
Represa 8	1982	162,181	1986	220,925	1987	254,474		
Represa 9	1982	1,435	1984	2,821	1985	6,760		
Represa 14	1981	10,631						
Represa 18	1982	3,600	1984	18,942	1985	19,542		
Represa 23	1984	11,547	1985	20,824				
Represa 24	1986	22,922	1987	32,342				
Represa 25	1987	30,000						
Presa La Soledad	1977	30,041,000	1988	36,529,000	1990	37,671,000	1992	40,497,000

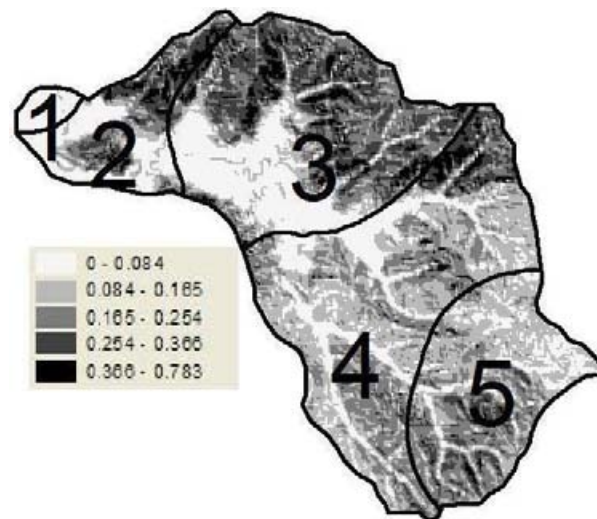


Figura 5- 9. Cuenca de la Represa 5. Valores de KLS para cada pixel en escala de grises (escala en el gráfico), con sus respectivas isócronas.

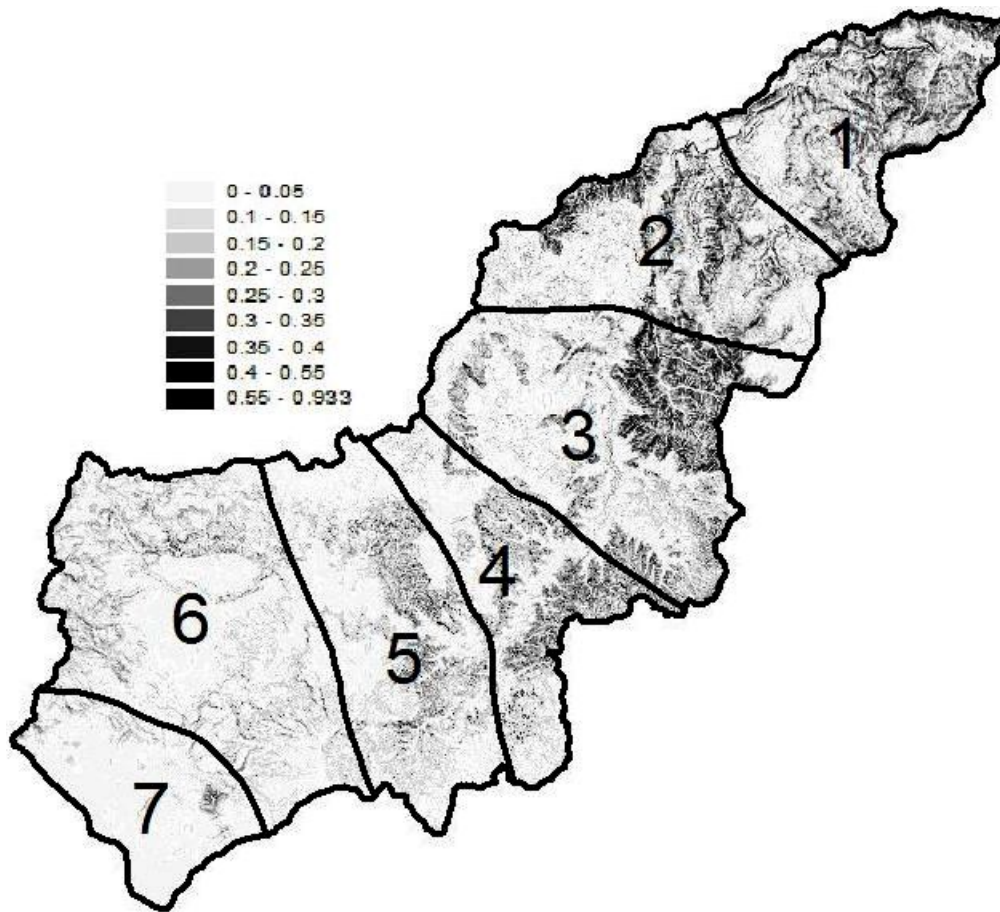


Figura 5- 10. Cuenca de la Presa La Soledad. Valores de *KLS* para cada pixel en escala de grises (escala en el gráfico), con sus respectivas isócronas.

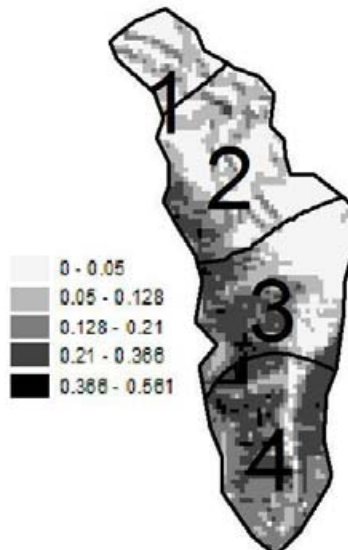


Figura 5- 11. Represa 9. Valores de *KLS* para cada pixel en escala de grises (escala en el gráfico), con sus respectivas isócronas.



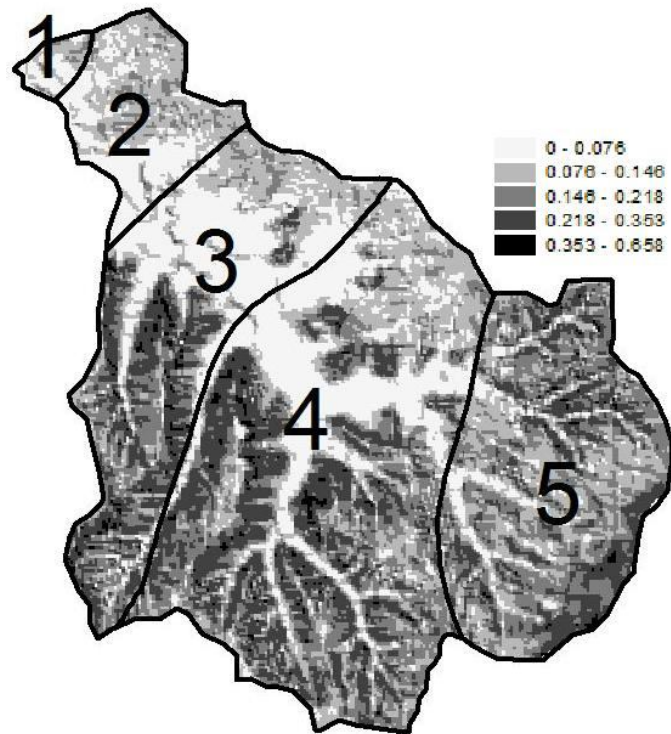


Figura 5- 12. Represa 8 Valores de *KLS* para cada pixel en escala de grises (escala en el gráfico), con sus respectivas isócronas.

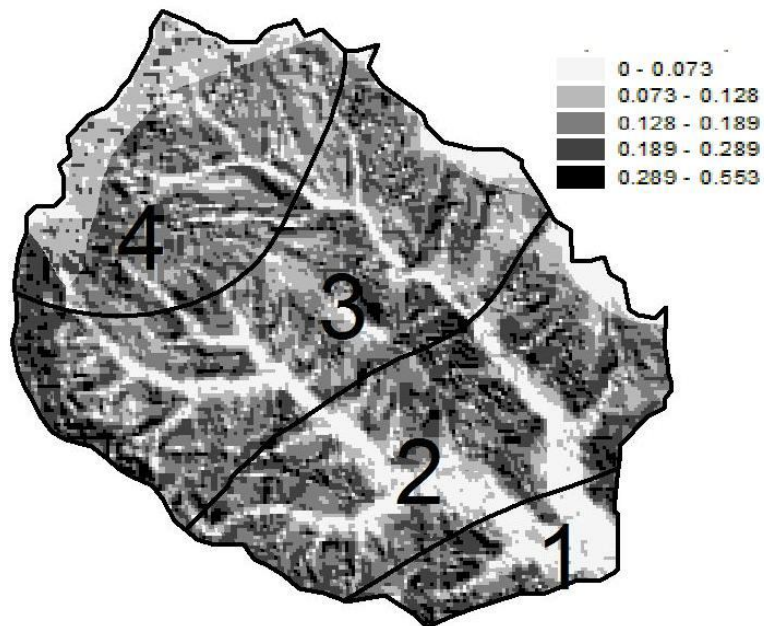


Figura 5- 13. Represa 14. Valores de *KLS* para cada pixel en escala de grises (escala en el gráfico), con sus respectivas isócronas.



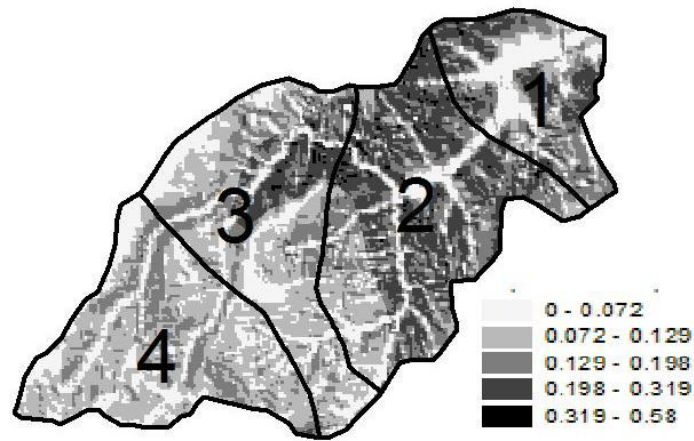


Figura 5- 14. Represa 18. Valores de *KLS* para cada pixel en escala de grises (escala en el gráfico), con sus respectivas isócronas.

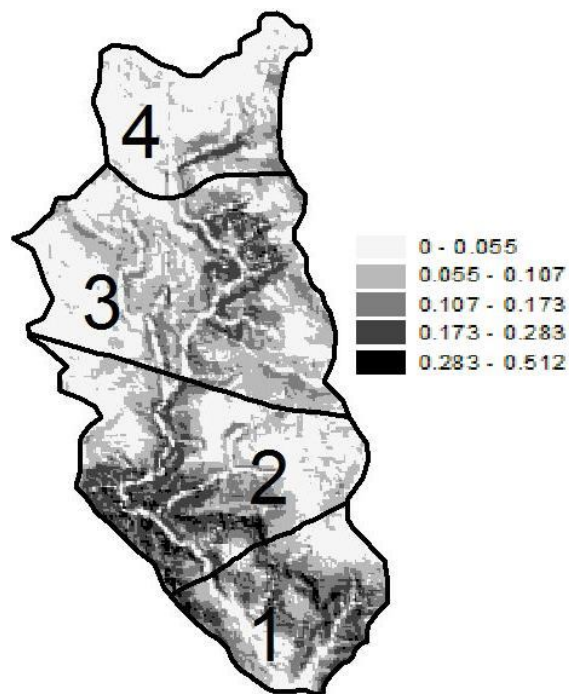


Figura 5- 15. Represa 23. Valores de *KLS* para cada pixel en escala de grises (escala en el gráfico), con sus respectivas isócronas.

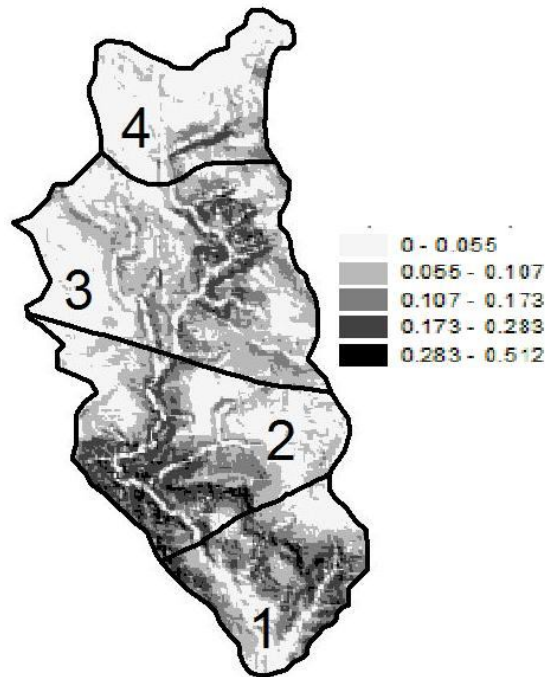


Figura 5- 16. Represa 24. Valores de KLS para cada pixel en escala de grises (escala en el gráfico), con sus respectivas isócronas.

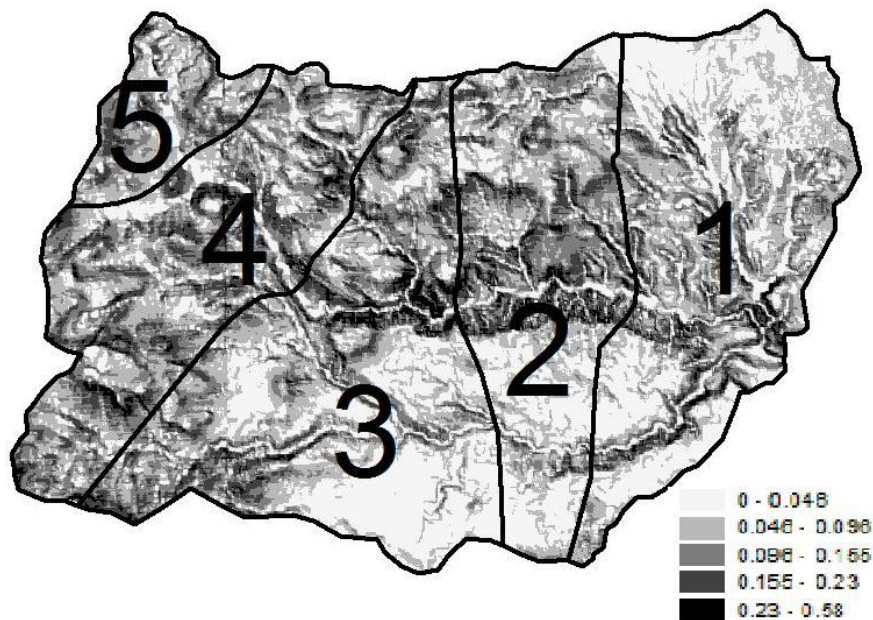


Figura 5- 17. Represa 25. Valores de KLS para cada pixel en escala de grises (escala en el gráfico), con sus respectivas isócronas.

El factor de la cobertura vegetal ( $C$ ) se obtuvo a partir de las cartas de Uso del Suelo de la Serie I y II de INEGI, identificando las zonas agrícolas o forestales con su respectivo tipo de vegetación. En el caso forestal se recurrió a expertos en la materia

(Cortés, 2008), quien proporcionó (Figura 5- 18 y Figura 5- 19, y Tabla 5- 11) valores aproximados de  $C$  para cada tipo de vegetación, los cuales coincidieron con los estimados requerimientos de Wischmeier (1978). Mientras que para las zonas agrícolas, se calculó  $C$  para el maíz, cultivo predominante en el distrito de desarrollo rural 2 y 3 de Puebla (Zacatlán y Teziutlan), 163 y 165 de Tlaxcala (Calpulapa y Huamantla) (Figura 5- 20 y Tabla 5- 12). Las fechas de siembra y de cosecha son 1 de Abril y 1 de Octubre aproximadamente (SAGARPA-Puebla DDR 2 y 3, 2008). La principal técnica de cultivo es el barbecho con vertedora y se remueven los residuos, siendo baja su productividad, aunque también se emplea maquinaria, aumentando su productividad ligeramente. Figueroa *et al.* (1991) menciona las características de estos cultivos, pero requiere que el índice de erosividad anual ( $R$ ) (Ec. 5- 21) vaya variando en porcentaje, lo cual se llevó a cabo, siendo  $C$  particular para cada año (ver anexo A).

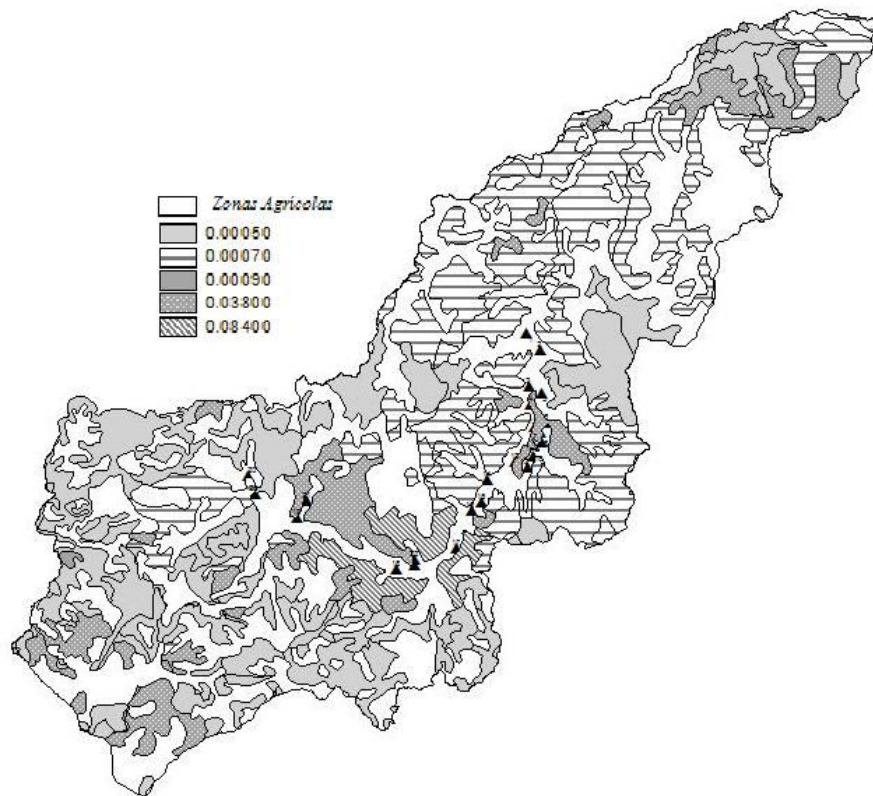


Figura 5- 18. Factor  $C$  para zonas forestadas de la serie t1 de Vegetación de INE.

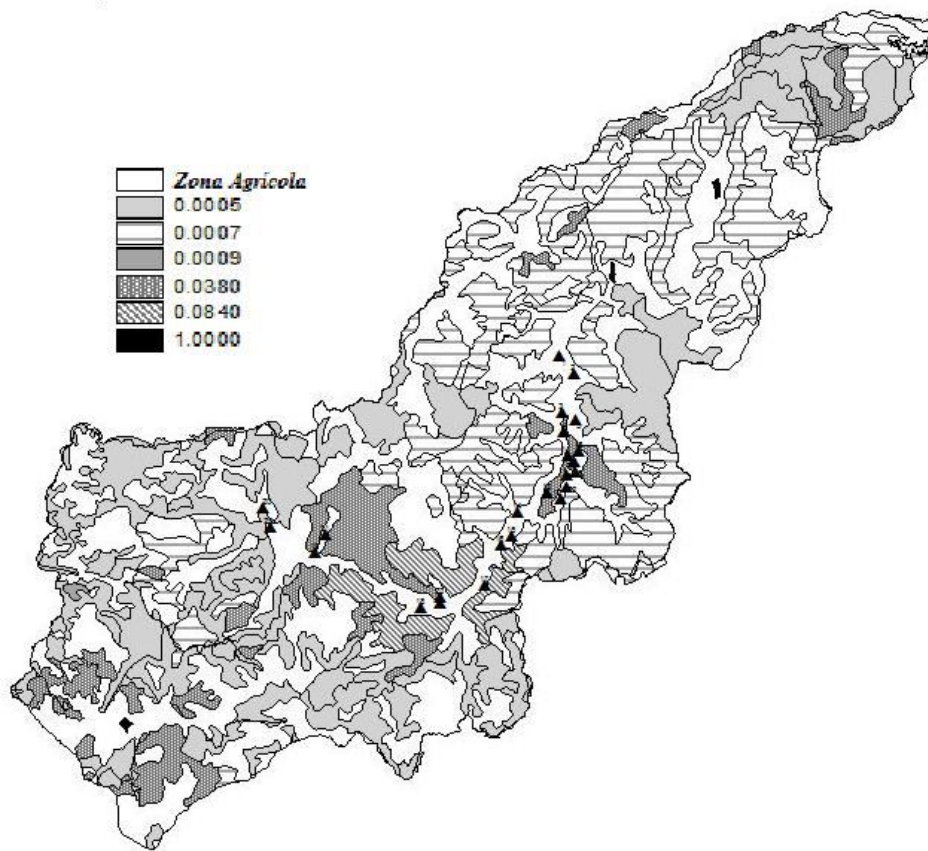


Figura 5- 19. Factor C para zonas forestadas de la serie II de Vegetación de INEGI.

Tabla 5- 11. Valores de C usados para áreas forestadas.

USO SUELO	FACTOR C
Bosque de encino	0.0009
Bosque de encino-pino	0.0007
Bosque de mesofilo de montaña	0.0005
Bosque de oyamel	0.0005
Bosque de pino	0.0005
Bosque de tascate	0.0005
Marorral desertico rosetofilo	0.0840
Matorral crasicaule	0.0840
Pastizal cultivado	0.0380
Pastizal halofilo	0.0450
Pastizal inducido	0.0380
Selva alta y mediana perennifolia	0.0007
Vegetación halofila	0.1700
Vegetación halofila y gipsofila	0.1700
Vegetación hidrofila	0.0040

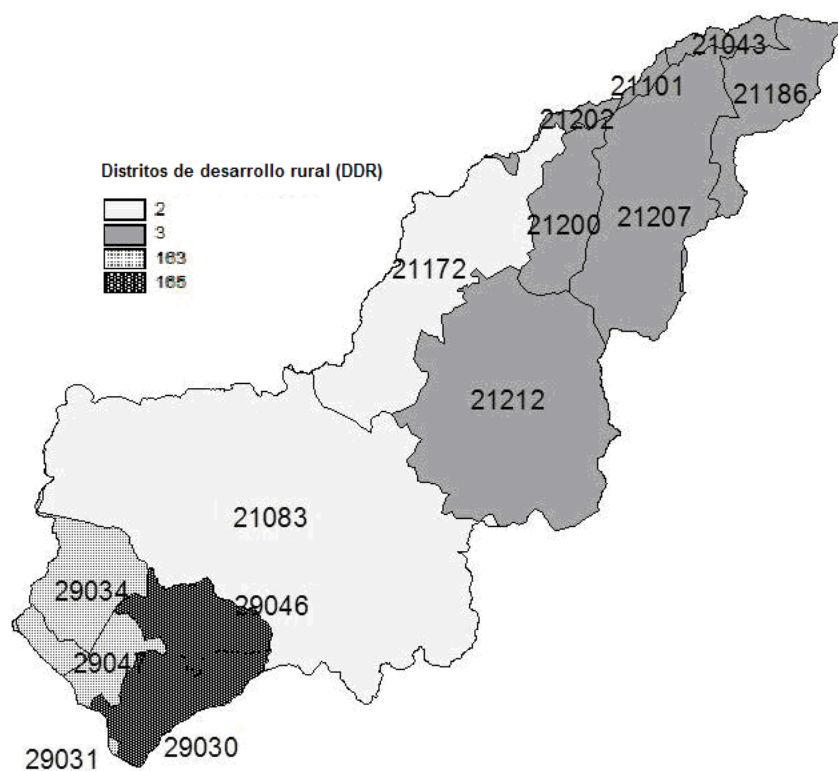


Figura 5- 20. Cuenca de la presa La Soledad, donde se muestra la clave de cada municipio y el distrito de desarrollo rural al que corresponde cada uno.

Tabla 5- 12. Relación de municipios con su respectiva clave, distrito de desarrollo rural y estado correspondiente.

Clave	Municipio	Distrito de desarrollo rural	Estado
21083	Ixtacamaxitlán	DDR02-Zacatlán	Puebla
21172	Tetela de Ocampo	DDR02-Zacatlán	Puebla
21043	Cuetzalan del Progreso	DDR03-Teziutlan	Puebla
21207	Zacapoaxtla	DDR03-Teziutlan	Puebla
21101	Nauzontla	DDR03-Teziutlan	Puebla
21202	Xochitlán de Vicente Suárez	DDR03-Teziutlan	Puebla
21212	Zautla	DDR03-Teziutlan	Puebla
21200	Xochiapulco	DDR03-Teziutlan	Puebla
21186	Tlatlauquitepec	DDR03-Teziutlan	Puebla
29047	Lázaro Cárdenas	DDR163-Calpulapa	Tlaxcala
29034	Tlaxco	DDR163-Calpulapa	Tlaxcala
29031	Tetla de la Solidaridad	DDR163-Calpulapa	Tlaxcala
29046	Emiliano Zapata	DDR165-Huamantla	Tlaxcala
29030	Terrenate	DDR165-Huamantla	Tlaxcala

R constituye el factor de peso de la USLE y su cálculo se obtuvo de la combinación de la tormenta característica (Ec. 5- 19 y Figura 5- 21), distribución de tormentas de la EMA TL01 (Ec. 5- 18 y Figura 5- 22) y el procedimiento de Montecarlo, que genera números aleatorios entre 0 y 1:



$$F = -1.086 e^{(-0.002498 D)} + 1.09 \quad \text{Ec. 5- 18}$$

$$RMSE = 0.01528$$

$$\frac{pi}{P_{24}} = -0.143 \left(\frac{ti}{D}\right)^3 - 0.4616 \left(\frac{ti}{D}\right)^2 + 1.5985 \left(\frac{ti}{D}\right) \quad \text{Ec. 5- 19}$$

$$R^2 = 0.8626$$

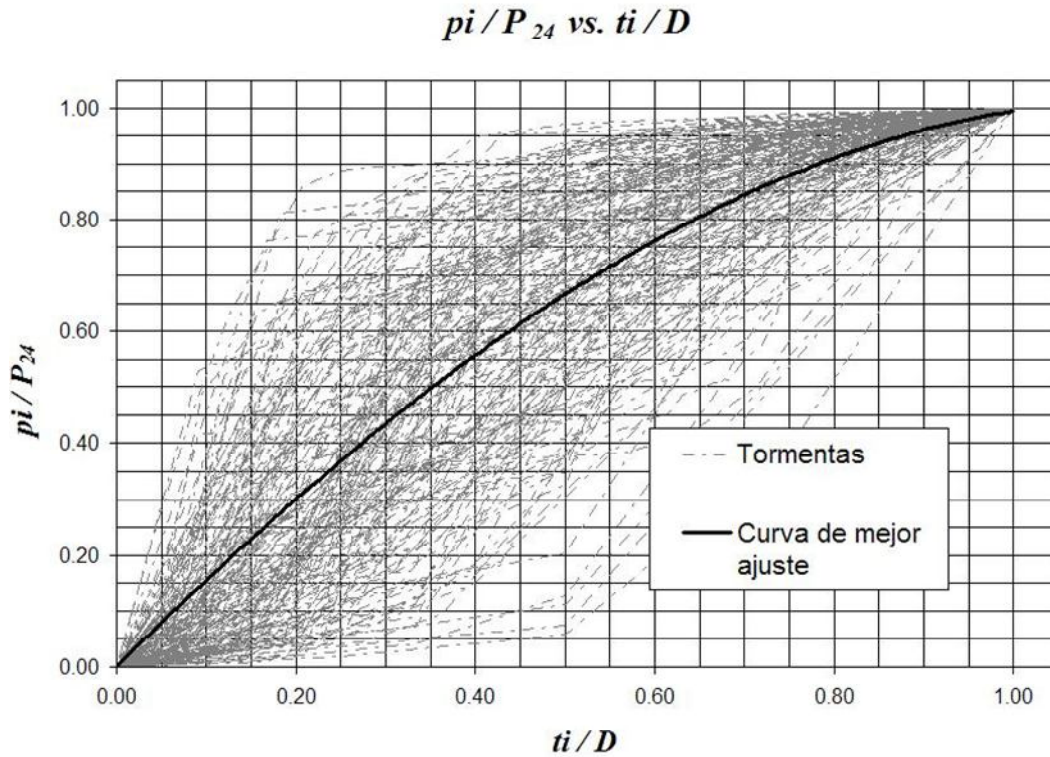
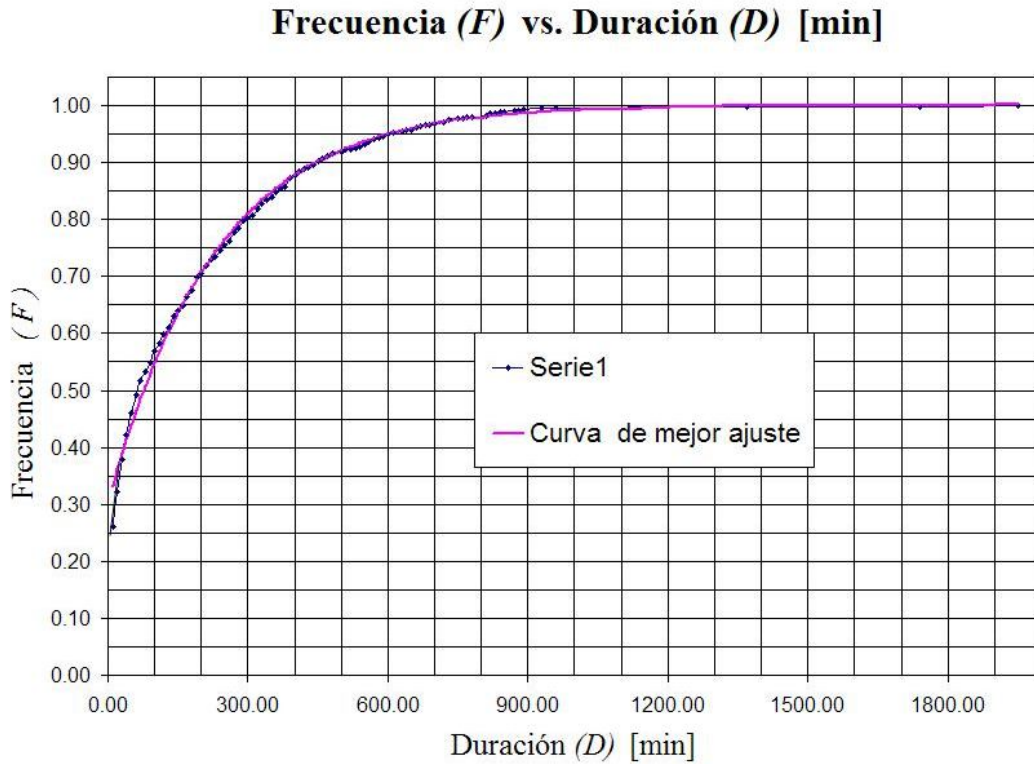


Figura 5- 21. Tormenta característica de la EMA TL01 utilizada en la metodología.

Siendo  $F$  la frecuencia acumulada,  $0 < F < 1$ , y  $D$  la duración de la tormenta. Por su parte  $pi$  es la lámina de lluvia acumulada en el instante  $ti$  y  $P_{24}$  la lámina de lluvia en 24h. Entonces, se supone una tormenta para cada día de lluvia, por lo que para cada día de registro de la estación climatológica se genera un número aleatorio  $x$ , el cual entra en la Ec. 5- 18 como  $F$  y encuentra  $D$ . Luego se pasa a la Ec. 5- 19, donde conocemos de antemano  $P_{24}$ , se resuelve para  $pi$ , pudiendo variar de  $0 \leq pi \leq P_{24}$  y  $0 \leq ti \leq D$ .



**Figura 5- 22. Distribución de frecuencia acumulada de tormentas de la EMA TL01 empleada en la metodología.**

Una vez que se determina  $pi$ , se puede obtener el incremento de lámina de lluvia ( $\Delta pi$ ) para un intervalo de tiempo, su intensidad ( $I$ ) y la intensidad máxima en 30 min ( $I_{30}$ ). Estas variables se requieren para las ecuaciones de Wischmeier y Smith (1978) para la obtención de  $R$  para una tormenta cualquiera (Ec. 5- 20 a Ec. 5- 23):

$$R = \sum_{i=1}^m EI_{30} \tag{Ec. 5- 20}$$

$$E = \sum_{j=1}^n e_j p_j \tag{Ec. 5- 21}$$

$$e_j = 0.119 + 0.0873 \log_{10} I_j \quad I_j < 76 \text{ mm/h} \tag{Ec. 5- 22}$$

$$e_j = 0.283 \quad I_j \geq 76 \text{ mm/h} \tag{Ec. 5- 23}$$

En las ecuaciones anteriores,  $I_j$  es la intensidad de la lluvia en el intervalo  $j$  (mm/h),  $e_j$  es la energía cinética para el intervalo de tiempo  $j$  (MJ/ha mm),  $\Delta pi = p_j$  es la lámina de lluvia en el intervalo de tiempo  $j$  (mm),  $E$  es la energía cinética total de la

tormenta (MJ/ha) y  $R$  es el factor de erosividad de la lluvia o índice de erosividad anual (MJ mm / ha h año).

Una vez que se obtuvo el  $EI_{30}$  para un día, se repitió el proceso 1000 veces y se obtuvo un promedio. Este promedio se acumuló con el resto de los promedios de los días del año y se obtuvo  $R$  (Ec. 5- 20). En el apéndice B se muestra la distribución de  $R$  anual para cada estación. Con el fin de automatizar el proceso se desarrolló un programa (apéndice C).

Al tener  $R$ ,  $K$ ,  $LS$  y  $C$ , se obtiene la pérdida de suelo ( $A$ , Ec. 5- 12) que constituirá la erosión para cada segmento isócrona. Conociendo el área, pendiente promedio y área forestada de la isócrona, se pueden proponer valores de  $C_1$ , obtener los  $DR_s$  y aplicar las ecuaciones Ec. 5- 5, Ec. 5- 6, Ec. 5- 8 y Ec. 5- 10 para obtener  $S_R$ . Este resultado ( $S_R$ ) lo comparamos contra el más reciente dato de material sedimentado, transformado de unidades de volumen a masa con la Ec. 5- 11, hasta obtener el menor error posible.

Para la obtención de los valores de  $d_I$  y  $B$  de la Ec. 5- 11, se contó con 26 muestras de azolves de la presa La Soledad (JICA y CFE, 1993). Estas se analizaron, determinando el porcentaje de arena, limo y arcilla de cada una. Posteriormente se obtuvo un promedio general para todas las muestras. Para arena fue 39.19%, para limo 41.97% y para arcilla 18.84%; la densidad para cada material por año se muestra en la Tabla 5- 14. Cuando se tiene una mezcla de diferentes tipos de suelo se emplea la Ec. 5- 24 para obtener la densidad representativa ( $dsed$ ) para todo el embalse (Tabla 5- 14), en lugar de realizar un promedio ponderado (USACE, 1995).

$$dsed = \frac{1}{\left(\frac{F_{clay}}{d_{clay}}\right) + \left(\frac{F_{silt}}{d_{silt}}\right) + \left(\frac{F_{sand}}{d_{sand}}\right)} \quad \text{Ec. 5- 24}$$

Donde  $dsed$  será la densidad representativa de los sedimentos,  $F_{clay}$  la fracción de arcilla,  $d_{clay}$  la densidad de arcilla,  $F_{silt}$  la fracción de limo,  $d_{silt}$  la densidad de limo,  $F_{sand}$  la fracción de arena y  $d_{sand}$  la densidad de arena. Al variar las densidades con respecto a los  $\theta$  años se obtendrá un  $dsed$  para cada año de consolidación (Tabla 5- 14).

Los valores calibrados de  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$  para los distintos embalse se muestran en la Tabla 5- 13. Del mismo modo las tasas de descarga ( $DR$ ) calculadas para cada cuenca se expresan en la Tabla 5- 15.



Tabla 5- 13. Relación de embalses con sus coeficientes  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$ .

Embalse	$C_1$	$C_2$	$C_3$
Represa 5	0.0520	0.0390	0.0260
Represa 8	0.0858	0.0644	0.0429
Represa 9	0.1281	0.0961	0.0641
Represa 14	0.1480	0.1110	0.0740
Represa 18	0.0644	0.0483	0.0322
Represa 23	0.1157	0.0868	0.0579
Represa 24	0.1290	0.0968	0.0645
Represa 25	0.1910	0.1433	0.0955
Presa La Soledad	0.1071	0.0803	0.0536

Tabla 5- 14. Densidades correspondientes para cada año azolvado, para los distintos materiales (arcilla, limo y arena) y el compuesto.

$\theta$ (años)	$d_{clay}$ (T/m <sup>3</sup> )	$d_{silt}$ (T/m <sup>3</sup> )	$d_{sand}$ (T/m <sup>3</sup> )	$d_{sed}$ (T/m <sup>3</sup> )	$\theta$ (años)	$d_{clay}$ (T/m <sup>3</sup> )	$d_{silt}$ (T/m <sup>3</sup> )	$d_{sand}$ (T/m <sup>3</sup> )	$d_{sed}$ (T/m <sup>3</sup> )
1	0.4807	1.0415	1.4901	0.9452	17	0.7961	1.1538	1.4901	1.1582
2	0.5578	1.0689	1.4901	1.0067	18	0.8025	1.1561	1.4901	1.1617
3	0.6030	1.0850	1.4901	1.0392	19	0.8085	1.1582	1.4901	1.1650
4	0.6350	1.0964	1.4901	1.0610	20	0.8142	1.1603	1.4901	1.1681
5	0.6599	1.1053	1.4901	1.0773	21	0.8196	1.1622	1.4901	1.1710
6	0.6802	1.1125	1.4901	1.0902	22	0.8248	1.1641	1.4901	1.1738
7	0.6973	1.1186	1.4901	1.1009	23	0.8298	1.1658	1.4901	1.1764
8	0.7122	1.1239	1.4901	1.1099	24	0.8345	1.1675	1.4901	1.1789
9	0.7253	1.1286	1.4901	1.1178	25	0.8390	1.1691	1.4901	1.1813
10	0.7370	1.1328	1.4901	1.1247	26	0.8434	1.1707	1.4901	1.1836
11	0.7476	1.1366	1.4901	1.1309	27	0.8476	1.1722	1.4901	1.1858
12	0.7573	1.1400	1.4901	1.1365	28	0.8517	1.1736	1.4901	1.1879
13	0.7662	1.1432	1.4901	1.1415	29	0.8556	1.1750	1.4901	1.1899
14	0.7745	1.1461	1.4901	1.1462	30	0.8593	1.1764	1.4901	1.1919
15	0.7822	1.1489	1.4901	1.1505	31	0.8630	1.1777	1.4901	1.1937
16	0.7894	1.1514	1.4901	1.1545	32	0.8665	1.1789	1.4901	1.1956

Tabla 5- 15. Relación de embalses con sus respectivas tasas de descarga ( $DR$ ).

Embalse	$DR_1$	$DR_2$	$DR_3$	$DR_4$	$DR_5$	$DR_6$	$DR_7$
Represa 5	0.1170	4.9416	0.2914	0.1401	0.0799		
Represa 8	0.1931	0.7126	15.4556	0.3659	0.1369		
Represa 9	0.2882	1.5773	0.3369	0.3763			
Represa 14	0.3330	1.1259	0.4062	0.2575			
Represa 18	0.1449	4.6298	0.1224	0.2141			
Represa 23	0.2603	0.3444	6.0556	0.1446			
Represa 24	0.2903	0.3745	6.7517	0.1612			
Represa 25	0.4298	0.3645	0.5401	0.3889	0.1901		
Presa La Soledad	0.2410	0.2928	0.3094	0.1660	0.2532	0.3487	0.0933

En las Tabla 5- 16 a Tabla 5- 24 se muestran los resultados del material azolvado en cada embalse. La columna 1 muestra el año, siendo el primero el de construcción y el último el de la última batimetría que se posee. La columna 2 corresponde a la producción de sedimentos calculada por año (*Sa*) en toneladas (Ec. 5- 5 y Ec. 5- 8). En la columna 3 se acumula *Sa* a los años en que hay batimetrías. La columna 5 corresponde al sedimento que es retenido en la presa (*SR*) también en unidades de masa (Ec. 5- 10). La columna 6 (*Azolve*) se refiere al volumen de sedimentos que ocupa en el almacenamiento, obtenido de batimetrías (JICA y CFE, 1993), se entiende que tendrá un cierto grado de incertidumbre debido a la naturaleza con que son realizadas. En la columna 7 (*dsed*) se expresa la densidad calculada para los azolves (col. 6), calculadas a partir de muestras con las Ec. 5- 11 y Ec. 5- 24. La columna 8 expresa el producto de la columna 6 y 7, es decir los azolves en unidades de masa, por lo que su comparación con *SR* (col. 5) es posible. Por último en la columna 9 se tiene el error, que se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Error \%} = 100((SR - Azolve) / Azolve) \quad \text{Ec. 5- 25}$$

**Tabla 5- 16. Represa 5, cálculos y resultados de la comparación de la producción de sedimentos anual calculado *Sa* y el azolve en el embalse.**

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Año	<i>Sa</i> (T)	<i>Sa</i> Acumulado (T)	<i>Te</i>	<i>SR</i> (T)	Azolve (m <sup>3</sup> )	<i>dsed</i> (T/m <sup>3</sup> )	Azolve (T)	Error %
1976	7,001.18							
1977	2,875.98							
1978	5,721.85							
1979	11,358.62							
1980	14,133.62							
1981	20,230.30							
1982	11,120.76	72,442.31	0.67	48,536.35	44,246.00	1.09	48,238.00	0.62%

**Tabla 5- 17. Represa 8, cálculos y resultados de la comparación de la producción de sedimentos anual calculado *Sa* y el azolve en el embalse.**

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Año	<i>Sa</i> (T)	<i>Sa</i> Acumulado (T)	<i>Te</i>	<i>SR</i> (T)	Azolve (m <sup>3</sup> )	<i>dsed</i> (T/m <sup>3</sup> )	Azolve (T)	Error %
1977	7,098.14							
1978	3,982.68							
1979	18,163.91							
1980	74,192.09							
1981	61,810.82							
1982	36,052.64	201,300.28	0.72	144,936.20	162,181.00	1.09	176,813.41	-18.03%
1983	16,361.89							
1984	53,499.46							
1985	51,384.94							
1986	35,375.02	357,921.59	0.72	257,703.54	220,925.00	1.12	248,474.89	3.71%
1987	41,761.79	399,683.38	0.72	287,772.03	254,474.00	1.13	287,780.57	0.00%

**Tabla 5- 18. Represa 9, cálculos y resultados de la comparación de la producción de sedimentos anual calculado  $S_a$  y el azolve en el embalse.**

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Año	$S_a$ (T)	$S_a$ Acumulado (T)	$Te$	$SR$ (T)	Azolve ( $m^3$ )	$dsed$ (T/ $m^3$ )	Azolve (T)	Error %
1978	146.50							
1979	666.52							
1980	2,730.08							
1981	2,273.17							
1982	1,328.27	7,144.54	0.65	4,643.95	1,435.00	1.06	1,522.60	205.00%
1983	601.64							
1984	1,967.25	9,713.43	0.65	6,313.73	2,821.00	1.09	3,075.52	105.29%
1985	1,830.86	11,544.29	0.65	7,503.79	6,760.00	1.10	7,441.94	0.83%

**Tabla 5- 19. Represa 14, cálculos y resultados de la comparación de la producción de sedimentos anual calculado  $S_a$  y el azolve en el embalse.**

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Año	$S_a$ (T)	$S_a$ Acumulado (T)	$Te$	$SR$ (T)	Azolve ( $m^3$ )	$dsed$ (T/ $m^3$ )	Azolve (T)	Error %
1980	16,023.23							
1981	14,531.32	30,554.55	0.35	10,694.09	10,631.00	1.01	10,702.17	-0.08%

**Tabla 5- 20. Represa 18, cálculos y resultados de la comparación de la producción de sedimentos anual calculado  $S_a$  y el azolve en el embalse.**

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Año	$S_a$ (T)	$S_a$ Acumulado (T)	$Te$	$SR$ (T)	Azolve ( $m^3$ )	$dsed$ (T/ $m^3$ )	Azolve (T)	Error %
1980	11,951.96							
1981	11,192.96							
1982	4,457.02	27,601.94	0.44	12,144.85	3,600.00	1.01	3,624.10	235.11%
1983	4,890.22							
1984	5,975.98	38,468.14	0.44	16,925.98	18,942.00	1.06	20,098.33	-15.78%
1985	9,314.04	47,782.18	0.44	21,024.16	19,542.00	1.08	21,052.92	-0.14%

**Tabla 5- 21. Represa 23, cálculos y resultados de la comparación de la producción de sedimentos anual calculado  $S_a$  y el azolve en el embalse.**

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Año	$S_a$ (T)	$S_a$ Acumulado (T)	$Te$	$SR$ (T)	Azolve ( $m^3$ )	$dsed$ (T/ $m^3$ )	Azolve (T)	Error %
1984	19,521.75	19,521.75	0.38	7,418.26	11,547.00	0.95	10,914.70	-32.03%
1985	35,594.70	55,116.44	0.38	20,944.25	20,824.00	1.01	20,963.40	-0.09%

Las represa 24 se encuentra aguas debajo de la represa 23, difiriendo en muy poco el área de éstas (Tabla 5- 8). Entonces, para calcular la producción de sedimentos y el material retenido (*SR*) en la represa 24 (Tabla 5- 22), fue necesario primero calcular el material retenido en la represa 23 (col. 5), determinando el material que llegaría a la represa 24 (col. 6). Por medio de la eficiencia de atrapamiento (*Te*) de la represa 24 (col. 7) se calculó el *SR* para dicha represa (col. 8), comparando contra el azolve en unidades de masa (col. 11). Se obtuvo el error mediante la Ec. 5- 25.

**Tabla 5- 22. Represa 24, cálculos y resultados de la comparación de la producción de sedimentos anual calculado *Sa* y el azolve en el embalse.**

1	2	3	4 5 6			7 8 9 10 11 12					
Año	<i>Sa</i> (T)	<i>Sa</i> Acum. (T)	Represa 23			Represa 24					
			<i>Te</i>	<i>SR</i> (T)	(3) - (5) (T)	<i>Te</i>	<i>SR</i> (T)	Azolve (m <sup>3</sup> )	<i>dsed</i> (T/m <sup>3</sup> )	Azolve (T)	Error %
1986	48,670.88	48,670.88	0.38	18,494.94	30,175.95	0.54	16,295.01	22,922.00	0.95	21,666.81	-24.79%
1987	48,899.08	97,569.97	0.38	37,076.59	60,493.38	0.54	32,666.42	32,342.00	1.01	32,558.50	0.33%

**Tabla 5- 23. Represa 25, cálculos y resultados de la comparación de la producción de sedimentos anual calculado *Sa* y el azolve en el embalse.**

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Año	<i>Sa</i> (T)	<i>Sa</i> Acumulado (T)	<i>Te</i>	<i>SR</i> (T)	Azolve (m <sup>3</sup> )	<i>dsed</i> (T/m <sup>3</sup> )	Azolve (T)	Error %
1987	54,465.73	54,465.73	0.52	28,322.18	30,000.00	0.95	28,357.22	-0.12%

Por otro lado, para determinar la producción de sedimentos que arroja la cuenca de la presa La Soledad se siguió el mismo procedimiento que en las represas 5, 8, 9, 14, 18, 23 y 25, difiriendo en que las 25 represas existentes en la cuenca retuvieron 666,400T para 1987 (JICA y CFE, 1993). Entonces del total de material producido acumulado (col. 3), se le restó el material azolvado en las represas (col. 4), que se expresa en la columna 5. Haciendo la comparación para estimar el error entre la columna 7 y la 10.

**Tabla 5- 24. Presa La Soledad, cálculos y resultados de la comparación de la producción de sedimentos anual calculado  $S_a$  y el azolve en el embalse.**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Año	$S_a$ (T)	$S_a$ Acum. (T)	Azolve Represas (T)	(3) - (4) (T)	$T_e$	$SR$ (T)	Azolve (m <sup>3</sup> )	$d_{sed}$ (T/m <sup>3</sup> )	Azolve (T)	Error %
1962	1.20E+06									
1963	1.62E+06									
1964	2.47E+06									
1965	2.17E+06									
1966	3.31E+06									
1967	2.45E+06									
1968	1.83E+06									
1969	3.00E+06									
1970	1.98E+06									
1971	2.88E+06									
1972	2.45E+06									
1973	3.49E+06									
1974	4.78E+06									
1975	3.15E+06									
1976	2.52E+06									
1977	1.50E+06	4.08E+07		4.08E+07	0.70	2.84E+07	3.00E+07	1.15	3.47E+07	-18.25%
1978	2.70E+06									
1979	3.20E+06									
1980	2.56E+06									
1981	3.85E+06									
1982	2.60E+06									
1983	2.33E+06									
1984	3.82E+06									
1985	2.09E+06									
1986	2.47E+06									
1987	9.54E+05									
1988	2.19E+06	6.96E+07	6.66E+05	6.89E+07	0.65	4.44E+07	3.65E+07	1.19	4.33E+07	2.58%
1989	3.00E+06									
1990	2.10E+06	7.47E+07		7.40E+07	0.63	4.62E+07	3.77E+07	1.19	4.48E+07	3.16%
1991	1.61E+06									
1992	2.95E+06	7.92E+07		7.86E+07	0.62	4.83E+07	4.05E+07	1.19	4.83E+07	-0.07%

### 5.5 Análisis

Se observa una correspondencia aceptable entre las cantidades de sedimentos calculadas ( $SR$ ) y medidas a partir de las batimetrías en los años en que se cuenta con información de éstas, para las represas 5, 8, 14, 23, 24 y 25, y la presa La Soledad. Aunque sólo las represas 8, 23, 24 y la presa La Soledad poseen más de una batimetría, que resultan indispensables para calibrar, por lo que sólo en estos embalses se tiene un buen resultado confiable.

---

---

*Capítulo 6*

---

---

## 6. Conclusiones

### 6.1 Resumen

En el capítulo 1 se abordó la problemática de la producción de sedimentos en cuencas en México, se analizó la situación existente, se plantearon los objetivos de este trabajo y su justificación. El capítulo 2 consistió en definir el fenómeno de la producción de sedimentos en cuencas, el cual resultó ser dependiente de la erosión y del ciclo hidrológico, además se revisaron las aportaciones de otros autores en la materia.

En el capítulo 3 se llevó a cabo una extensa revisión bibliográfica de los métodos de producción de sedimentos, conformando los métodos geológicos con base en radionúclidos ambientales (ver 3.3.3) el estado del arte en la materia. Sin embargo, esta tecnología aún no se encuentra disponible. En el capítulo 4 se analizó la información disponible en México para la producción de sedimentos, la cual se concentra básicamente en las bases de datos ERIC III (IMTA, 2006) y BANDAS (IMTA, 2007), las estaciones meteorológicas automáticas (EMAS) del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y la información cartográfica del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). Además se llevó a cabo un análisis de los métodos mencionados en el capítulo 3, donde con base en la información existente se recomendó el método más apropiado para nuestro medio, el cual resultó ser el método de la Variación Temporal de Producción de Sedimentos (Kothyari *et al.*, 1996; ver 3.3.1).

El capítulo 5 describe paso a paso la aplicación del método de Kothyari *et al.* (1996), con sus respectivas adaptaciones para la cuenca del Río Apulco. El estudio se llevó a cabo en nueve cuencas, contando con un embalse para cada una y sus respectivas batimetrías. Para cada cuenca el primer paso fue dividirla en segmentos isócronos, luego calcular la pérdida de suelo para cada segmento, determinar las tasas de descarga de sedimentos entre los segmentos isócronos y calibrar el modelo respecto a los volúmenes de azolve producto de las batimetrías. Los resultados se expresaron en una tabla para cada cuenca (ver tablas 5-15 a la 5-23). El error se obtuvo al restarle a la masa de sedimentos azolvados calculados ( $SR$ ), la masa de sedimentos azolvados medidos y dividir el resultado entre esta última masa, expresado en porcentaje. En general se obtuvieron errores entre -32.03% y 235.11%.

### 6.2 Análisis

Analizando las represas 5, 14 y 25, notamos que estas obtienen resultados cuyos errores son menores al  $\pm 1\%$  (ver tablas 5-15, 5-18 y 5-22), esto debido a que fueron calibradas con una sola batimetría, por lo que sus resultados se ajustaron siendo casi perfectos, los cuales no deben tomarse en cuenta para promediar el error. Las represas 9

y 18 adquirieron errores de hasta 205.00% y 235.00%, después de 8 y 6 años de haber sido construidas respectivamente, y empleando 3 batimetrías para calibrar cada una (ver tablas 5-17 y 5-19). Tales errores, tan altos, los atribuimos a la imprecisión en las batimetrías y al cambio en el uso del suelo de las cuencas, las cuales no cuentan con registros al respecto para su evaluación, lo que pudo ocasionar un crecimiento acelerado en los azolves (col. 6).

Las represas 8, 23 y 24, y la presa La Soledad presentan resultados consistentes, errores de -18.03%, -32.03%, -24.79% y -18.25% respectivamente (ver tablas 5-16, 5-20, 5-21 y 5-23), para 11, 2, 2 y 31 años de registro, y calibradas con 3, 2, 2 y 4 batimetrías respectivamente. El error promedio, contando todos los años con batimetrías de todos los embalses, resultó ser de 22.36%, pero eliminando los años usados para calibración el error resultó en 40.54%

### 6.3 Logros y aportaciones

La aportación de este trabajo consiste en la combinación de varios elementos:

- **La extrapolación del Método de la Variación Temporal de la Producción de Sedimentos.** Kothyari *et al.* (1996) aplican su metodología a una escala de tiempo horaria. Originalmente se diseñó para estimar la producción de sedimentos en cuencas para tormentas individuales, mientras que en esta tesis se extrapola a varios años de cálculo.
- **Involucrar el concepto eficiencia de atrapamiento ( $Te$ ).** Los resultados de producción de sedimentos del método extrapolado de Kothyari *et al.* (1996) son afectados por el  $Te$ , el cual es particular para cada embalse. Los  $Te$  nos fueron proporcionado por JICA y CFE (1993).
- **La obtención del factor de erosividad de lluvia ( $R$ ) de la USLE.** Wischmeier y Smith (1965 y 1978) estiman  $R$  como la suma de la energía cinética de la tormenta ( $E$ ) afectada por la intensidad máxima en 30 min ( $I_{30}$ ), producto que acumulan para todas las tormentas del año ( $\sum EI_{30}$ ). La dificultad para la obtención de este factor radica en que se requiere conocer la distribución de las tormentas en el tiempo, para lo cual se necesitan pluviómetros, cuando la red pluviométrica en nuestro país es limitada. Mientras que la red de estaciones climatológicas es extensa, así como sus años de registro y ofrece datos de precipitación acumulada cada 24 hrs.

Varios autores nacionales y extranjeros (*e.g.* Roose, 1977; Arnouldus, 1980; Cortés, 1991; Renard y Freimund, 1994) han tratado de remediar esa situación mediante el cálculo de  $R$  a partir de la precipitación acumulada anual, resultados que no siempre son representativos. Por lo que se propuso en este trabajo combinar los datos de las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS) con los de las estaciones climatológicas. Esto se llevó a cabo al determinar de la EMA más cercana



a la zona de estudio la ecuación adimensional de la tormenta característica y su distribución acumulada de frecuencias para la duración de las tormentas (ver 5.4.2). Entonces, estas ecuaciones se trasladaron a las estaciones climatológicas y se emplearon sus datos de lluvia de 24 hrs.

Se supuso que para cada día de lluvia se tendría una sola tormenta, cuya precipitación era conocida y su duración se obtendría de la ecuación de distribución acumulada de frecuencias, al generar un número aleatorio mediante un procedimiento de Montecarlo. Al ser la duración y la lámina de lluvia de la tormenta variables conocidas se pudo encontrar la energía cinética, empleando las ecuaciones de Wischmeier y Smith (1965) originales para estimar  $R$ . El procedimiento se repitió mil veces para cada día de lluvia y se acumuló anualmente, de donde se obtuvo un promedio anual para  $R$ .

#### **6.4 Recomendaciones**

Los resultados obtenidos de producción de sedimentos se consideran aceptables en vista del grado de aproximación de los datos de entrada. No se tienen elementos para recomendar el método para un tamaño de cuenca en particular o para un periodo de tiempo específico, sin embargo se recomienda seguir probando el método a fin de definir sus límites.

En cuanto a la metodología para estimar el factor  $R$ , este arroja datos dentro del rango de otros autores en nuestro país (*e.g.* Cortés, 1991). Para su popularización se requiere verificarlo respecto a los resultados que se obtendrían empleando la metodología original de Wischmeier y Smith (1965) en varias estaciones. Además, aplicar pruebas estadísticas para confirmar que los resultados forman parte del conjunto de datos esperados y tener el grado de aproximación respecto a la metodología original.

La combinación de los elementos anteriores da como resultado la metodología aplicaca. Resulta importante señalar que se recurre a este tipo de metodologías debido a la escasez de mediciones de sedimentos sobre el cauce, por lo que su aproximación será inferior a aplicar técnicas con base en mediciones de sedimentos diarios. Se recomienda extender la red de mediciones de sedimentos y fomentar el desarrollo de tecnología de mediciones nacional, a fin de abaratar y automatizar la medición de sedimentos, y con ello mejorar las aproximaciones de nuestros cálculos, lo que dará lugar a estructuras óptimas, poblaciones seguras y con abasto de agua.

---

---

## *Referencias*

---

---

### **Referencias**

- Aparicio, J.** Fundamentos de Hidrología de Superficie. Editorial Limusa, S.A. de C.V., México. 2004.
- Aparicio, J.** Tesis de licenciatura en Ing. Civil: Análisis de la Producción de Sedimentos Mediante el Modelo de Stanford. UNAM Facultad de Ingeniería, 1979.
- Arnoldus, H.M.J.** An Approximation of the Rainfall Factor in the USLE. In: M. DeBoot and D. Gabriels (Editors), Assessment of Erosion. John Wiley and Sons, Chichester. 1980.
- Barragán, M.C.** Remoción de sedimentos en embalses con la ayuda de la modelación física. Tesis de maestría en ingeniería hidráulica. Facultad de Ingeniería, UNAM, México 2000, pp. 1-14. 2000.
- Basile, A. Pedro; Riccardi, Gerardo A. y Stenta, Hernán.** Modelo de la producción de sedimentos a escala de cuenca en el sistema de A° Ludueña, Santa Fe, Argentina. XX Congreso Nacional del Agua, Mendoza, Argentina. Mayo 2005.
- Beasley, D.B.; Huggins, L.F. y Monke, E.J.** Answers: A Model for Watershed Planning. Transactions of the ASAE Vol. 23, No. 4, p 938-944, July-August, 1980.
- Brooks, K. N. ; Ffolliott, P. F.; Gregersen, H.M.; DeBano, L.F.** Hydrology and the Management of Watersheds. Pp. 151-163, Iowa State Press. 1997.
- Brune, G.M.** Trap efficiency of reservoirs. Transactions of the American Geophysical Union. 34, 407-18. 1953.
- Campos Aranda, D.F.** Procesos del Ciclo Hidrológico. UASLP, 1998.
- Campos Aranda, D.F.** Tesis Maestría en Ing. Hidráulica: Dimensionamiento de la capacidad para sedimentos en los embalses. UNAM, Facultad de Ingeniería, 1980.
- Chow, V. T.; Maidment, D. R. y Mays, L.W.** Applied Hydrology. McGraw-Hill, Inc. 1988
- Colotti, E.** Aplicabilidad de los datos de lluvia horaria en el cálculo de la erosidad. Fondo Editorial de Humanidades y Educación, Departamento de Publicaciones. Universidad Central de Venezuela. 1ª Edición 2004.
- Cortés, H.G.** Caracterización de la erosividad de la lluvia en México utilizando métodos multivariados. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Posgraduados. Montecillo, México. 1991.
- Cortés, H.G.** Comunicación personal, IMTA. 2008.
- De Roo, A. P. J. y Offermans. R. J. E.** Lisem: A Physically-Based Hydrological And Soil Erosion Model For Basin-Scale Water And Sediment Management. Modelling and Management of Sustainable Basin-scale Water Resource Systems (Proceedings of a Boulder Symposium, July 1995). IAHS Publ. no. 231, 1995.
- Dölling, O. R. y Varas, E. A.** Tormentas de diseño usando redes neuronales artificiales. Ingeniería Hidráulica en México. Octubre – Diciembre, 2006.
- Figueroa, B.; Cortés, H.G.; Pimentel, J.; Osuna, E.S.; Rodríguez, J.M. y Morales, F.J.** Manual de Predicción de Pérdidas de Suelo por Erosión Hídrica. Colegio de Posgraduados, SAHR, México. 1991.
- Flanagan, D.C. y Nearing, M.A.** USDA - Water Erosion Prediction Project, Hillslope Profile And Watershed Model Documentation. NSERL Report No. 10, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana 47907. Julio de 1995.
- Foster, G.R.; Yoder, D.C.; Weesies, G.A.; McCool, D. K. ; McGregor, K.C. y Binger, R.L.** Revised Universal Soil Loss Equation Version 2. USDA-Agricultural Research Service, Washington, D.C. 2003.
- Gangyan, Z.; Goel, N. K. Bhatt, V. K.** Stochastic modelling of the sediment load of the upper Yangtze River (China). Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques, 47(S) August, 2002.
- García-Oliva, F.; Martínez Lugo, R. y Maass, J.M.** Long-term net soil erosion as determined by Cs-137 redistribution in an undisturbed and perturbed tropical deciduous forest ecosystem. Geoderma, 68. 1995.
- García-Oliva, F.; Martínez Lugo, R. y Maass, J.M.** Soil Cs-137 Activity in a Tropical Deciduous Ecosystem Under Pasture Conversion in Mexico. Journal of Environmental Radioactivity, 26. 1995.

- Gert, V. y Poesen, J.** Estimating trap efficiency of small reservoirs and ponds: methods and implications for the assessment of sediment yield. *Progress in Physical Geography* 24,2 pp. 219-251. 2000
- Gracia, J.** Sedimentación en embalses, Capítulo 18 del Manual de Ingeniería de Ríos. Instituto de Ingeniería, UNAM. 1997.
- Gracia, J.** Capítulo 17 de Manual de Ingeniería de Ríos: Pérdida de suelo en cuencas. UNAM, Instituto de Ingeniería. Serie 587. 1997.
- Gracia, J.** Capítulo 18 de Manual de Ingeniería de Ríos: Sedimentación en embalses. UNAM, Instituto de Ingeniería. Serie 588. 1997a.
- Haan, C.T.; Barfield, B.J.; Hayes, J.C.** Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments. Academic Press, 1994.
- Haan, C.T.; Johnson, H.P.; Brakensiek, D.L.** Hydrologic Modeling of Small Watersheds. ASAE, pp. 297-370, 1982.
- Hudson, N.** Conservación del suelo. Editorial Reverté, 1982.
- IMTA.** Extractor Rápido de Información Climatológica III (ERIC III). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 2006.
- IMTA.** Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 2007
- INEGI.** Guía para la Interpretación Cartográfica, Edafología. 2004.
- INEGI a.** Guía para la Interpretación Cartográfica, Topografía. 2005.
- INEGI b.** Guía para la Interpretación Cartográfica, Uso del Suelo y Vegetación. 2005.
- JICA y CFE.** Estudio de Factibilidad para la Rehabilitación de la C.H. Mazatepec. Japan International Cooperation Agency y Comisión Federal de Electricidad. 1993.
- Julien, P. Y.** River Mechanics. Cambridge : Cambridge university press, 2002.
- Kinnell, P.I.A. y Risse, L.M.** USLE-M: Empirical Modeling Rainfall Erosion though Runoff and Sediment Concentration. *Soil Science Society of America Journal*, 62, 1998.
- Kinnell, P.I.A.** Agricultural Non Point Source Pollution Model using the USLE-M, Users Guide. University of Canberra, Australia. 2005.
- Kothyari, U.C.; Tiwari, A.K. y Singh, R.** Temporal Variation of Sediment Yield. *Journal of Hydrologic Engineering*. pp. 169-176. October, 1996.
- Kramer, R.A.; Richter, D.D.; Pattanayak, S. y Sharma, N.P.** Ecological and economic analysis of watershed protection in Eastern Madagascar. *Journal of Environmental Management*, Vol. 49, p.277-295. 1997.
- Kumar, A. y Das, G.** Dynamic Model of Daily Runoff-Sediment Yield for a Himalayan Sub-Catchment of Ramganga River. 12th ISCO Conference, Beijing. 2002.
- Lane, E.W. y Koelzer V.A.** Density of Sediments Deposited in Reservoirs. Report No. 5 of Study of Methods used in Measurement and Analysis of Sediment Loads in Streams, St.Paul, U.S. Engr. Dist. Sub-Office Hydr. Lab., Univ. of Iowa, Iowa City. 1953.
- Levi, E.** El agua según la ciencia, evolución de la hidráulica. Volumen II. Series del Instituto de Ingeniería, D-24, UNAM. pp. 933-937. Octubre, 1986.
- López Cárdenas, F.** La ingeniería en los procesos de desertificación. Grupo TRAGSA, Ediciones Mundi-Prensa. 2003
- Manson, R.H.** Los Servicios Hidrológicos y la Conservación de los Bosques de México. *Madera y Bosques* 10(1):3-20. 2004.
- Marcos, E.; Tárrega, R. y Luis-Calabuig, E.** Comparative Analysis of Runoff and Sediment Yield with Rainfall Simulator After Experimental Fire. *Arid Soild Research and Rehabilitation*, 14:293-307, 2000.
- Marengo, H.** Aplicación en Modelos Físicos de la Remoción Hidráulica de Sedimentos. *Ingeniería Hidráulica en México*, Vol. XVI, núm. 1, pp. 99-124, enero-marzo de 2001.

- Martínez Ménez, M. R.; López Martínez, R.; Hernández Fuentes, E.** Relacion Sedimentos – Erosion En La Cuenca Alta Del Papaloapan. XI Congreso Nacional de Irrigación. Guanajuato, Guanajuato, México. 2001.
- Mashriqui, H.S. y Cruise, J.F.** Sediment Yield Modeling By Grouped Response Units. Journal of Water Resources Planning and Management, pp. 95-104. March-April 1997.
- Mays, L.W.** Stormwater Collection Systems Design Handbook. McGraw-Hill, 2001.
- Maza, J. A. y García Flores, M.** Capítulo 10 del Manual de Ingeniería de Río: Transporte de sedimentos. UNAM, Instituto de Ingeniería. Serie 584. 1996.
- McCool, D.K.; Foster, G.R. y Yoder, D.C.** The Revised Universal Soil Loss Equation, Version 2. ISCO 2004 - 13th International Soil Conservation Organisation Conference – Brisbane, July 2004
- Molina-Aguilar, J. P. y Aparicio, J.** Tránsito de avenidas en cauces mediante redes neuronales artificiales. Ingeniería Hidráulica en México. Octubre – Diciembre, 2006.
- Morgan, R. P. C.; Torri, D.; Smith, R. E.; Govers, G.; Poesen, J. W. A.; Styczen, M. E.; Quinton, J. N.; Chisci, G. y Auerswald, K.** The European Soil Erosion Model (EUROSEM): A Dynamic Approach For Predicting Sediment Transport From Fields And Small Catchments. Earth Surface Processes & Landforms; Vol. 23 Issue 6, p527. Jun. 1998.
- Owens, P.N. y Collins, A. J.** Soil Erosion and Sediment Redistribution in River Catchments: Measurement, Modeling and Management. Wallingford, Oxfordshire, UK: CABI Publishing, p xiii. 2006.
- Pelczer, I. J. y Cisneros-Iturbe, H. L.** Redes neuronales artificiales para pronosticar alturas de precipitación cada 15 minutos. Ingeniería Hidráulica en México. Julio – Septiembre, 2007.
- Phillips, J.** Alluvial Storage and the Long-term Stability of Sediment Yields. Blackwell Publishing Ltd, Basin Research, 15, 153-163, 2003.
- PSIAC.** Report of water management subcommittee, erosion and sediment yield methods. May, 1974
- Queralt, I.; Zapata, F.; García-Agudo, E.** Assessment of Soil Erosion and Sedimentation through the use of the 137Cs and Related Techniques. Acta Geológica Hispanica. V. 35 N° 3-4. Barcelona. 2000.
- Quintas, Isabel.** Eric II, Documentación de la base de datos climatología y del programa extractor. IMTA, Mayo, 2000.
- Raghuwanshi, N.S.; Singht, R. y Reddy, L.S.** Runoff and Sediment Yield Modeling Using Artificial Neural Networks: Upper Siwane River, India. Journal of hydrologic Engineering ASCE / January/February 2006, pp. 71-104. 2006.
- Renard, K. G. y Freimund, J.R.** Using montly precipitacion data to estimate the R-factor in the revised USLE. Journal of Hydrology 157 (1994) 287-306. 1994.
- Renard, K.G.** Sediment problems in the arid and semiarid southwest. Soil Conserv. Soc. Amer. Proc. 27th ann, meeting. Portland Oregon, p. 225-232. Agosto, 1972.
- Renard, K.G.; Foster, G.R.; Weesies, G.A. ; McCool, D.K. y Yoder, D.C.** Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). USDA-ARS, Agriculture Handbook No. 703. 1997.
- Rivera Ruiz, P. y Arellano Lara, F. del R.** Estimación de la Erosión Hídrica y la Producción de Sedimentos con un Sistema de Información Geográfica, Ejemplo de Aplicación en Cuencas Hidrográficas. XIX Congreso Nacional de Hidráulica, AMH. Cuernavaca, Morelos, 2006.
- Rivera Trejo, F.; Gutiérrez López, A.; Val Segura, R.; Mejía Z. ermeño, R.; Sánchez Ruiz, P.A.; Aparicio, J.; Díaz Flores, L.L.** La medición de sedimentos en México. IMTA, UJAT y UNESCO. 2006.
- Rojas, T.** Las obras hidráulicas mesoamericanas en la transición novohispanas. XIII Economy History Congress, Session 17 “Transferencia de técnicas, modos de producción y uso del agua en Europa y América Latina” (desde la Antigüedad hasta el siglo XX). Buenos Aires, Argentina, julio de 2002.
- Roose, E.** Erosion et Ruissellement en Afrique de l'ouest-vingy annees de mesures en petites parcelles experimentales. Travaux et Document de l'OSRTON No. 78, ORSTOM, Paris. 1977.

- SAGARPA-Puebla** DDR 2 y 3. Comunicación personal. 2008.
- Sánchez Bribiesca, J. L. y Gracia Sánchez, J.** Formulación de un Criterio de Calculo Para Determinar la Turbidez y el Deposito de sedimento en un Vaso de Almacenamiento. UNAM, Instituto de Ingeniería. Serie 542. 1992
- SARH-CNA.** México, Grandes Presas 1982-1991. Pp. 11-25, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos-Comisión Nacional del Agua. 1991.
- Simons, D. B. y Sentürk, F.** Sediment Transport Technology: Water and Sediment Dynamics. Water Resources Publications, LLC. August 20, 1992.
- Solís, Yolanda.** Actualización del Banco Nacional de Datos Hidrométricos (BANDAS) hasta 2005 de las estaciones seleccionadas por GASIR. Convenio de colaboración: CNA-IMTA/TH07-01. Subcoordinación de Hidrología y Mecánica de Ríos Coordinación de Tecnología Hidrológica, IMTA. Diciembre 2007.
- Stott, T. y Mount, N.** Plantation Forestry Impacts on Sediment Yields and Downstream Channel Dynamics in the UK: a Review. Progress in Physical Geography 28,2 pp. 197-240. 2004.
- Summer, W y Walling, D.E.** Modelling Erosion, Sediment Transport And Sediment Yield. International Hydrological Programme, Technical Documents in Hydrology No. 60. UNESCO, Paris, 2002
- USACE.** Sedimentation Investigations of Rivers and Reservoirs, Engineer Manual 1110-2-4000. U.S. Army Corps of Engineers. Washington, DC 20314-1000. 1995.
- Vanoni, V.A.** Sedimentation Engineering. Manuals and reports on engineering practice, No. 54. ASCE. pp. 1-15, 1977.
- Verstraeten, G. y Poesen, J.** Estimating trap efficiency of small reservoirs and ponds: methods and implications for the assessment of sediment yield. Progress in Physical Geography 24,2. pp. 219-251. 2000.
- Walling, D.E; Hadley, R.F.; Lal, R.; Onstand, C.A.; Yair, A.** Recent developementes in erosion and sediment yield studies. UNESCO, Paris, 1985.
- Williams, J. R. y Berndt, H.D.** Sediment yield computed with universal equation. Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol. 98 (12). 1972
- Wischmeier, W.H. y Smith, D. D.** Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the rocky mountains, guide for selection of practices for soil and water conservation. Agriculture Handbook No. 282. USDA –ARS, 1965.
- Wischmeier, W.H. y Smith, D. D.** Predicting Rainfall-Erosion Losses, A Guide to Conservation Planning. Agriculture Handbook No. 537. USDA –ARS, 1978.
- Zapata, F.** Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides. Secaucus, NJ, USA: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- Zingg, A.W.** Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff. Agricultural Engineering, 21: 59-64. 1940.

---

---

*Apéndice A*

---

---





## Apéndice A

Para obtener el factor de cobertura para cultivos ( $C$ ) de la USLE es necesario conocer cómo se distribuye la lluvia a través del año y cuánta protección a la erosión ofrecen los cultivos, los residuos de cultivo y las prácticas de manejo de estos (Figuroa *et al.*, 1991). Las etapas de cultivo se dividen en: laboreo (L), preparación de la cama de semilla (PC), establecimiento (P1), desarrollo (P2), madurez (P3), y residuos (P4). Cada etapa presenta una protección contra la erosión hídrica diferente, la cual es expresada en porcentaje, siendo el 100% el que permite mayor erosión y el 0% el que menos, a esto se le denomina pérdida relativa. A cada etapa le corresponde una fracción del factor de erosividad de lluvia ( $\Delta R$ ), el cual es afectado por la pérdida relativa de cada etapa. Este producto se acumula para todo el año, obteniendo el  $C$  anual. La distribución de  $R$  en el año se obtuvo según se describe en los apéndices B y C.

La pérdida relativa de cada etapa se tomó de Figuroa *et al.* (1991), para las siguientes características de cultivos:

**Tabla-A 1.**

	<b>Condición 1</b>	<b>Condición 2</b>
<b>Cultivo</b>	Maíz	Maíz
<b>Sistema de cultivo</b>	Barbecho con vertedora	Discos superficiales
<b>Productividad</b>	Baja	2000 kg/ha
<b>Fecha de siembra</b>	Primavera	Primavera
<b>Remoción de residuos</b>	Sí	No

Correspondiendo con las siguientes pérdidas relativas:

**Tabla-A 2.**

<b>Etapas de cultivo</b>	<b>Pérdida Relativa</b>	
	<b>Condición 1</b>	<b>Condición 2</b>
	<b>%</b>	<b>%</b>
<b>PC</b>	77	46
<b>P1</b>	68	42
<b>P2</b>	49	38
<b>P3</b>	35	33
<b>P4</b>	74	47

A continuación se muestra la forma en que se calculó  $C$ , para una misma estación y año, con tres fechas de siembra distintas y dos condiciones de manejo de cultivos:

**Tabla-A 3. Cálculo de C para maíz en el año 1962, para la estación 21011, en el DDR-02.**

Etapas de Cultivo	Fecha		R %	ΔR %	Pérdida Relativa		Factor C	
					Cond 1	Cond 2	Cond 1	Cond 2
	1	Febrero					0	0
PC	1	Marzo	2.37%	2.72%	77%	46%	0.021	0.012
P1	2	Abril	5.08%	13.64%	68%	42%	0.093	0.057
P2	13	Mayo	18.72%	9.42%	49%	38%	0.046	0.036
P3	16	Junio	28.14%	66.81%	35%	33%	0.234	0.220
P4	1	Noviembre	94.95%	7.42%	74%	47%	0.055	0.035
<b>C anual</b>								
<b>Σ=</b>							<b>0.449</b>	<b>0.361</b>

**Tabla-A 4. Cálculo de C para maíz en el año 1962, para la estación 21011, en el DDR03, municipio Cuetzalan.**

Etapas de Cultivo	Fecha		R %	ΔR %	Pérdida Relativa		Factor C	
					Cond 1	Cond 2	Cond 1	Cond 2
	1	Junio					0	0
PC	1	Julio	35.76%	25.37%	77%	46%	0.195	0.117
P1	2	Agosto	61.14%	13.96%	68%	42%	0.095	0.059
P2	13	Septiembre	75.09%	14.84%	49%	38%	0.073	0.056
P3	16	Octubre	89.94%	10.06%	35%	33%	0.035	0.033
P4	1	Enero	100.00%	35.76%	74%	47%	0.265	0.168
<b>C anual</b>								
<b>Σ=</b>							<b>0.663</b>	<b>0.433</b>

**Tabla-A 5. Cálculo de C para maíz en el año 1962, para la estación 21011, en el DDR03, municipio diferente de Cuetzalan.**

Etapas de Cultivo	Fecha		R %	ΔR %	Pérdida Relativa		Factor C	
					Cond 1	Cond 2	Cond 1	Cond 2
	1	Abril					0	0
PC	1	Mayo	17.53%	3.86%	77%	46%	0.030	0.018
P1	2	Junio	21.38%	24.67%	68%	42%	0.168	0.104
P2	13	Julio	46.06%	18.52%	49%	38%	0.091	0.070
P3	16	Agosto	64.58%	20.12%	35%	33%	0.070	0.066
P4	1	Octubre	84.70%	32.83%	74%	47%	0.243	0.154
<b>C anual</b>								
<b>Σ=</b>							<b>0.602</b>	<b>0.412</b>

El proceso se repitió para todas las estaciones climatológicas comprendidas en la cuenca y para los años de 1962 a 1992. Posteriormente los resultados de C de cultivo se cargaron junto con los valores de C para áreas forestadas en el SIG (ArcGis9).

En las Figuras 5A-1 a 5A-31 se presenta la distribución del factor de cobertura vegetal (*C*) de la USLE, para cada año en la cuenca alta del río Apulco.

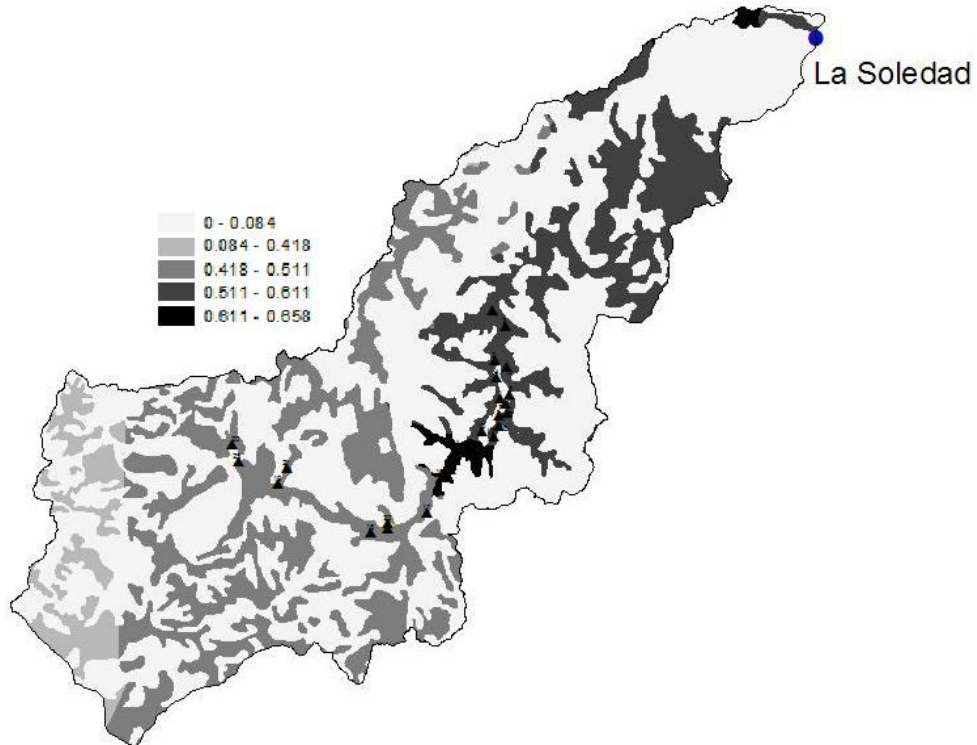


Figura 5A- 1. *Factor C* en la cuenca de La Soledad para 1962

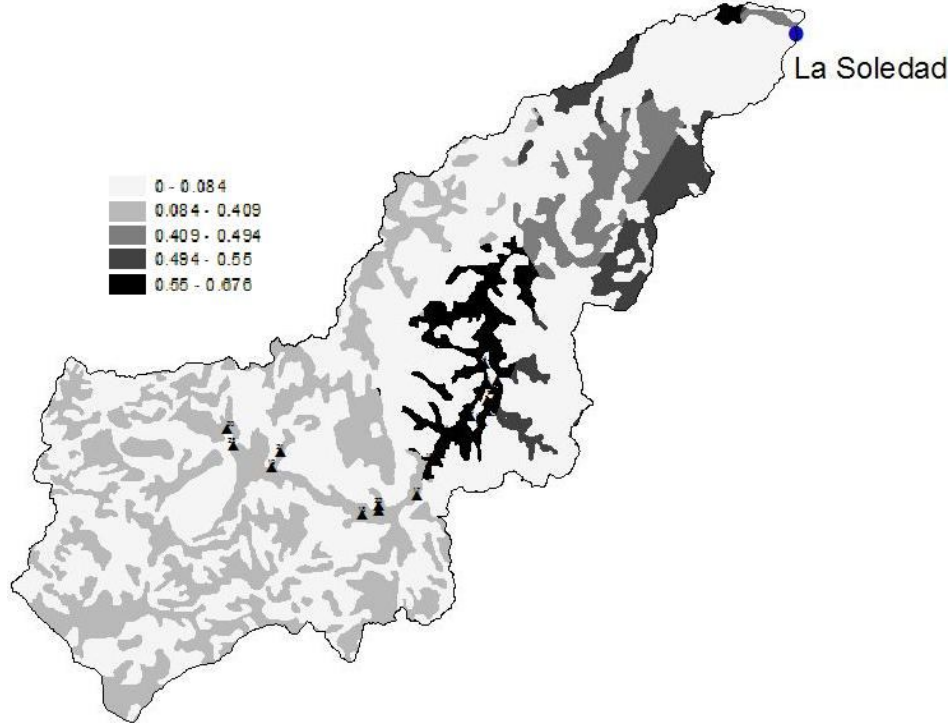


Figura 5A- 2. *Factor C* en la cuenca de La Soledad para 1963.

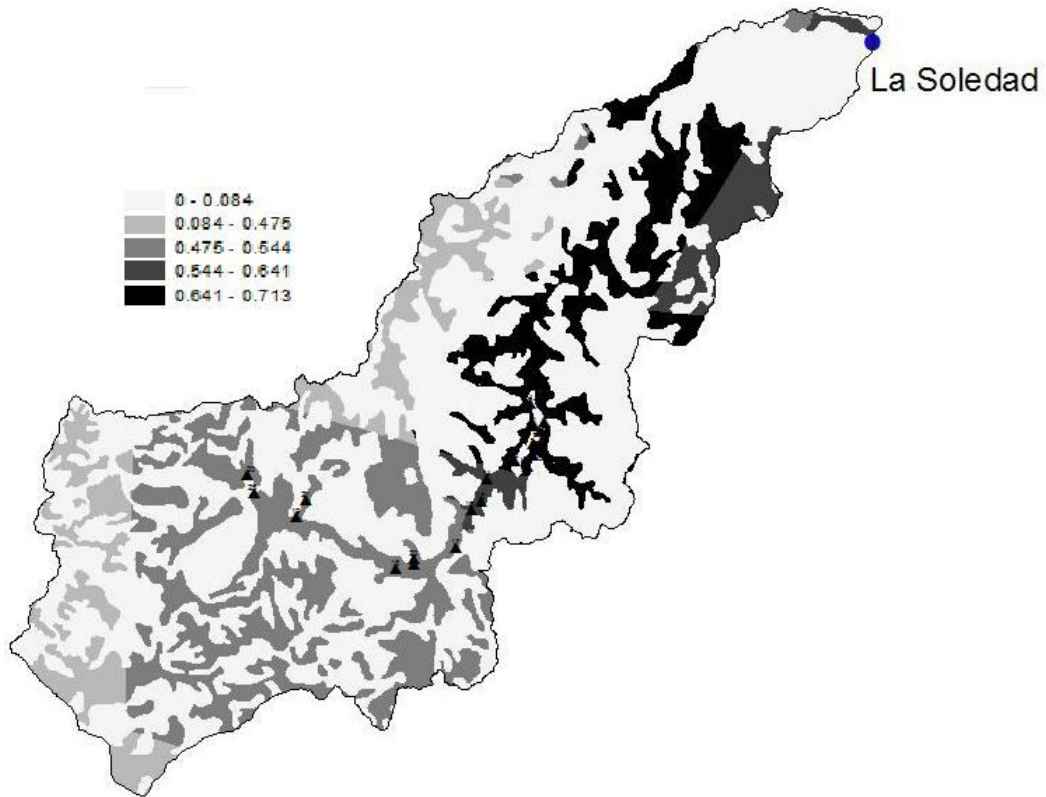


Figura 5A- 3. Factor C en la cuenca de La Soledad para 1964.

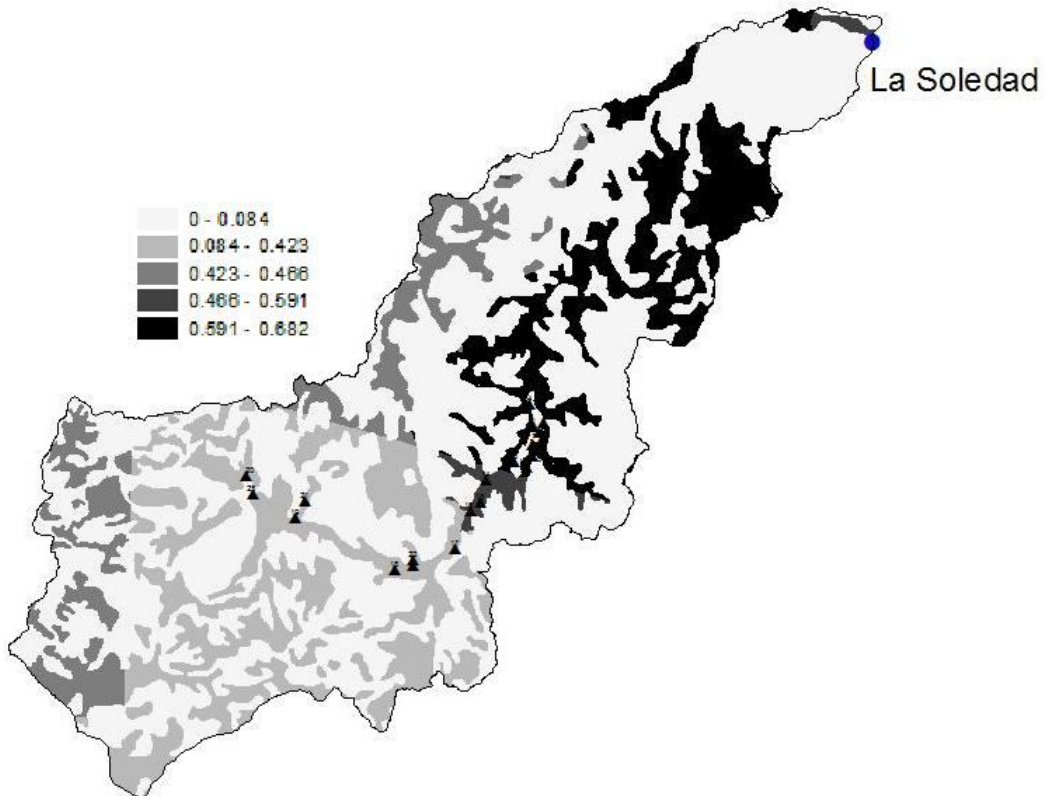


Figura 5A- 4. Factor C en la cuenca de La Soledad para 1965.

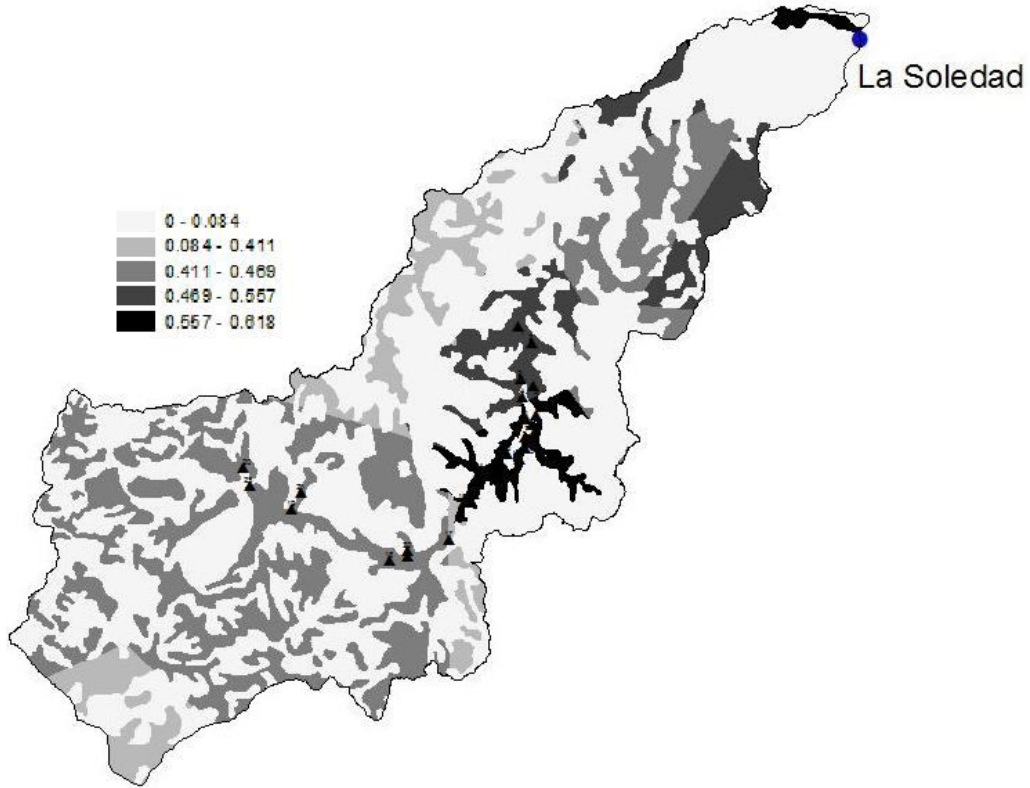


Figura 5A- 5. Factor C en la cuenca de La Soledad para 1966.

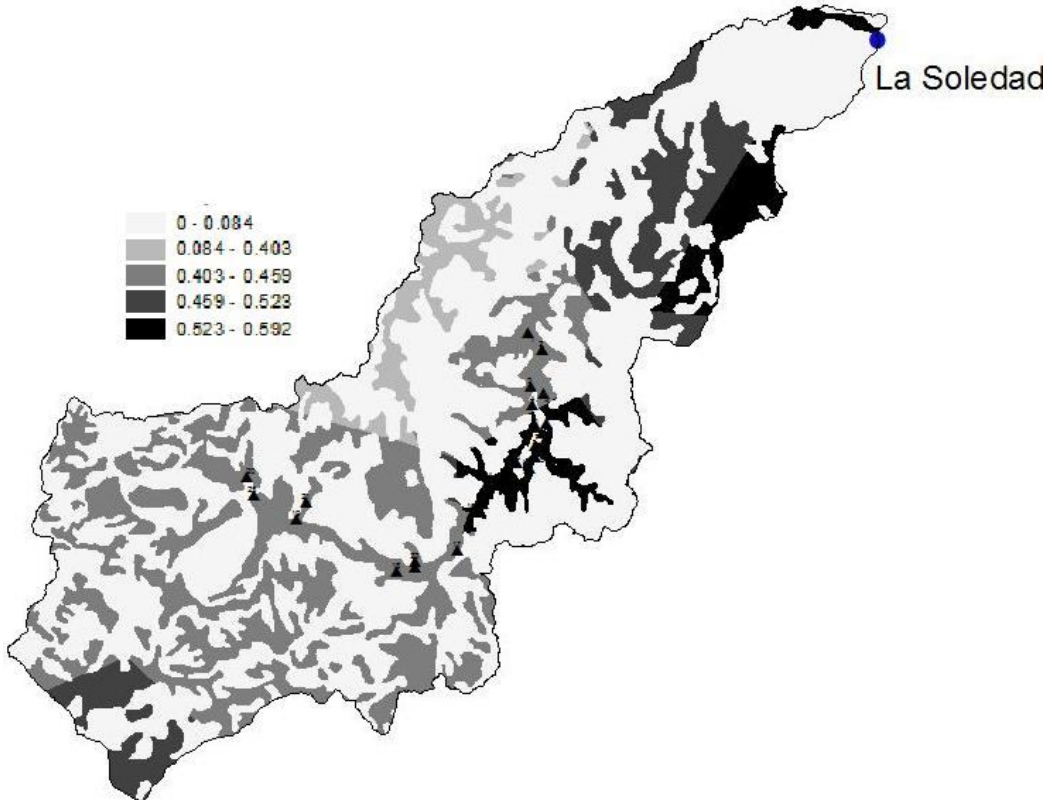


Figura 5A- 6. Factor C en la cuenca de La Soledad para 1967.

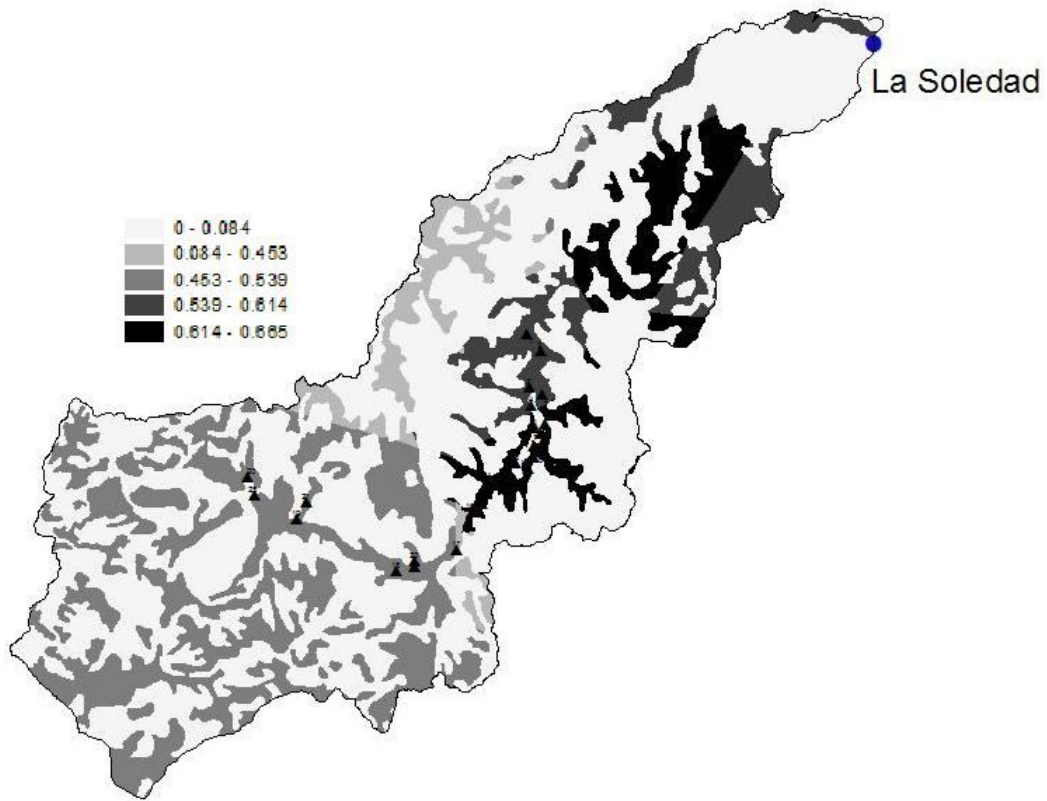


Figura 5A- 7. Factor C en la cuenca de La Soledad para 1968.

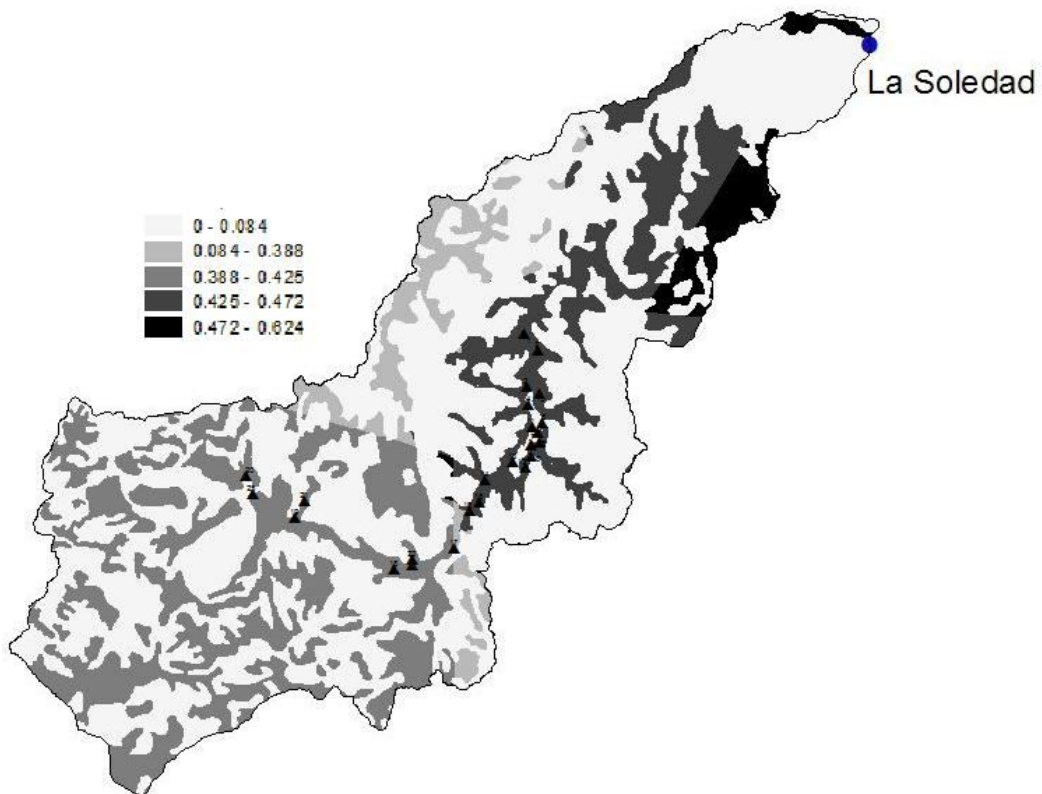


Figura 5A- 8. Factor C en la cuenca de La Soledad para 1969.



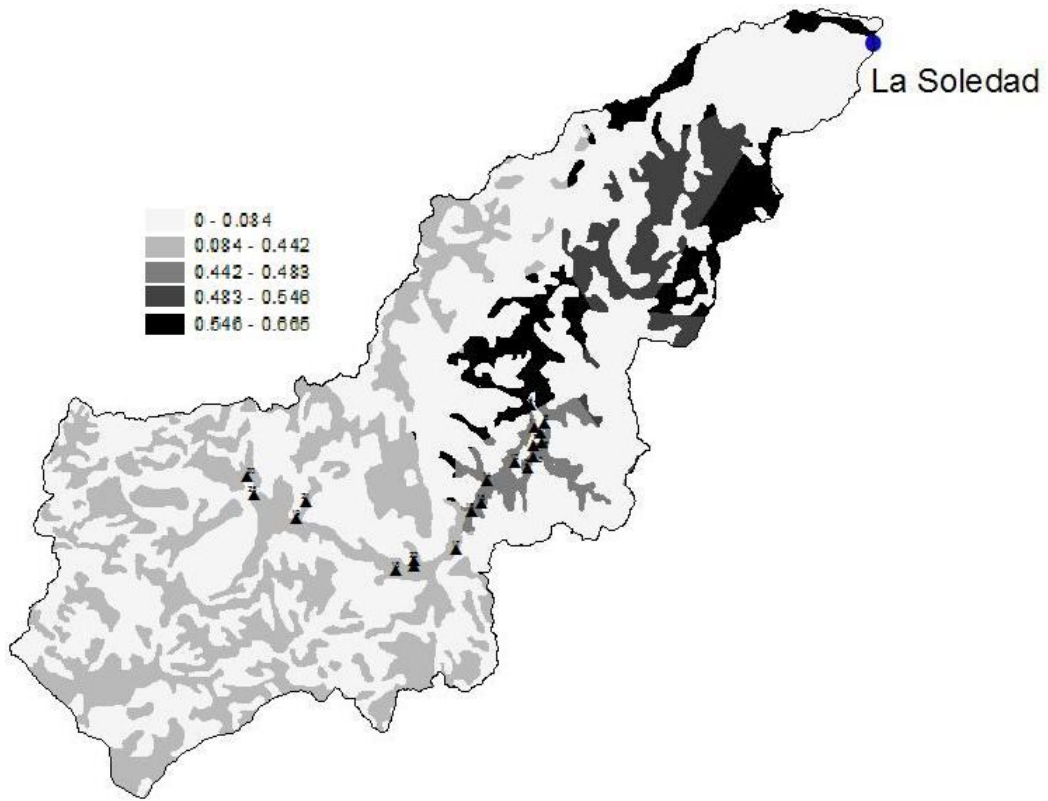


Figura 5A- 9. Factor C en la cuenca de La Soledad para 1970.

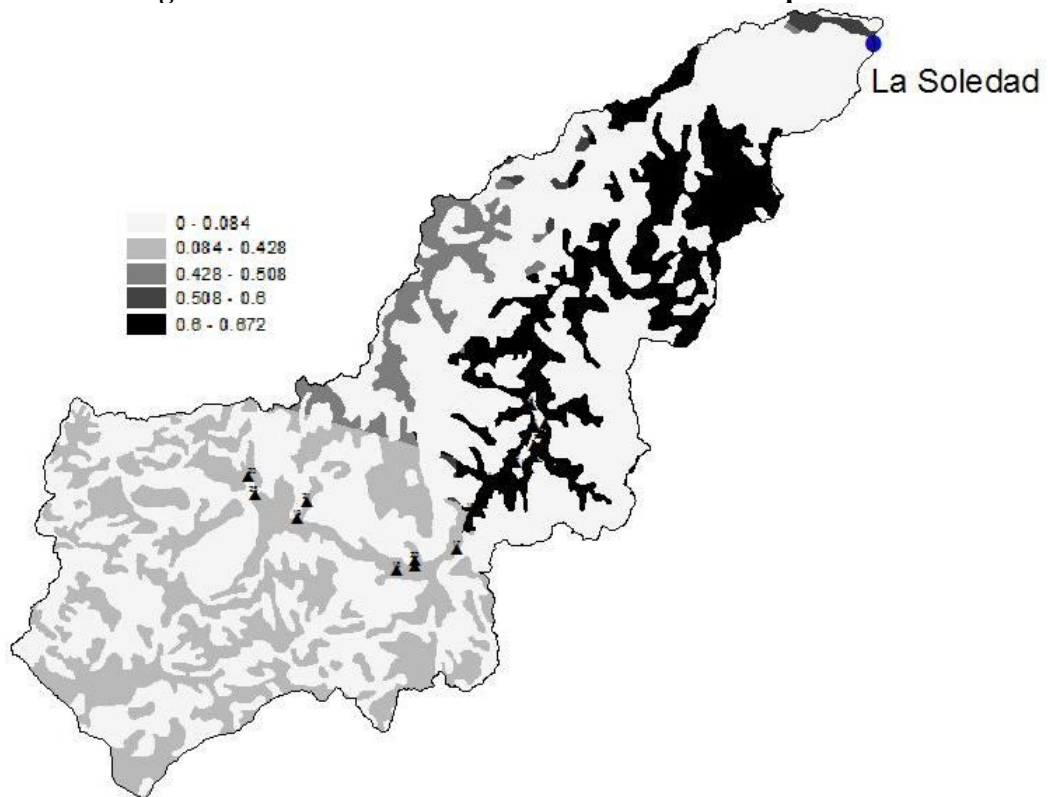


Figura 5A- 10. Factor C en la cuenca de La Soledad para 1971.

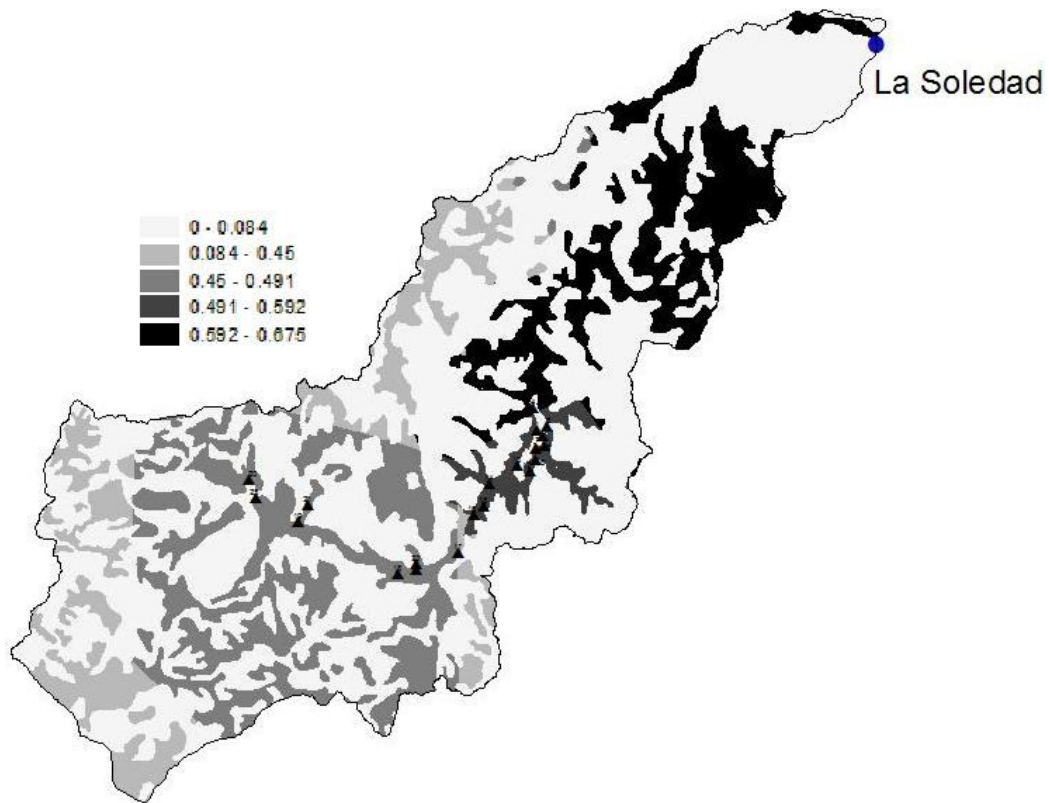


Figura 5A- 11. Factor C en la cuenca de La Soledad para 1972.

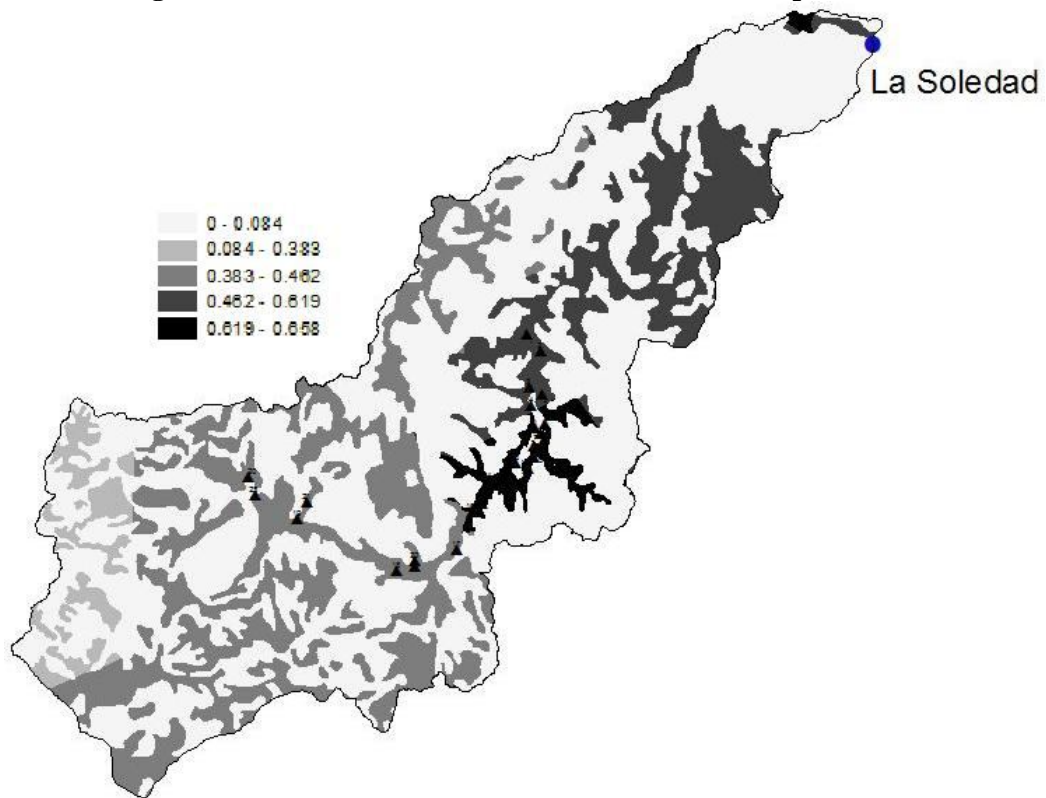


Figura 5A- 12. Factor C en la cuenca de La Soledad para 1973.



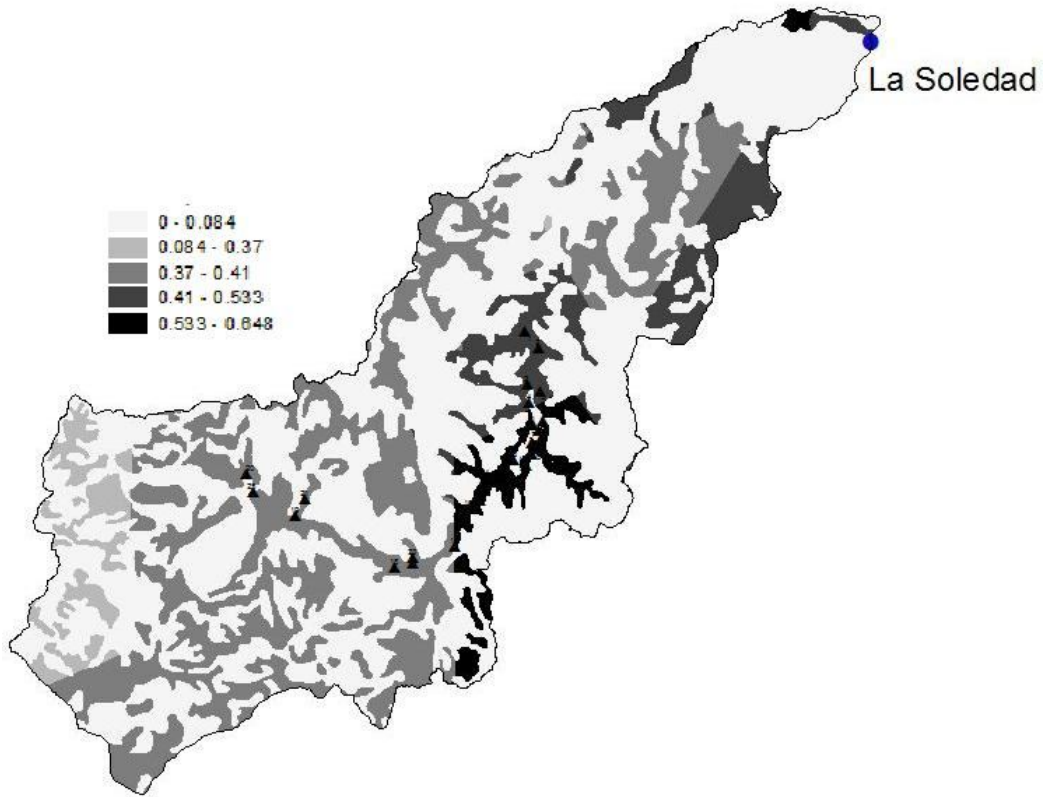


Figura 5A- 13. Factor *C* en la cuenca de La Soledad para 1974.

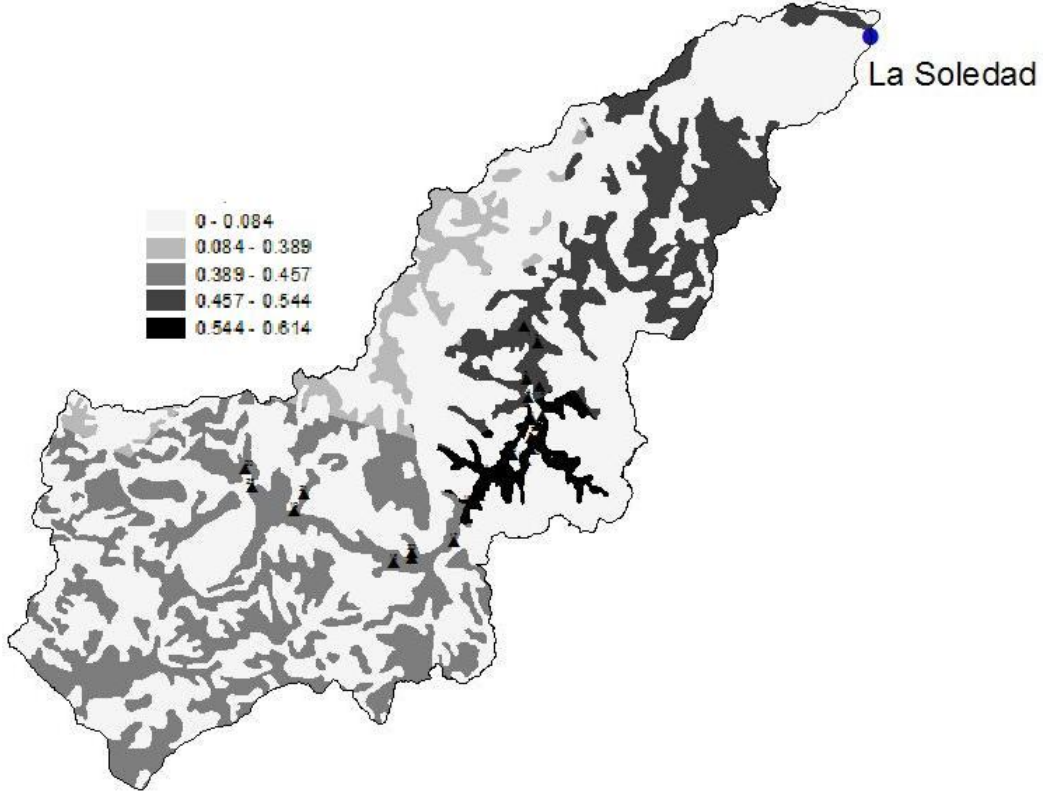


Figura 5A- 14. Factor *C* en la cuenca de La Soledad para 1975.

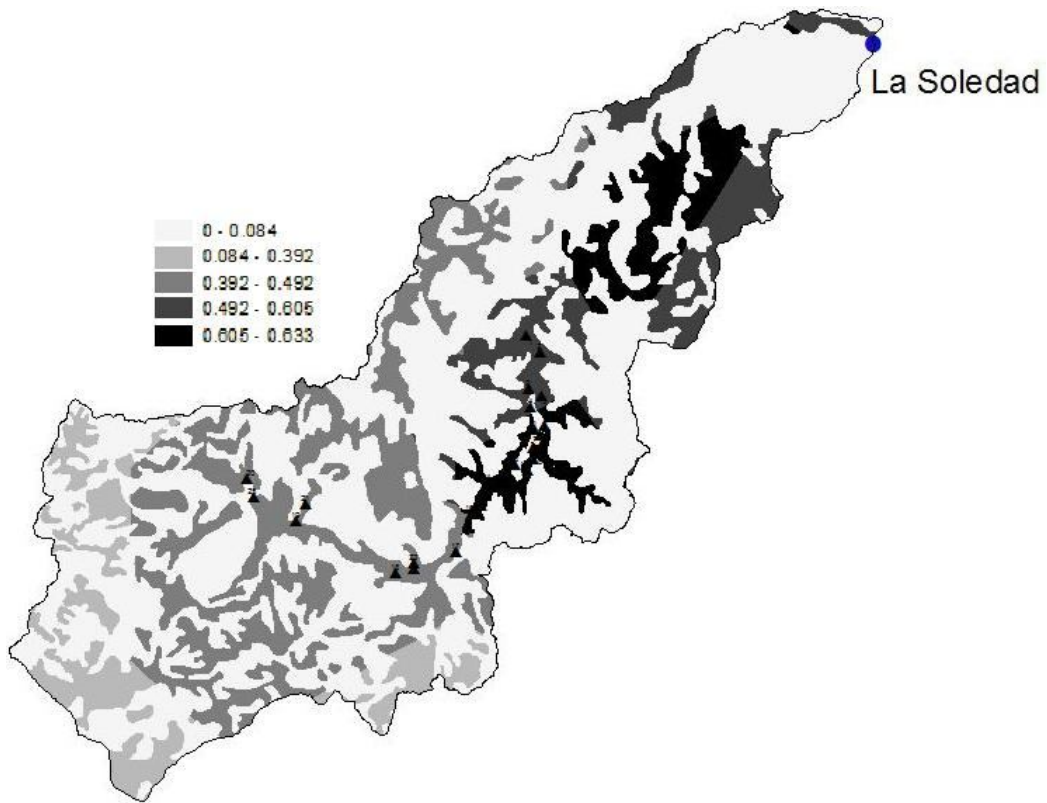


Figura 5A- 15. Factor C en la cuenca de La Soledad para 1976.

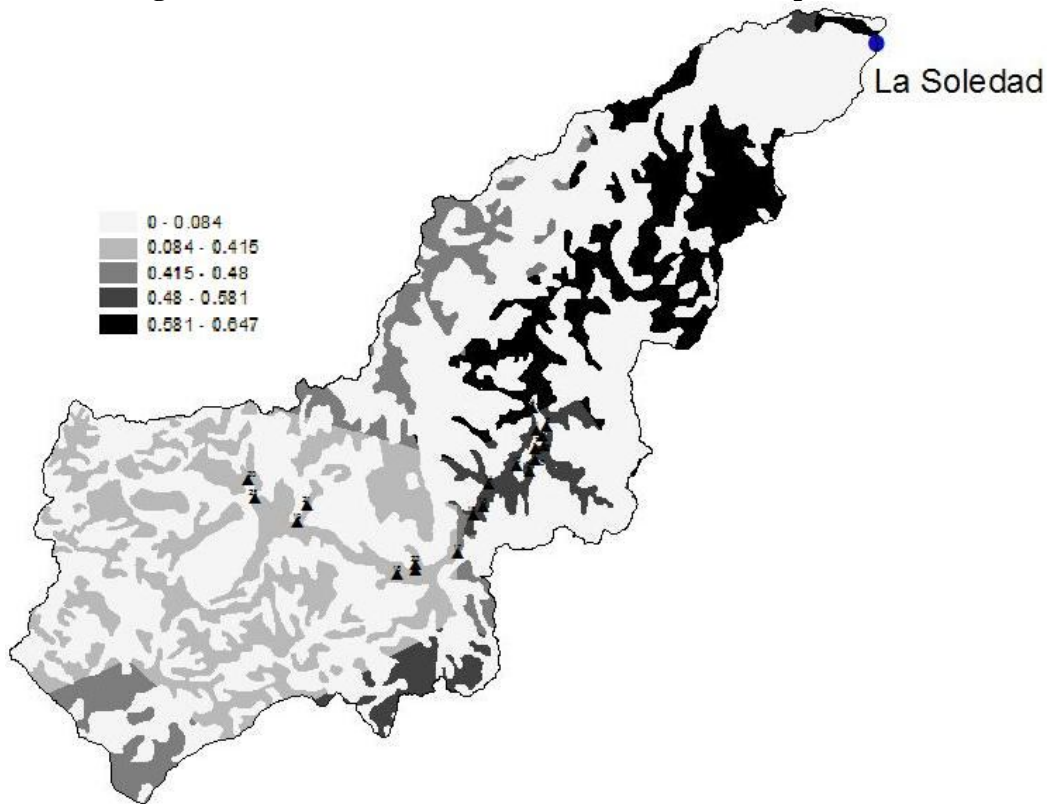


Figura 5A- 16. Factor C en la cuenca de La Soledad para 1977.

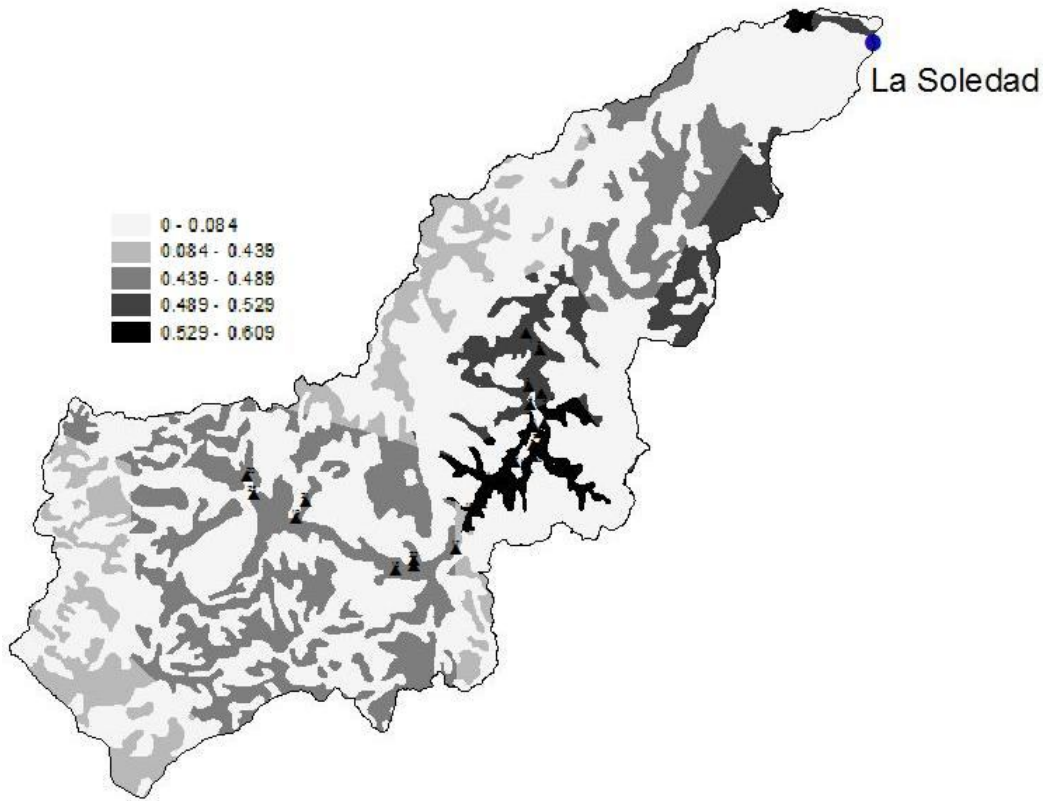


Figura 5A- 17. Factor C en la cuenca de La Soledad para 1978.

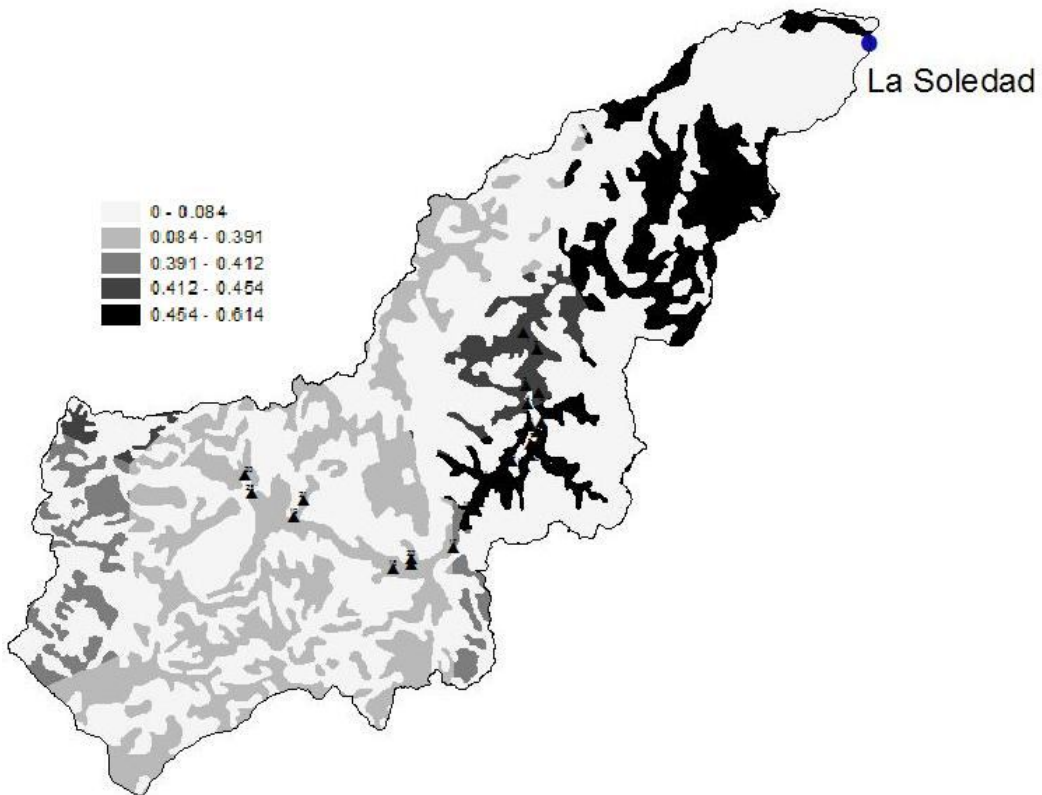


Figura 5A- 18. Factor C en la cuenca de La Soledad para 1979.

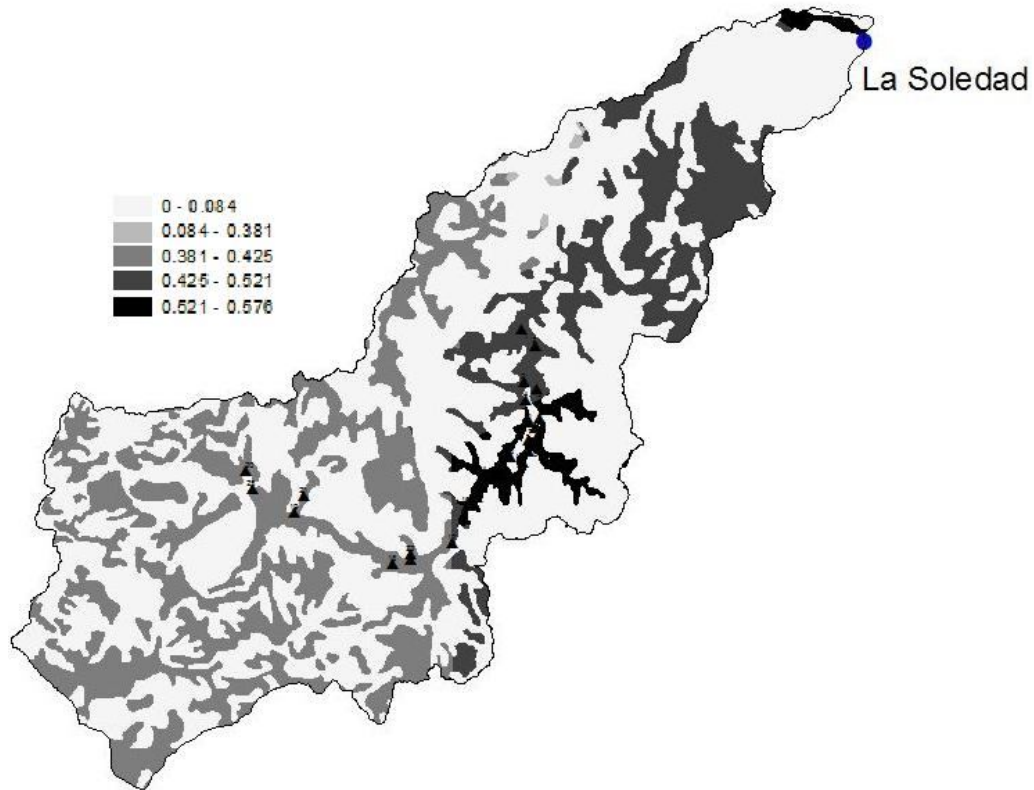


Figura 5A- 19. Factor C en la cuenca de La Soledad para 1980.

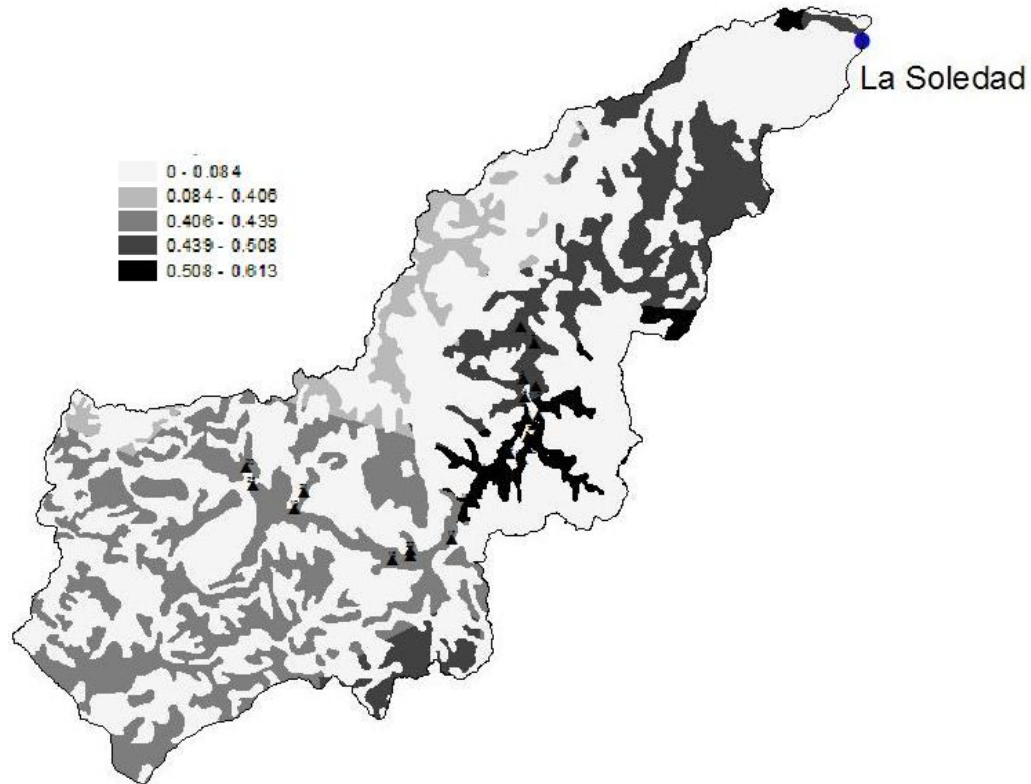


Figura 5A- 20. Factor C en la cuenca de La Soledad para 1981.



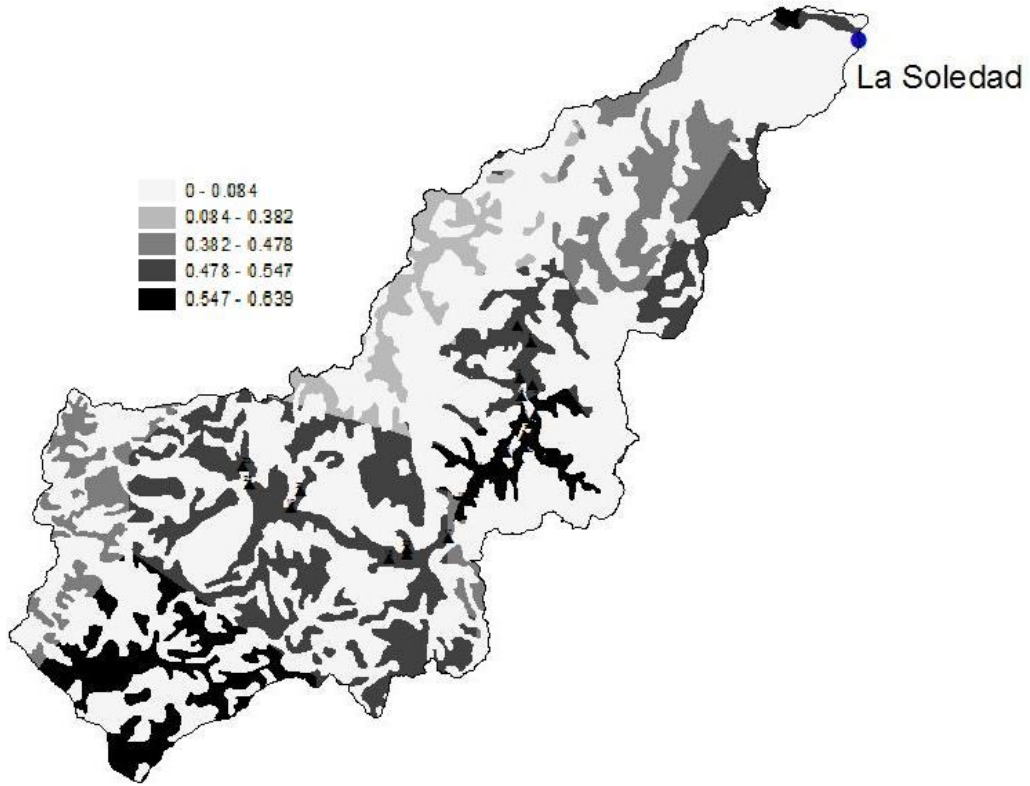


Figura 5A- 21. Factor C en la cuenca de La Soledad para 1982.

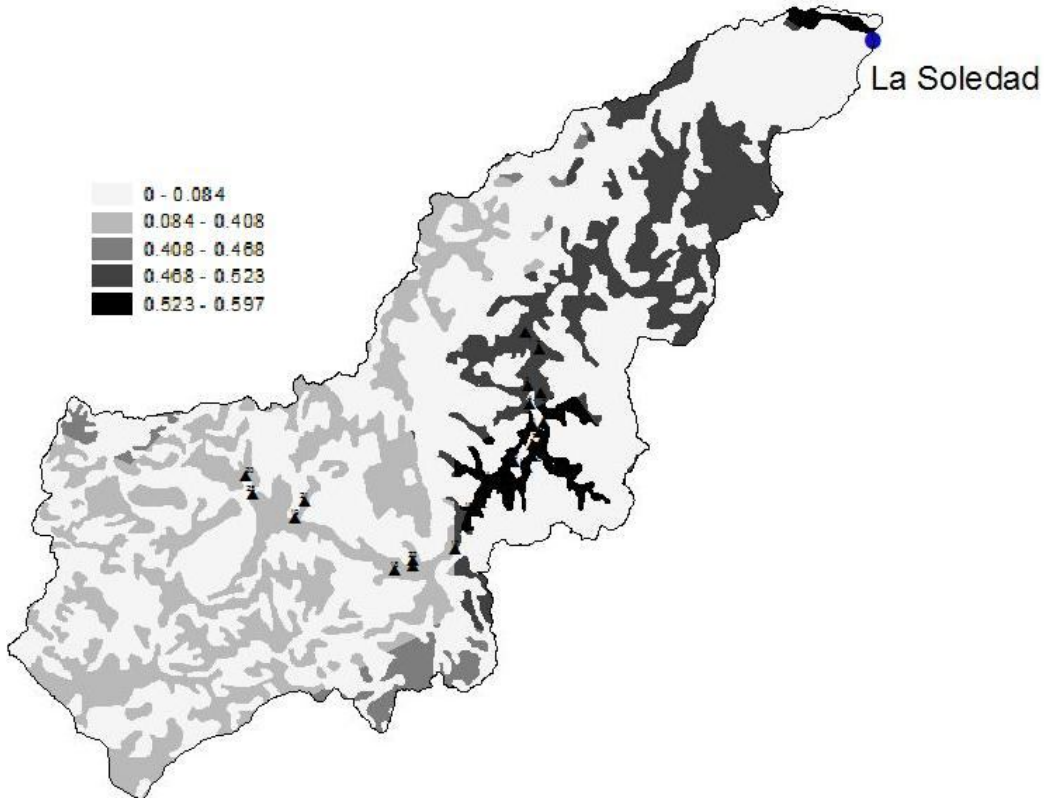


Figura 5A- 22. Factor C en la cuenca de La Soledad para 1983.

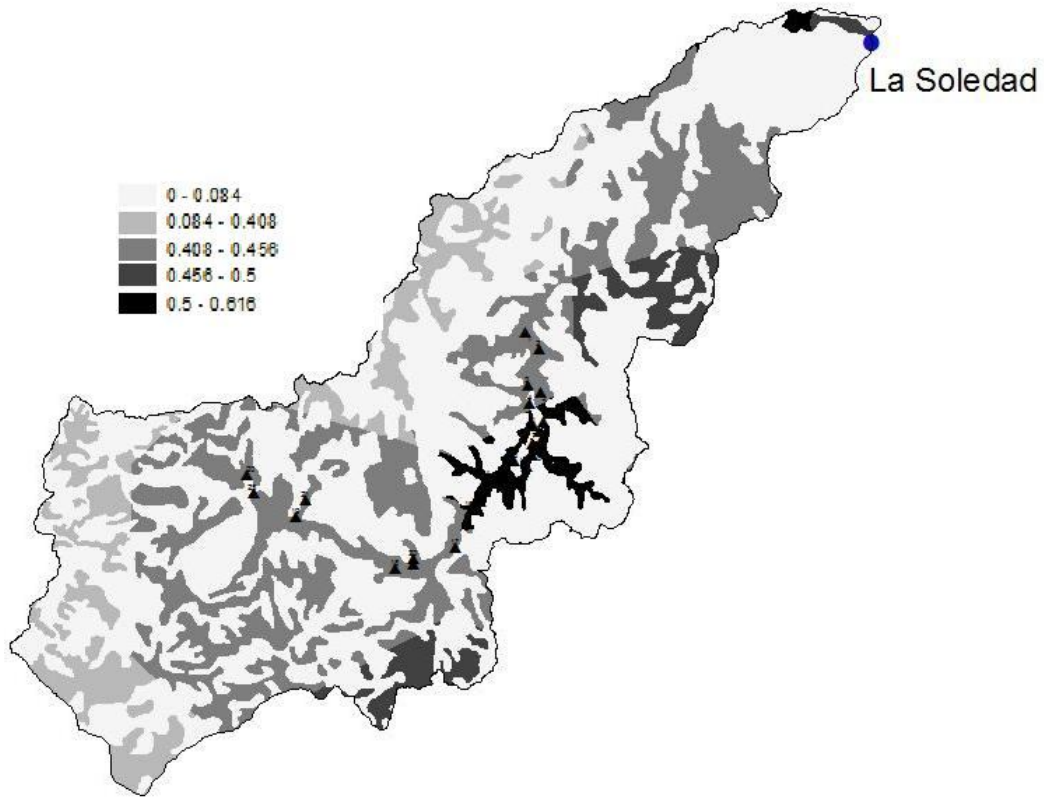


Figura 5A- 23. Factor C en la cuenca de La Soledad para 1984.

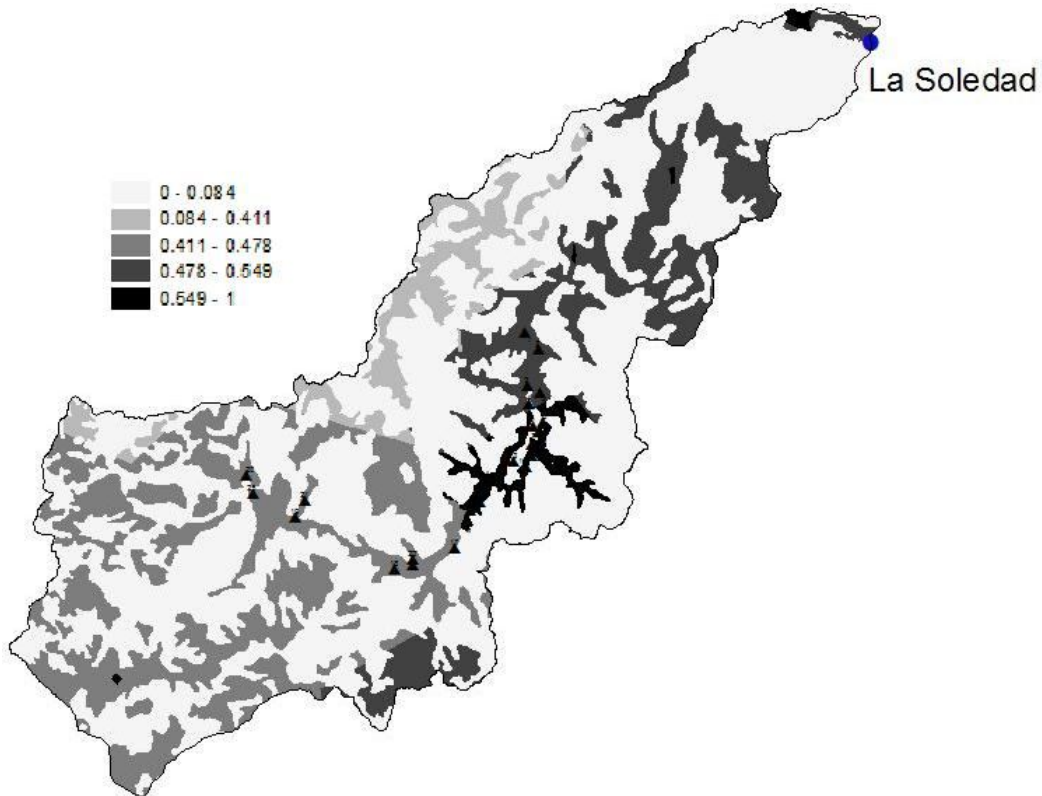


Figura 5A- 24. Factor C en la cuenca de La Soledad para 1985.

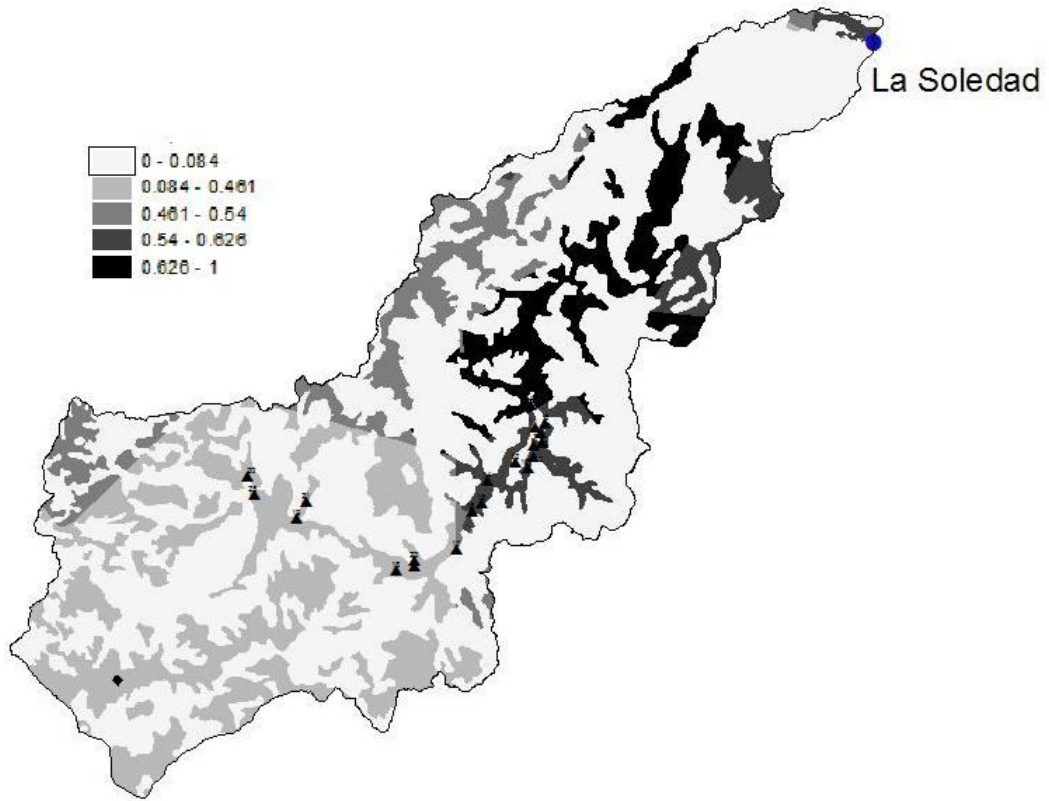


Figura 5A- 25. Factor C en la cuenca de La Soledad para 1986.

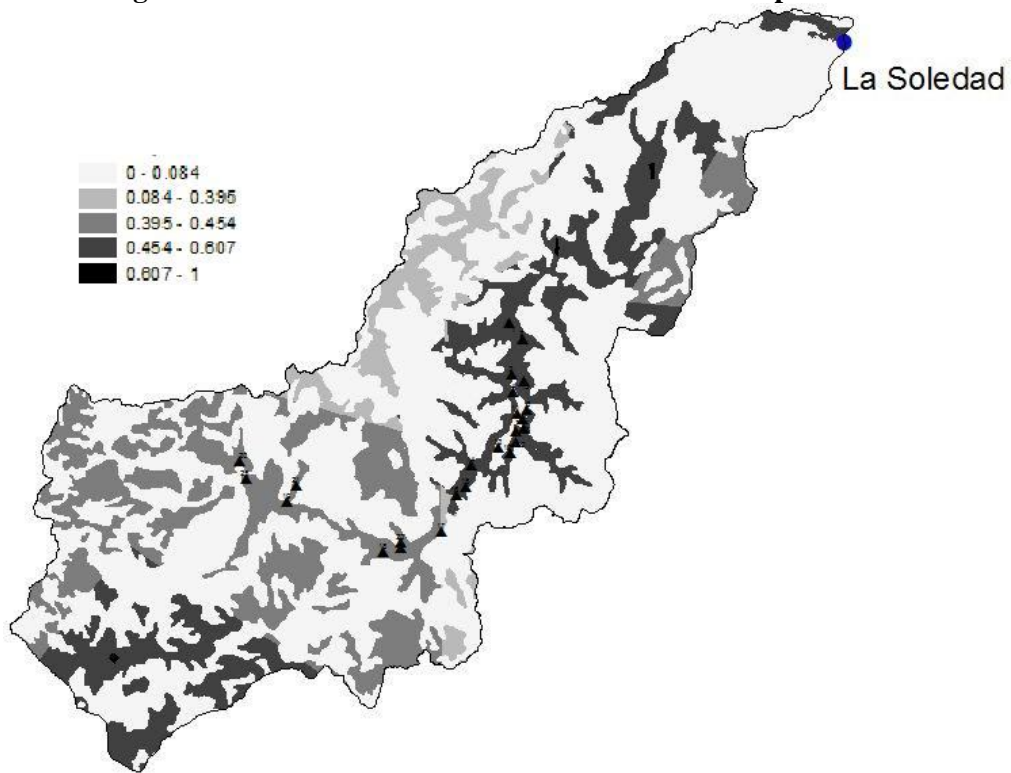


Figura 5A- 26. Factor C en la cuenca de La Soledad para 1987.

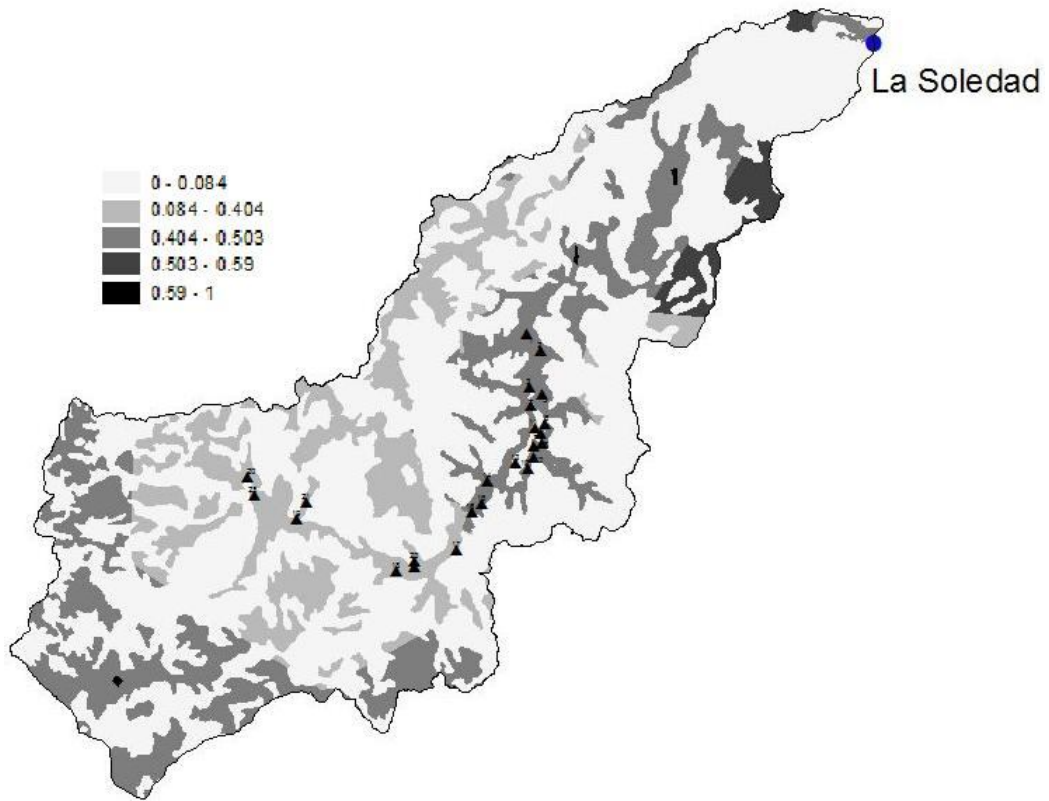


Figura 5A- 27. Factor C en la cuenca de La Soledad para 1988.

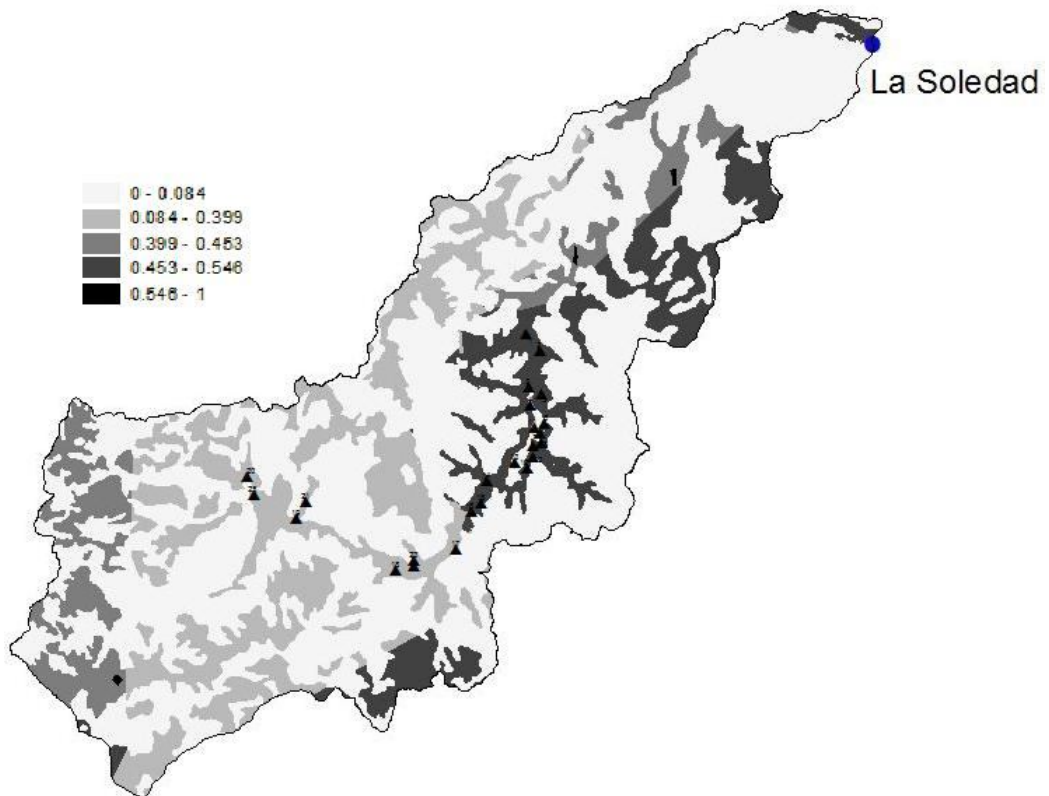


Figura 5A- 28. Factor C en la cuenca de La Soledad para 1989.



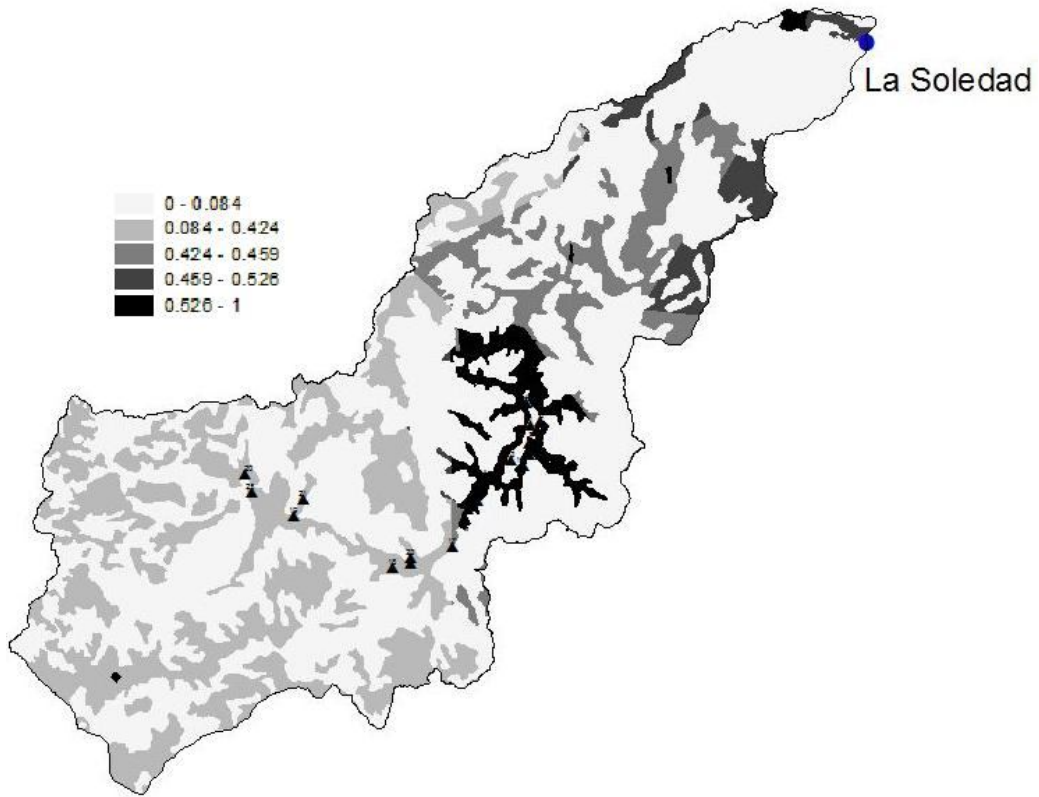


Figura 5A- 29. Factor C en la cuenca de La Soledad para 1990.

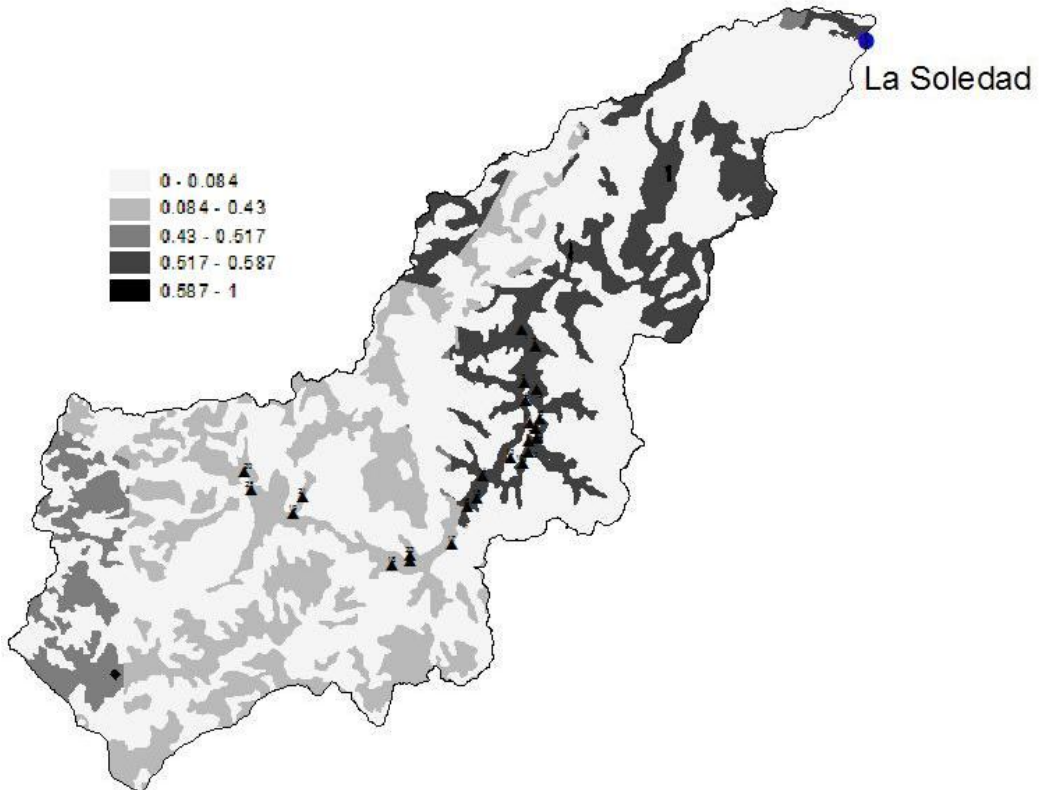


Figura 5A- 30. Factor C en la cuenca de La Soledad para 1991.

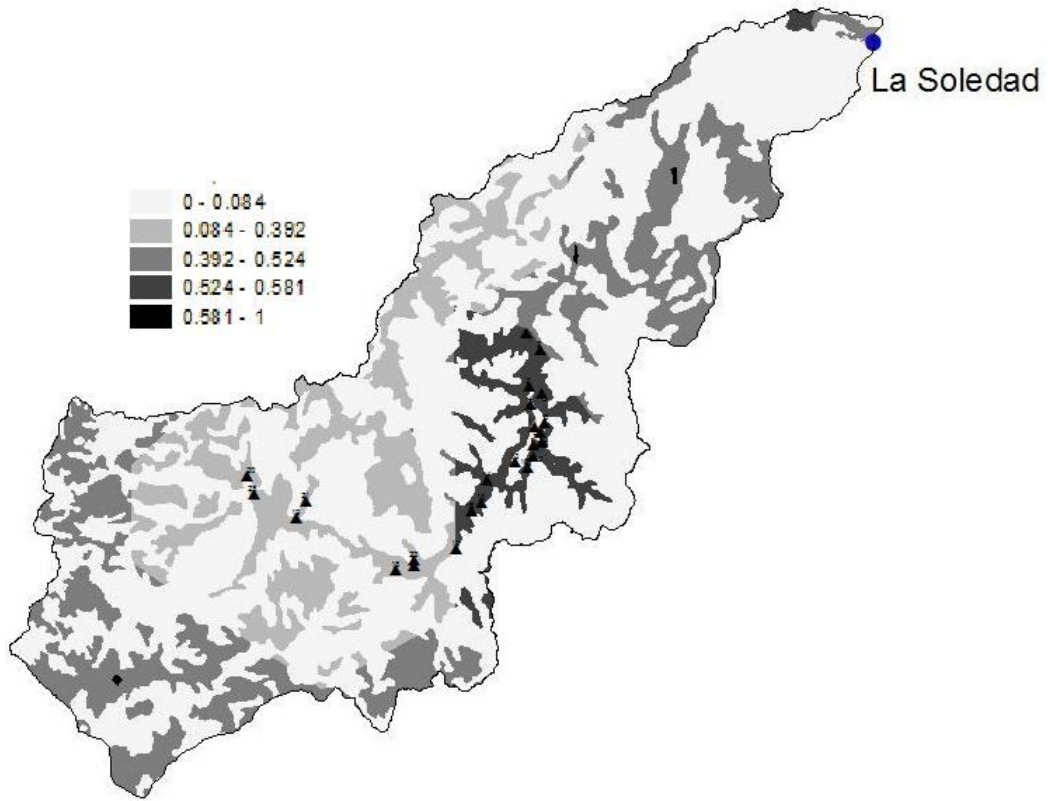


Figura 5A- 31. Factor C en la cuenca de La Soledad para 1992.

---

---

*Apéndice B*

---

---



**Apéndice B**

Distribución del factor de lluvia ( $R$ ) de la USLE para cada año en la cuenca alta del río Apulco.  $R$  se distribuye mediante polígonos de Thiessen desarrollados a partir de las estaciones climatológicas. Figuras 5B-1 a 5B-31.

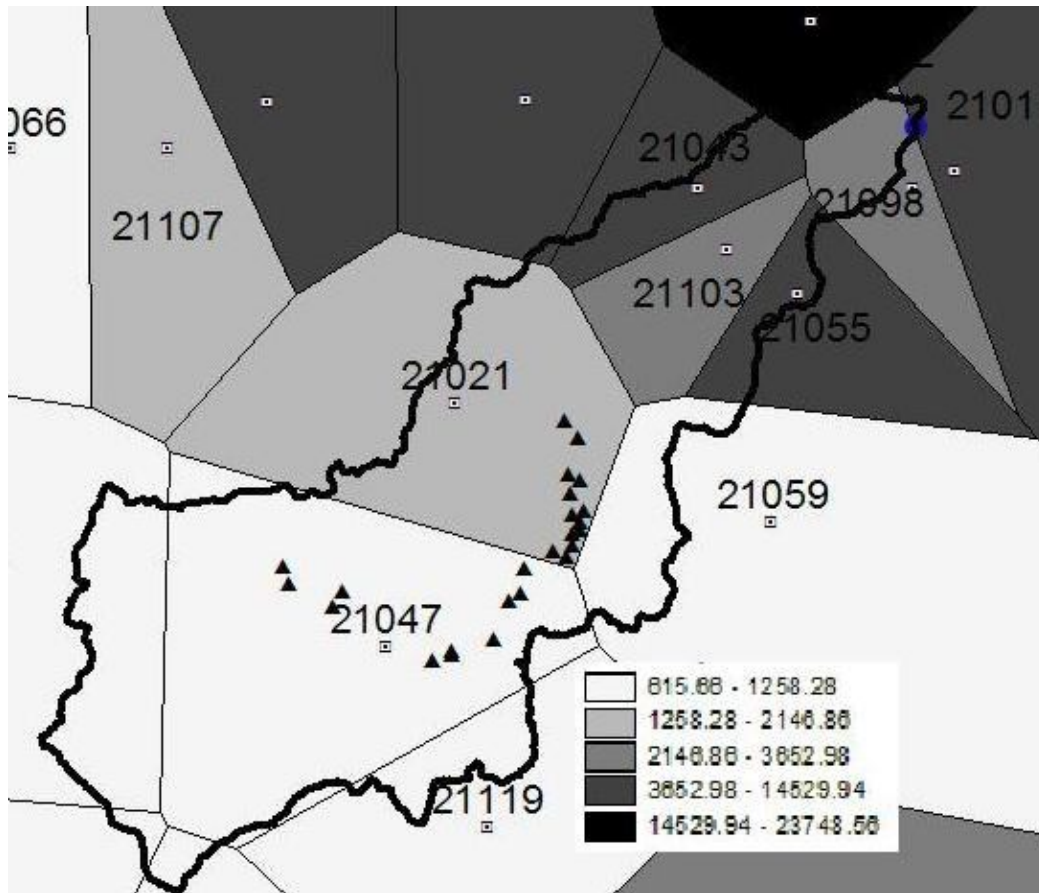


Figura 5B- 1. Factor  $R$  en la cuenca de La Soledad para 1962.

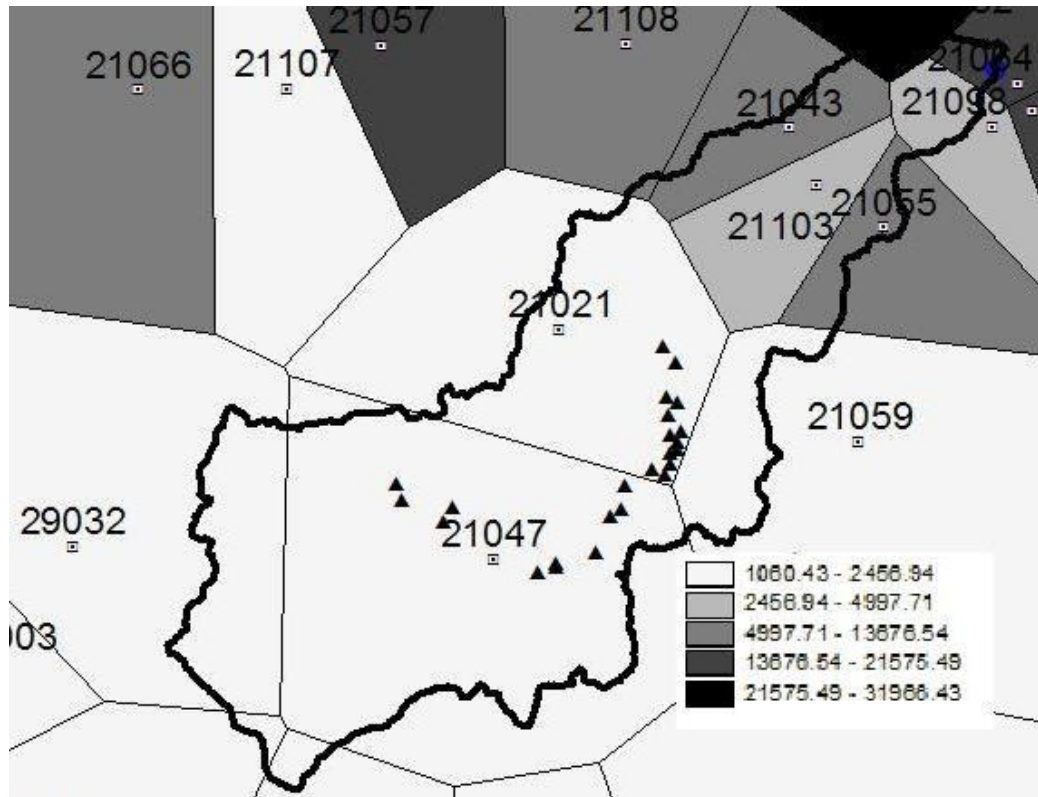


Figura 5B- 2. Factor  $R$  en la cuenca de La Soledad para 1963.

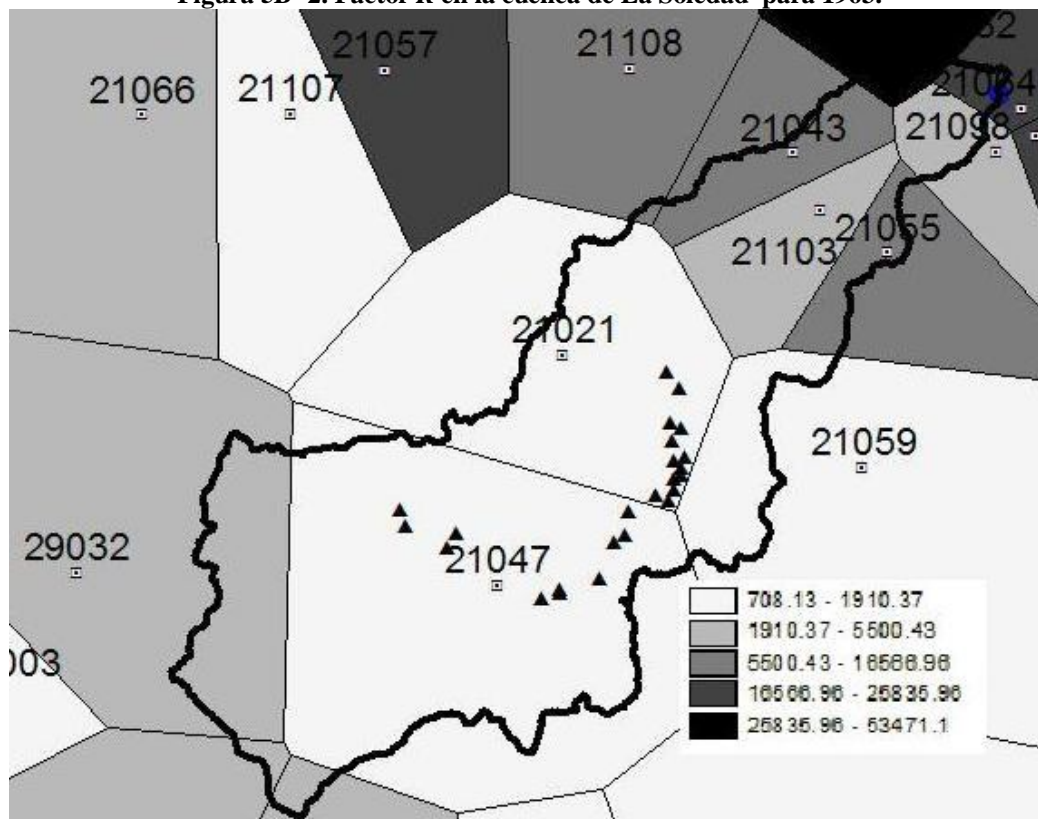


Figura 5B- 3. Factor  $R$  en la cuenca de La Soledad para 1964.

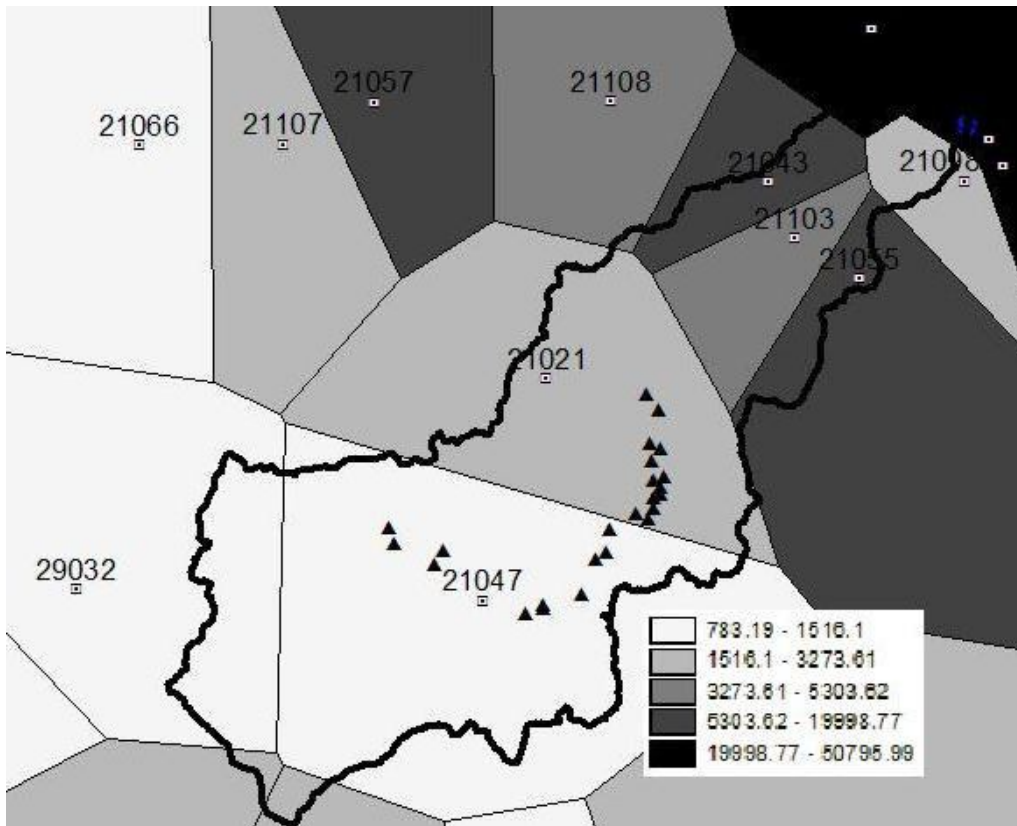


Figura 5B- 4. Factor R en la cuenca de La Soledad para 1965.

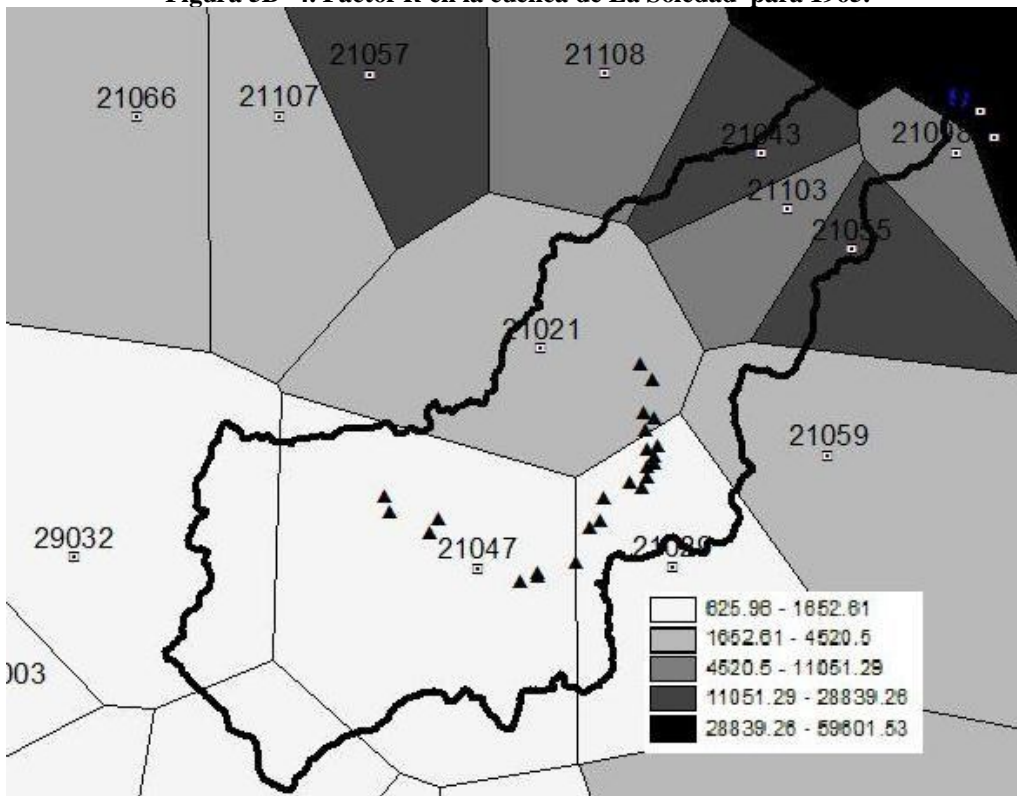


Figura 5B- 5. Factor R en la cuenca de La Soledad para 1966.



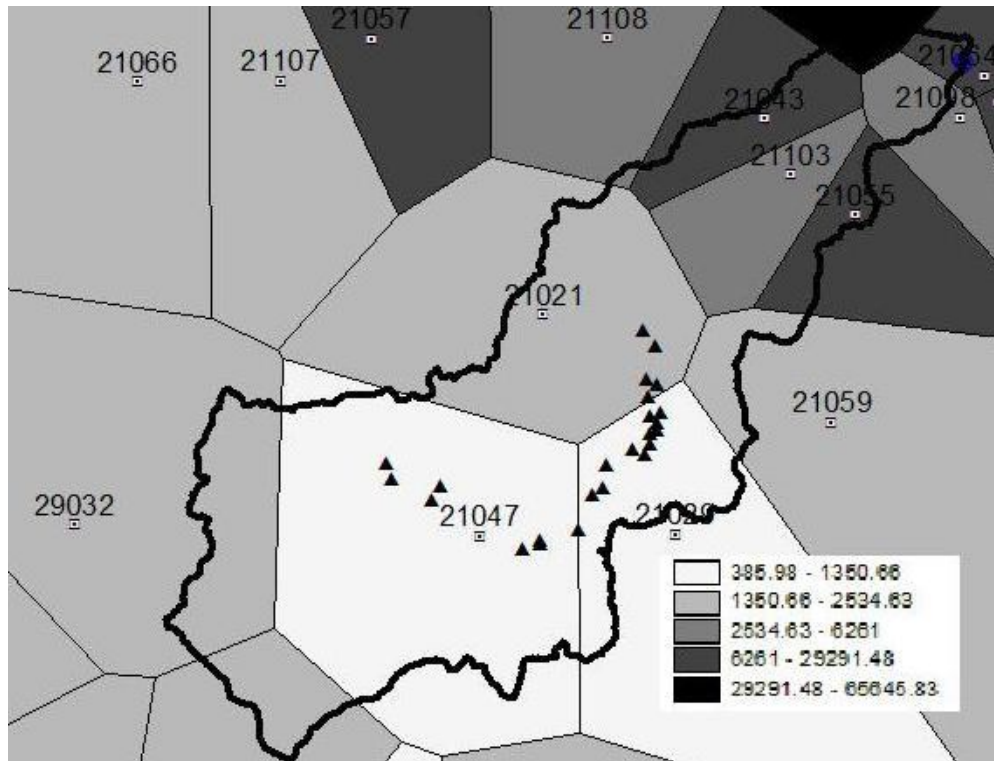


Figura 5B- 6. Factor *R* en la cuenca de La Soledad para 1967.

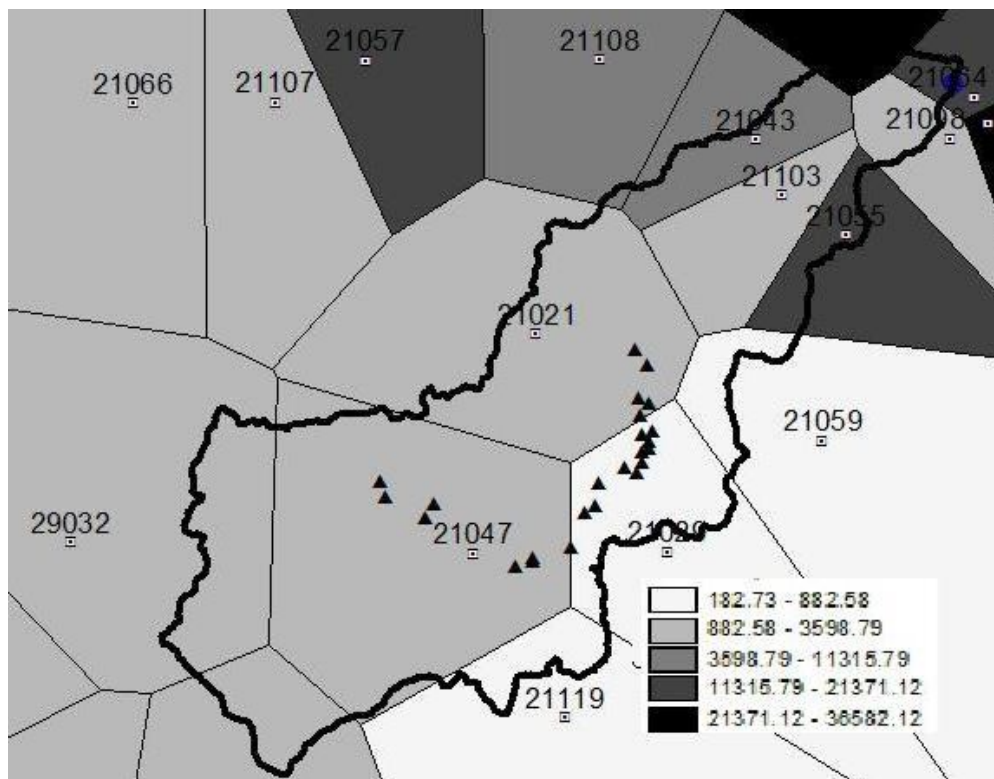


Figura 5B- 7. Factor *R* en la cuenca de La Soledad para 1968.



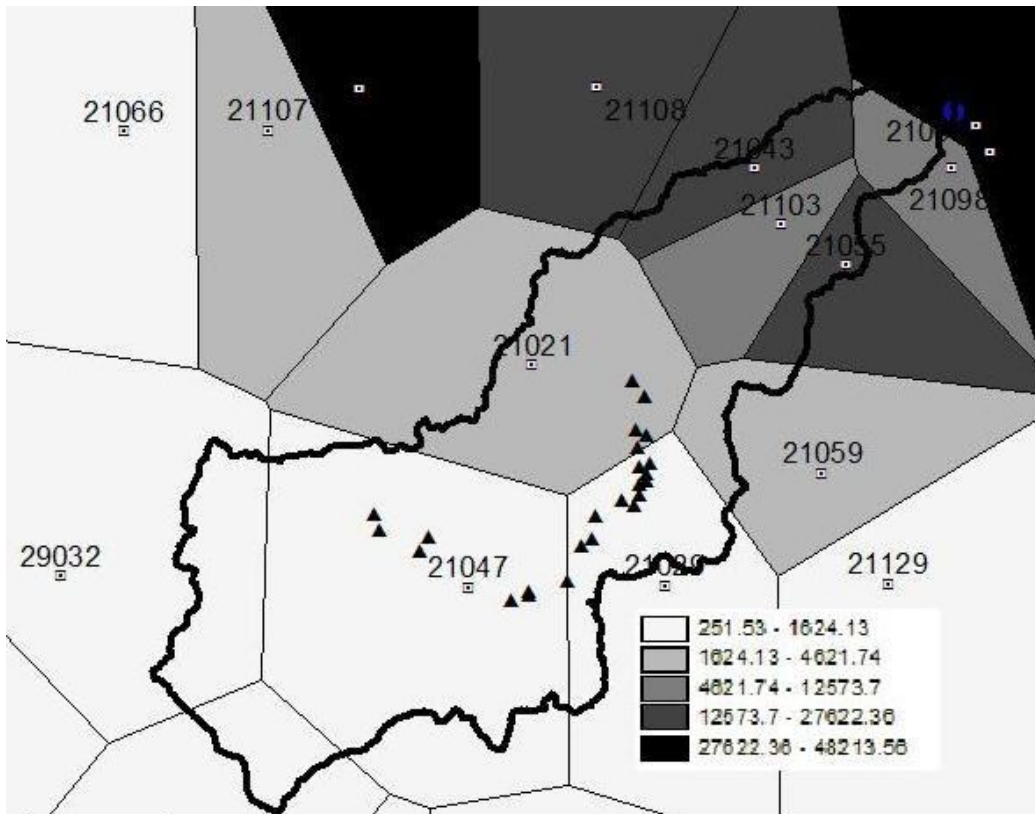


Figura 5B- 8. Factor  $R$  en la cuenca de La Soledad para 1969.

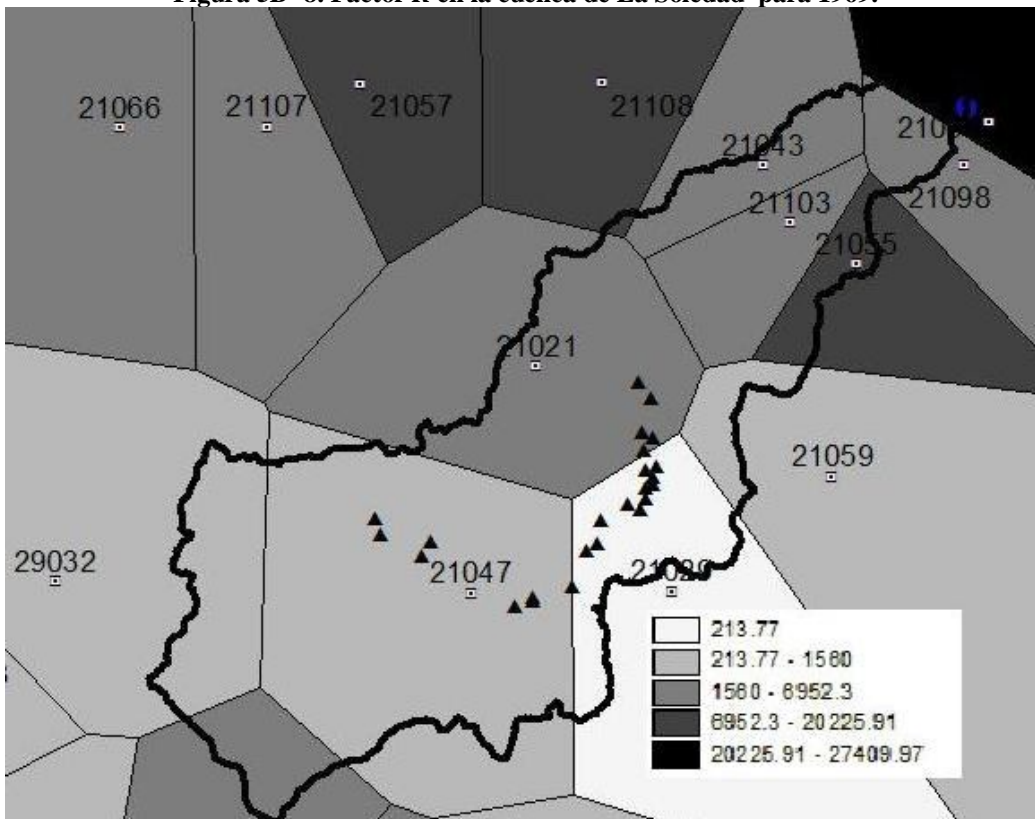


Figura 5B- 9. Factor  $R$  en la cuenca de La Soledad para 1970.

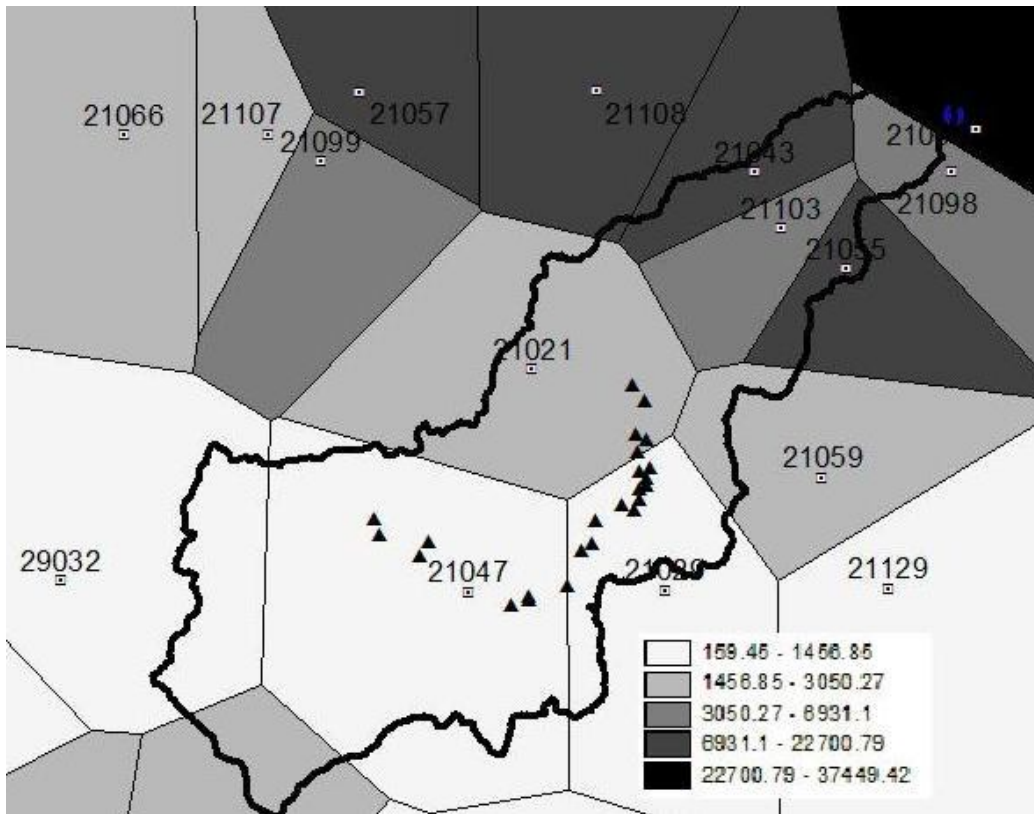


Figura 5B- 10. Factor R en la cuenca de La Soledad para 1971.

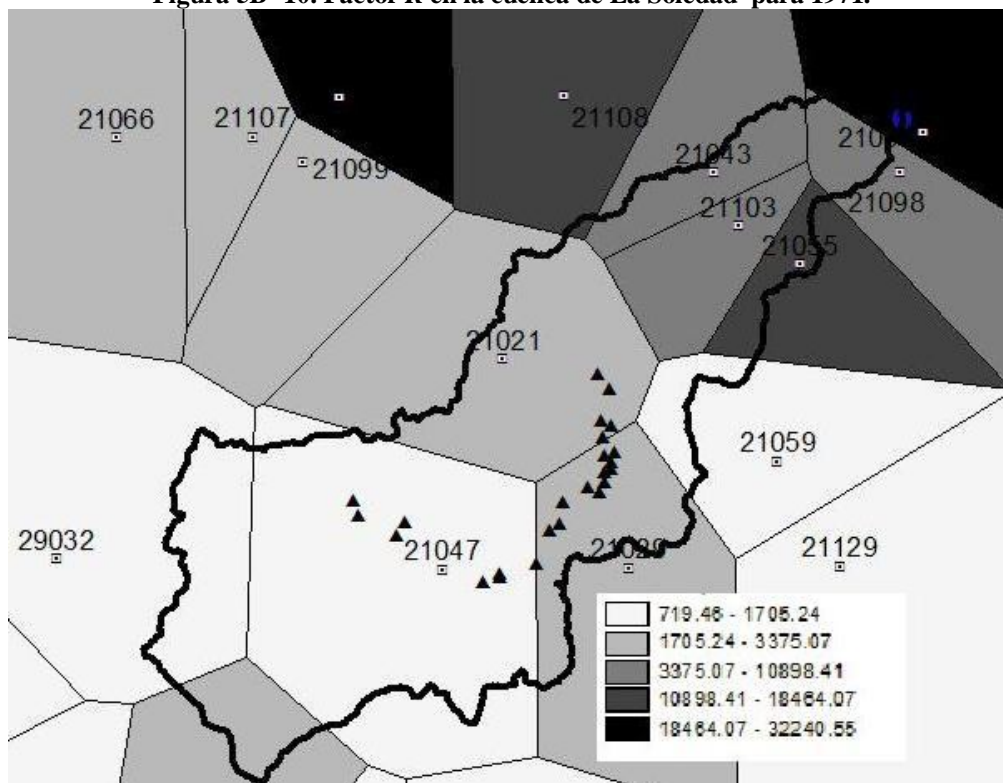


Figura 5B- 11. Factor R en la cuenca de La Soledad para 1972.

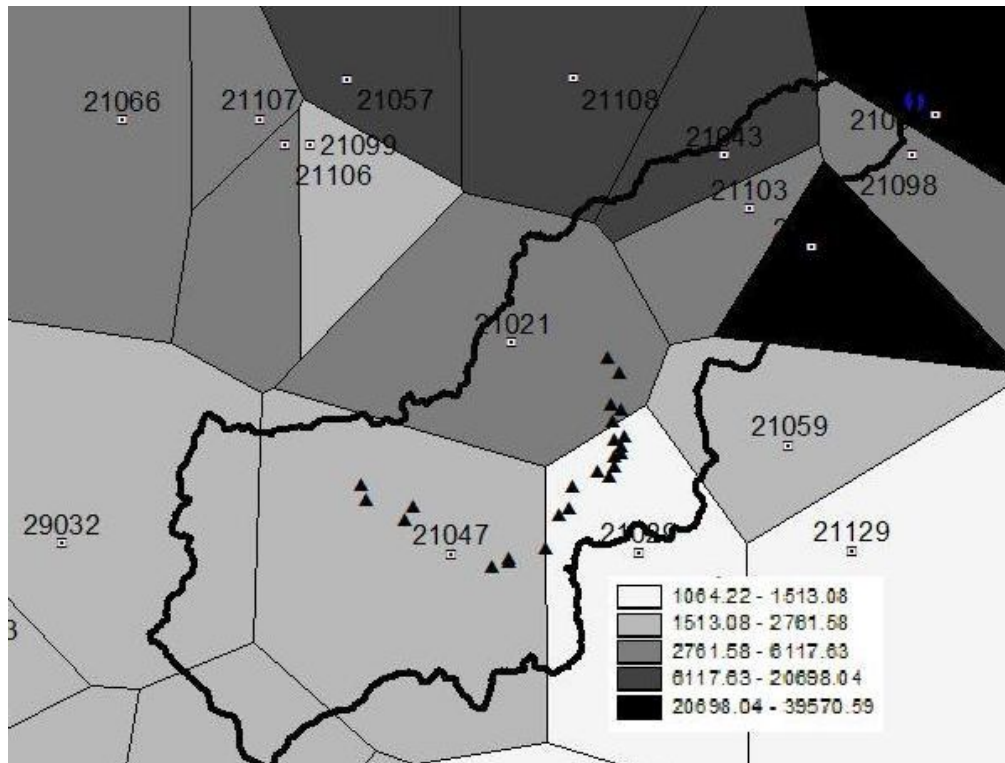


Figura 5B- 12. Factor R en la cuenca de La Soledad para 1973.

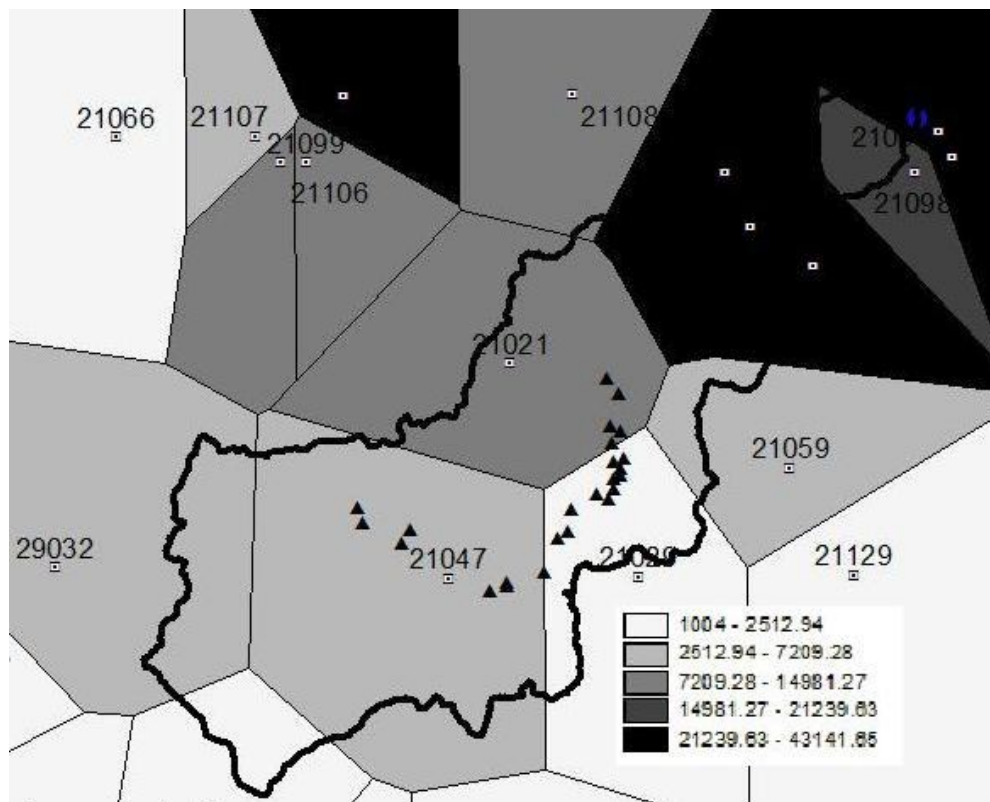


Figura 5B- 13. Factor R en la cuenca de La Soledad para 1974.

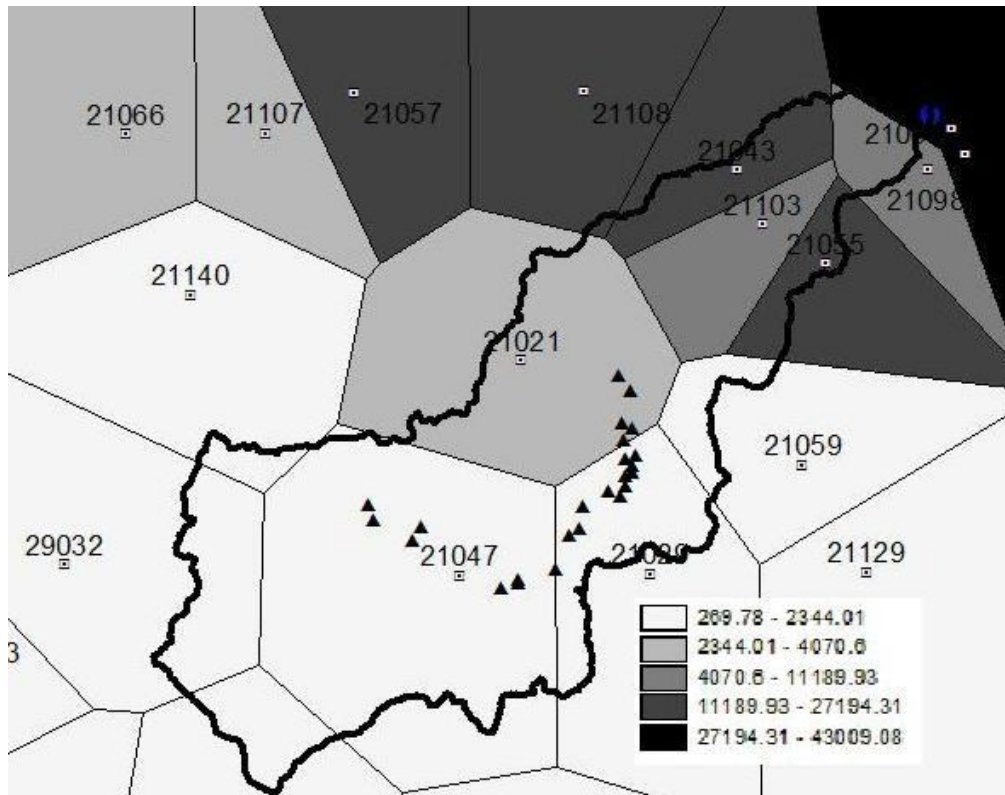


Figura 5B- 14. Factor R en la cuenca de La Soledad para 1975.

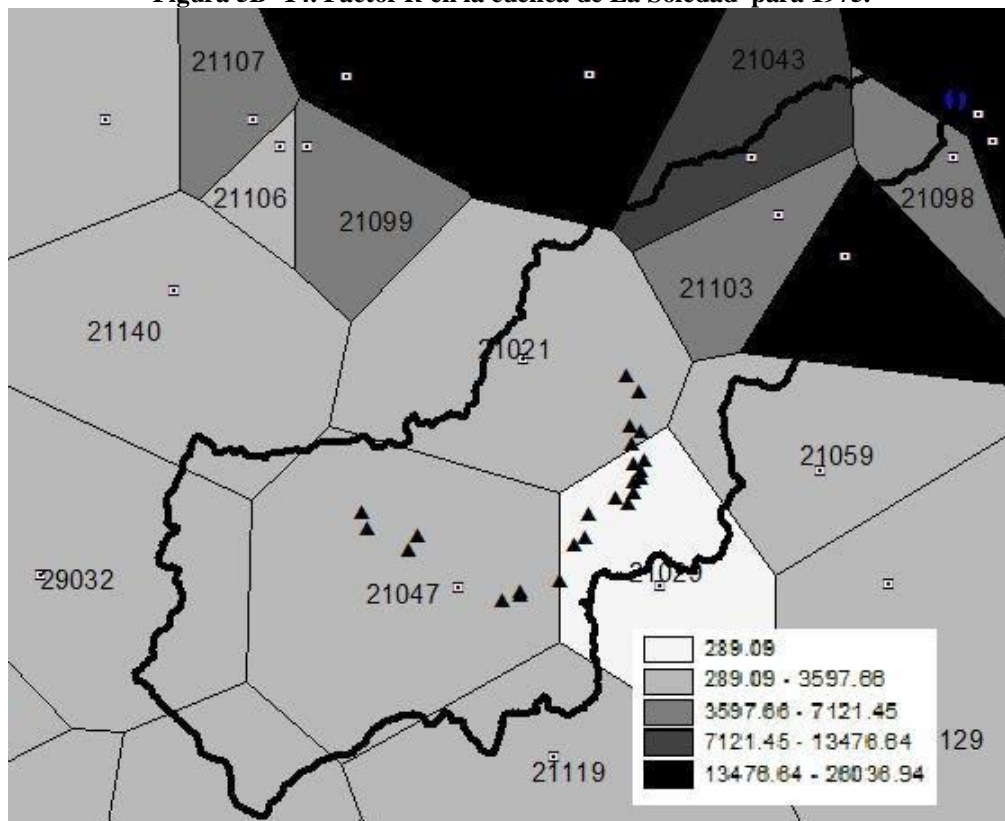


Figura 5B- 15. Factor R en la cuenca de La Soledad para 1976.



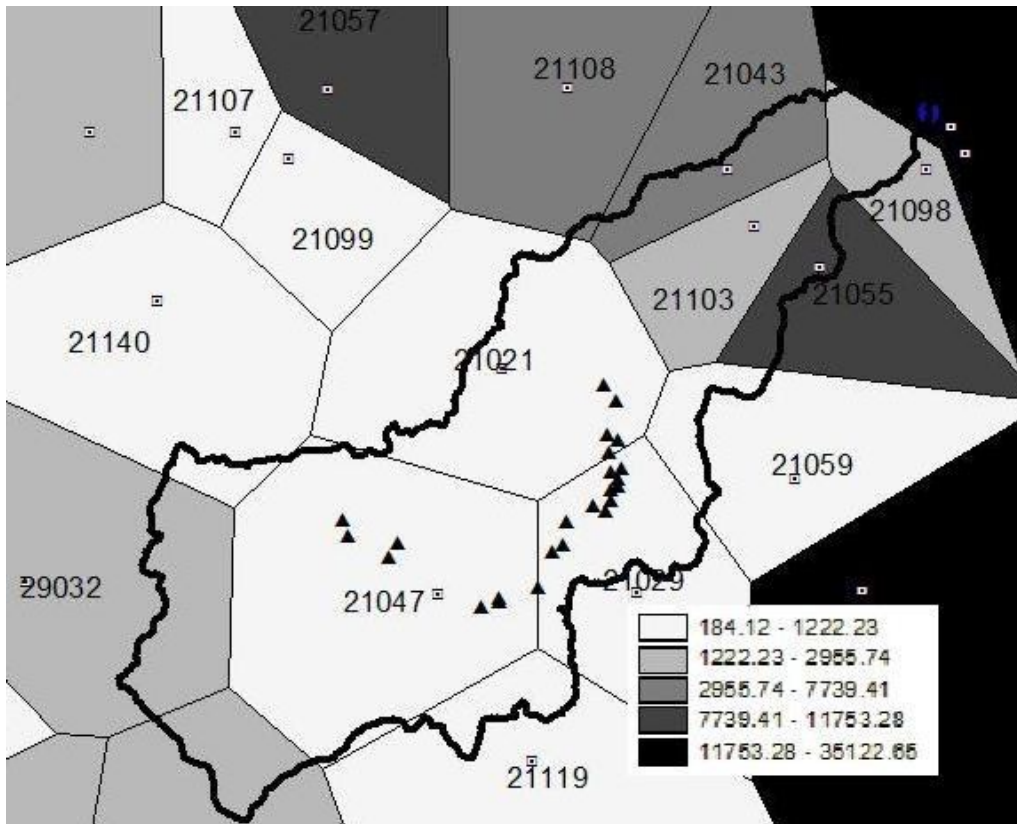


Figura 5B- 16. Factor R en la cuenca de La Soledad para 1977.

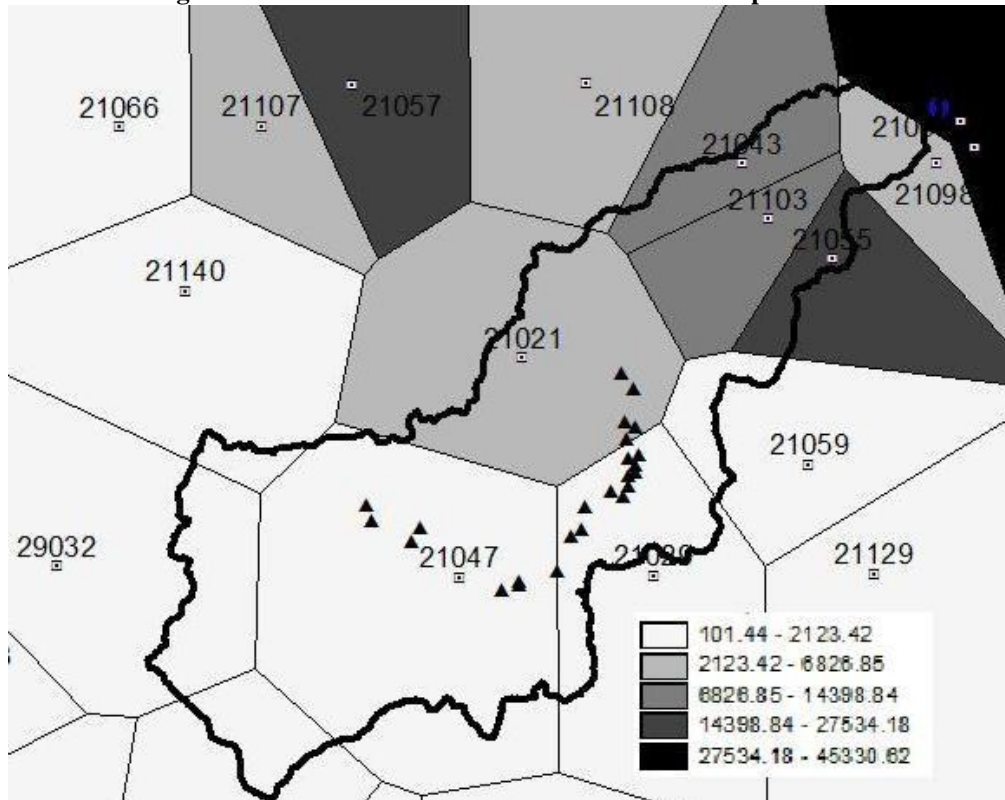


Figura 5B- 17. Factor R en la cuenca de La Soledad para 1978.

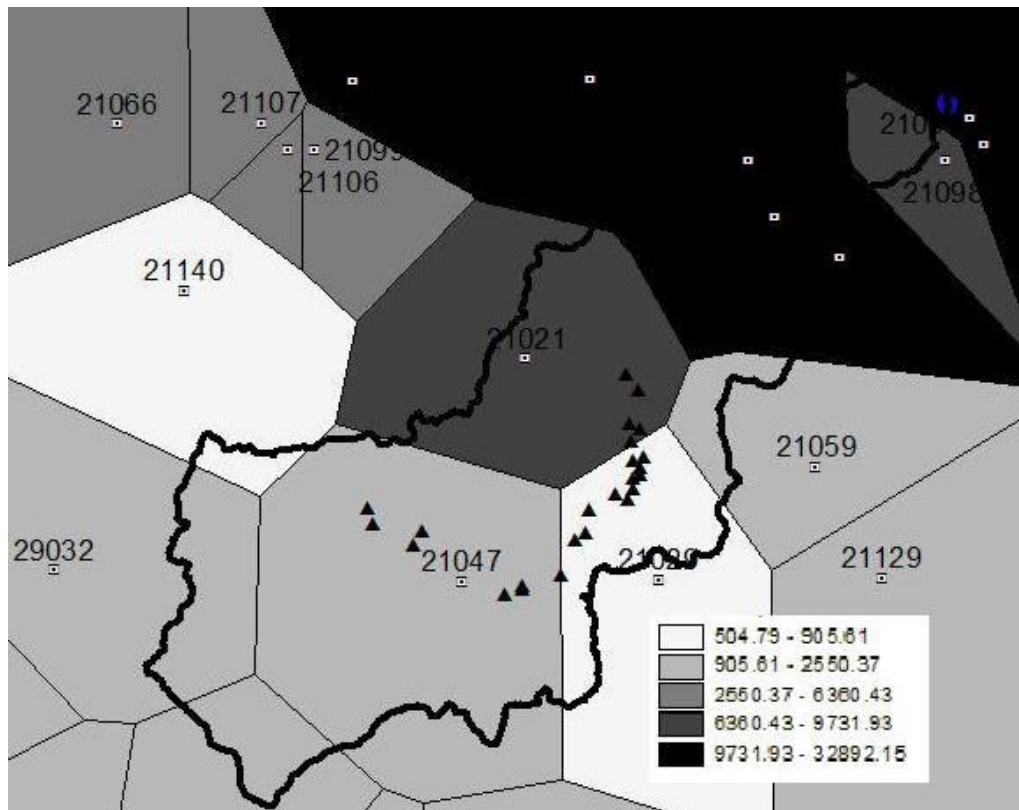


Figura 5B- 18. Factor *R* en la cuenca de La Soledad para 1979.

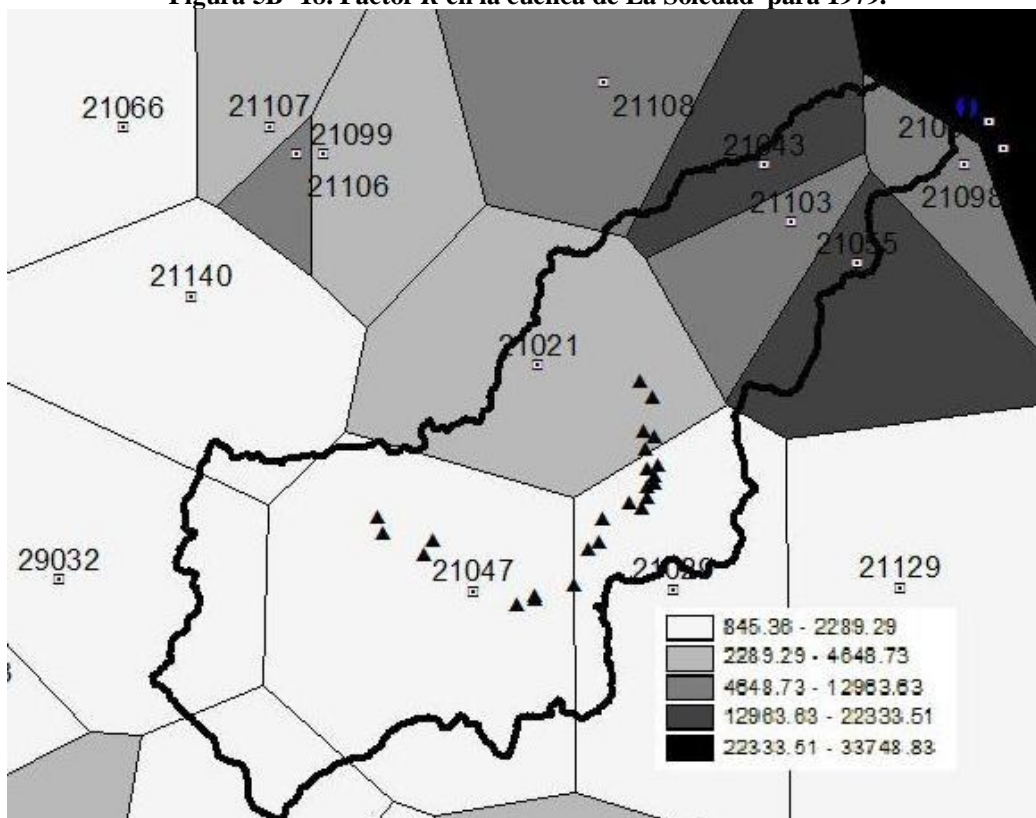


Figura 5B- 19. Factor *R* en la cuenca de La Soledad para 1980.

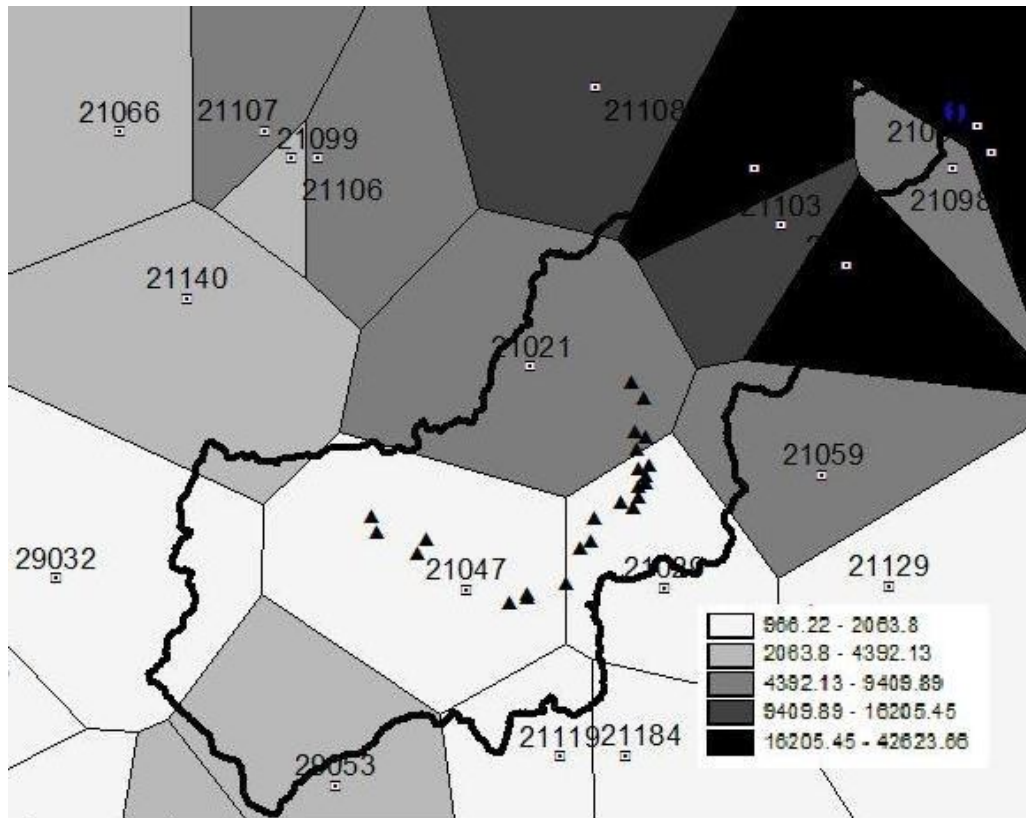


Figura 5B- 20. Factor R en la cuenca de La Soledad para 1981.

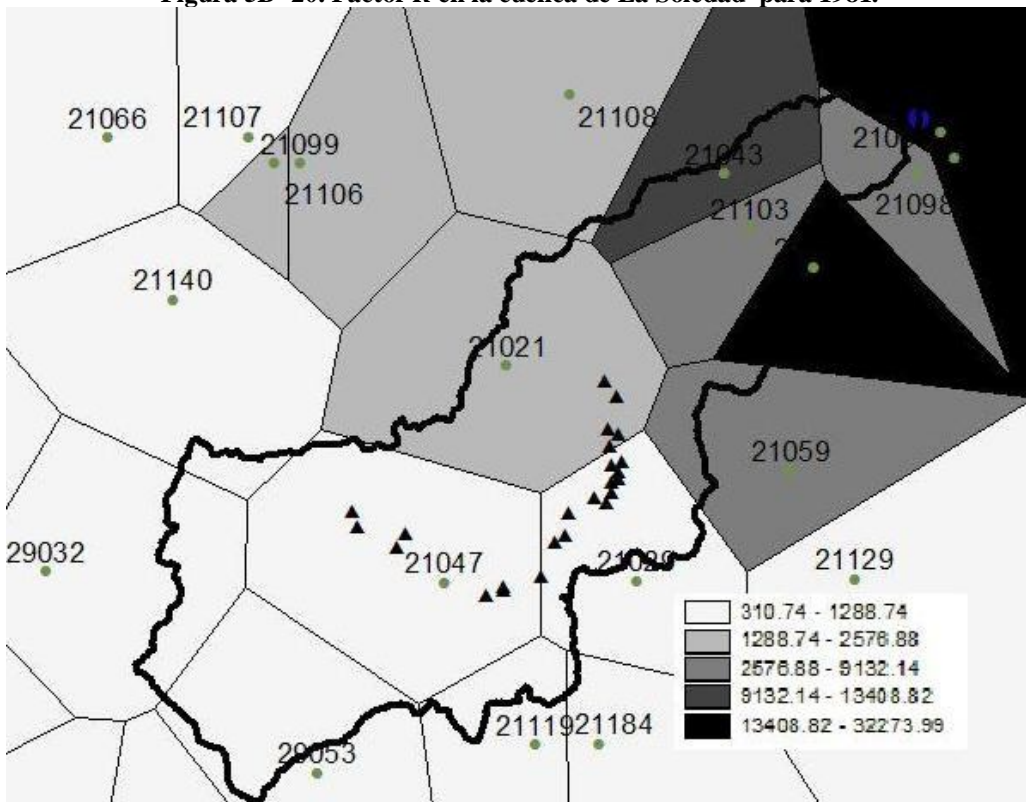


Figura 5B- 21. Factor R en la cuenca de La Soledad para 1982.



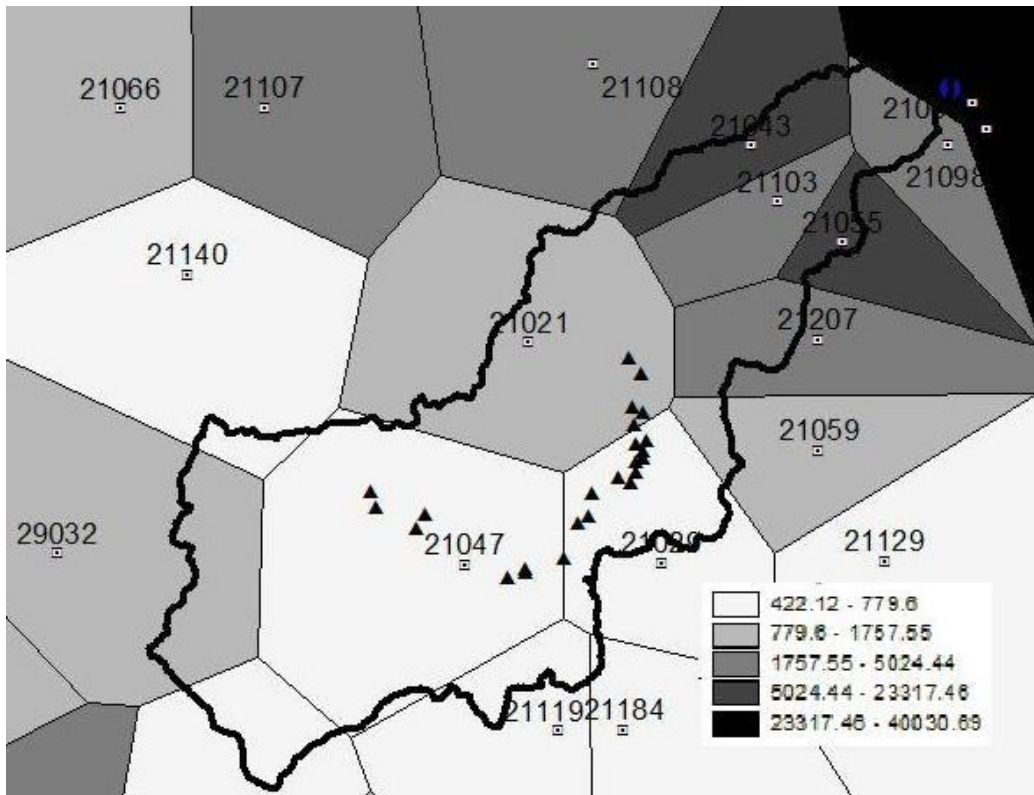


Figura 5B- 22. Factor R en la cuenca de La Soledad para 1983.

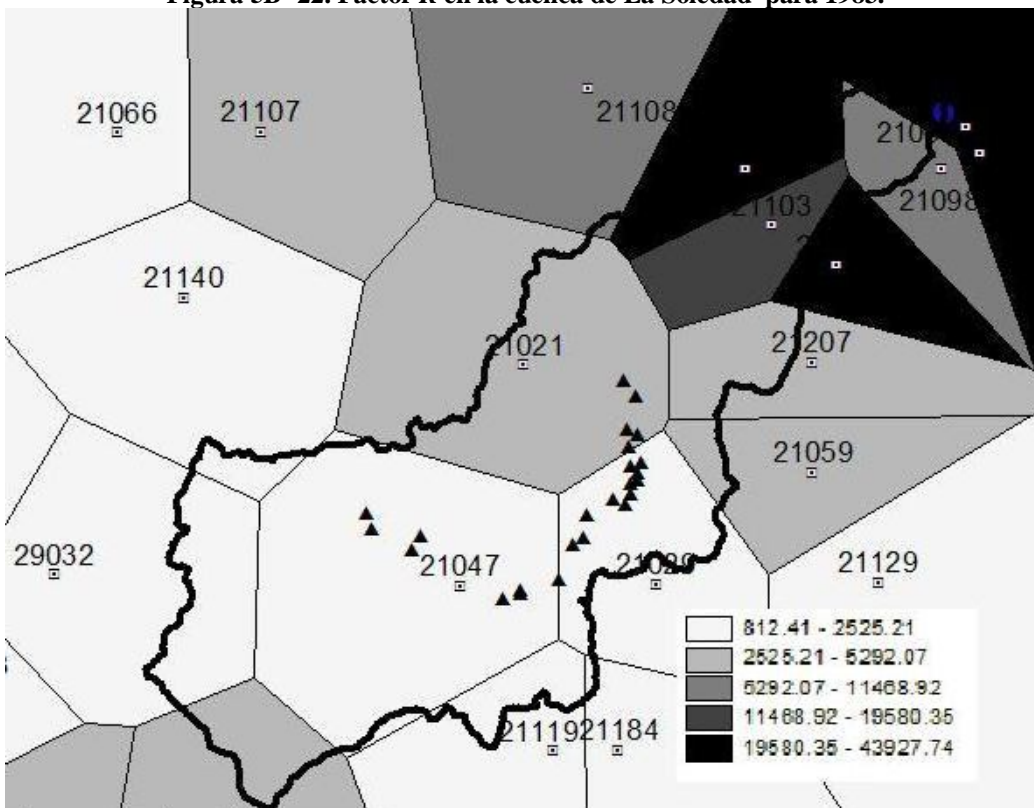


Figura 5B- 23. Factor R en la cuenca de La Soledad para 1984.



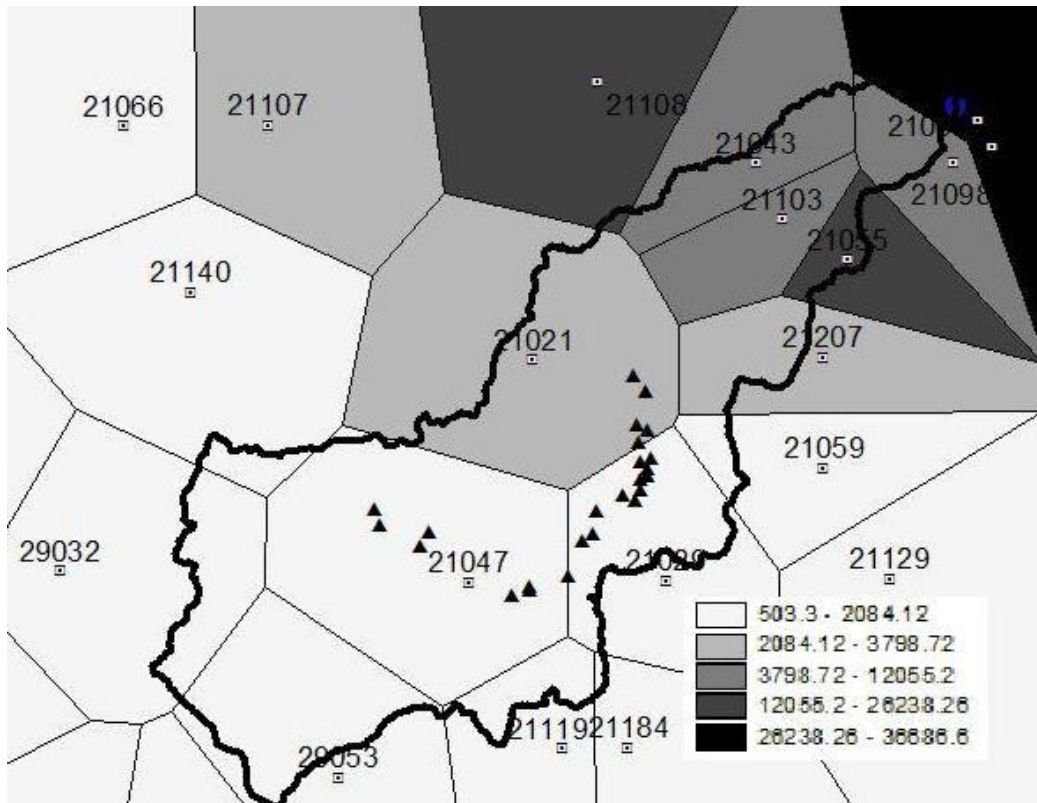


Figura 5B- 24. Factor R en la cuenca de La Soledad para 1985.

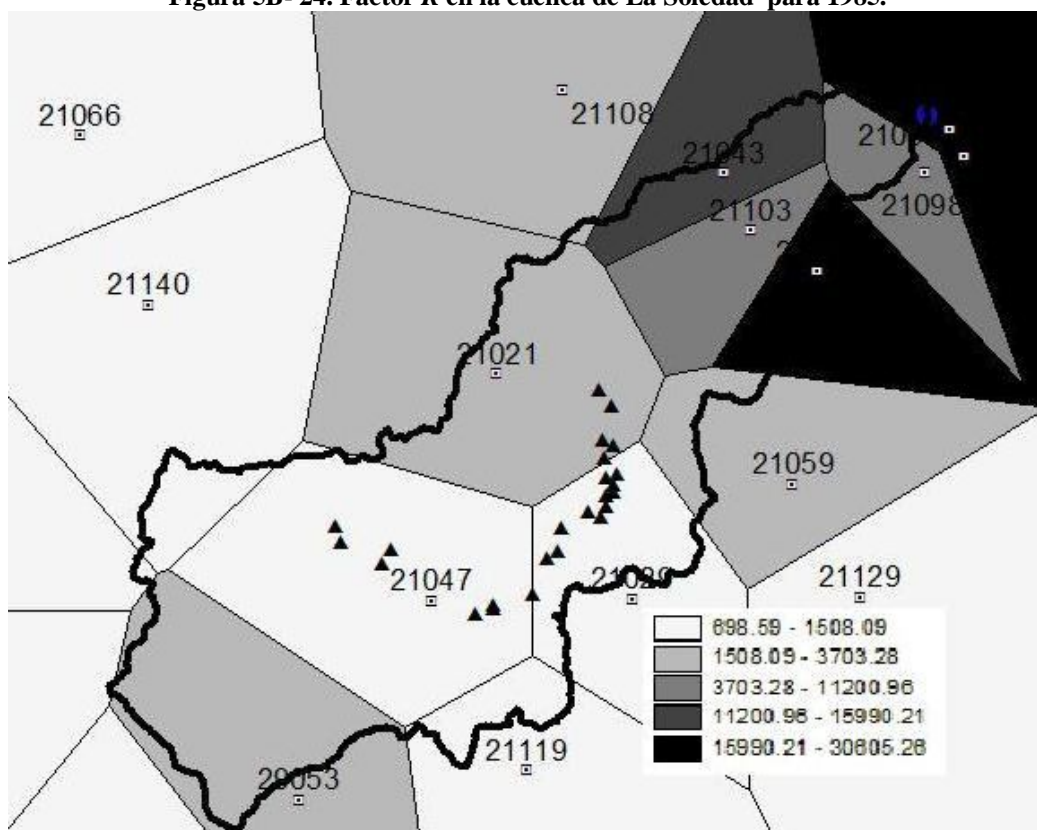


Figura 5B- 25. Factor R en la cuenca de La Soledad para 1986.

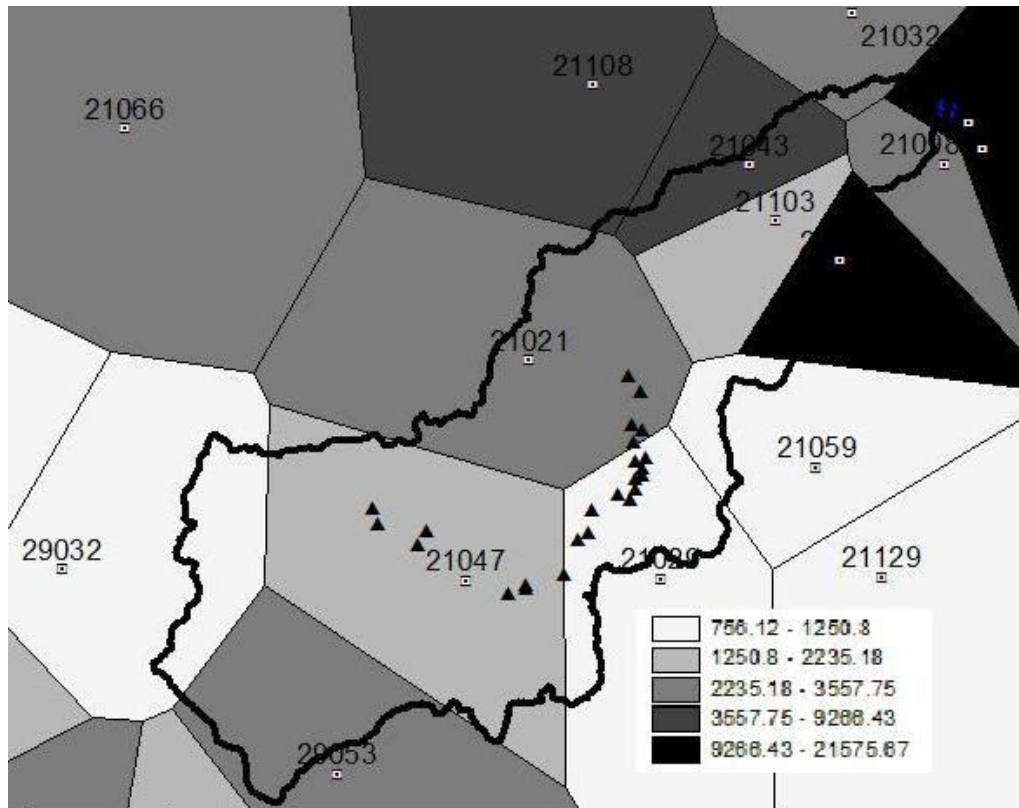


Figura 5B- 26. Factor *R* en la cuenca de La Soledad para 1987.

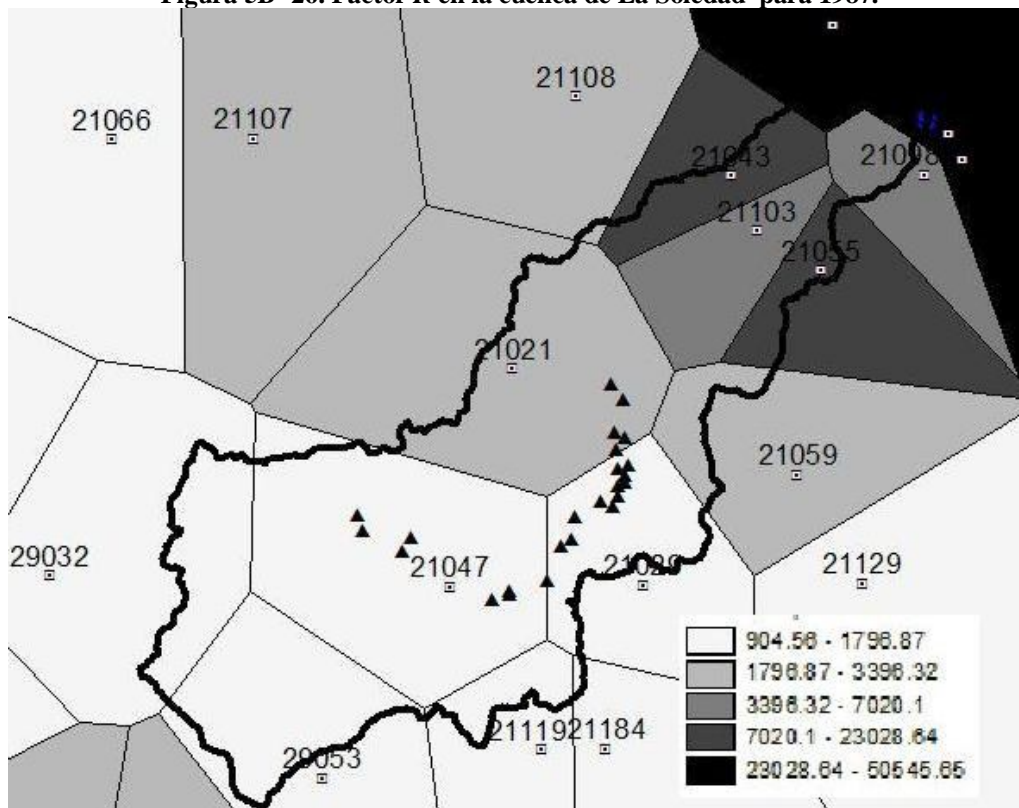


Figura 5B- 27. Factor *R* en la cuenca de La Soledad para 1988.

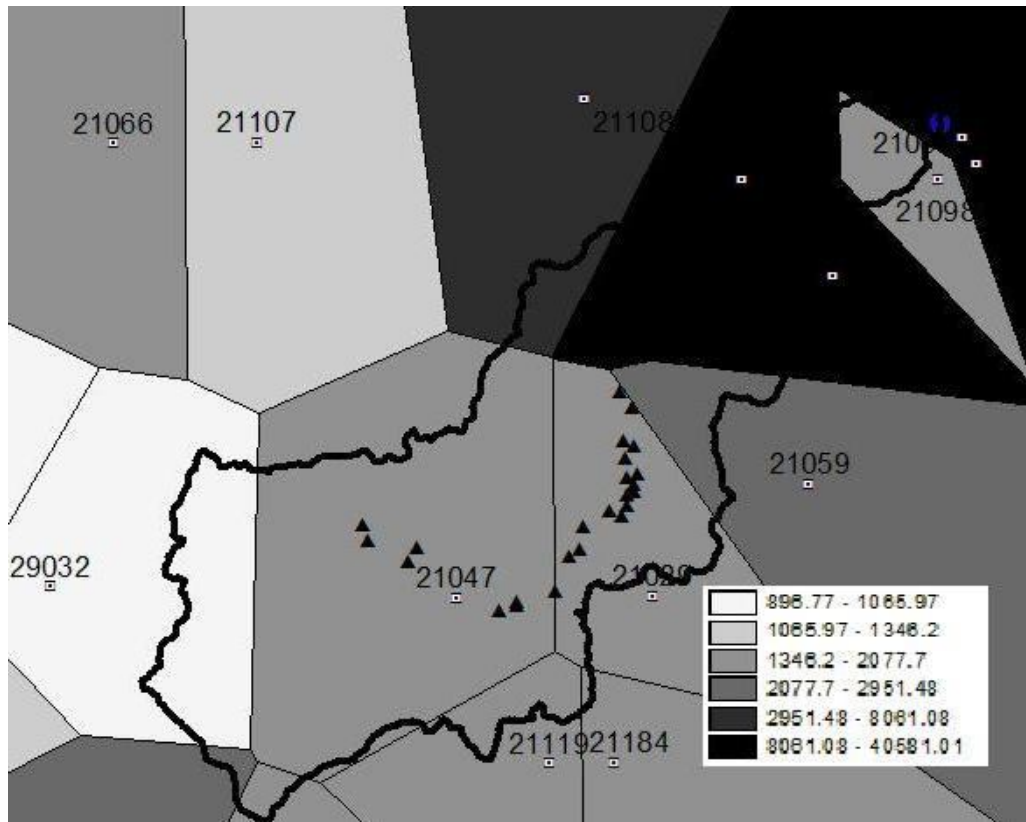


Figura 5B- 28. Factor R en la cuenca de La Soledad para 1989.

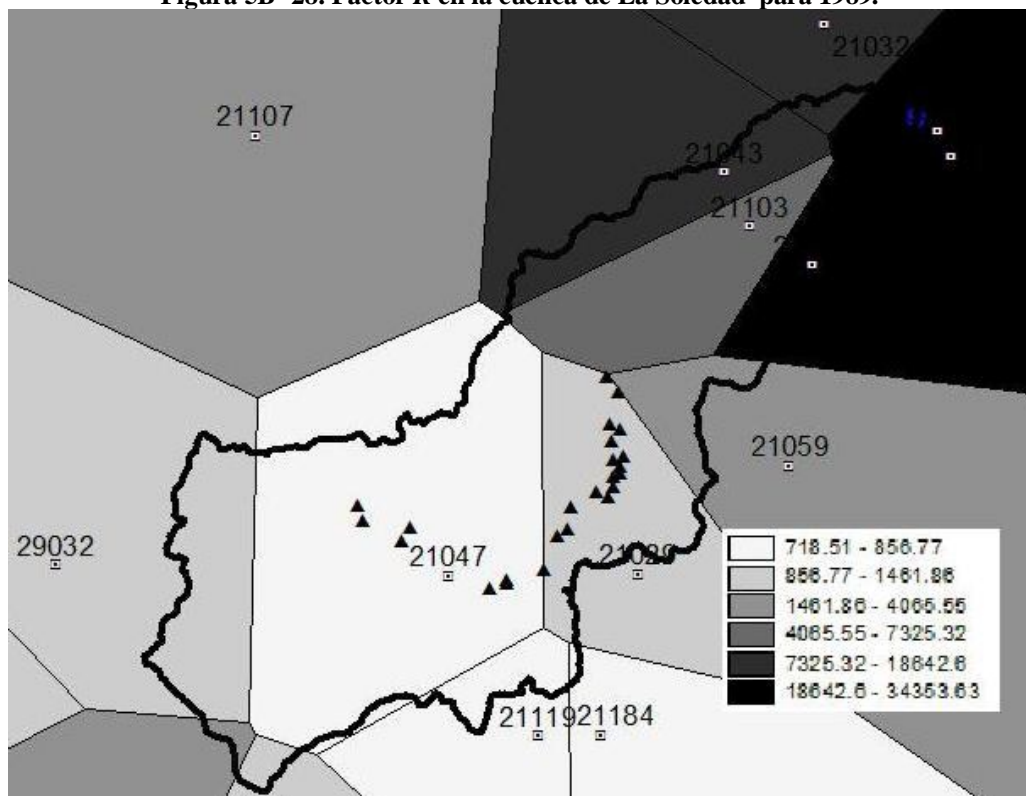


Figura 5B- 29. Factor R en la cuenca de La Soledad para 1990.

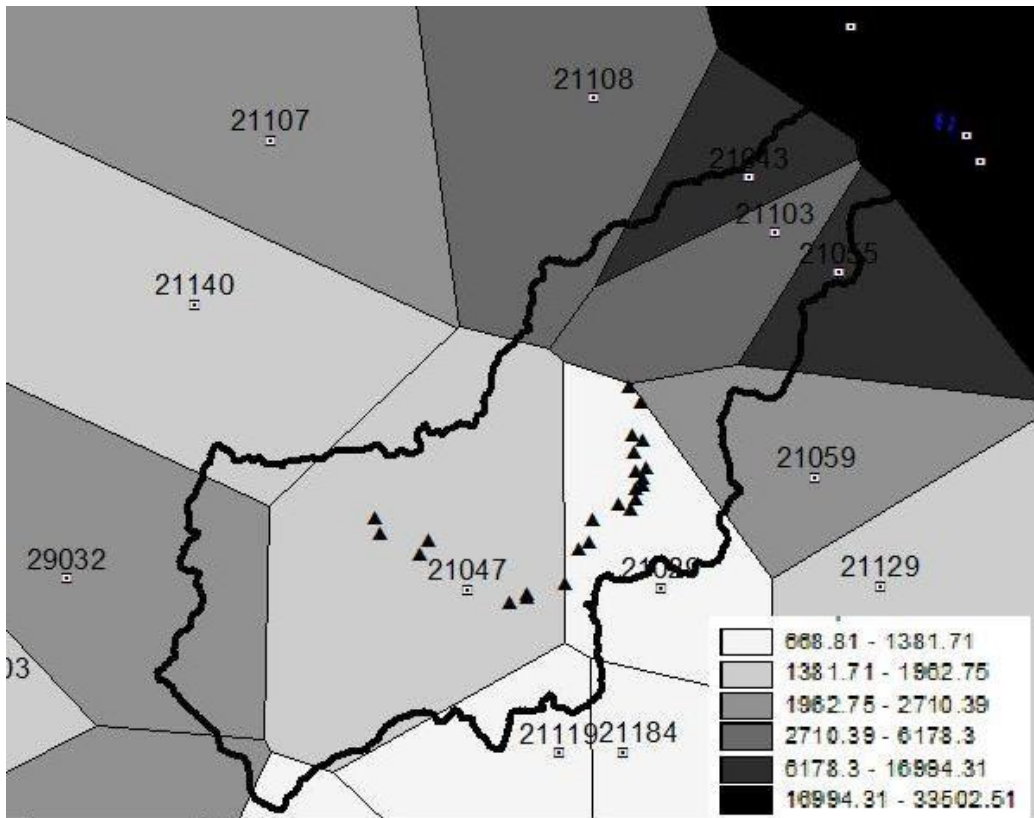


Figura 5B- 30. Factor R en la cuenca de La Soledad para 1991.

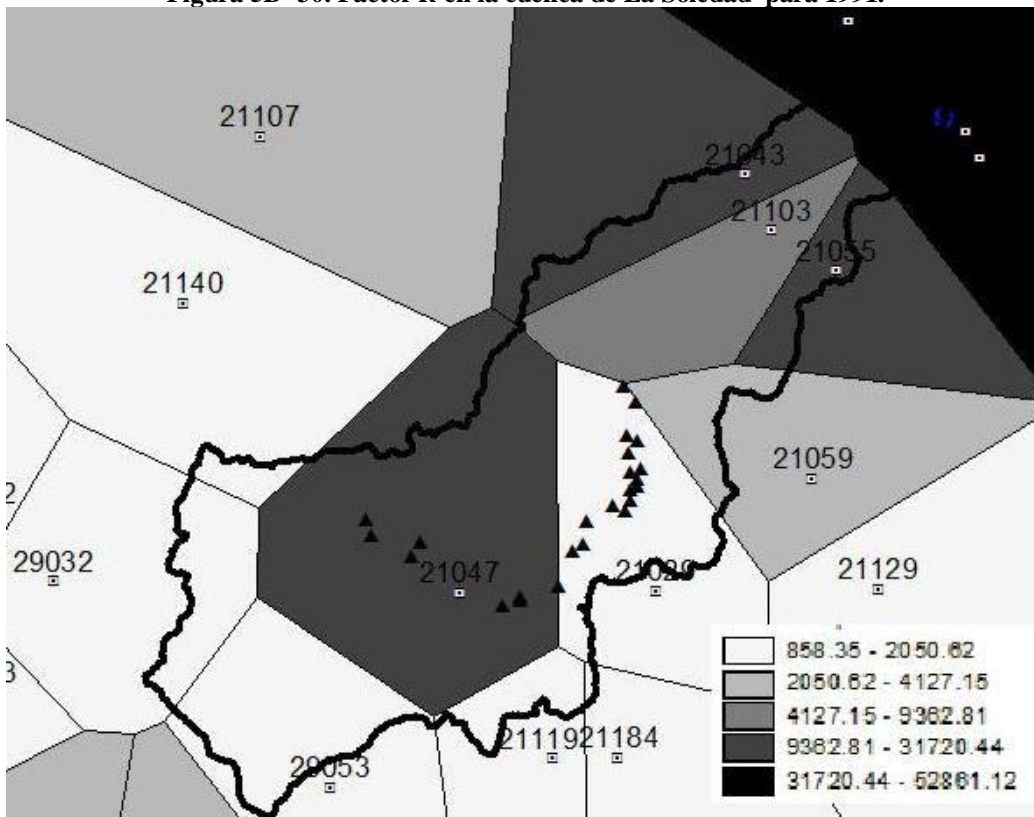


Figura 5B- 31. Factor R en la cuenca de La Soledad para 1992.

---

---

*Apéndice C*

---

---



### Apéndice C

Para determinar el factor de erosividad de lluvia  $R$  se propuso combinar las ecuaciones de distribución de frecuencia acumulada (Ec-C 1) y de tormenta característica (Ec-C 2) de una EMA (clave TL01), con los datos de precipitación diaria de estaciones climatológicas cercanas, mediante un procedimiento de Montecarlo.

$$F = -1.086 e^{(-0.002498 D)} + 1.09 \quad \text{Ec-C 1}$$

$$RMSE = 0.01528$$

$$\frac{p_i}{P_{24}} = -0.143 \left(\frac{t_i}{D}\right)^3 - 0.4616 \left(\frac{t_i}{D}\right)^2 + 1.5985 \left(\frac{t_i}{D}\right) \quad \text{Ec-C 2}$$

$$R^2 = 0.8626$$

De las ecuaciones anteriores  $F$  es la frecuencia acumulada;  $D$ , la duración de la tormenta;  $p_i$ , la lámina de lluvia acumulada en el intervalo  $i$ ;  $t_i$ , intervalo de tiempo  $i$ ; y  $P_{24}$ , la precipitación acumulada en 24 h.

Se supone una sola tormenta para cada día con registro de lluvia en las estaciones climatológicas. Posteriormente, para cada día de lluvia se generó un número aleatorio, el cual toma el lugar de  $F$  en la Ec-C 1, de donde se obtiene  $D$ . Una vez que se tiene  $D$  y la precipitación acumulada en 24 h ( $P_{24}$ ) de la estación climatológica, se puede bosquejar mediante la Ec-C 2 la distribución de la tormenta en el tiempo. La Ec-C 2 se dividió en 50 intervalos, obteniendo 50 ( $n=50$ ) incrementos de lluvia ( $\Delta p_i = p_j$ ), con su respectiva intensidad ( $I_j$ ). La intensidad máxima en 30 min ( $I_{30}$ ) se obtiene al analizar los  $p_j$ . Al contar con  $p_j$ ,  $I_j$  e  $I_{30}$  se pueden emplear las ecuaciones de Wischmeir y Smith (1965) para obtener  $R$ :

$$R = \sum_{i=1}^m EI_{30} \quad \text{Ec-C 3}$$

$$E = \sum_{j=1}^n e_j p_j \quad \text{Ec-C 4}$$

$$e_j = 0.119 + 0.0873 \log_{10} I_j \quad I_j < 76 \text{ mm/h} \quad \text{Ec-C 5}$$

$$e_j = 0.283 \quad I_j \geq 76 \text{ mm/h} \quad \text{Ec-C 6}$$



donde  $E$  es la energía cinética de la tormenta; y  $e_j$ , la energía cinética en el intervalo  $j$ . Dada la naturaleza aleatoria de  $F$ , el proceso se repitió 1000 veces para obtener un promedio.

Con el fin de automatizar el proceso se desarrolló un programa, el cual se muestra a continuación. El lenguaje utilizado fue Fortran (Compaq Visual Fortran Professional Edition 6.1.0).

```

program JMRLFactorR5
C***** 0.- Declaracion de variables

    implicit none

    integer i,j,NUMDAT,anos,k,q,veces

    character*30 Archivo
    character a1,a3,a5,a7

    real(8) hp24e,de,SEce,I30e,Re
    real(8) hp24f,df,SEcf,I30f,Rf
    real(8) hp24mr,dmr,SEcmr,I30mr,Rmr
    real(8) hp24ab,dab,SEcab,I30ab,Rab
    real(8) hp24my,dmy,SEcmy,I30my,Rmy
    real(8) hp24jn,djn,SEcjn,I30jn,Rjn
    real(8) hp24jl,djl,SEcjl,I30jl,Rjl
    real(8) hp24ag,dag,SEcag,I30ag,Rag
    real(8) hp24sp,dsp,SEcsp,I30sp,Rsp
    real(8) hp24oc,doc,SEcoc,I30oc,Roc
    real(8) hp24nv,dnv,SEcnv,I30nv,Rnv
    real(8) hp24dc,ddc,SEcdc,I30dc,Rdc

    real(8) a2,a4,a6

    real(8) a8

    real(8) Renero,Rfebrero,Rmarzo,Rabril,Rmayo,Rjunio,Rjulio,
    1Ragosto,Rseptiembre,Roctubre,Rnoviembre,Rdiciembre,Ranual

    real(8) DeltaHp1i,DeltaHp2i,DeltaHp3i,DeltaHp4i,
    1          DeltaHp5i,DeltaHp6i,DeltaHp7i,DeltaHp8i,
    1          DeltaHp9i,DeltaHp10i,DeltaHp11i,DeltaHp12i,
    1          DeltaHp13i,DeltaHp14i,DeltaHp15i,DeltaHp16i,
    1          DeltaHp17i,DeltaHp18i,DeltaHp19i,DeltaHp20i,
    1          DeltaHp21i,DeltaHp22i,DeltaHp23i,DeltaHp24i,
    1          DeltaHp25i,DeltaHp26i,DeltaHp27i,DeltaHp28i,
    1          DeltaHp29i,DeltaHp30i,DeltaHp31i,DeltaHp32i,
    1          DeltaHp33i,DeltaHp34i,DeltaHp35i,DeltaHp36i,

```



```

1          DeltaHp37i,DeltaHp38i,DeltaHp39i,DeltaHp40i,
1          DeltaHp41i,DeltaHp42i,DeltaHp43i,DeltaHp44i,
1          DeltaHp45i,DeltaHp46i,DeltaHp47i,DeltaHp48i,
1          DeltaHp49i,DeltaHp50i

```

```
integer, Allocatable::dia(:)
```

```
Real(8), Allocatable::Ene(:),Feb(:),Mar(:),Abr(:),May(:)
Real(8), Allocatable::Jun(:),Jul(:),Ago(:),Sep(:),Oct(:),Nov(:)
Real(8), Allocatable::Dic(:)
```

```

write(*,*)
write(*,*)
write(*,*)
write(*,*)
write(*,*)
write(*,*)

```

c\*\*\*\*\*

C 1.- Leo Archivo con datos

```

open(500,File="Variables.txt",status='unknown')
read (500,*)NUMDAT
read (500,*)Archivo
read (500,*)anos
read (500,*)veces

```

```

Write (*,*)'NUMDAT', NUMDAT
Write (*,*)'Archivo', Archivo
Write (*,*)'Num de anos', anos
Write (*,*)'Num de veces', veces

```

```
Close(500)
```

```

write(*,*) NUMDAT
write(*,*) Archivo
write(*,*) anos
write(*,*) veces

```

!Cada variable almacena #NUMDAT de datos

```

Allocate(dia(NUMDAT),Ene(NUMDAT),Feb(NUMDAT),Mar(NUMDAT),
1Abr(NUMDAT),May(NUMDAT),Jun(NUMDAT),Jul(NUMDAT),Ago(NUMDAT),
1Sep(NUMDAT),Oct(NUMDAT),Nov(NUMDAT),Dic(NUMDAT))

```

c\*\*\*\*\*

C 2.- Leo datos del archivo

```

open(200,File="R_diario.txt",status='unknown')
open(210,File="d_diario.txt",status='unknown')
open(220,File="E_diario.txt",status='unknown')
open(230,File="I30_diario.txt",status='unknown')

```

```
open(300,File="R_mensual.txt",status='unknown')
open(400,File="R_anual.txt",status='unknown')
```

```
c*****Repetir las realizaciones
```

```
do q=1,veces
```

```
open(100,File=Archivo,status='unknown')
```

```
c*****Procesando por años
```

```
Write(300,*)'Estacion Año Enero Febrero Marzo Abril Mayo
1Junio Julio Agosto Septiembre Octubre Noviembre Diciembre'
```

```
Write(400,*)'Estación Año Ranual'
```

```
do k=1,anos
```

```
read (100,*)
read (100,*)a1,a2,a3,a4,a5,a6,a7,a8
read (100,*)
```

```
write(*,*)
write(*,*)
```

```
Renero=0
Rfebrero=0
Rmarzo=0
Rabril=0
Rmayo=0
Rjunio=0
Rjulio=0
Ragosto=0
Rseptiembre=0
Roctubre=0
Rnoviembre=0
Rdiciembre=0
Ranual=0
```

```
do i=1,NUMDAT
read (100,*) dia(i),Ene(i),Feb(i),Mar(i),Abr(i),May(i),
1Jun(i),Jul(i),Ago(i),Sep(i),Oct(i),Nov(i),Dic(i)
enddo
```

```
do i=1,NUMDAT ! JB
write (*,*) 'JB',k,dia(i),Ene(i),Feb(i),Mar(i),Abr(i),May(i),
1Jun(i),Jul(i),Ago(i),Sep(i),Oct(i),Nov(i),Dic(i)
enddo
```

```
do i=1,NUMDAT
write (*,*) dia(i),Ene(i),Feb(i),Mar(i),Abr(i),May(i),
```

```

1Jun(i),Jul(i),Ago(i),Sep(i),Oct(i),Nov(i),Dic(i)
  enddo

c*****
C 3.- Generar número aleatorio

c***** Analizando los datos de Enero

c*****Número Aleatorio

  Write(200,*)'          R=EI30 por Tormenta Diaria'
  Write(200,*)'q Dia Estación Año Enero Febrero Marzo
  1Abril Mayo Junio Julio Agosto Septiembre Octubre
  1Noviembre Diciembre'

  Write(210,*)'          Duración (d) por Tormenta Diaria'
  Write(210,*)'q Dia Estación Año Enero Febrero Marzo
  1Abril Mayo Junio Julio Agosto Septiembre Octubre
  1Noviembre Diciembre'

  Write(220,*)'          Energía Cinetica (E) por Tormenta Diaria'
  Write(220,*)'q Dia Estación Año Enero Febrero Marzo
  1Abril Mayo Junio Julio Agosto Septiembre Octubre
  1Noviembre Diciembre'

  Write(230,*)'          I30 por Tormenta Diaria'
  Write(230,*)'q Dia Estación Año Enero Febrero Marzo
  1Abril Mayo Junio Julio Agosto Septiembre Octubre
  1Noviembre Diciembre'

c*****Procesando por días 1°,2°,3°

  do i=1,NUMDAT

c*****Enero

  hp24e=Ene(i)

  if (hp24e.GT.0) then

  call Ecine (hp24e,de,DeltaHp1i,DeltaHp2i,DeltaHp3i,DeltaHp4i,
  1          DeltaHp5i,DeltaHp6i,DeltaHp7i,DeltaHp8i,
  1          DeltaHp9i,DeltaHp10i,DeltaHp11i,DeltaHp12i,
  1          DeltaHp13i,DeltaHp14i,DeltaHp15i,DeltaHp16i,
  1          DeltaHp17i,DeltaHp18i,DeltaHp19i,DeltaHp20i,
  1          DeltaHp21i,DeltaHp22i,DeltaHp23i,DeltaHp24i,
  1          DeltaHp25i,DeltaHp26i,DeltaHp27i,DeltaHp28i,
  1          DeltaHp29i,DeltaHp30i,DeltaHp31i,DeltaHp32i,
  1          DeltaHp33i,DeltaHp34i,DeltaHp35i,DeltaHp36i,
  1          DeltaHp37i,DeltaHp38i,DeltaHp39i,DeltaHp40i,
  1          DeltaHp41i,DeltaHp42i,DeltaHp43i,DeltaHp44i,

```

```

1          DeltaHp45i,DeltaHp46i,DeltaHp47i,DeltaHp48i,
1          DeltaHp49i,DeltaHp50i,Sece)

call SubI30(de,DeltaHp1i,DeltaHp2i,DeltaHp3i,DeltaHp4i,
1          DeltaHp5i,DeltaHp6i,DeltaHp7i,DeltaHp8i,
1          DeltaHp9i,DeltaHp10i,DeltaHp11i,DeltaHp12i,
1          DeltaHp13i,DeltaHp14i,DeltaHp15i,DeltaHp16i,
1          DeltaHp17i,DeltaHp18i,DeltaHp19i,DeltaHp20i,
1          DeltaHp21i,DeltaHp22i,DeltaHp23i,DeltaHp24i,
1          DeltaHp25i,DeltaHp26i,DeltaHp27i,DeltaHp28i,
1          DeltaHp29i,DeltaHp30i,DeltaHp31i,DeltaHp32i,
1          DeltaHp33i,DeltaHp34i,DeltaHp35i,DeltaHp36i,
1          DeltaHp37i,DeltaHp38i,DeltaHp39i,DeltaHp40i,
1          DeltaHp41i,DeltaHp42i,DeltaHp43i,DeltaHp44i,
1          DeltaHp45i,DeltaHp46i,DeltaHp47i,DeltaHp48i,
1          DeltaHp49i,DeltaHp50i,I30e)

```

Re=Sece\*I30e

ELSE

```

de=0
Sece=0
I30e=0
Re=0

```

ENDIF

c\*\*\*\*\*Febrero

```

hp24f=Feb(i)
if (hp24f.GT.0) then
call Ecine(hp24f,df,DeltaHp1i,DeltaHp2i,DeltaHp3i,DeltaHp4i,
1          DeltaHp5i,DeltaHp6i,DeltaHp7i,DeltaHp8i,
1          DeltaHp9i,DeltaHp10i,DeltaHp11i,DeltaHp12i,
1          DeltaHp13i,DeltaHp14i,DeltaHp15i,DeltaHp16i,
1          DeltaHp17i,DeltaHp18i,DeltaHp19i,DeltaHp20i,
1          DeltaHp21i,DeltaHp22i,DeltaHp23i,DeltaHp24i,
1          DeltaHp25i,DeltaHp26i,DeltaHp27i,DeltaHp28i,
1          DeltaHp29i,DeltaHp30i,DeltaHp31i,DeltaHp32i,
1          DeltaHp33i,DeltaHp34i,DeltaHp35i,DeltaHp36i,
1          DeltaHp37i,DeltaHp38i,DeltaHp39i,DeltaHp40i,
1          DeltaHp41i,DeltaHp42i,DeltaHp43i,DeltaHp44i,
1          DeltaHp45i,DeltaHp46i,DeltaHp47i,DeltaHp48i,
1          DeltaHp49i,DeltaHp50i,Secf)

call SubI30(df,DeltaHp1i,DeltaHp2i,DeltaHp3i,DeltaHp4i,
1          DeltaHp5i,DeltaHp6i,DeltaHp7i,DeltaHp8i,
1          DeltaHp9i,DeltaHp10i,DeltaHp11i,DeltaHp12i,
1          DeltaHp13i,DeltaHp14i,DeltaHp15i,DeltaHp16i,
1          DeltaHp17i,DeltaHp18i,DeltaHp19i,DeltaHp20i,
1          DeltaHp21i,DeltaHp22i,DeltaHp23i,DeltaHp24i,

```

```

1      DeltaHp25i,DeltaHp26i,DeltaHp27i,DeltaHp28i,
1      DeltaHp29i,DeltaHp30i,DeltaHp31i,DeltaHp32i,
1      DeltaHp33i,DeltaHp34i,DeltaHp35i,DeltaHp36i,
1      DeltaHp37i,DeltaHp38i,DeltaHp39i,DeltaHp40i,
1      DeltaHp41i,DeltaHp42i,DeltaHp43i,DeltaHp44i,
1      DeltaHp45i,DeltaHp46i,DeltaHp47i,DeltaHp48i,
1      DeltaHp49i,DeltaHp50i,I30f)

```

Rf=Secf\*I30f

ELSE

```

df=0
Secf=0
I30f=0
Rf=0

```

ENDIF

c\*\*\*\*\*Marzo

hp24mr=Mar(i)

if (hp24mr.GT.0) then

```

call Ecine (hp24mr, dmr, DeltaHp1i, DeltaHp2i, DeltaHp3i, DeltaHp4i,
1      DeltaHp5i, DeltaHp6i, DeltaHp7i, DeltaHp8i,
1      DeltaHp9i, DeltaHp10i, DeltaHp11i, DeltaHp12i,
1      DeltaHp13i, DeltaHp14i, DeltaHp15i, DeltaHp16i,
1      DeltaHp17i, DeltaHp18i, DeltaHp19i, DeltaHp20i,
1      DeltaHp21i, DeltaHp22i, DeltaHp23i, DeltaHp24i,
1      DeltaHp25i, DeltaHp26i, DeltaHp27i, DeltaHp28i,
1      DeltaHp29i, DeltaHp30i, DeltaHp31i, DeltaHp32i,
1      DeltaHp33i, DeltaHp34i, DeltaHp35i, DeltaHp36i,
1      DeltaHp37i, DeltaHp38i, DeltaHp39i, DeltaHp40i,
1      DeltaHp41i, DeltaHp42i, DeltaHp43i, DeltaHp44i,
1      DeltaHp45i, DeltaHp46i, DeltaHp47i, DeltaHp48i,
1      DeltaHp49i, DeltaHp50i, Secmr)

```

```

call SubI30 (dmr, DeltaHp1i, DeltaHp2i, DeltaHp3i, DeltaHp4i,
1      DeltaHp5i, DeltaHp6i, DeltaHp7i, DeltaHp8i,
1      DeltaHp9i, DeltaHp10i, DeltaHp11i, DeltaHp12i,
1      DeltaHp13i, DeltaHp14i, DeltaHp15i, DeltaHp16i,
1      DeltaHp17i, DeltaHp18i, DeltaHp19i, DeltaHp20i,
1      DeltaHp21i, DeltaHp22i, DeltaHp23i, DeltaHp24i,
1      DeltaHp25i, DeltaHp26i, DeltaHp27i, DeltaHp28i,
1      DeltaHp29i, DeltaHp30i, DeltaHp31i, DeltaHp32i,
1      DeltaHp33i, DeltaHp34i, DeltaHp35i, DeltaHp36i,
1      DeltaHp37i, DeltaHp38i, DeltaHp39i, DeltaHp40i,
1      DeltaHp41i, DeltaHp42i, DeltaHp43i, DeltaHp44i,
1      DeltaHp45i, DeltaHp46i, DeltaHp47i, DeltaHp48i,
1      DeltaHp49i, DeltaHp50i, I30mr)

```

Rmr=Secmr\*I30mr

ELSE

dmr=0  
 Secmr=0  
 I30mr=0  
 Rmr=0

ENDIF

c\*\*\*\*\*Abril

hp24ab=Abr(i)

if(hp24ab.GT.0) then

call Ecine(hp24ab,dab,DeltaHp1i,DeltaHp2i,DeltaHp3i,DeltaHp4i,  
 1 DeltaHp5i,DeltaHp6i,DeltaHp7i,DeltaHp8i,  
 1 DeltaHp9i,DeltaHp10i,DeltaHp11i,DeltaHp12i,  
 1 DeltaHp13i,DeltaHp14i,DeltaHp15i,DeltaHp16i,  
 1 DeltaHp17i,DeltaHp18i,DeltaHp19i,DeltaHp20i,  
 1 DeltaHp21i,DeltaHp22i,DeltaHp23i,DeltaHp24i,  
 1 DeltaHp25i,DeltaHp26i,DeltaHp27i,DeltaHp28i,  
 1 DeltaHp29i,DeltaHp30i,DeltaHp31i,DeltaHp32i,  
 1 DeltaHp33i,DeltaHp34i,DeltaHp35i,DeltaHp36i,  
 1 DeltaHp37i,DeltaHp38i,DeltaHp39i,DeltaHp40i,  
 1 DeltaHp41i,DeltaHp42i,DeltaHp43i,DeltaHp44i,  
 1 DeltaHp45i,DeltaHp46i,DeltaHp47i,DeltaHp48i,  
 1 DeltaHp49i,DeltaHp50i,Secab)

call SubI30(dab,DeltaHp1i,DeltaHp2i,DeltaHp3i,DeltaHp4i,  
 1 DeltaHp5i,DeltaHp6i,DeltaHp7i,DeltaHp8i,  
 1 DeltaHp9i,DeltaHp10i,DeltaHp11i,DeltaHp12i,  
 1 DeltaHp13i,DeltaHp14i,DeltaHp15i,DeltaHp16i,  
 1 DeltaHp17i,DeltaHp18i,DeltaHp19i,DeltaHp20i,  
 1 DeltaHp21i,DeltaHp22i,DeltaHp23i,DeltaHp24i,  
 1 DeltaHp25i,DeltaHp26i,DeltaHp27i,DeltaHp28i,  
 1 DeltaHp29i,DeltaHp30i,DeltaHp31i,DeltaHp32i,  
 1 DeltaHp33i,DeltaHp34i,DeltaHp35i,DeltaHp36i,  
 1 DeltaHp37i,DeltaHp38i,DeltaHp39i,DeltaHp40i,  
 1 DeltaHp41i,DeltaHp42i,DeltaHp43i,DeltaHp44i,  
 1 DeltaHp45i,DeltaHp46i,DeltaHp47i,DeltaHp48i,  
 1 DeltaHp49i,DeltaHp50i,I30ab)

Rab=Secab\*I30ab

ELSE

dab=0

```

Secab=0
I30ab=0
Rab=0

        ENDIF

c*****Mayo

hp24my=May(i)

if (hp24my.GT.0) then

call Ecine (hp24my,dmy,DeltaHp1i,DeltaHp2i,DeltaHp3i,DeltaHp4i,
1          DeltaHp5i,DeltaHp6i,DeltaHp7i,DeltaHp8i,
1          DeltaHp9i,DeltaHp10i,DeltaHp11i,DeltaHp12i,
1          DeltaHp13i,DeltaHp14i,DeltaHp15i,DeltaHp16i,
1          DeltaHp17i,DeltaHp18i,DeltaHp19i,DeltaHp20i,
1          DeltaHp21i,DeltaHp22i,DeltaHp23i,DeltaHp24i,
1          DeltaHp25i,DeltaHp26i,DeltaHp27i,DeltaHp28i,
1          DeltaHp29i,DeltaHp30i,DeltaHp31i,DeltaHp32i,
1          DeltaHp33i,DeltaHp34i,DeltaHp35i,DeltaHp36i,
1          DeltaHp37i,DeltaHp38i,DeltaHp39i,DeltaHp40i,
1          DeltaHp41i,DeltaHp42i,DeltaHp43i,DeltaHp44i,
1          DeltaHp45i,DeltaHp46i,DeltaHp47i,DeltaHp48i,
1          DeltaHp49i,DeltaHp50i,Secmy)

call SubI30(dmy,DeltaHp1i,DeltaHp2i,DeltaHp3i,DeltaHp4i,
1          DeltaHp5i,DeltaHp6i,DeltaHp7i,DeltaHp8i,
1          DeltaHp9i,DeltaHp10i,DeltaHp11i,DeltaHp12i,
1          DeltaHp13i,DeltaHp14i,DeltaHp15i,DeltaHp16i,
1          DeltaHp17i,DeltaHp18i,DeltaHp19i,DeltaHp20i,
1          DeltaHp21i,DeltaHp22i,DeltaHp23i,DeltaHp24i,
1          DeltaHp25i,DeltaHp26i,DeltaHp27i,DeltaHp28i,
1          DeltaHp29i,DeltaHp30i,DeltaHp31i,DeltaHp32i,
1          DeltaHp33i,DeltaHp34i,DeltaHp35i,DeltaHp36i,
1          DeltaHp37i,DeltaHp38i,DeltaHp39i,DeltaHp40i,
1          DeltaHp41i,DeltaHp42i,DeltaHp43i,DeltaHp44i,
1          DeltaHp45i,DeltaHp46i,DeltaHp47i,DeltaHp48i,
1          DeltaHp49i,DeltaHp50i,I30my)

        Rmy=Secmy*I30my

        ELSE

dmy=0
Secmy=0
I30my=0
Rmy=0

        ENDIF

```

c\*\*\*\*\*Junio

hp24jn=Jun(i)

if (hp24jn.GT.0) then

call Ecine (hp24jn,djn,DeltaHp1i,DeltaHp2i,DeltaHp3i,DeltaHp4i,  
 1 DeltaHp5i,DeltaHp6i,DeltaHp7i,DeltaHp8i,  
 1 DeltaHp9i,DeltaHp10i,DeltaHp11i,DeltaHp12i,  
 1 DeltaHp13i,DeltaHp14i,DeltaHp15i,DeltaHp16i,  
 1 DeltaHp17i,DeltaHp18i,DeltaHp19i,DeltaHp20i,  
 1 DeltaHp21i,DeltaHp22i,DeltaHp23i,DeltaHp24i,  
 1 DeltaHp25i,DeltaHp26i,DeltaHp27i,DeltaHp28i,  
 1 DeltaHp29i,DeltaHp30i,DeltaHp31i,DeltaHp32i,  
 1 DeltaHp33i,DeltaHp34i,DeltaHp35i,DeltaHp36i,  
 1 DeltaHp37i,DeltaHp38i,DeltaHp39i,DeltaHp40i,  
 1 DeltaHp41i,DeltaHp42i,DeltaHp43i,DeltaHp44i,  
 1 DeltaHp45i,DeltaHp46i,DeltaHp47i,DeltaHp48i,  
 1 DeltaHp49i,DeltaHp50i,Secjn)

call SubI30 (djn,DeltaHp1i,DeltaHp2i,DeltaHp3i,DeltaHp4i,  
 1 DeltaHp5i,DeltaHp6i,DeltaHp7i,DeltaHp8i,  
 1 DeltaHp9i,DeltaHp10i,DeltaHp11i,DeltaHp12i,  
 1 DeltaHp13i,DeltaHp14i,DeltaHp15i,DeltaHp16i,  
 1 DeltaHp17i,DeltaHp18i,DeltaHp19i,DeltaHp20i,  
 1 DeltaHp21i,DeltaHp22i,DeltaHp23i,DeltaHp24i,  
 1 DeltaHp25i,DeltaHp26i,DeltaHp27i,DeltaHp28i,  
 1 DeltaHp29i,DeltaHp30i,DeltaHp31i,DeltaHp32i,  
 1 DeltaHp33i,DeltaHp34i,DeltaHp35i,DeltaHp36i,  
 1 DeltaHp37i,DeltaHp38i,DeltaHp39i,DeltaHp40i,  
 1 DeltaHp41i,DeltaHp42i,DeltaHp43i,DeltaHp44i,  
 1 DeltaHp45i,DeltaHp46i,DeltaHp47i,DeltaHp48i,  
 1 DeltaHp49i,DeltaHp50i,I30jn)

Rjn=Secjn\*I30jn

ELSE

djn=0  
 Secjn=0  
 I30jn=0  
 Rjn=0

ENDIF

c\*\*\*\*\*Julio

hp24jl=Jul(i)

if (hp24jl.GT.0) then



```

call Ecine(hp24jl,djl,DeltaHp1i,DeltaHp2i,DeltaHp3i,DeltaHp4i,
1          DeltaHp5i,DeltaHp6i,DeltaHp7i,DeltaHp8i,
1          DeltaHp9i,DeltaHp10i,DeltaHp11i,DeltaHp12i,
1          DeltaHp13i,DeltaHp14i,DeltaHp15i,DeltaHp16i,
1          DeltaHp17i,DeltaHp18i,DeltaHp19i,DeltaHp20i,
1          DeltaHp21i,DeltaHp22i,DeltaHp23i,DeltaHp24i,
1          DeltaHp25i,DeltaHp26i,DeltaHp27i,DeltaHp28i,
1          DeltaHp29i,DeltaHp30i,DeltaHp31i,DeltaHp32i,
1          DeltaHp33i,DeltaHp34i,DeltaHp35i,DeltaHp36i,
1          DeltaHp37i,DeltaHp38i,DeltaHp39i,DeltaHp40i,
1          DeltaHp41i,DeltaHp42i,DeltaHp43i,DeltaHp44i,
1          DeltaHp45i,DeltaHp46i,DeltaHp47i,DeltaHp48i,
1          DeltaHp49i,DeltaHp50i,Secjl)

call SubI30(djl,DeltaHp1i,DeltaHp2i,DeltaHp3i,DeltaHp4i,
1          DeltaHp5i,DeltaHp6i,DeltaHp7i,DeltaHp8i,
1          DeltaHp9i,DeltaHp10i,DeltaHp11i,DeltaHp12i,
1          DeltaHp13i,DeltaHp14i,DeltaHp15i,DeltaHp16i,
1          DeltaHp17i,DeltaHp18i,DeltaHp19i,DeltaHp20i,
1          DeltaHp21i,DeltaHp22i,DeltaHp23i,DeltaHp24i,
1          DeltaHp25i,DeltaHp26i,DeltaHp27i,DeltaHp28i,
1          DeltaHp29i,DeltaHp30i,DeltaHp31i,DeltaHp32i,
1          DeltaHp33i,DeltaHp34i,DeltaHp35i,DeltaHp36i,
1          DeltaHp37i,DeltaHp38i,DeltaHp39i,DeltaHp40i,
1          DeltaHp41i,DeltaHp42i,DeltaHp43i,DeltaHp44i,
1          DeltaHp45i,DeltaHp46i,DeltaHp47i,DeltaHp48i,
1          DeltaHp49i,DeltaHp50i,I30jl)

          Rjl=Secjl*I30jl

          ELSE

          djl=0
          Secjl=0
          I30jl=0
          Rjl=0

          ENDIF

c*****Agosto

          hp24ag=Ago(i)

          if(hp24ag.GT.0) then

          call Ecine(hp24ag,dag,DeltaHp1i,DeltaHp2i,DeltaHp3i,DeltaHp4i,
1          DeltaHp5i,DeltaHp6i,DeltaHp7i,DeltaHp8i,
1          DeltaHp9i,DeltaHp10i,DeltaHp11i,DeltaHp12i,
1          DeltaHp13i,DeltaHp14i,DeltaHp15i,DeltaHp16i,
1          DeltaHp17i,DeltaHp18i,DeltaHp19i,DeltaHp20i,
1          DeltaHp21i,DeltaHp22i,DeltaHp23i,DeltaHp24i,

```

```

1          DeltaHp25i,DeltaHp26i,DeltaHp27i,DeltaHp28i,
1          DeltaHp29i,DeltaHp30i,DeltaHp31i,DeltaHp32i,
1          DeltaHp33i,DeltaHp34i,DeltaHp35i,DeltaHp36i,
1          DeltaHp37i,DeltaHp38i,DeltaHp39i,DeltaHp40i,
1          DeltaHp41i,DeltaHp42i,DeltaHp43i,DeltaHp44i,
1          DeltaHp45i,DeltaHp46i,DeltaHp47i,DeltaHp48i,
1          DeltaHp49i,DeltaHp50i,Secag)

call SubI30(dag,DeltaHp1i,DeltaHp2i,DeltaHp3i,DeltaHp4i,
1          DeltaHp5i,DeltaHp6i,DeltaHp7i,DeltaHp8i,
1          DeltaHp9i,DeltaHp10i,DeltaHp11i,DeltaHp12i,
1          DeltaHp13i,DeltaHp14i,DeltaHp15i,DeltaHp16i,
1          DeltaHp17i,DeltaHp18i,DeltaHp19i,DeltaHp20i,
1          DeltaHp21i,DeltaHp22i,DeltaHp23i,DeltaHp24i,
1          DeltaHp25i,DeltaHp26i,DeltaHp27i,DeltaHp28i,
1          DeltaHp29i,DeltaHp30i,DeltaHp31i,DeltaHp32i,
1          DeltaHp33i,DeltaHp34i,DeltaHp35i,DeltaHp36i,
1          DeltaHp37i,DeltaHp38i,DeltaHp39i,DeltaHp40i,
1          DeltaHp41i,DeltaHp42i,DeltaHp43i,DeltaHp44i,
1          DeltaHp45i,DeltaHp46i,DeltaHp47i,DeltaHp48i,
1          DeltaHp49i,DeltaHp50i,I30ag)
          Rag=Secag*I30ag
      ELSE
dag=0
Secag=0
I30ag=0
Rag=0
      ENDIF

c*****Septiembre
hp24sp=Sep(i)

if(hp24sp.GT.0) then

call Ecine(hp24sp,dsp,DeltaHp1i,DeltaHp2i,DeltaHp3i,DeltaHp4i,
1          DeltaHp5i,DeltaHp6i,DeltaHp7i,DeltaHp8i,
1          DeltaHp9i,DeltaHp10i,DeltaHp11i,DeltaHp12i,
1          DeltaHp13i,DeltaHp14i,DeltaHp15i,DeltaHp16i,
1          DeltaHp17i,DeltaHp18i,DeltaHp19i,DeltaHp20i,
1          DeltaHp21i,DeltaHp22i,DeltaHp23i,DeltaHp24i,
1          DeltaHp25i,DeltaHp26i,DeltaHp27i,DeltaHp28i,
1          DeltaHp29i,DeltaHp30i,DeltaHp31i,DeltaHp32i,
1          DeltaHp33i,DeltaHp34i,DeltaHp35i,DeltaHp36i,
1          DeltaHp37i,DeltaHp38i,DeltaHp39i,DeltaHp40i,
1          DeltaHp41i,DeltaHp42i,DeltaHp43i,DeltaHp44i,
1          DeltaHp45i,DeltaHp46i,DeltaHp47i,DeltaHp48i,
1          DeltaHp49i,DeltaHp50i,Secsp)
call SubI30(dsp,DeltaHp1i,DeltaHp2i,DeltaHp3i,DeltaHp4i,
1          DeltaHp5i,DeltaHp6i,DeltaHp7i,DeltaHp8i,
1          DeltaHp9i,DeltaHp10i,DeltaHp11i,DeltaHp12i,
1          DeltaHp13i,DeltaHp14i,DeltaHp15i,DeltaHp16i,

```

```

1          DeltaHp17i,DeltaHp18i,DeltaHp19i,DeltaHp20i,
1          DeltaHp21i,DeltaHp22i,DeltaHp23i,DeltaHp24i,
1          DeltaHp25i,DeltaHp26i,DeltaHp27i,DeltaHp28i,
1          DeltaHp29i,DeltaHp30i,DeltaHp31i,DeltaHp32i,
1          DeltaHp33i,DeltaHp34i,DeltaHp35i,DeltaHp36i,
1          DeltaHp37i,DeltaHp38i,DeltaHp39i,DeltaHp40i,
1          DeltaHp41i,DeltaHp42i,DeltaHp43i,DeltaHp44i,
1          DeltaHp45i,DeltaHp46i,DeltaHp47i,DeltaHp48i,
1          DeltaHp49i,DeltaHp50i,I30sp)
      Rsp=Secsp*I30sp
    ELSE
dsp=0
Secsp=0
I30sp=0
Rsp=0

      ENDIF

c*****Octubre

hp24oc=Oct(i)

if(hp24oc.GT.0) then

call Ecine(hp24oc,doc,DeltaHp1i,DeltaHp2i,DeltaHp3i,DeltaHp4i,
1          DeltaHp5i,DeltaHp6i,DeltaHp7i,DeltaHp8i,
1          DeltaHp9i,DeltaHp10i,DeltaHp11i,DeltaHp12i,
1          DeltaHp13i,DeltaHp14i,DeltaHp15i,DeltaHp16i,
1          DeltaHp17i,DeltaHp18i,DeltaHp19i,DeltaHp20i,
1          DeltaHp21i,DeltaHp22i,DeltaHp23i,DeltaHp24i,
1          DeltaHp25i,DeltaHp26i,DeltaHp27i,DeltaHp28i,
1          DeltaHp29i,DeltaHp30i,DeltaHp31i,DeltaHp32i,
1          DeltaHp33i,DeltaHp34i,DeltaHp35i,DeltaHp36i,
1          DeltaHp37i,DeltaHp38i,DeltaHp39i,DeltaHp40i,
1          DeltaHp41i,DeltaHp42i,DeltaHp43i,DeltaHp44i,
1          DeltaHp45i,DeltaHp46i,DeltaHp47i,DeltaHp48i,
1          DeltaHp49i,DeltaHp50i,Secoc)

call SubI30(doc,DeltaHp1i,DeltaHp2i,DeltaHp3i,DeltaHp4i,
1          DeltaHp5i,DeltaHp6i,DeltaHp7i,DeltaHp8i,
1          DeltaHp9i,DeltaHp10i,DeltaHp11i,DeltaHp12i,
1          DeltaHp13i,DeltaHp14i,DeltaHp15i,DeltaHp16i,
1          DeltaHp17i,DeltaHp18i,DeltaHp19i,DeltaHp20i,
1          DeltaHp21i,DeltaHp22i,DeltaHp23i,DeltaHp24i,
1          DeltaHp25i,DeltaHp26i,DeltaHp27i,DeltaHp28i,
1          DeltaHp29i,DeltaHp30i,DeltaHp31i,DeltaHp32i,
1          DeltaHp33i,DeltaHp34i,DeltaHp35i,DeltaHp36i,
1          DeltaHp37i,DeltaHp38i,DeltaHp39i,DeltaHp40i,
1          DeltaHp41i,DeltaHp42i,DeltaHp43i,DeltaHp44i,
1          DeltaHp45i,DeltaHp46i,DeltaHp47i,DeltaHp48i,
1          DeltaHp49i,DeltaHp50i,I30oc)

```

Roc=Secoc\*I30oc

ELSE

doc=0  
 Secoc=0  
 I30oc=0  
 Roc=0

ENDIF

c\*\*\*\*\*Noviembre

hp24nv=Nov(i)

if (hp24nv.GT.0) then

call Ecine (hp24nv,dnv,DeltaHp1i,DeltaHp2i,DeltaHp3i,DeltaHp4i,  
 1 DeltaHp5i,DeltaHp6i,DeltaHp7i,DeltaHp8i,  
 1 DeltaHp9i,DeltaHp10i,DeltaHp11i,DeltaHp12i,  
 1 DeltaHp13i,DeltaHp14i,DeltaHp15i,DeltaHp16i,  
 1 DeltaHp17i,DeltaHp18i,DeltaHp19i,DeltaHp20i,  
 1 DeltaHp21i,DeltaHp22i,DeltaHp23i,DeltaHp24i,  
 1 DeltaHp25i,DeltaHp26i,DeltaHp27i,DeltaHp28i,  
 1 DeltaHp29i,DeltaHp30i,DeltaHp31i,DeltaHp32i,  
 1 DeltaHp33i,DeltaHp34i,DeltaHp35i,DeltaHp36i,  
 1 DeltaHp37i,DeltaHp38i,DeltaHp39i,DeltaHp40i,  
 1 DeltaHp41i,DeltaHp42i,DeltaHp43i,DeltaHp44i,  
 1 DeltaHp45i,DeltaHp46i,DeltaHp47i,DeltaHp48i,  
 1 DeltaHp49i,DeltaHp50i,Secnv)

call SubI30(dnv,DeltaHp1i,DeltaHp2i,DeltaHp3i,DeltaHp4i,  
 1 DeltaHp5i,DeltaHp6i,DeltaHp7i,DeltaHp8i,  
 1 DeltaHp9i,DeltaHp10i,DeltaHp11i,DeltaHp12i,  
 1 DeltaHp13i,DeltaHp14i,DeltaHp15i,DeltaHp16i,  
 1 DeltaHp17i,DeltaHp18i,DeltaHp19i,DeltaHp20i,  
 1 DeltaHp21i,DeltaHp22i,DeltaHp23i,DeltaHp24i,  
 1 DeltaHp25i,DeltaHp26i,DeltaHp27i,DeltaHp28i,  
 1 DeltaHp29i,DeltaHp30i,DeltaHp31i,DeltaHp32i,  
 1 DeltaHp33i,DeltaHp34i,DeltaHp35i,DeltaHp36i,  
 1 DeltaHp37i,DeltaHp38i,DeltaHp39i,DeltaHp40i,  
 1 DeltaHp41i,DeltaHp42i,DeltaHp43i,DeltaHp44i,  
 1 DeltaHp45i,DeltaHp46i,DeltaHp47i,DeltaHp48i,  
 1 DeltaHp49i,DeltaHp50i,I30nv)

Rnv=Secnv\*I30nv

ELSE

dnv=0  
 Secnv=0

```

I30nv=0
Rnv=0

        ENDIF

c*****Diciembre

hp24dc=Dic(i)

if (hp24dc.GT.0) then

call Ecine(hp24dc,ddc,DeltaHp1i,DeltaHp2i,DeltaHp3i,DeltaHp4i,
1          DeltaHp5i,DeltaHp6i,DeltaHp7i,DeltaHp8i,
1          DeltaHp9i,DeltaHp10i,DeltaHp11i,DeltaHp12i,
1          DeltaHp13i,DeltaHp14i,DeltaHp15i,DeltaHp16i,
1          DeltaHp17i,DeltaHp18i,DeltaHp19i,DeltaHp20i,
1          DeltaHp21i,DeltaHp22i,DeltaHp23i,DeltaHp24i,
1          DeltaHp25i,DeltaHp26i,DeltaHp27i,DeltaHp28i,
1          DeltaHp29i,DeltaHp30i,DeltaHp31i,DeltaHp32i,
1          DeltaHp33i,DeltaHp34i,DeltaHp35i,DeltaHp36i,
1          DeltaHp37i,DeltaHp38i,DeltaHp39i,DeltaHp40i,
1          DeltaHp41i,DeltaHp42i,DeltaHp43i,DeltaHp44i,
1          DeltaHp45i,DeltaHp46i,DeltaHp47i,DeltaHp48i,
1          DeltaHp49i,DeltaHp50i,Secdc)

call SubI30(ddc,DeltaHp1i,DeltaHp2i,DeltaHp3i,DeltaHp4i,
1          DeltaHp5i,DeltaHp6i,DeltaHp7i,DeltaHp8i,
1          DeltaHp9i,DeltaHp10i,DeltaHp11i,DeltaHp12i,
1          DeltaHp13i,DeltaHp14i,DeltaHp15i,DeltaHp16i,
1          DeltaHp17i,DeltaHp18i,DeltaHp19i,DeltaHp20i,
1          DeltaHp21i,DeltaHp22i,DeltaHp23i,DeltaHp24i,
1          DeltaHp25i,DeltaHp26i,DeltaHp27i,DeltaHp28i,
1          DeltaHp29i,DeltaHp30i,DeltaHp31i,DeltaHp32i,
1          DeltaHp33i,DeltaHp34i,DeltaHp35i,DeltaHp36i,
1          DeltaHp37i,DeltaHp38i,DeltaHp39i,DeltaHp40i,
1          DeltaHp41i,DeltaHp42i,DeltaHp43i,DeltaHp44i,
1          DeltaHp45i,DeltaHp46i,DeltaHp47i,DeltaHp48i,
1          DeltaHp49i,DeltaHp50i,I30dc)

        Rdc=Secdc*I30dc

        ELSE

ddc=0
Secdc=0
I30dc=0
Rdc=0

        ENDIF

Renero=Re+Renero

```

```
Rfebrero=Rf+Rfebrero
Rmarzo=Rmr+Rmarzo
Rabril=Rab+Rabril
Rmayo=Rmy+Rmayo
Rjunio=Rjn+Rjunio
Rjulio=Rjl+Rjulio
Ragosto=Rag+Ragosto
Rseptiembre=Rsp+Rseptiembre
Roctubre=Roc+Roctubre
Rnoviembre=Rnv+Rnoviembre
Rdiciembre=Rdc+Rdiciembre
```

```
Write(200,20)q,i,a2,a8,Re,Rf,Rmr,Rab,Rmy,Rjn,Rjl,Rag,Rsp,Roc,Rnv,Rdc
```

```
Write(210,20)q,i,a2,a8,de,df,dmr,dab,dmy,djn,djl,dag,dsp,doc,dnv,ddc
```

```
Write(220,20)q,i,a2,a8,SECe,SECF,SECMR,SECAb,SECMy,SECJn,SECJl,SECag,
1SECSp,SECoc,SECnv,SECdc
```

```
Write(230,20)q,i,a2,a8,I30e,I30f,I30mr,I30ab,I30my,I30jn,I30jl,I30ag,
1I30sp,I30oc,I30nv,I30dc
```

```
20 format(i4,4x,i2,2x,f0.0,3x,f0.0,3x,f0.3,3x,f0.3,3x,f0.3,3x,
1f0.3,3x,f0.3,3x,f0.3,3x,f0.3,3x,f0.3,3x,f0.3,3x,f0.3)
```

```
enddo
```

```
Write(200,*)
Write(210,*)
Write(220,*)
Write(230,*)
```

```
Ranual=SUM((/Renero,Rfebrero,Rmarzo,Rabril,Rmayo,Rjunio,Rjulio,
1Ragosto,Rseptiembre,Roctubre,Rnoviembre,Rdiciembre/))
```

```
Write(300,30)q,a2,a8,Renero,Rfebrero,Rmarzo,Rabril,Rmayo,Rjunio,
1Rjulio,Ragosto,Rseptiembre,Roctubre,Rnoviembre,Rdiciembre
```

```
30 format(i4,4x,f0.0,1x,f0.0,1x,f0.3,3x,f0.3,3x,f0.3,3x,f0.3,
13x,f0.3,3x,f0.3,3x,f0.3,3x,f0.3,3x,f0.3,3x,f0.3,3x,f0.3)
```

```
Write(400,40)q,a2,a8,Ranual
```

```
40 format(i4,4x,f0.0,1x,f0.0,1x,f0.3)
```

```
enddo
```

```
Write(300,*)
Write(400,*)
```

```
close (100)
```

```

enddo

      Close(200)

      Close(210)
      Close(220)
      Close(230)

      Close(300)
      Close(400)

endprogram

c*****
c***** Subrutina para encontrar el I30
c  Sub-I30

      subroutine SubI30(d1,DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,
1          DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1          DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1          DeltaHp13,DeltaHp14,DeltaHp15,DeltaHp16,
1          DeltaHp17,DeltaHp18,DeltaHp19,DeltaHp20,
1          DeltaHp21,DeltaHp22,DeltaHp23,DeltaHp24,
1          DeltaHp25,DeltaHp26,DeltaHp27,DeltaHp28,
1          DeltaHp29,DeltaHp30,DeltaHp31,DeltaHp32,
1          DeltaHp33,DeltaHp34,DeltaHp35,DeltaHp36,
1          DeltaHp37,DeltaHp38,DeltaHp39,DeltaHp40,
1          DeltaHp41,DeltaHp42,DeltaHp43,DeltaHp44,
1          DeltaHp45,DeltaHp46,DeltaHp47,DeltaHp48,
1          DeltaHp49,DeltaHp50,I30i)

      integer j
      real(8) d1,I30i,P
      real(8) DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,
1DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,DeltaHp9,
1DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,DeltaHp13,DeltaHp14,
1DeltaHp15,DeltaHp16,DeltaHp17,DeltaHp18,DeltaHp19,
1DeltaHp20,DeltaHp21,DeltaHp22,DeltaHp23,DeltaHp24,
1DeltaHp25,DeltaHp26,DeltaHp27,DeltaHp28,DeltaHp29,
1DeltaHp30,DeltaHp31,DeltaHp32,DeltaHp33,DeltaHp34,
1DeltaHp35,DeltaHp36,DeltaHp37,DeltaHp38,DeltaHp39,
1DeltaHp40,DeltaHp41,DeltaHp42,DeltaHp43,DeltaHp44,
1DeltaHp45,DeltaHp46,DeltaHp47,DeltaHp48,DeltaHp49,
1DeltaHp50

      d1=d1

C1          IF(d1.LE.30)THEN
              P=SUM((/DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,

```

```

1      DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1      DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1      DeltaHp13,DeltaHp14,DeltaHp15,DeltaHp16,
1      DeltaHp17,DeltaHp18,DeltaHp19,DeltaHp20,
1      DeltaHp21,DeltaHp22,DeltaHp23,DeltaHp24,
1      DeltaHp25,DeltaHp26,DeltaHp27,DeltaHp28,
1      DeltaHp29,DeltaHp30,DeltaHp31,DeltaHp32,
1      DeltaHp33,DeltaHp34,DeltaHp35,DeltaHp36,
1      DeltaHp37,DeltaHp38,DeltaHp39,DeltaHp40,
1      DeltaHp41,DeltaHp42,DeltaHp43,DeltaHp44,
1      DeltaHp45,DeltaHp46,DeltaHp47,DeltaHp48,
1      DeltaHp49,DeltaHp50))

```

ENDIF

C2

```

IF(d1.GT.30.AND.d1.LE.31)THEN
P=SUM((/DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,
1      DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1      DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1      DeltaHp13,DeltaHp14,DeltaHp15,DeltaHp16,
1      DeltaHp17,DeltaHp18,DeltaHp19,DeltaHp20,
1      DeltaHp21,DeltaHp22,DeltaHp23,DeltaHp24,
1      DeltaHp25,DeltaHp26,DeltaHp27,DeltaHp28,
1      DeltaHp29,DeltaHp30,DeltaHp31,DeltaHp32,
1      DeltaHp33,DeltaHp34,DeltaHp35,DeltaHp36,
1      DeltaHp37,DeltaHp38,DeltaHp39,DeltaHp40,
1      DeltaHp41,DeltaHp42,DeltaHp43,DeltaHp44,
1      DeltaHp45,DeltaHp46,DeltaHp47,DeltaHp48/))

```

ENDIF

C3

```

IF(d1.GT.31.AND.d1.LE.32)THEN
P=SUM((/DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,
1      DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1      DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1      DeltaHp13,DeltaHp14,DeltaHp15,DeltaHp16,
1      DeltaHp17,DeltaHp18,DeltaHp19,DeltaHp20,
1      DeltaHp21,DeltaHp22,DeltaHp23,DeltaHp24,
1      DeltaHp25,DeltaHp26,DeltaHp27,DeltaHp28,
1      DeltaHp29,DeltaHp30,DeltaHp31,DeltaHp32,
1      DeltaHp33,DeltaHp34,DeltaHp35,DeltaHp36,
1      DeltaHp37,DeltaHp38,DeltaHp39,DeltaHp40,
1      DeltaHp41,DeltaHp42,DeltaHp43,DeltaHp44,
1      DeltaHp45,DeltaHp46,DeltaHp47/))

```

ENDIF

C4

```

IF(d1.GT.32.AND.d1.LE.33)THEN

```



```

P=SUM((/DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,
1      DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1      DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1      DeltaHp13,DeltaHp14,DeltaHp15,DeltaHp16,
1      DeltaHp17,DeltaHp18,DeltaHp19,DeltaHp20,
1      DeltaHp21,DeltaHp22,DeltaHp23,DeltaHp24,
1      DeltaHp25,DeltaHp26,DeltaHp27,DeltaHp28,
1      DeltaHp29,DeltaHp30,DeltaHp31,DeltaHp32,
1      DeltaHp33,DeltaHp34,DeltaHp35,DeltaHp36,
1      DeltaHp37,DeltaHp38,DeltaHp39,DeltaHp40,
1      DeltaHp41,DeltaHp42,DeltaHp43,DeltaHp44,
1      DeltaHp45/))

ENDIF

C5

IF(d1.GT.33.AND.d1.LE.34)THEN
P=SUM((/DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,
1      DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1      DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1      DeltaHp13,DeltaHp14,DeltaHp15,DeltaHp16,
1      DeltaHp17,DeltaHp18,DeltaHp19,DeltaHp20,
1      DeltaHp21,DeltaHp22,DeltaHp23,DeltaHp24,
1      DeltaHp25,DeltaHp26,DeltaHp27,DeltaHp28,
1      DeltaHp29,DeltaHp30,DeltaHp31,DeltaHp32,
1      DeltaHp33,DeltaHp34,DeltaHp35,DeltaHp36,
1      DeltaHp37,DeltaHp38,DeltaHp39,DeltaHp40,
1      DeltaHp41,DeltaHp42,DeltaHp43,DeltaHp44/))

ENDIF

C6

IF(d1.GT.34.AND.d1.LE.35)THEN
P=SUM((/DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,
1      DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1      DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1      DeltaHp13,DeltaHp14,DeltaHp15,DeltaHp16,
1      DeltaHp17,DeltaHp18,DeltaHp19,DeltaHp20,
1      DeltaHp21,DeltaHp22,DeltaHp23,DeltaHp24,
1      DeltaHp25,DeltaHp26,DeltaHp27,DeltaHp28,
1      DeltaHp29,DeltaHp30,DeltaHp31,DeltaHp32,
1      DeltaHp33,DeltaHp34,DeltaHp35,DeltaHp36,
1      DeltaHp37,DeltaHp38,DeltaHp39,DeltaHp40,
1      DeltaHp41,DeltaHp42,DeltaHp43/))

ENDIF

C7

IF(d1.GT.35.AND.d1.LE.36)THEN
P=SUM((/DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,

```

```

1      DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1      DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1      DeltaHp13,DeltaHp14,DeltaHp15,DeltaHp16,
1      DeltaHp17,DeltaHp18,DeltaHp19,DeltaHp20,
1      DeltaHp21,DeltaHp22,DeltaHp23,DeltaHp24,
1      DeltaHp25,DeltaHp26,DeltaHp27,DeltaHp28,
1      DeltaHp29,DeltaHp30,DeltaHp31,DeltaHp32,
1      DeltaHp33,DeltaHp34,DeltaHp35,DeltaHp36,
1      DeltaHp37,DeltaHp38,DeltaHp39,DeltaHp40,
1      DeltaHp41,DeltaHp42/))

```

ENDIF

C8

```

IF(d1.GT.36.AND.d1.LE.37)THEN
P=SUM((/DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,
1      DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1      DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1      DeltaHp13,DeltaHp14,DeltaHp15,DeltaHp16,
1      DeltaHp17,DeltaHp18,DeltaHp19,DeltaHp20,
1      DeltaHp21,DeltaHp22,DeltaHp23,DeltaHp24,
1      DeltaHp25,DeltaHp26,DeltaHp27,DeltaHp28,
1      DeltaHp29,DeltaHp30,DeltaHp31,DeltaHp32,
1      DeltaHp33,DeltaHp34,DeltaHp35,DeltaHp36,
1      DeltaHp37,DeltaHp38,DeltaHp39,DeltaHp40,
1      DeltaHp41/))

```

ENDIF

C9

```

IF(d1.GT.37.AND.d1.LE.38)THEN
P=SUM((/DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,
1      DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1      DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1      DeltaHp13,DeltaHp14,DeltaHp15,DeltaHp16,
1      DeltaHp17,DeltaHp18,DeltaHp19,DeltaHp20,
1      DeltaHp21,DeltaHp22,DeltaHp23,DeltaHp24,
1      DeltaHp25,DeltaHp26,DeltaHp27,DeltaHp28,
1      DeltaHp29,DeltaHp30,DeltaHp31,DeltaHp32,
1      DeltaHp33,DeltaHp34,DeltaHp35,DeltaHp36,
1      DeltaHp37,DeltaHp38,DeltaHp39/))

```

ENDIF

C10

```

IF(d1.GT.38.AND.d1.LE.40)THEN
P=SUM((/DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,
1      DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1      DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1      DeltaHp13,DeltaHp14,DeltaHp15,DeltaHp16,

```

```

1      DeltaHp17,DeltaHp18,DeltaHp19,DeltaHp20,
1      DeltaHp21,DeltaHp22,DeltaHp23,DeltaHp24,
1      DeltaHp25,DeltaHp26,DeltaHp27,DeltaHp28,
1      DeltaHp29,DeltaHp30,DeltaHp31,DeltaHp32,
1      DeltaHp33,DeltaHp34,DeltaHp35,DeltaHp36,
1      DeltaHp37,DeltaHp38,DeltaHp39/))

```

ENDIF

C11

IF(d1.GT.40.AND.d1.LE.41)THEN

```

P=SUM((/DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,
1      DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1      DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1      DeltaHp13,DeltaHp14,DeltaHp15,DeltaHp16,
1      DeltaHp17,DeltaHp18,DeltaHp19,DeltaHp20,
1      DeltaHp21,DeltaHp22,DeltaHp23,DeltaHp24,
1      DeltaHp25,DeltaHp26,DeltaHp27,DeltaHp28,
1      DeltaHp29,DeltaHp30,DeltaHp31,DeltaHp32,
1      DeltaHp33,DeltaHp34,DeltaHp35,DeltaHp36,
1      DeltaHp37/))

```

ENDIF

C12

IF(d1.GT.41.AND.d1.LE.42)THEN

```

P=SUM((/DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,
1      DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1      DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1      DeltaHp13,DeltaHp14,DeltaHp15,DeltaHp16,
1      DeltaHp17,DeltaHp18,DeltaHp19,DeltaHp20,
1      DeltaHp21,DeltaHp22,DeltaHp23,DeltaHp24,
1      DeltaHp25,DeltaHp26,DeltaHp27,DeltaHp28,
1      DeltaHp29,DeltaHp30,DeltaHp31,DeltaHp32,
1      DeltaHp33,DeltaHp34,DeltaHp35,DeltaHp36/))

```

ENDIF

C13

IF(d1.GT.42.AND.d1.LE.43)THEN

```

P=SUM((/DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,
1      DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1      DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1      DeltaHp13,DeltaHp14,DeltaHp15,DeltaHp16,
1      DeltaHp17,DeltaHp18,DeltaHp19,DeltaHp20,
1      DeltaHp21,DeltaHp22,DeltaHp23,DeltaHp24,
1      DeltaHp25,DeltaHp26,DeltaHp27,DeltaHp28,
1      DeltaHp29,DeltaHp30,DeltaHp31,DeltaHp32,
1      DeltaHp33,DeltaHp34,DeltaHp35/))

```

ENDIF

C14

```

IF(d1.GT.43.AND.d1.LE.44)THEN
P=SUM((/DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,
1          DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1          DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1          DeltaHp13,DeltaHp14,DeltaHp15,DeltaHp16,
1          DeltaHp17,DeltaHp18,DeltaHp19,DeltaHp20,
1          DeltaHp21,DeltaHp22,DeltaHp23,DeltaHp24,
1          DeltaHp25,DeltaHp26,DeltaHp27,DeltaHp28,
1          DeltaHp29,DeltaHp30,DeltaHp31,DeltaHp32,
1          DeltaHp33,DeltaHp34/))

ENDIF

```

C15

```

IF(d1.GT.44.AND.d1.LE.45)THEN
P=SUM((/DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,
1          DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1          DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1          DeltaHp13,DeltaHp14,DeltaHp15,DeltaHp16,
1          DeltaHp17,DeltaHp18,DeltaHp19,DeltaHp20,
1          DeltaHp21,DeltaHp22,DeltaHp23,DeltaHp24,
1          DeltaHp25,DeltaHp26,DeltaHp27,DeltaHp28,
1          DeltaHp29,DeltaHp30,DeltaHp31,DeltaHp32,
1          DeltaHp33/))

ENDIF

```

C16

```

IF(d1.GT.45.AND.d1.LE.47.5)THEN
P=SUM((/DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,
1          DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1          DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1          DeltaHp13,DeltaHp14,DeltaHp15,DeltaHp16,
1          DeltaHp17,DeltaHp18,DeltaHp19,DeltaHp20,
1          DeltaHp21,DeltaHp22,DeltaHp23,DeltaHp24,
1          DeltaHp25,DeltaHp26,DeltaHp27,DeltaHp28,
1          DeltaHp29,DeltaHp30,DeltaHp31,DeltaHp32/))

ENDIF

```

C17

```

IF(d1.GT.47.5.AND.d1.LE.48.75)THEN
P=SUM((/DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,
1          DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1          DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1          DeltaHp13,DeltaHp14,DeltaHp15,DeltaHp16,
1          DeltaHp17,DeltaHp18,DeltaHp19,DeltaHp20,
1          DeltaHp21,DeltaHp22,DeltaHp23,DeltaHp24,
1          DeltaHp25,DeltaHp26,DeltaHp27,DeltaHp28,

```

```

1          DeltaHp29,DeltaHp30,DeltaHp31/))
          ENDIF

C18
          IF(d1.GT.48.75.AND.d1.LE.50)THEN
          P=SUM((/DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,
1          DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1          DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1          DeltaHp13,DeltaHp14,DeltaHp15,DeltaHp16,
1          DeltaHp17,DeltaHp18,DeltaHp19,DeltaHp20,
1          DeltaHp21,DeltaHp22,DeltaHp23,DeltaHp24,
1          DeltaHp25,DeltaHp26,DeltaHp27,DeltaHp28,
1          DeltaHp29,DeltaHp30/))
          ENDIF

C19
          IF(d1.GT.50.AND.d1.LE.52.5)THEN
          P=SUM((/DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,
1          DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1          DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1          DeltaHp13,DeltaHp14,DeltaHp15,DeltaHp16,
1          DeltaHp17,DeltaHp18,DeltaHp19,DeltaHp20,
1          DeltaHp21,DeltaHp22,DeltaHp23,DeltaHp24,
1          DeltaHp25,DeltaHp26,DeltaHp27,DeltaHp28,
1          DeltaHp29/))
          ENDIF

C20
          IF(d1.GT.52.5.AND.d1.LE.53.75)THEN
          P=SUM((/DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,
1          DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1          DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1          DeltaHp13,DeltaHp14,DeltaHp15,DeltaHp16,
1          DeltaHp17,DeltaHp18,DeltaHp19,DeltaHp20,
1          DeltaHp21,DeltaHp22,DeltaHp23,DeltaHp24,
1          DeltaHp25,DeltaHp26,DeltaHp27,DeltaHp28/))
          ENDIF

C21
          IF(d1.GT.53.75.AND.d1.LE.55)THEN
          P=SUM((/DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,
1          DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1          DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1          DeltaHp13,DeltaHp14,DeltaHp15,DeltaHp16,
1          DeltaHp17,DeltaHp18,DeltaHp19,DeltaHp20,
1          DeltaHp21,DeltaHp22,DeltaHp23,DeltaHp24,
1          DeltaHp25,DeltaHp26,DeltaHp27/))
          ENDIF

C22

```

```

IF(d1.GT.55.AND.d1.LE.57.5)THEN
P=SUM((/DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,
1          DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1          DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1          DeltaHp13,DeltaHp14,DeltaHp15,DeltaHp16,
1          DeltaHp17,DeltaHp18,DeltaHp19,DeltaHp20,
1          DeltaHp21,DeltaHp22,DeltaHp23,DeltaHp24,
1          DeltaHp25,DeltaHp26/))
ENDIF

C23

IF(d1.GT.57.5.AND.d1.LE.60)THEN
P=SUM((/DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,
1          DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1          DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1          DeltaHp13,DeltaHp14,DeltaHp15,DeltaHp16,
1          DeltaHp17,DeltaHp18,DeltaHp19,DeltaHp20,
1          DeltaHp21,DeltaHp22,DeltaHp23,DeltaHp24,
1          DeltaHp25/))
ENDIF

C24

IF(d1.GT.60.AND.d1.LE.62.5)THEN
P=SUM((/DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,
1          DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1          DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1          DeltaHp13,DeltaHp14,DeltaHp15,DeltaHp16,
1          DeltaHp17,DeltaHp18,DeltaHp19,DeltaHp20,
1          DeltaHp21,DeltaHp22,DeltaHp23,DeltaHp24/))
ENDIF

C25

IF(d1.GT.62.5.AND.d1.LE.65)THEN
P=SUM((/DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,
1          DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1          DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1          DeltaHp13,DeltaHp14,DeltaHp15,DeltaHp16,
1          DeltaHp17,DeltaHp18,DeltaHp19,DeltaHp20,
1          DeltaHp21,DeltaHp22,DeltaHp23/))
ENDIF

C27

IF(d1.GT.65.AND.d1.LE.67.5)THEN
P=SUM((/DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,
1          DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1          DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1          DeltaHp13,DeltaHp14,DeltaHp15,DeltaHp16,
1          DeltaHp17,DeltaHp18,DeltaHp19,DeltaHp20,
1          DeltaHp21,DeltaHp22/))

```

```

ENDIF

C27
IF(d1.GT.67.5.AND.d1.LE.70)THEN
P=SUM((/DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,
1      DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1      DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1      DeltaHp13,DeltaHp14,DeltaHp15,DeltaHp16,
1      DeltaHp17,DeltaHp18,DeltaHp19,DeltaHp20,
1      DeltaHp21/))
ENDIF

C28
IF(d1.GT.70.AND.d1.LE.75)THEN
P=SUM((/DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,
1      DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1      DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1      DeltaHp13,DeltaHp14,DeltaHp15,DeltaHp16,
1      DeltaHp17,DeltaHp18,DeltaHp19,DeltaHp20/))
ENDIF

C29
IF(d1.GT.75.AND.d1.LE.80)THEN
P=SUM((/DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,
1      DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1      DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1      DeltaHp13,DeltaHp14,DeltaHp15,DeltaHp16,
1      DeltaHp17,DeltaHp18,DeltaHp19/))
ENDIF

C30
IF(d1.GT.80.AND.d1.LE.85)THEN
P=SUM((/DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,
1      DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1      DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1      DeltaHp13,DeltaHp14,DeltaHp15,DeltaHp16,
1      DeltaHp17,DeltaHp18/))
ENDIF

C31
IF(d1.GT.85.AND.d1.LE.90)THEN
P=SUM((/DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,
1      DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1      DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1      DeltaHp13,DeltaHp14,DeltaHp15,DeltaHp16,
1      DeltaHp17/))
ENDIF

C32
IF(d1.GT.90.AND.d1.LE.95)THEN
P=SUM((/DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,

```

```

1          DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1          DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1          DeltaHp13,DeltaHp14,DeltaHp15,DeltaHp16/))
          ENDIF

C33
          IF(d1.GT.95.AND.d1.LE.102.5)THEN
          P=SUM((/DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,
1          DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1          DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1          DeltaHp13,DeltaHp14,DeltaHp15/))
          ENDIF

C34
          IF(d1.GT.102.5.AND.d1.LE.122.5)THEN
          P=SUM((/DeltaHp1,DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,
1          DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1          DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1          DeltaHp13,DeltaHp14/))
          ENDIF

C35
          IF(d1.GT.122.5.AND.d1.LE.147.5)THEN
          P=SUM((/DeltaHp2,DeltaHp3,DeltaHp4,
1          DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1          DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11,DeltaHp12,
1          DeltaHp13/))
          ENDIF

CC36
          IF(d1.GT.147.5.AND.d1.LE.185)THEN
          P=SUM((/DeltaHp4,
1          DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1          DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11/))
          ENDIF

C37
          IF(d1.GT.185.AND.d1.LE.247.5)THEN
          P=SUM((/DeltaHp3,DeltaHp4,
1          DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1          DeltaHp9,DeltaHp10,DeltaHp11/))
          ENDIF

C38
          IF(d1.GT.247.5.AND.d1.LE.372.5)THEN
          P=SUM((/DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,
1          DeltaHp9,DeltaHp10/))
          ENDIF

C39
          IF(d1.GT.372.5.AND.d1.LE.610)THEN
          P=SUM((/DeltaHp5,DeltaHp6,DeltaHp7,DeltaHp8,

```



```

1                               DeltaHp9/))
                               ENDIF
                               I30i=P*2
END

c*****
c***** Subrutina para encontrar E-cinética
c   Ecine
      subroutine Ecine (hp24ii,di,delHp1,delHp2,delHp3,delHp4,delHp5,
1delHp6,delHp7,delHp8,delHp9,delHp10,delHp11,delHp12,delHp13,
1delHp14,delHp15,delHp16,
      1delHp17,delHp18,delHp19,delHp20,delHp21,delHp22,delHp23,delHp24,
1delHp25,delHp26,delHp27,delHp28,delHp29,delHp30,delHp31,delHp32,
      1delHp33,delHp34,delHp35,delHp36,delHp37,delHp38,delHp39,delHp40,
1delHp41,delHp42,delHp43,delHp44,delHp45,delHp46,delHp47,delHp48,
      1delHp49,delHp50,Sec)

      integer x
      Real(8) alei,di,hp24ii,DeltaTi

      parameter(o=50)
      Real(8) S(o),T(o),DeltaHp(o),DeltaI(o),e(o),Ec(o),Sec
      Real(8) A,B,C

      Real(8) delHp1,delHp2,delHp3,delHp4,delHp5,delHp6,delHp7,delHp8,
1delHp9,delHp10,delHp11,delHp12,delHp13,delHp14,delHp15,delHp16,
1delHp17,delHp18,delHp19,delHp20,delHp21,delHp22,delHp23,delHp24,
1delHp25,delHp26,delHp27,delHp28,delHp29,delHp30,delHp31,delHp32,
1delHp33,delHp34,delHp35,delHp36,delHp37,delHp38,delHp39,delHp40,
1delHp41,delHp42,delHp43,delHp44,delHp45,delHp46,delHp47,delHp48,
1delHp49,delHp50

      Real(8) EC1,EC2,EC3

      alei=RAN(x)

c*****Duración de la tormenta
      IF(alei.LE.0.0101010101010101)THEN
          di=10
      end if
      IF(alei.GT.0.0101010101010101.and.
1      alei.LE.0.1522367341957030)THEN
          di=(alei-0.0101010101010101)*211.065868141732+10
      end if
      IF(alei.GT.0.1522367341957030.and.
1      alei.LE.0.968840020661745)THEN
          di=(-1/0.007248)*LOG((alei-1.039)/-1.185)
      end if
      IF(alei.GT.0.968840020661745.and.
1      alei.LE.1)THEN
          di=(alei-0.968840020661745)*7060.33844284051+390

```

```

end if
DeltaTi=di/50
c*****Calculando E por medio de 50 intervalos de e
do j=1,50
    EC1=-0.14
    EC2=-0.4616
    EC3=1.5985

    S(j)=DeltaTi*(j-1)
    T(j)=DeltaTi*j

    A=EC1*(S(j)**3-T(j)**3)/di**3
    B=EC2*(S(j)**2-T(j)**2)/di**2
    C=EC3*(T(j)-S(j))/di

    DeltaHp(j)=(A+B+C)*hp24ii

    DeltaI(j)=60*DeltaHp(j)/DeltaTi

    IF(DeltaI(j).LT.76)THEN
e(j)=0.119+0.0873*LOG10(DeltaI(j))
    ELSE
e(j)=0.283
    END IF

    Ec(j)=e(j)*DeltaHp(j)

enddo

Sec=SUM(Ec)

delHp1=DeltaHp(1)
delHp2=DeltaHp(2)
delHp3=DeltaHp(3)
delHp4=DeltaHp(4)
delHp5=DeltaHp(5)
delHp6=DeltaHp(6)
delHp7=DeltaHp(7)
delHp8=DeltaHp(8)
delHp9=DeltaHp(9)
delHp10=DeltaHp(10)
delHp11=DeltaHp(11)
delHp12=DeltaHp(12)
delHp13=DeltaHp(13)
delHp14=DeltaHp(14)
delHp15=DeltaHp(15)
delHp16=DeltaHp(16)
delHp17=DeltaHp(17)
delHp18=DeltaHp(18)
delHp19=DeltaHp(19)

```

delHp20=DeltaHp(20)  
delHp21=DeltaHp(21)  
delHp22=DeltaHp(22)  
delHp23=DeltaHp(23)  
delHp24=DeltaHp(24)  
delHp25=DeltaHp(25)  
delHp26=DeltaHp(26)  
delHp27=DeltaHp(27)  
delHp28=DeltaHp(28)  
delHp29=DeltaHp(29)  
delHp30=DeltaHp(30)  
delHp31=DeltaHp(31)  
delHp32=DeltaHp(32)  
delHp33=DeltaHp(33)  
delHp34=DeltaHp(34)  
delHp35=DeltaHp(35)  
delHp36=DeltaHp(36)  
delHp37=DeltaHp(37)  
delHp38=DeltaHp(38)  
delHp39=DeltaHp(39)  
delHp40=DeltaHp(40)  
delHp41=DeltaHp(41)  
delHp42=DeltaHp(42)  
delHp43=DeltaHp(43)  
delHp44=DeltaHp(44)  
delHp45=DeltaHp(45)  
delHp46=DeltaHp(46)  
delHp47=DeltaHp(47)  
delHp48=DeltaHp(48)  
delHp49=DeltaHp(49)  
delHp50=DeltaHp(50)

write(500,\*)delHp1,delHp2,delHp3,delHp4,delHp5,delHp6,delHp7,  
1delHp9,delHp10,delHp11,delHp12,delHp13,delHp14,delHp15,delHp16,  
1delHp17,delHp18,delHp19,delHp20,delHp21,delHp22,delHp23,delHp24,  
1delHp25,delHp26,delHp27,delHp28,delHp29,delHp30,delHp31,delHp32,  
1delHp33,delHp34,delHp35,delHp36,delHp37,delHp38,delHp39,delHp40,  
1delHp41,delHp42,delHp43,delHp44,delHp45,delHp46,delHp47,delHp48,  
1delHp49,delHp50,delHp8

END

---

---

*Apéndice D*

---

---



### Apéndice D

Del modelo de elevación de la cuenca se obtuvo la coordenada “X,Y,Z” para cada pixel de 30x30m. La superficie de la cuenca fue de 144,439 ha, por lo que le correspondieron 1’600,00 puntos. Por medio del siguiente programa se determinó para cada punto a qué dirección drenaba, pudiendo tener ocho posibles resultados más el punto mismo, si es que se trataba de un punto bajo.

Una vez que se determinó la dirección para donde drenaba cada punto se procedió a determinar el desnivel y la longitud entre estos puntos ( $\lambda$ ). Con el desnivel se obtuvo el ángulo respecto a la horizontal ( $\theta$ ). Al tener  $\lambda$  y  $\theta$  fue posible determinar los factores  $L$  y  $S$  mediante las ecuaciones siguientes (Wischmeier y Smith, 1978; Figueroa *et al.*, 1991):

$$L = \left( \frac{\lambda}{22.1} \right)^m \quad \text{Ec-D 1}$$

$$m = \frac{\beta}{1 + \beta} \quad \text{Ec-D 2}$$

$$\beta = \frac{\text{sen } \theta / 0.0896}{3(\text{sen } \theta)^{0.8} + 0.56} \quad \text{Ec-D 3}$$

$$S = 10.8 \text{sen } \theta + 0.03 \quad \theta < 5.14^\circ \quad \text{Ec-D 4}$$

$$S = 16.8 \text{sen } \theta - 0.50 \quad \theta \geq 5.14^\circ \quad \text{Ec-D 5}$$

Los resultados para  $L$  y  $S$  para cada punto fueron cargados en un SIG, específicamente ArcGis9. A continuación se muestra el código del programa desarrollado, el cual se encuentra en lenguaje Fortran (Compaq Visual Fortran Professional Edition 6.1.0).

```
program josemanuel
```

```
c*****
```

```
C 0.- Declaracion de variables
```

```
implicit none
```

```
integer i,j,m,L,q,n,k,NUMDAT,tip,NTipos,a,b,index
```

```
integer Tamdist,dir,o,c
```

```
c character*1 c
```

```

character*30 Archivo
parameter (o=10)
real(8) Dist(o),ss

integer, Allocatable:: Escurre(:)

Real(8) deltaX,delta Y,maximo,Xj, Yj,EL,Eli,Distancia,Tol
Real(8) Lamda,Pend,Teta,Slope,Beta 1,Beta2,Beta,Eme,Long
Real(8) ME2X,ME1X,MA1X,MA2X,MA2Y,MA1 Y,ME1 Y,ME2Y

Real(8), Allocatable::X(:), Y(:),ELEV(:)

Real(8) RanIzqX,RanDerX,RanSupY,RaninfY,PeX,PeY
Real(8) elevPi,XPi,YPi,Px1,Py1,Px2,Py2,Px3,Py3
Real(8) Px4,Py4,Px5,Py5,Px6,Py6,Px7,Py7,Px8,Py8
Real(8) elev1,elev2,elev3,elev4,elev5,elev6,elev7,elev8
Real(8) SWAP,Minimo,PeEl,resX,res Y,Toln,Tolp

```

NTipos=10

```

Allocate (Escurre(NTipos))

```

```

write(*,*)
write(*,*)
write(*,*) 'Programa procesamiento de datos'
write(*,*) 'J. Briseño y J.M. Ramírez Leon'
write(*,*)

```

c\*\*\*\*\*

```

C 1.- Leo Archivo con datos
open(500,File="Variables.txt",status='unknown')
read (500,*)NUMDAT
read (500,*)deltaX
read (500,*)deltaY
read (500,*)Archivo

```

```

Write (*,*)'NUMDAT', NUMDAT
Write (*,*)'deltaX', deltaX
Write (*,*)'deltaY', deltaY

```

c\*\*\*\*\*

```

C 2.- Leo datos del archivo

```

```

open(100,File=Archivo,status='unknown')
read (100,*)

```

```

write(*,*)
write(*,*) 'Datos'
write(*,*) NUMDAT
write(*,*) deltaX,deltaY

```

```

Allocate(X(NUMDAT),Y(NUMDAT),ELEV(NUMDAT))

```

```

do i=1,NUMDAT
    read (100,*) a,ELEV(i),b,c,X(i),Y(i)
enddo

do i=1,10000
    write (*,*) a,ELEV(i),b,X(i),Y(i)
enddo

close(100)
c*****
C 3.- Buscar los 8 puntos cercanos

open(200,File="salida.txt",status='unknown')
Write(200,*)' PX PY PEI Lamda Pend Teta Slope Long dir '

open(501,File="Dat_1.txt",status='unknown')
open(502,File="Dat_2.txt",status='unknown')
open(503,File="Dat_3.txt",status='unknown')
open(504,File="Dat_4.txt",status='unknown')
open(505,File="Dat_5.txt",status='unknown')
open(506,File="Dat_6.txt",status='unknown')
open(507,File="Dat_7.txt",status='unknown')
open(508,File="Dat_8.txt",status='unknown')
open(500,File="Dat_0.txt",status='unknown')

do i=1,1409000

    write(*,*)'Procesando el dato ',i

        elevPi=ELEV(i)
        XPi=X(i)
        YPi=Y(i)

        RanIzqX=XPi-deltaX
        RanDerX=XPi+deltaX
        RanSupY=YPi+deltaY
        RaninfY=YPi-deltaY

        call indiceA(100,XPi,YPi,elevPi,RanIzqX,RanDerX,RanSupY,RaninfY,
        1 NUMDAT,i,archivo,a,ELEV,b,c,X,Y)

c*****
C 4.- Resta de las elevaciones de los 8 puntos cercanos
c y ordenar el vector dist de mayor a menor

close(1778)
open(1778,File="TamDist.txt",status='unknown')
Read(1778,*)Tamdist

close(1777)
open(1777,File="Dist.txt",status='unknown')

```



```

do j=1,Tamdist
  Read(1777,*)Dist(j)
enddo

```

c ordenar un vector

```

do j=1,Tamdist-1
  Minimo=Dist(j)
  index=j

  do k=j+1,Tamdist
    if(Dist(k).LT.Minimo) THEN
      Minimo=Dist(k)
      index=k
    end if
  enddo

  SWAP=Dist(j)
  Dist(j)=Dist(index)
  Dist(index)=SWAP

```

```

enddo
maximo=Dist(Tamdist)

```

c\*\*\*\*\*

C 5.- Encuentra los datos del punto hacia donde escurre

```

call EncontrarTip(777,maximo,PeX,PeY,PeEl,Tamdist)
close(1777,status='delete')
close(1778,status='delete')
close(777,status='delete')

```

c\*\*\*\*\*

C 6.- Carculos finales y escribe en el archivo de salida

```

resX=PeX-XPi
resY=PeY-YPi
Lamda=(sqrt(((XPi-PeX)**2)+((YPi-PeY)**2)))
Pend=(maximo/Lamda)
ss=ISNAN(Pend)

```

```

if (ss.EQ.-1) THEN
  Pend=0.000000001
end if

```

```

Write(*,*)Pend,ss

```

```

Teta=atan(Pend)

```

```

if(Pend.LT.0.90) THEN
  Slope=10.8*SIN(Teta)+0.03
else
  Slope=16.8*SIN(Teta)-0.50
end if

```

```

Beta1=(sin(Teta))/0.0896

Beta2=3*(sin(Teta))**0.80+0.56

Beta=Beta1/Beta2

Eme=Beta/(Beta+1)

Long=(Lamda/22.1)**Eme

dir=0

ME2X=XPi-2*(deltaX)+10
ME1X=XPi-10
MA1X=XPi+10
MA2X=XPi+2*(deltaX)-10

MA2Y=YPi+2*(deltaY)-10
MA1Y=YPi+10
ME1Y=YPi-10
ME2Y=YPi-2*(deltaY)+10

    if (ME2X.LE.PeX.AND.PeX.LE.ME1X.AND.MA1Y.LE.PeY.AND.PeY.LE.MA
12Y) THEN
        dir=1
        Write(501,37)i,XPi,YPi,elevPi,Lamda,Pend,Teta,Slope,Long,dir
        end if

    if (ME1X.LE.PeX.AND.PeX.LE.MA1X.AND.MA1Y.LE.PeY.AND.PeY.LE.MA
12Y) THEN
        dir=2
        Write(502,37)i,XPi,YPi,elevPi,Lamda,Pend,Teta,Slope,Long,dir
        end if

    if
(MA1X.LE.PeX.AND.PeX.LE.MA2X.AND.MA1Y.LE.PeY.AND.PeY.LE.MA
12Y) THEN
        dir=3
        Write(503,37)i,XPi,YPi,elevPi,Lamda,Pend,Teta,Slope,Long,dir
        end if

    if
(ME2X.LE.PeX.AND.PeX.LE.ME1X.AND.ME1Y.LE.PeY.AND.PeY.LE.MA
11Y) THEN
        dir=4
        Write(504,37)i,XPi,YPi,elevPi,Lamda,Pend,Teta,Slope,Long,dir
        end if

    if
(MA1X.LE.PeX.AND.PeX.LE.MA2X.AND.ME1Y.LE.PeY.AND.PeY.LE.MA
11Y) THEN

```

```

dir=5
  Write(505,37)i,XPi,YPi,elevPi,Lamda,Pend,Teta,Slope,Long,dir
end if

  if
(ME2X.LE.PeX.AND.PeX.LE.ME1X.AND.ME2Y.LE.PeY.AND.PeY.LE.ME
11Y) THEN
  dir=6
    Write(506,37)i,XPi,YPi,elevPi,Lamda,Pend,Teta,Slope,Long,dir
end if

  if
(ME1X.LE.PeX.AND.PeX.LE.MA1X.AND.ME2Y.LE.PeY.AND.PeY.LE.ME
11Y) THEN
  dir=7
    Write(507,37)i,XPi,YPi,elevPi,Lamda,Pend,Teta,Slope,Long,dir
end if

  if
(MA1X.LE.PeX.AND.PeX.LE.MA2X.AND.ME2Y.LE.PeY.AND.PeY.LE.ME
11Y) THEN
  dir=8
    Write(508,37)i,XPi,YPi,elevPi,Lamda,Pend,Teta,Slope,Long,dir
end if

    if (dir.EQ.0) THEN
      Write(500,37)i,XPi,YPi,elevPi,Lamda,Pend,Teta,Slope,Long,dir
    end if
  Write(200,37)i,XPi,YPi,elevPi,Lamda,Pend,Teta,Slope,Long,dir

37 format(i0,1x,f15.5,1x,f15.5,1x,f10.3,1x,f8.3,1x,f8.3,1x,f8.5,1x,
1f8.5,1x,f8.6,1x,i2.2)

Tol=0.9
  TolP=Tol
  TolN=Tol*(-1)

enddo
end program
c*****
c***** Subroutine indiceA

subroutine indiceA(unit,XPii,YPii,elevPii,RanIzqXi,RanDerXi,
1 RanSupYi,RaninfYi,Numdati,ii,Archiv,aa,El,bb,cc,Xa,Ya)

integer aa,bb,cc
c character*1 cc
character*30 Archiv
integer unit,i,Tip,Numdati,ii,numf,l
real(8) XPii,YPii,elevPii,deltaXi,deltaYi
real(8) X,Y,El,elevPi,EDist

```

```

real(8) RanIzqXi,RanDerXi
real(8) RanSupYi,RaninfYi

parameter (o=2000000)
real(8) Xa(o),Ya(o),ELE(o)

      open(777,File="sal1.txt",status='unknown')
      open(1777,File="Dist.txt",status='unknown')
      open(1778,File="TamDist.txt",status='unknown')
c    open(unit,File=Archiv,status='unknown')
c    read (unit,*)

num=1
  numf=0

      do i=1,Numdati
c    read (unit,*)aa(i),El,bb,cc,X,Y

      X=Xa(i)
      Y=Ya(i)
      El=ELe(i)

      if(X.LE.RanDerXi.AND.X.GE.RanIzqXi) THEN
      if(Y.GE.RanInfYi.AND.Y.LE.RanSUPYi) THEN

          numf=num+numf
          EDist=elevPii-El
          Write(777,36)ii,XPii,YPii,elevPii,X,Y,El,EDist
          Write(1777,*)EDist

      l=numf

          end if
          end if

      end do

          Write(1778,*)l

      return

36 format(i0,1x,f15.5,1x,f15.5,1x,f15.5,1x,f15.5,1x,f15.5,1x,f15.5,1x,
1 f15.5,1x)

end
c*****
c*****
c*****
          EncontrarTip

subroutine EncontrarTip(unit,maximoi,PeXi,PeYi,PeEli,Tam)

integer unit,num,ii,Tam,i
real(8) maximoi,PesX,PesY,PesEl
real(8) XP,YP,eIP,PeXi,PeYi,PeEli,EDisti

      close(unit)
      open(unit,File="sal1.txt",status='unknown')

```

```
do i=1,tam
read (unit,*)ii,XP,YP,eIP,PesX,PesY,PesEl,EDisti

      if(maximoi.EQ.EDisti)then
        PeXi=PesX
        PeYi=PesY
        PeEli=PesEl

      close(unit)
      return
      end if

end do
return

end
```

Contacto:

José Manuel Ramírez León  
ramirezleon@iteso.mx  
<http://sites.google.com/site/jmramirezleon/>